

ANÁLISE DA RUGOSIDADE E DA POTÊNCIA CONSUMIDA NO PROCESSO DE FRESAMENTO A SECO DO AÇO SAE 4340 ENDURECIDO

Larissa Ribas de Lima Soares, larissa.ribas.lima@gmail.com¹

Manoel Cléber de Sampaio Alves, manoelcsa@feg.unesp.br¹

Sarah David Müzel, muzel@feg.unesp.br¹

Marcel Yuzo kondo, yuzokondo@gmail.com¹

Carlino Carvalho de Almeida, carlinostats@gmail.com²

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Av. Ariberto P. Cunha, 333, Guaratinguetá/SP, Brasil.

²Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rua Geraldo Alckmin, 519, Itapeva/SP, Brasil.

Resumo: Têm-se buscado alternativas para otimizar os processos de fabricação por usinagem, com o objetivo de diminuir custos, aumentar produtividade e diminuir problemas ambientais. Entre essas alternativas destacam-se a procura pela usinagem a seco e a usinagem de aços endurecidos. Portanto, neste trabalho foi analisado o fresamento frontal do aço SAE 4340 endurecido (temperado e revenido), utilizando ferramentas de metal duro com recobrimento de TiAlN (nitreto de alumínio-titânio) e TiN (nitreto de titânio) na condição à seco. O objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento da qualidade superficial e da potência consumida durante o processo nas diferentes condições de usinagem. Esta pesquisa foi realizada em um Centro de Usinagem CNC, variando-se os parâmetros velocidade de corte (200 e 300 m/min) e avanço de (0,1 e 0,04 mm/dente). No qual, foi possível concluir que na velocidade de 200 m/min a potência consumida durante o processo foi menor e a rugosidade Ra apresentou menores resultados. De forma geral, ao comparar as rugosidades Ra obtida no fresamento frontal do aço endurecido com o esperado em um processo de retificação, pode-se inferir que os resultados foram muito satisfatórios.

Palavras-chave: Rugosidade, Usinagem a Seco, Aços Endurecidos, Potência Consumida

1. INTRODUÇÃO

A usinagem de aços endurecidos está cada vez mais em evidência na indústria metalmeccânica porque, em alguns casos, ela pode substituir o processo de retificação, possibilitando com isso, reduzir tempo e custos de produção, além de obter peças com elevado acabamento superficial e pequenas tolerâncias, quando a usinagem se procede em uma máquina-ferramenta com alta rigidez e acuracidade (LIMA e CORRÊA, 2002).

Dentre os aços endurecidos usinados na indústria, se destaca o SAE 4340, visto que ele é um material de engenharia de grande importância na fabricação de componentes que exigem uma boa combinação de resistência mecânica e tenacidade. Este aço é de médio carbono, tratável termicamente, com alta resistência e baixa liga, resistente à fadiga em elevadas temperaturas, aplicado em estruturas críticas, como vasos de pressão em usinas nucleares e componentes de construção e utilizado na indústria automobilística e aeronáutica na produção de engrenagens de transmissão de energia, semieixos, eixos principais, acoplamentos, trens de pouso, entre outros (SILVA et al., 2005; BHATTACHARYA et al., 2011; SURESH; BASAVARAJAPPA e SAMUEL, 2012; EL RAYES; EL-DANAF e ALMAJID, 2015; SAHU e CHOUDHURY, 2015; SHARMA e PANDEY, 2016).

Em relação a estes processos industriais de usinagem, é muito comum utilizar fluidos de corte para que eles atuem como lubrificante (facilitada em baixas velocidades) e refrigerante, diminuindo o atrito e a temperatura durante o corte (GINTING; NOUARI, 2007). No entanto, estes fluidos são prejudiciais ao meio ambiente, pois eles são danosos a saúde dos operadores além de poluir a água ou o solo quando precisam ser descartados.

Devido a estes problemas, as pesquisas realizadas atualmente, voltadas para a usinagem de materiais, procuram por uma produção mais limpa, no qual, para alcançar este objetivo um dos principais meios é a utilização de técnicas para reduzir a quantidade de fluido de corte utilizado durante o processo, pois, a influência destes fluidos na saúde humana não deve ser negligenciada (SIMUNOVIC; SIMUNOVIC; SARIC, 2015). Para Sahoo e Sahoo (2012), as operações de usinagem devem ser orientadas para a usinagem a seco ou a usinagem próxima a seco a fim de evitar os problemas ambientais.

