

VERIFICAÇÃO DAS FORÇAS GERADAS NO TORNEAMENTO A SECO, COM FLUIDO EM ABUNDÂNCIA E EM QUANTIDADE REDUZIDA DO AÇO AISI 420C UTILIZANDO FERRAMENTA WIPER

André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br
Roberto Isoppo Rodrigues, roberto.ir@hotmail.com
Guilherme Cortelini da Rosa, guilherme.cortelini@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) –
Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) – Rua Sarmento Leite, 425 – Porto Alegre, RS – CEP 90050-170.

Resumo: Deseja-se verificar o comportamento dos sinais de força gerados no torneamento longitudinal externo do aço inoxidável AISI 420C aplicando ferramenta alisadora (wiper) de metal-duro com raio de ponta $r_e = 0,8$ mm para diferentes condições de corte e lubrificação. Para tanto, foram consideradas conforme recomendações do fabricante do inserto duas profundidades de corte (a_p), dois avanços (f) e duas velocidades de corte (v_c). As condições de lubrificação envolveram os cortes com fluido em abundância, com quantidade reduzida de fluido QRF e a seco. Os sinais das componentes ortogonais da força de usinagem F (passiva F_p , corte F_c e avanço F_f) adquiridos para as 24 amostras usinadas com ferramenta alisadora mostraram que, para todas as condições de lubrificação, o incremento de a_p influi significativamente no aumento das componentes F_c e F_f e muito pouco sobre F_p . O incremento de f influi mais sobre o aumento de F_c , seguido por F_p e por último F_f . Já o incremento de v_c promoveu uma pequena diminuição de F_c e F_f , mas não alterou a intensidade de F_p . Na comparação com a utilização de fluido em abundância, a aplicação de QRF resultou em uma pequena redução dos valores das componentes F_c e F_f e um pequeno aumento de F_p ; no caso do corte a seco pôde-se observar o contrário: aumento de F_c e F_f e redução de F_p . Observou-se ainda que os menores valores da força F foram gerados com a aplicação de QRF, tanto para os valores médios quanto para as suas variações. Assim, conclui-se que a utilização de QRF garante uma melhor penetração do lubrificante na região de corte, diminuindo o coeficiente de atrito e facilitando a usinagem do aço inoxidável AISI 420C.

Palavras-chave: Torneamento, Força de Usinagem, Aço AISI 420C, Ferramenta Wiper, Meios lubrificantes

1. INTRODUÇÃO

O AISI 420C é um aço ligado ao cromo, inoxidável, martensítico, temperável e magnético. Este aço é bastante utilizado na fabricação de componentes onde há necessidade de alta resistência mecânica (até a temperatura de 400 °C) aliada à ductilidade, resistência à oxidação (até a temperatura de 610 °C) e ao desgaste. Exemplos: moldes de injeção de plásticos, instrumentos cirúrgicos e dentários, lâminas de corte, válvulas para água e vapor, turbinas a gás, engrenagens, eixos, cutelaria, entre outros (Favorit, 2012). Entretanto, a usinabilidade desse aço pode ser complicada quando não são utilizadas as melhores condições para tal [escolha incorreta de ferramentas de corte (geometria e material), parâmetros de corte inadequados (pode gerar forças excessivas, vibrações etc.), meios lubrificantes ineficientes etc.].

Os aços inoxidáveis martensíticos têm usinabilidade comparável com os aços baixa liga e, por isso, é possível utilizar as recomendações para usinagem geral para o torneamento de aços. De acordo com Sandvik (2012), para o torneamento longitudinal externo de aços baixa liga não endurecidos, a primeira escolha é a geometria wiper.

As ferramentas com geometria alisadora (wiper) proporcionam maior qualidade de acabamento e maior produtividade; maior qualidade devido ao maior número de raios que compõem a ferramenta e maior produtividade devido aos parâmetros de corte (a_p e f) que podem ser maiores que os utilizados com ferramenta convencional para o mesmo acabamento, aumentando assim a taxa de remoção de material (Sandvik, 2012; Rosa e Souza, 2014).

Os estudos da força de usinagem e de suas componentes são de grande importância, pois possibilitam estimar a potência necessária ao corte, bem como as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo. Além disso, a grandeza da força de usinagem é um critério para a usinabilidade de um material – geralmente materiais de difícil usinabilidade apresentam forças de usinagem maiores (Diniz *et al.*, 2010).

No estudo de Nassif *et al.* (2013), as forças de corte (F_c) e de avanço (F_f) geradas pela ferramenta com geometria *wiper* foram iguais ou menores que as obtidas para a ferramenta com geometria *standard*. Isto se deu a uma redução da pressão específica de corte pela alteração do formato da aresta, a qual facilita a ação de corte. Já as forças passivas (F_p) foram maiores. Uma possível explicação é que a mesma geometria que facilita o avanço e o corte na direção tangencial dificulta o corte na direção radial (ou de profundidade).

