

ANÁLISE DA FORÇA DE USINAGEM E DA RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 4340 ENDURECIDO COM FERRAMENTAS DE PCBN E DE METAL-DURO

Vinicius Rodrigues Borba, vinicius.borba@ifsc.edu.br¹

Denis Boing, denisboing@unifebe.edu.br²

Rolf Bertrand Schroeter, rolf.schroeter@ufsc.br³

¹IFSC, Instituto Federal de Santa Catarina, Campos Florianópolis, Av. Mauro Ramos, 950, Centro, Florianópolis - SC

²UNIFEBE, Centro Universitário de Brusque, Rua Dorval Luz, 123 – Brusque – SC

³UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis -SC

Resumo: O torneamento de aços endurecidos tem sido aplicado na indústria em processos de acabamento e semi-acabamento, e normalmente empregam-se ferramentas de cerâmicas e PCBN. No entanto, o processo de fabricação de tais ferramentas ainda é oneroso, limitando-se a aplicações em situações específicas – como no torneamento de aços de construção mecânica no intervalo de dureza 35 e 60HRC. Neste intervalo de dureza, também podem ser utilizadas as ferramentas de metal-duro de grãos ultrafinos, que são o resultado do desenvolvimento de novas classes associado à novos materiais e tecnologias de revestimento. Este trabalho apresenta e discute resultados de medição das componentes da força de usinagem e da rugosidade da superfície geradas no processo de torneamento do aço AISI 4340 (35 a 60HRC) com ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos. A análise dos resultados mostrou que devido a diferença da geometria das duas ferramentas, principalmente em função do ângulo de saída, os menores valores das componentes da força de usinagem foram obtidos para as ferramentas de metal-duro. Também se observou que as magnitudes das componentes da força de usinagem foram influenciadas pelo incremento da dureza, para ambas as ferramentas. Já a qualidade da superfície do torneamento do aço AISI 4340 melhorou com o incremento da dureza para as duas ferramentas, pois verificou-se a redução nos valores de rugosidade para ambas as ferramentas. Com o emprego da ferramenta de PCBN, obtiveram-se os menores valores de rugosidade no ensaio com dureza de 60HRC. Já com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, ocorreu sua menor magnitude quando torneou-se o aço AISI 4340 com a dureza de 50HRC.

Palavras-chave: Força de usinagem, Qualidade da superfície, Torneamento de aços endurecidos.

1. INTRODUÇÃO

O processo de torneamento de aços endurecidos tem sido adotado em processos de acabamento e semi-acabamento em diversos segmentos da indústria, como a automobilística e a naval na construção de eixos e engrenagens. Tal aplicação é decorrente das boas características econômicas, de qualidade do componente produzido e ecológica quando comparado ao processo de retificação. Esse processo ganhou atenção considerável a partir da década de 1980 em função do desenvolvimento de máquinas-ferramentas de elevada rigidez e estabilidade dinâmica, em conjunto com o desenvolvimento de ferramentas capazes de suportar as severas condições tribológicas do processo (Klocke et al, 2005 e Klocke 2011). Desde então, inúmeras pesquisas evidenciam e consolidam a aplicação das ferramentas de cerâmica e de PCBN no torneamento de materiais endurecidos. No entanto, o processo de fabricação dessas ferramentas ainda é oneroso, o que limita sua aplicação no meio industrial.

Além das ferramentas de cerâmica e PCBN, têm sido desenvolvidas ferramentas de metal-duro de granulometria ultrafina, que são resultantes do aperfeiçoamento de novas classes. O refino do grão das ferramentas de metal-duro, associadas às técnicas de alteração do substrato, promovem o aumento da dureza, maior resistência à flexão, maior tenacidade e maior resistência do gume em comparação ao metal-duro de grãos convencionais (König et al 2002). Essas características podem permitir o uso da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos no torneamento de materiais endurecidos, tornando-se uma alternativa econômica para assumir uma faixa específica de aplicação no processo de torneamento de materiais endurecidos e de superligas utilizados industrialmente (Chinchankar et al, 2013 e Chinchankar et al 2015). Nesse contexto, utilizar-se-á na pesquisa o aço de construção mecânica AISI 4340, que é usualmente empregado, por exemplo, em componentes que estão sujeitos a tensões dinâmicas, nas indústrias automotiva, aeronáutica e marítima onde há severas condições de trabalho. As aplicações típicas incluem pinos, parafusos, engrenagens, eixos, virabrequins e bielas para motores. Sua escolha está relacionada a sua grande aplicabilidade no meio industrial, bem como à presença de microestruturas distintas, possibilitando avaliar o desempenho das duas ferramentas na usinagem de materiais com características diversas.