Por isso, várias pesquisas veem sendo desenvolvidas para analisar o desempenho de técnicas como a MQL (mínima quantidade de lubrificante) e a usinagem à seco. Entretanto, para que estas técnicas sejam vantajosas para a indústria elas não podem afetar de forma significativa as variáveis de saída do processo (rugosidade da peça, vida da ferramenta, etc.) e principalmente a produtividade. Portanto, o desafio está em estabelecer condições de usinagem que possam contribuir simultaneamente para estes fatores.

Com base nestas informações, esta pesquisa buscou analisar a potência consumida durante o fresamento a seco do aço SAE 4340 endurecido, utilizando ferramentas de corte recobertas de TiAlN e TiN, comparado com a usinagem deste aço na condição recozida. Além de analisar a qualidade superficial das peças usinadas com o intuito de buscar melhores condições de usinagem para este aço.

1.1 Objetivo

Analisar a rugosidade e a potência consumida no fresamento frontal, em um processo de abertura de canal, do aço SAE 4340 nas formas recozidas e endurecida (temperado e revenido), utilizando ferramentas de metal duro recobertas com TiAlN e TiN, na condição a seco.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nestes itens foram descritos todos os materiais e métodos utilizados e as etapas de desenvolvimento da pesquisa, bem como, a forma de análise dos resultados.

2.1. Preparação dos corpos de prova

O material utilizado para estudo nesta pesquisa foi o aço ABNT 4340. Ele foi adquirido na forma bruta, proveniente de 03 lotes diferentes, com dureza variando de 201 a 227 HB.

Este material passou por um processo de usinagem preparatório para obter dimensões nominais de 25x70x100mm. Ele foi ensaiado na forma como foi fornecido (recozido), ilustrado a esquerda na Figura 1. E na forma temperada e revenida, ilustrado a direita na mesma foto, com numeração de 1 a 4, com dureza pré-estabelecida de 56 HRc (615 HV).

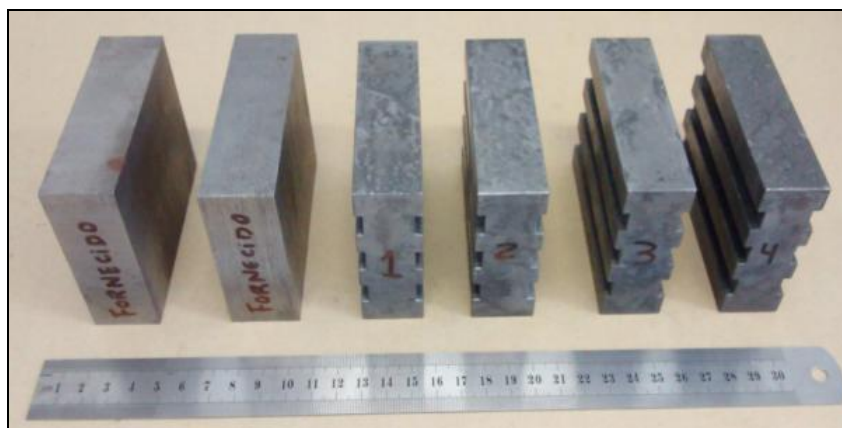


Figura 1. Corpo de prova na forma recozida e na forma temperada e revenida.

Estas amostras foram tratadas termicamente na Empresa Proterm na cidade de São José dos Campos e atingiram a dureza especificada.

2.2. Processo de usinagem

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Estudo da Usinagem na Unesp-Guaratinguetá em um Centro de Usinagem marca DMG modelo DMU50ECO série DMG Ecoline (Figura 2), acoplado a um sistema de aquisição de dados de potência.



Figura 2. Centro de Usinagem.

O processo de usinagem realizado nesta pesquisa foi o fresamento frontal simétrico (abertura de canal) a seco das amostras. No qual, para cada condição de usinagem foram utilizadas 3 ferramentas de metal duro revestida com TiAlN ($1,8 \mu\text{m}$) e TiN ($0,2 \mu\text{m}$).

Este processo foi realizado para cada material em estudo (aço recozido e o aço endurecido) em 04 condições de usinagem diferentes, ilustradas na Tabela 1, com o intuito de analisar a influência da Velocidade de Corte (V_c) e do avanço nas variáveis de saída do processo (R_a e potência).

Tabela 1. Condições de usinagem analisadas para os dois materiais em estudo.

Condição	1	2	3	4
V_c (m/min)	200	200	300	300
f (mm/dente)	0,1	0,04	0,1	0,04
n (RPM)	2546,5	2546,5	3819,7	3819,7
a_p (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5
a_e (mm)	25	25	25	25
v_f (mm/min)	764,0	305,6	1145,9	458,4

2.2.1. Fresas

A empresa Seco Tools, sediada em Sorocaba, forneceu as ferramentas de corte utilizadas nesta pesquisa. Estes insertos (LOEX080408TR-M08) são de metal duro revestidos de TiAlN e TiN com 4 arestas (Figura 3).



Figura 3. Ferramentas de metal duro LOEX080408TR-M08.

2.3 Sistema Aquisição de dados

Durante os ensaios, a potência de corte foi obtida e armazenada pelo sistema de aquisição de dados. Este sistema permite a obtenção de quaisquer variáveis físicas que, mediante sensores ou transdutores apropriados, são convertidos em sinais elétricos proporcionais.

A placa de aquisição de dados utilizada é da marca National Instruments, modelo NI PCI 6220. Ela teve como função, receber os sinais analógicos dos sensores e transformá-los em sinais digitais para serem interpretados pelo software no microcomputador. Essa interpretação foi feita no programa LabView® 7.1 da National Instruments, no qual, foi elaborado um programa para adquirir esses dados.

2.3.1 Potência de corte

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de usinagem foram utilizados sensores de efeito Hall marca LEM modelo AT 100 B10 (Figura 4).



Figura 4. Sensor de efeito Hall marca LEM modelo AT 100 B10.

O sinal do sensor (Potência) é captado pela placa de aquisição de dados e armazenado durante a execução dos ensaios. Este sinal é transformado, através da Equação 1, na unidade de potência (Watts).

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (1)$$

No qual:

P_c = potência consumida, em Watts;

I = corrente alternada, em Ampéres;

U_f = Tensão de uma das fases, em Volts;

F_p = Fator de potência.

O sensor em função da corrente elétrica utilizada no motor gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts (VCC), que é armazenada pelo computador. Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em Volts é necessário converter o valor de Volts para Ampéres para que se possa aplicar esse valor na Equação 1.

O fabricante do sensor fornece a Equação 2 para a transformação do dado adquirido em volts para ampéres.

$$I = V_{cc} \times 10 \quad (2)$$

Sendo:

I = corrente de uma das fases em ampéres;

V_{cc} = tensão de corrente continua em volts.

Substituindo o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, têm-se a Equação 3, utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts.

$$P_c = V_{cc} \times 10 \times 0,92 \times 220 \times \sqrt{3} \quad (3)$$

2.4 Rugosidade

A rugosidade da peça foi analisada através do parâmetro R_a (rugosidade média), no qual, o comprimento de amostragem (cut-off) adotado foi de 0,8 mm e o percurso de medição (l_m) de 4 mm.

Para obter a medida da rugosidade superficial foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (Figura 5) com ponta apalpadora de diamante na haste de medição em formato de cone-esférico (raio de ponta de 2 μm). No qual, foram realizadas três repetições a cada amostra. Este rugosímetro era posicionado, ao final de cada ciclo de usinagem, em cima de dois suportes metálicos dentro do próprio centro de usinagem para não precisar retirar a peça que se encontrava fixada no suporte (Figura 6).



Figura 5. Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300.



Figura 6. Medição da rugosidade durante o ensaio.