Além das propriedades dos materiais da ferramenta e da peça a ser usinada, a geometria da ferramenta reflete-se no comportamento da vida da ferramenta, no desempenho do processo e na qualidade da superfície, bem como nas componentes da força de usinagem. Cabe destacar que o conhecimento da força de usinagem e o estudo do

comportamento de suas componentes, que agem sobre a ferramenta, são importantes para determinar a potência necessária de corte, as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, o rendimento da máquina para diferentes cargas e velocidades de trabalho, além de contribuírem para o projeto da ferramenta de corte (Machado et al, 2009).

No torneamento de materiais endurecidos a magnitude da força de usinagem não é necessariamente elevada em comparação com as forças de usinagem envolvidas em materiais dúcteis (Nakayama et al, 1988). Com o aumento da dureza do material, o ângulo de cisalhamento aumenta e, por conseguinte, a área de contato da interface cavaco-ferramenta torna-se menor, contribuindo para a redução das componentes da força de usinagem (Tönshoff et al, 2000). Além disso, o cavaco é formado depois da pequena deformação plástica, consequentemente a energia consumida e a força de usinagem são reduzidas, apesar da alta resistência do material endurecido. Salienta-se ainda que, normalmente, no torneamento de materiais endurecidos empregam-se elevadas velocidades de corte, baixos valores de avanço e pequenas profundidades de corte, gerando uma pequena área de corte.

As ferramentas comerciais de metal-duro e PCBN possuem significativas diferenças em função da geometria, principalmente do ângulo de saída. Tradicionalmente, a ferramenta de PCBN tem ângulo de saída negativo, o que confere boa resistência ao gume. Por outro lado, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos apresenta frequentemente ângulos de saída positivos, o que facilita a penetração da ferramenta na peça e também o escoamento do cavaco. Por consequência, para condições similares de aplicação, as componentes da força de usinagem para a ferramenta de metal-duro tendem a ser menores em comparação com as forças que ocorrem na usinagem com a ferramenta de PCBN (Klocke 2011).

Tendo em vista tais considerações, o objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento das componentes da força de usinagem e a qualidade da superfície na operação de torneamento de materiais endurecidos, utilizando-se as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos no processo de torneamento do aço de construção mecânica AISI 4340 em seis níveis de dureza. Desta maneira, pretende-se verificar as possibilidades e limitações da aplicabilidade destas ferramentas para este tipo de material e tipo de operação, de modo a elencar os fatores determinantes tanto nas componentes da força de usinagem quanto na rugosidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no centro de torneamento CNC Heyligenstaed Heynumat 10 de 70 kW de potência no motor principal, pertencente ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O material usinado no ensaio foi o aço AISI 4340 em seis níveis de dureza, por ser utilizado em diversos setores industriais em diferentes estados de dureza. O aço foi adquirido da empresa Favorit e sua composição química foi verificada conforme a norma da *American Iron and Steel Institute* (AISI), encontrando-se dentro do padrão especificado conforme pode ser visualizado na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química (% em massa) padrão (segundo AISI) do aço AISI 4340.

Aço	C	Mn	P	Si	Ni	Cr	Mo	V
AISI 4340 (norma)	0,38 0,43	0,6 0,8	0,035 máx	0,15 0,35	1,65 2,00	0,70 0,90	0,20 0,30	-
AISI 4340 (medido)	0,39	0,67	0,02	0,27	1,74	0,76	0,22	-

FONTE: Metals-Handbook e do autor.

Já a geometria do corpo de prova foi adotada com base em Diniz et al (2008), e tem forma de um disco com um furo passante no centro, cujas dimensões são: diâmetro externo de 125mm, diâmetro interno de 25mm e espessura de 16mm. Tal geometria permite induzir maior rigidez ao sistema de usinagem em função dos pequenos comprimentos em balanço e por permitir maior aproveitamento do volume do corpo de prova.

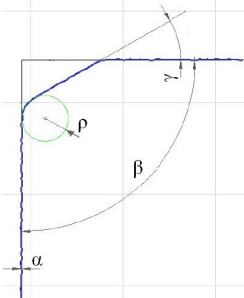
Confecionados os corpos de prova com as dimensões e geometrias desejadas, os mesmos foram submetidos a tratamento térmico de têmpera e de revenimento na empresa Tecno Têmpera, de modo que atingissem seis níveis de dureza (35 ± 1 , 40 ± 1 , 45 ± 1 , 50 ± 1 , 55 ± 1 e 60 ± 1 HRC). Dessa maneira, cada ferramenta exigiu o emprego de 6 corpos de prova, resultando em 12 corpos de prova para atender às duas ferramentas. Em função do elevado custo do experimento, realizou-se uma réplica, totalizando assim 24 corpos de prova para as duas ferramentas.