Os dados obtidos no processo de fresamento frontal do aço 4340 endurecido foram comparados com os resultados encontrados no fresamento deste aço recozido, através do teste t utilizando o software estatístico R.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para poder comparar os resultados obtidos no fresamento do aço 4340 recozido com os resultados do aço 4340 endurecido, foi necessário isolar uma das variáveis de entrada (velocidade de corte e avanço). Portanto, as análises a seguir estão apresentadas separadas por avanço e após, separadas por nível de velocidade.

3.1 Rugosidade Média R_a

O comportamento do parâmetro (R_a) em função das velocidades de corte e em função do avanço está ilustrado respectivamente nas Figuras 7 e 8, para cada material usinado. No qual, a análise de variância mostrou que houve diferença significativa da rugosidade média entre os materiais usinados no avanço de 0,04 mm/dente ($t_{6,7242} = 6,2582$; P-valor < 5%). Entretanto, no avanço de 0,1 mm/dente, não teve diferença significativa ($t_{5,764} = 0,21046$; P-valor > 5%).

Em relação as velocidades, na V_c de 200 m/min, a análise de variância mostrou que houve diferença significativa da rugosidade média entre os materiais analisados ($t_{5,1431} = 3,5073$; P-valor < 5%). O mesmo não ocorreu para a V_c de 300 m/min ($t_{9,6421} = 2,3559$; P-valor > 5%), porque a usinagem do aço endurecido com esta velocidade provocou um desgaste na ferramenta muito acentuado e isso pode ter influenciado na rugosidade da peça.

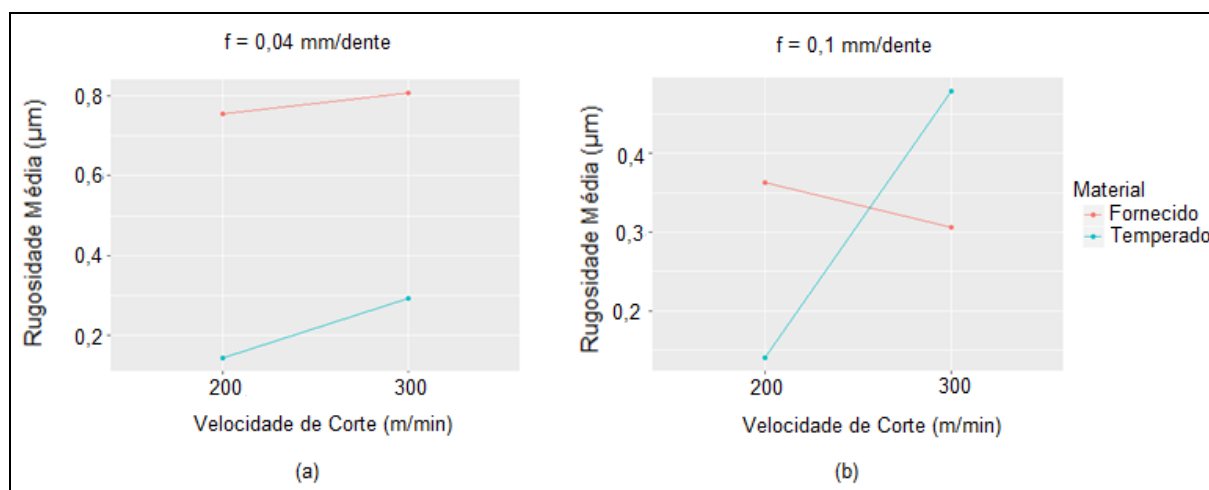


Figura 7. Gráfico do parâmetro R_a em função das velocidades de corte, para cada material, com avanço de: (a) 0,04 mm/dente e (b) 0,1 mm/dente.

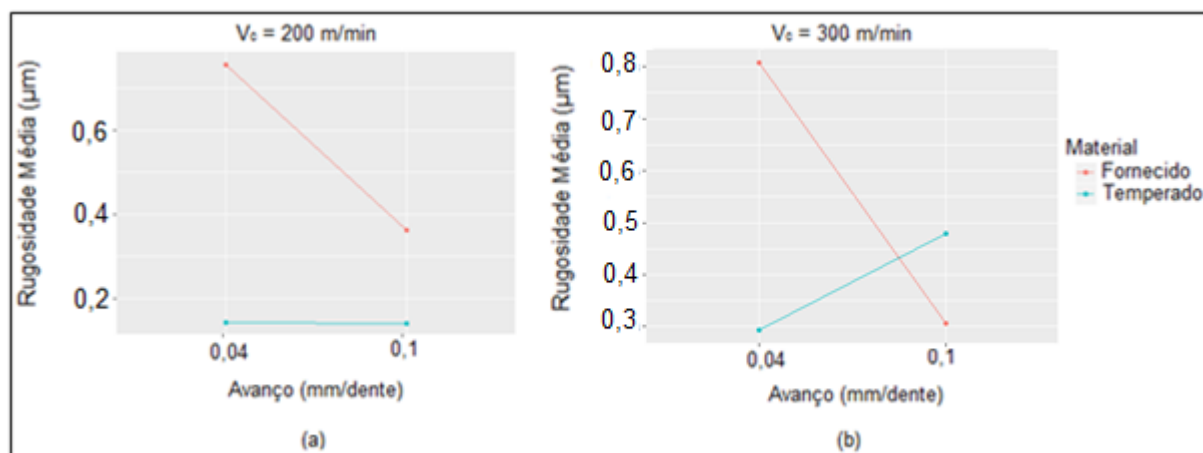


Figura 8. Gráfico do parâmetro R_a em função do avanço, para cada material, com V_c de: (a) 200 m/min e (b) 300 m/min.

Ao comparar os dois materiais, foi observado que o endurecimento do aço 4340 contribuiu para uma menor rugosidade da peça usinada com V_c de 200 m/min. Além disso, os resultados do parâmetro R_a foram, na maioria das

vezes, menor do que o esperado em um processo de retificação. Banin Jr (2009), ao analisar as influências dos parâmetros de corte (V_c , avanço e profundidade de corte) sobre a integridade superficial do aço SAE 4340 endurecido (52 HRC), no fresamento de topo, também verificou os resultados de rugosidade obtidos foram similares aos de operações de usinagem fina.

3.2 Potência Consumida

Nas Figuras 9 e 10 estão ilustrados o comportamento da potência em função das velocidades de corte e em função do avanço para cada material usinado. No qual, de acordo com a análise estatística realizada, a potência consumida durante o processo de fresamento de ambos os materiais não diferiu significativamente nos dois níveis de velocidade e avanço. Isto mostra que a dureza do material, bem como, os fatores analisados (avanço e velocidade de corte) não tiveram influência sobre a potência.

Os resultados obtidos em cada nível testado foram:

- Avanço de 0,04 mm/dente ($t_{5.1592} = -1,6673$; P-valor > 5%)
- Avanço de 0,1 mm/dente ($t_{5.4748} = -0,64644$; P-valor > 5%)
- V_c de 200 m/min ($t_{6.1697} = -1,0991$; P-valor > 5%)
- V_c de 300 m/min ($t_{8.7653} = -1,519$; P-valor > 5%)