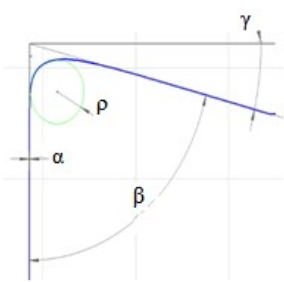
As ferramentas de corte empregadas no experimento foram o inserto de PCBN de código ISO SNGA 12 04 08 S01030A classe 7025 e o inserto de metal-duro de grãos ultrafinos de código ISO SNMG 12 04 08 - SM Classe 1105. Os insertos foram fixados no porta-ferramenta de código ISO de DSBNR 2020K com ângulo de inclinação de -6° e com ângulo de direção de 75° . As principais características geométricas das ferramentas foram definidas utilizando-se o microscópio InfiniteFocus G5[®] da fabricante ALICONA, conforme Tab. (2). Cabe destacar, que os ângulos da Tab. (2) são os ângulos da ferramenta de corte e não se considerou o ângulo de inclinação do porta-ferramenta.

Tabela 2. Características entre as ferramentas de PCBN e Metal-duro.

Geométricas da ferramenta	Ferramentas	
	PCBN	Metal-duro
Raio do gume (ρ)	$24,33 \pm 5,26 \mu\text{m}$	$28,01 \pm 2,89 \mu\text{m}$
Ângulo de saída (γ)	$-29,71 \pm 0,26^\circ$	$+15,32 \pm 1,29^\circ$
Ângulo de cunha (β)	$90,12 \pm 0,06^\circ$	$74,80 \pm 1,29^\circ$
Ângulo de incidência (α)	$-0,20 \pm 0,06^\circ$	$-0,12 \pm 0,10^\circ$

Perfil





No experimento empregou-se o processo de torneamento radial (faceamento) em um único passe no sentido radial (do diâmetro maior para o menor), sem emprego de meios lubrificantes. Os parâmetros de usinagem adotados foram: velocidade de corte de $v_c = 150\text{m/min}$, profundidade de corte $a_p = 0,20\text{mm}$ e avanço $f = 0,08\text{mm}$. Esses foram selecionados de modo que abrangessem os intervalos dos parâmetros de corte de acabamento recomendados pelo fabricante de cada ferramenta, bem como os parâmetros de corte de materiais endurecidos para operações de acabamento.

Com os parâmetros de usinagem definidos e com o sistema de medição de forças ligado, o torno CNC foi programado com o objetivo de realizar o torneamento radial dos corpos de prova, em um único passe no sentido radial da face da peça, tendo como sentido do avanço do diâmetro maior para o menor diâmetro da peça. A Figura 1 mostra uma representação esquemática do experimento, ilustrando o percurso realizado pela ferramenta durante cada ensaio.

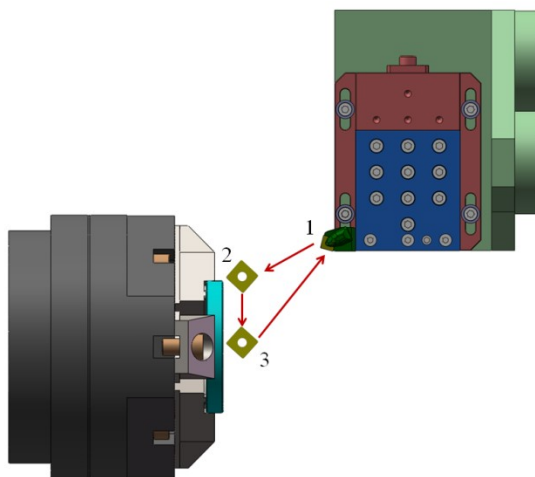


Figura 1. Representação do percurso da ferramenta ao longo do ensaio.

Em cada ciclo de usinagem empregou-se um novo gume, pois não era objetivo do trabalho avaliar o comportamento das componentes das forças de usinagem em função do desgaste das ferramentas. No experimento utilizaram-se 12 gumes de ferramenta de PCBN e 12 gumes de ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.

Antes de cada ensaio, a superfície do corpo de prova foi faceada de modo que ficasse homogênea e que, assim, fosse minimizado o batimento axial do corpo de prova. Após a criação dessa superfície de referência no corpo de prova, a ferramenta empregada nesse processo de homogeneização era substituída por uma nova ferramenta.

Cada corpo de prova foi ensaiado duas vezes, ou seja, efetuou-se o torneamento em uma face do corpo de prova com um gume e sua réplica foi realizada na outra face com um novo gume. Em cada face do corpo de prova, mediu-se o valor das componentes da força de usinagem e posteriormente a rugosidade da superfície gerada.

A medição das componentes da força de usinagem no torneamento transversal do aço AISI 4340 foi efetuada com a plataforma piezelétrica (dinamômetro) da marca Kistler Instrument AG, modelo 9257A. Esta possui três canais de aquisição de dados dispostos nos eixos cartesianos x, y e z, e foi montada na máquina-ferramenta de forma a coincidir com os eixos cartesianos da mesma. Os sinais são transmitidos para os amplificadores de sinais da marca Kistler, modelo 5011 e 5006, e os dados são transmitidos por cabos coaxiais blindados para a placa de aquisição do fabricante National Instruments, modelo NI USB 6218, na qual empregou-se uma taxa de aquisição de 1000Hz. O processamento e a gravação dos dados foram executados através do *software* Labview e o tratamento dos sinais foi executado pelo *software* Matlab. A Figura (2A) mostra o projeto da representação do procedimento de medição e a Figura (2B) mostra os equipamentos de medição de força empregados no experimento.

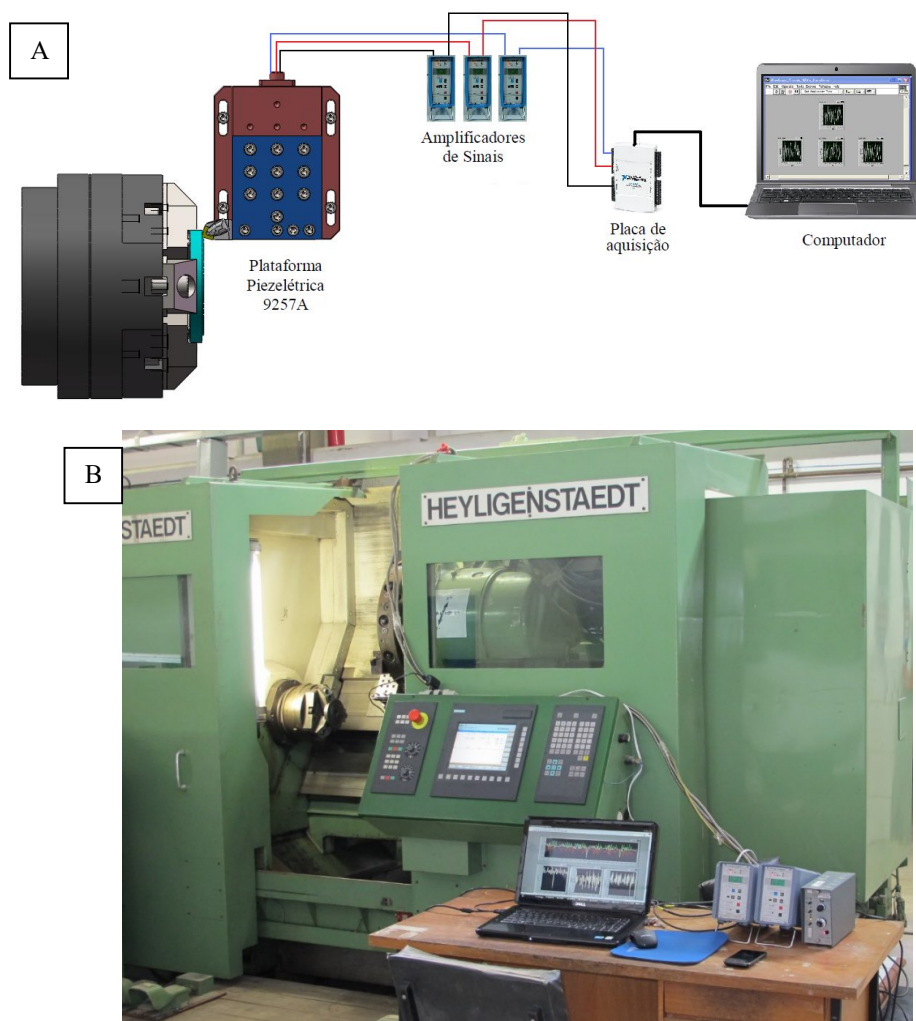


Figura 2. Representação do sistema de medição empregados no experimento.