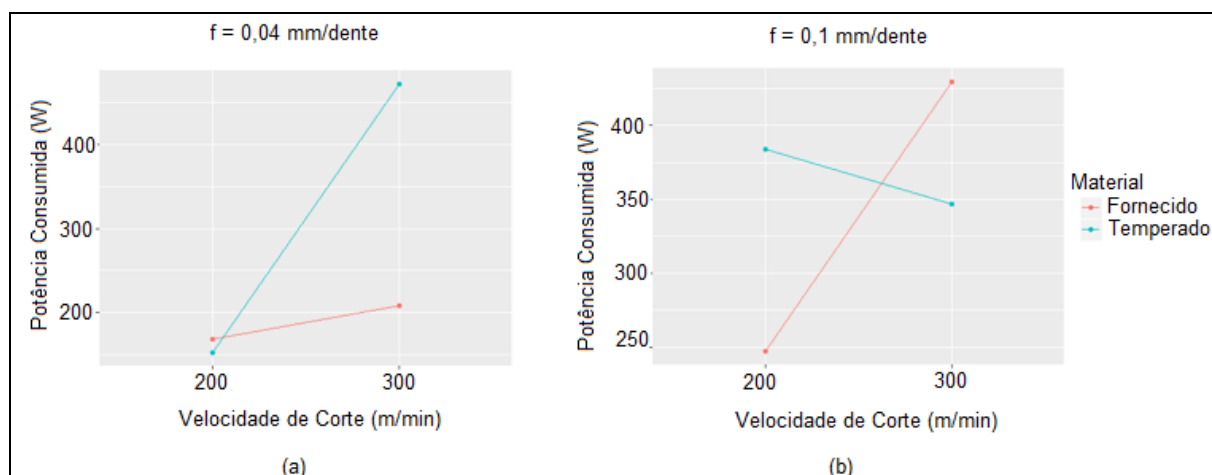


Figura 9. Gráfico da potência em função das velocidades de corte, para cada material, com avanço de: (a) 0,04 mm/dente e (b) 0,1 mm/dente (Autoria Própria).

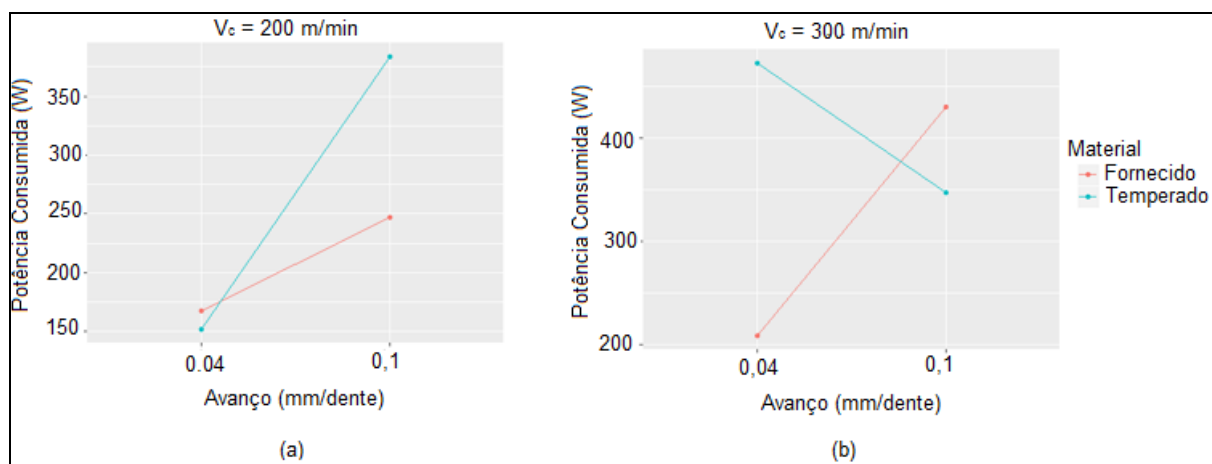


Figura 10. Gráfico da potência em função do avanço, para cada material, com V_c de: (a) 200 m/min e (b) 300 m/min (Autoria Própria).

Como há uma tendência em usinar aços endurecidos para eliminar o processo de retificação, o fato da dureza do material não ter influenciado a potência consumida, nesta pesquisa, é bom, porque caso aumentasse o consumo, isso seria prejudicial ao meio ambiente.

O ideal, de acordo com Kant e Sangwan (2014), é que haja uma redução no consumo da potência durante a usinagem, porque isso ajuda a alcançar um desempenho sustentável nos processos industriais. No entanto, é necessário conciliar esta redução com a qualidade superficial da peça. Visto que ela pode afetar a rugosidade, gerando mais rejeições, retrabalho e perda de tempo.

Nesta pesquisa, esta conciliação foi obtida ao usinar o aço 4340 endurecido com uma V_c de 200 m/min e um avanço de 0,04 mm/dente. O que mostra, que esta foi a combinação com resultados mais satisfatórios.