A medição da rugosidade 2D dos corpos de prova foi efetuada com o rugosímetro Mitutoyo® SJ-310. O rugosímetro foi configurado com comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,25mm de acordo com a norma ISO 4288/1998. A medição da rugosidade nos corpos de prova foi realizada em 3 direções afastadas em 120° e em cada ponto mediu-se 1 vez, totalizando 3 medições para cada face do corpo de prova. No tratamento dos dados, foram utilizados os resultados das duas faces para determinar os valores das médias e das incertezas, e empregou-se o parâmetro de rugosidade R_a .

A seguir são apresentados e discutidos os resultados da força de usinagem e da rugosidade 2D do experimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Força de usinagem

O comportamento das componentes da força de usinagem - força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p) - com relação às variáveis utilizadas nesta pesquisa pode ser visualizado na Fig. (3).

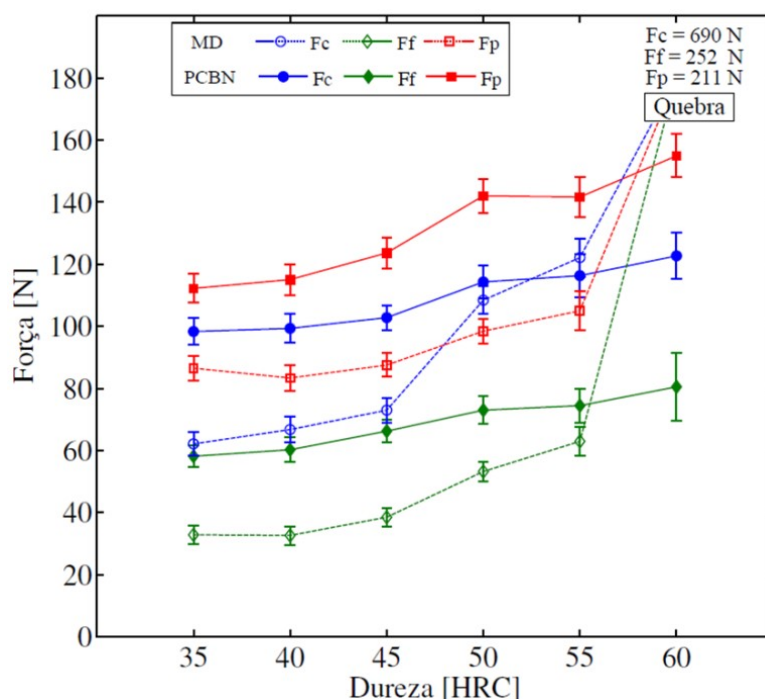


Figura 3. Comportamento das componentes da força de usinagem do aço AISI 4340 com a ferramenta de metal-duro (MD) e de PCBN.

Observa-se que no experimento com a ferramenta de PCBN a força passiva (F_p) foi maior do que a força de corte (F_c) para os seis níveis de dureza. Isso pode ser explicado com base na recuperação elástica promovida pelo material usinado, a qual é diretamente dependente da resistência do escoamento do material, bem como às pequenas espessuras do cavaco na região secundária de corte (Nakayama et al, 1988 e Astakhov, 2011).

Já no torneamento do aço AISI 4340 com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, verifica-se se que no intervalo de dureza de 35 a 45HRC a intensidade da força passiva é maior do que da força de corte. Entretanto, para a dureza maior que 50HRC, a componente da força de corte da ferramenta de metal-duro apresenta magnitude maior, conforme mostra o gráfico da Fig. (3). Uma explicação para essa inversão de grandeza das componentes da força de usinagem pode estar relacionada ao incremento da dureza do aço AISI 4340. Esse aumento pode acarretar um desgaste do gume da ferramenta de corte, ocasionando modificações na geometria da ferramenta, devido à maior área de contato com a peça, situação que explicaria a inversão das componentes da força de usinagem. Este comportamento pode ser visualizado na Fig. (4), na qual observa-se a variação da força ao longo do processo de torneamento, que é provocada pela variação do gume, conforme será explanado mais adiante.

Ainda com relação à Fig. (3), verifica-se que as magnitudes da força de usinagem foram menores para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos do que para a ferramenta de PCBN, exceto no ensaio em que ocorreu a quebra da ferramenta de metal-duro. Essa distinção de força ocorre em função da diferença de geometria das ferramentas, principalmente com relação ao ângulo de saída, conforme dados da Tab. (2). Tal situação já era esperada, pois a variação angular gera alterações nas componentes da força de usinagem.

Como a ferramenta de PCBN possui ângulo negativo, este ângulo, segundo Klocke (2011), promove maior índice de deformação plástica do cavaco até o ponto de cisalhamento, o que eleva a força de usinagem durante o processo. Esse aumento da força de usinagem com a variação do ângulo de saída também foi estudado por Zhou et al (2003) na usinagem do aço AISI 52100 (60-62HRC de dureza) com a ferramenta de CBN com a variação do ângulo de saída de 0° a -30° , em que se verificou que as componentes da força de usinagem tendem a aumentar com o aumento do ângulo de saída.

Já com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, foi necessária uma menor força de usinagem para remover o cavaco, conforme mostra Fig. (3), exceto na dureza de 60HRC. Esse comportamento pode favorecer o uso dessa ferramenta na aplicação industrial, pois o menor esforço no gume da ferramenta pode promover uma vida adequada da mesma, além de diminuição da potência necessária à realização da operação. Porém, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos não suportou as severas condições de usinagem geradas durante o torneamento do aço AISI 4340 na dureza de 60HRC, conforme Fig. (4) que ilustra o gráfico de aquisição de força da ferramenta de metal-duro e da ferramenta de PCBN.

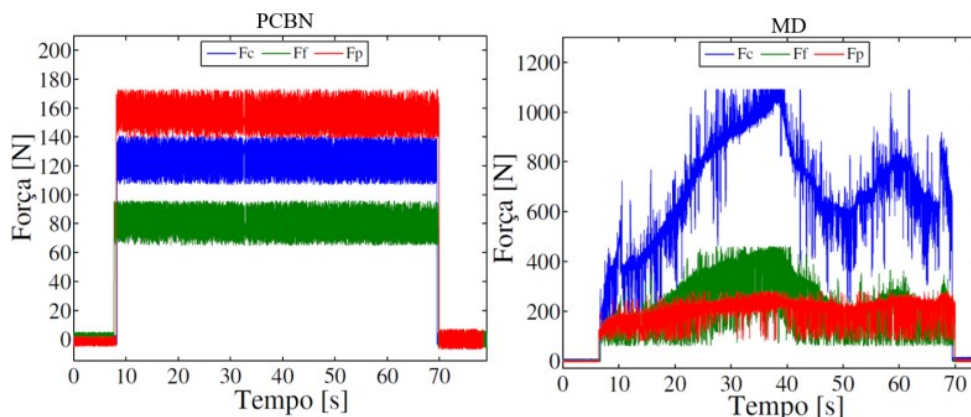


Figura 4. Gráfico das componentes da força de usinagem do aço AISI 4340 de 60HRC de dureza com a ferramenta de PCBN e de metal-duro (MD).

Verifica-se na Figura (4) que a ferramenta de metal-duro apresentou uma excessiva variação das componentes da força de usinagem e este comportamento deve-se ao fato do metal-duro de grãos ultrafinos utilizado não suportar as condições de processo. Dentre as componentes da força de usinagem, a força de corte (F_c) foi a que teve maior alteração, o que pode ser explicado em decorrência da redução do grau de afiação da ferramenta em função do excessivo desgaste, ocasionando a perda de material da ferramenta e, devido a isto, a profundidade de corte programada de $a_p=0,20\text{mm}$ passa a não ser real.

O ângulo de saída positivo da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos também pode ter contribuído para a quebra da ferramenta, pois sua característica de forma pode fragilizar a integridade do gume em severas condições de usinagem, como neste experimento. O ângulo de saída positivo da ferramenta de metal-duro favorece a penetração da ferramenta na peça, proporciona um maior ângulo de cisalhamento e facilita o escoamento do cavaco (Machado et al, 2009), consequentemente, reduz a força de usinagem. Em materiais com alta dureza, como por exemplo o aço AISI 4340 de 60HRC, prioriza-se o ângulo de saída negativo da ferramenta, pois este aumenta a resistência do gume.

Tanto na Figura (3) quanto na Figura (4), verifica-se que o comportamento das componentes da força de usinagem foi estável ao longo do processo de torneamento com a ferramenta de PCBN nos seis níveis de dureza, o que consolida sua aplicação no torneamento de materiais endurecidos.

3.2. Rugosidade

A rugosidade do aço AISI 4340 nos seis níveis de dureza também foi analisada, tendo em vista que em muitos processos de usinagem a rugosidade da peça é usada como parâmetro de saída do processo de produção e, com isso, torna-se uma variável fundamental na decisão da escolha da ferramenta. A Figura (5) mostra a variação do parâmetro de rugosidade (R_a) em função das ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos. Para cada parâmetro de rugosidade, calculou-se a média e seu intervalo de confiança, para um nível de confiança de 95%.