4. CONCLUSÕES

Com as análises dos resultados obtidos no fresamento frontal a seco do aço 4340, utilizando ferramentas de metal duro revestidas com TiAlN e TiN, é possível concluir que: o endurecimento do aço 4340 contribuiu para uma menor rugosidade R_a ; a potência consumida na usinagem dos dois materiais não diferiu significativamente em todos os níveis de V_c e avanço analisados; e a configuração que apresentou melhores resultados em relação a potência consumida e a rugosidade da peça usinada foi a V_c de 200 m/min com um avanço de 0,04mm/dente.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio a esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Banin JR, J. R., 2009, “Análise de tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento de topo de aço sae 4340 endurecido”, Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos) – Centro Universitário da FEI de São Bernardo do Campo, 115p.
- Bhattacharya, S. et al., 2011, “Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process”, Materials Science and Engineering A, Vol. 528, pp. 2309–2318.
- EL Rayes, M. M.; EL-Danaf, E. A.; Almajid, A. A., 2015, “Ultrasonic characterization of heat-treatment effects on SAE-1040 and -4340 steels”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 216, pp. 188–198.
- Ginting, A.; Nouari, M., 2007, “Optimal cutting conditions when dry end milling the aeroengine material Ti-6242S”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 184, pp. 319–324.
- Kant, G. Sangwan, K. S., 2014, “Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining”, Journal of Cleaner Production, Vol. 83, pp. 151 – 164.
- Lima, F. E; Corrêa, M., 2002, “Usinagem de materiais endurecidos”, Revista tecnologia, Fortaleza-CE, Vol. 23, pp. 38-44.
- Sahoo, A. K.; Sahoo, B., 2012, “Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts”, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, Vol. 45, pp. 2153–2165.
- Sahu, S.; Choudhury, B. B., 2015, “Optimization of Surface Roughness Using Taguchi Methodology & Prediction of Tool Wear in Hard Turning Tools”, Materials Today: Proceedings, Vol. 2, pp. 2615–2623.
- Sharma, V.; Pandey, P. M., 2016, “Optimization of machining and vibration parameters for residual stresses minimization in ultrasonic assisted turning of 4340 hardened steel”, Ultrasonics, Vol. 70, pp. 172–182.
- Silva, L.R.; Bianchi, E.C.; Catai, R.E.; Fusse, R.Y.; França, T.V.; Aguiar, P.R., 2005, “Study on the behavior of the minimum quantity lubricant - MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 27, pp. 192–199.
- Simunovic, K.; Simunovic, G.; Saric, T., 2015, “Single and multiple goal optimization of structural steel face milling process considering different methods of cooling / lubricating”, Journal of Cleaner Production. Vol. 94, pp. 1–9.
- Suresh, R.; Basavarajappa, S.; Samuel, G. L., 2012, “Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool”, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, Vol. 45, pp. 1872–1884.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

ANALYSIS OF ROUGHNESS AND CONSUMED POWER IN THE DRYING MILLING PROCESS OF SAE 4340 HARDENED STEEL

Larissa Ribas de Lima Soares, larissa.ribas.lima@gmail.com¹

Manoel Cléber de Sampaio Alves, manoelcsa@feg.unesp.br¹

Sarah David Müzel, muzel@feg.unesp.br¹

Marcel Yuzo kondo, yuzokondo@gmail.com¹

Carlino Carvalho de Almeida, carlinostats@gmail.com²

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Av. Ariberto P. Cunha, 333, Guaratinguetá/SP, Brasil.

²Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rua Geraldo Alckmin, 519, Itapeva/SP, Brasil.

Resumo: *It is been of concern to look for alternatives to optimize machining for manufacturing processes in order to reduce costs, increase productivity and reduce environmental issues. Among those options, it is highlighted the demand for dry machining and the machining of hardened steels. Therefore, in this work the frontal milling of SAE 4340 annealed and hardened (quenched and tempered) was analyzed using carbide tools with TiAlN (aluminum nitride-titanium) and TiN (titanium nitride) coating in dry condition. The objective of this work was to verify the behavior of the surface quality and the power consumed during the process in the different machining conditions. This research was carried out in a CNC Machining Center, varying the cutting speed parameters (200 and 300 m/min) and feed rates (0.1 and 0.04 mm/tooth). It was possible to conclude that at 200 m/min the power consumed during the process was lower and the Ra roughness presented lower results. In general, when comparing roughness Ra obtained in the frontal milling of hardened steel with that expected in a grinding process, it can be inferred that the results were very satisfactory.*

Keywords: *Roughness, Dry Machining, Hardened Steels, Power Consumption.*