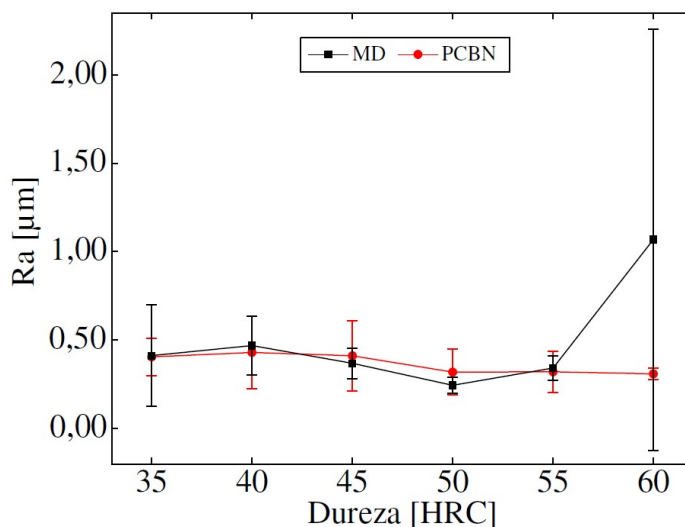


Figura 5. Rugosidade R_a com a variação da dureza do aço AISI 4340 na operação de torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

Com relação à influência da dureza na qualidade da superfície obtida no torneamento do aço AISI 4340 com a ferramenta de PCBN, verifica-se no intervalo de 35 a 40HRC de dureza que os valores de rugosidade R_a não são diferentes, conforme teste de hipótese realizado com um nível de confiança de 95% ($\mu_{PCBN35} \neq \mu_{PCBN40} \rightarrow P=0,515$). A partir da dureza de 40HRC, observa-se uma tendência de melhoria com o incremento da dureza, conforme verificada no teste de hipótese. A tendência da queda dos valores de rugosidade R_a no intervalo de 40 a 60HRC de dureza se deve, principalmente, à alteração do comportamento plástico do material sofrido com o incremento da dureza (Tönshoff et al, 2000), o que melhora a superfície da peça. Destaca-se ainda que o menor valor de rugosidade R_a foi de $0,31 \pm 0,03\mu m$ no ensaio com 60HRC de dureza, o que permite uma classificação na classe rugosidade de N5, de acordo com a norma NBR 8404. Já o maior valor de rugosidade obtido da superfície foi no experimento com a dureza de 40HRC de dureza, o qual teve um valor de $0,43 \pm 0,20\mu m$, assim obtendo uma classe de rugosidade de N6.

Entretanto, para as superfícies torneadas com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, também se observa que os valores de rugosidade R_a não são diferentes para o intervalo de 35 a 40HRC, conforme teste de hipótese realizado ($\mu_{MD35} \neq \mu_{MD40} \rightarrow P=0,356$). A partir da dureza de 40HRC, verifica-se uma tendência de queda da rugosidade até a dureza de 50HRC, conforme verificada no teste de hipótese. Depois da dureza de 50HRC houve um aumento dos valores de rugosidade com o aumento da dureza, devido às irregularidades da ferramenta provocadas pelo desgaste. O menor valor de rugosidade R_a ocorreu no ensaio com a dureza de 50HRC, com rugosidade R_a de $0,24 \pm 0,05\mu m$, e classificou-se a superfície gerada como N5, de acordo com a classe de rugosidade. A maior rugosidade R_a foi de $0,47 \pm 0,17\mu m$ para o ensaio com a dureza de 40 HRC, resultando uma classe de N6 (neste caso não se considerou o ensaio no qual ocorreu quebra da ferramenta).

Ainda com relação ao gráfico da Fig. (5), observa-se que as médias dos valores de rugosidade não são diferentes entre as duas ferramentas no intervalo de 35 a 55HRC de dureza, de acordo com o teste hipótese realizado. Assim as duas ferramentas geraram superfícies estatisticamente similares para esse intervalo de dureza. Tal igualdade estatística é resultante do fato das médias estarem próximas e da grande dispersão dos valores. Dessa maneira, a superfície gerada no corpo de prova das duas ferramentas teve a mesma aplicação de acordo com a classe de rugosidade.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas as componentes da força de usinagem geradas no processo de torneamento do aço AISI 4340 em seis níveis de dureza com o emprego da ferramenta de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos. Além disso, também foi analisada a superfície gerada pelas duas ferramentas.

Com relação as componentes da força de usinagem no torneamento dos aços AISI 4340 nos seis níveis de dureza, constatou-se o aumento das componentes da força de usinagem com o incremento da dureza do aço para as duas ferramentas utilizadas. Verificou-se também a influência da geometria das ferramentas nas componentes da força de usinagem. Assim, a ferramenta de PCBN apresentou maiores magnitudes de força do que a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos. Isso se deu em função da diferença, principalmente, entre os ângulos de saída das duas ferramentas. Além disso, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos não suportou as severas condições de usinagem no torneamento do aço AISI 4340 de 60HRC de dureza e quebrou.

Os resultados com relação à qualidade da superfície melhoraram com o incremento da dureza, para ambas as ferramentas (exceto para a ferramenta de metal-duro no intervalo de 55 a 60HRC). Dessa maneira, obteve-se o menor valor de rugosidade no corpo de prova com a dureza de 60HRC para a ferramenta de PCBN. Já a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos permitiu o melhor acabamento da superfície na dureza de 50HRC no torneamento do aço AISI 4340. De modo geral, a rugosidade foi estatisticamente semelhante para ambas as ferramentas, exceto no ensaio em que a ferramenta de metal-duro quebrou.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho teve apoio do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), do Centro Universitário de Brusque, da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e do Programa de Bolsas Universitárias de Santa Catarina UNIEDU/Pós-Graduação pelos recursos disponibilizados a este projeto para a compra de materiais e também pela concessão de bolsas de estudo e financiamento deste projeto de pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Astakhov, V. P., 2011, “Machining of Hard Materials – Definitions and Industrial Applications”, In: DAVIM, J. D. Machining of Hard Materials, Springer-Verlag London Limited.
- Chincharikar, S., Choudhury, S. K., 2013 “Investigations on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tools”, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 38, pp. 124-133.

- Chinchani, S., Choudhury, S. K., 2015, “Machining of hardened steel-Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review”, *International journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 89, pp. 95-109.
- Diniz, A. E., Oliveira, A. J. D., 2008, “Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 195, pp. 275-281.
- Klocke, F., Brinksmeier, E., Weinert, K., 2005, “Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 45, pp. 22-45.
- Klocke, F., 2011, “Manufacturing Processes 1 – Cutting”, Aachen, Springer.
- König, W., Klocke, F., 2002 “Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida I - Parte I”, Traduzido e adaptado do livro “Fertigungsverfahren Drehen, Bohren, Fresen”, Florianópolis.
- Nakayama, K., Arai, M., Kanda, T., 1988, “Machining Characteristics of Hard Materials”, *Annals of the CIRP*, Vol. 37, n. 1.
- Machado, Á. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, 1ª. ed., São Paulo: Blucher.
- Zhou, J. M., Walter, M. A. J. E. S., 2003, “Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 301-305.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

ANALYSIS OF MACHINING FORCES AND ROUGHNESS IN TURNING OF HARDENED AISI 4340 STEEL WITH PCBN AND METAL CARBIDE TOOLS

Vinícius Rodrigues Borba, vinicius.borba@ifsc.edu.br¹

Denis Boing, denis.boing@gmail.com²

Rolf Bertrand Schroeter, rolf.schroeter@ufsc.br³

¹IFSC, Federal Institute of Santa Catarina, Campos Florianópolis, Av. Mauro Ramos, 950, Centro, Florianópolis - SC

²UNIFEFE, University Center of Brusque, Rua Dorval Luz, 123 – Brusque – SC

³UFSC, Federal University of Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis -SC

Resumo: Hard Turning has been applied in the industry in finishing and semi-finishing processes, and usually tools the ceramics and the PCBN are used. However, the manufacturing process of such tools is still expensive, being limited to applications in specific situations - as in the turning of mechanical steels in the hardness range 35 and 60HRC. In this hardness range, the ultra-fine grain carbide tools may be used. This paper presents and discusses the measurement results of machining force components and surface roughness resulting from the turning process of AISI 4340 steel (35 to 60HRC) with PCBN and ultrafine grain carbide tools. The analysis of the results showed that due to the difference in the geometry of the two tools, mainly in function of the rake angle, the lower values of the components of the machining force were obtained for the tools of ultra-fine grain carbide. It was also observed that the magnitudes of the components of the machining force were influenced by the increase in hardness for both tools. The quality of the turning surface of AISI 4340 steel improved with the increase in hardness for the two tools, because the reduction in roughness values was verified for both tools. With the use of the PCBN tool, it obtained its lowest roughness intensity in the test with hardness of 60HRC. On the other hand, the ultra-fine grain carbide tool had its lowest magnitude when turning the AISI 4340 steel with a hardness of 50HRC.

Keywords: Machining Force, Surface Quality, Hard turning.