As funções básicas de um fluido de corte são proporcionar arrefecimento da região de corte e lubrificação, reduzindo o atrito nas interfaces ferramenta/peça e cavaco/ferramenta. Os fluidos podem afetar as condições de usinagem, modificando: o comportamento das forças de usinagem, a temperatura de contato, os mecanismos de desgaste da ferramenta e o acabamento superficial da peça. Em algumas aplicações, espera-se ainda que o fluido execute ações secundárias, como auxiliar na quebra e na expulsão do cavaco da região de corte (Astakhov, 2008).

O uso de fluido de corte por inundação aumenta em até 16% o custo da usinagem em fatores como aquisição, armazenamento, preparação, controle durante o uso e descarte. Além disso, ainda há a questão do impacto ambiental que estes produtos podem causar, e ainda podem causar riscos à saúde humana. Dessa forma, mesmo o corte a seco produzindo forças maiores (dependendo da aplicação) pode ser viável (Silva *et al.*, 2003). Porém, nos casos em que o corte a seco não for possível, as condições de quantidade reduzida de fluido (QRF) podem ser aplicadas. As técnicas QRF surgiram como tentativa de reduzir os impactos causados pelo fluido de corte; porém, esta também pode gerar custos extras, como na pressurização do ar.

Assim, esse trabalho pretende verificar o comportamento das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida (QRF) do aço inoxidável AISI 420C utilizando ferramenta com geometria *wiper* para diferentes combinações de parâmetros de corte.

1.1. Forças na Usinagem

De acordo com diferentes trabalhos (Ribeiro, 2006; Machado *et al.*, 2009; Diniz *et al.*, 2010; Kalpakjian e Schmid, 2010) a força de usinagem depende do material a ser usinado, dos parâmetros de usinagem, da seção de usinagem, do processo a ser utilizado, do meio lubrificante e estado da ferramenta de corte.

A força de usinagem pode ser dividida em três componentes ortogonais: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p). Detalhes na Fig. (6). A Equação (1) representa a intensidade da força de usinagem (F).

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (1)$$

A força de corte (F_c) é a componente da força F no sentido oposto ao movimento de corte. É também a força de maior intensidade no processo de torneamento e é o principal fator de cálculo da potência necessária ao corte. A força de avanço (F_f) é a componente da força F no sentido oposto ao movimento de avanço longitudinal da ferramenta de corte sobre a peça. A força passiva (F_p) é a componente da força F no sentido oposto ao movimento de avanço transversal (profundidade de corte) da ferramenta de corte sobre a peça. Em outras palavras, é a projeção da força de usinagem em um plano perpendicular ao plano de trabalho.

É importante ressaltar que as forças surgem do contato da ferramenta de corte com a peça e não podem ser definidas previamente; elas são consequência dos movimentos realizados, estes definidos por parâmetros de entrada como avanço (f), profundidade de corte (a_p) e velocidade de corte (v_c). Sendo assim, a força é caracterizada como um parâmetro de saída do processo de usinagem. A Figura (1) ilustra a influência dos parâmetros de corte nos valores de força.

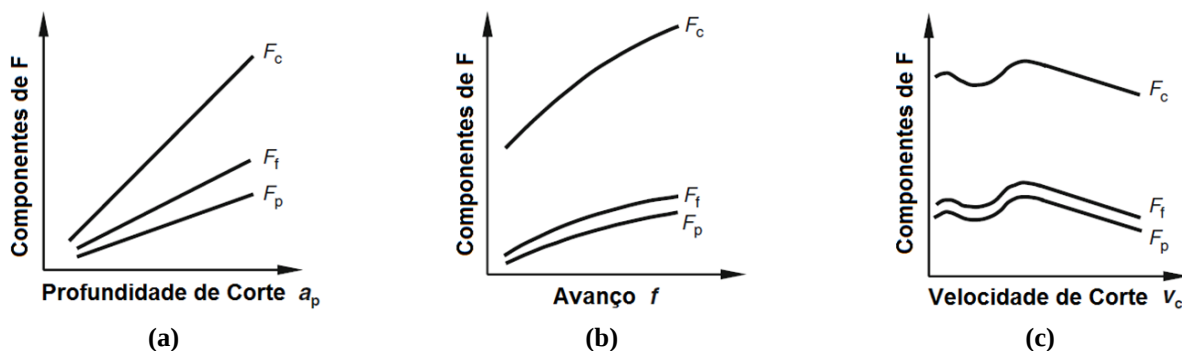


Figura 1. Dependência das componentes das forças de usinagem em relação a: (a) profundidade de corte; (b) avanço; (c) velocidade de corte (adaptado de Klocke, 2011).

Com o aumento de a_p , tem-se também o aumento das três componentes da força de forma linear, o que mostra que a pressão específica de corte praticamente não se altera (Fig. 2b). Já com o aumento de f tem-se um aumento não linear das componentes explicado pela redução de k_c com o aumento de f devido à redução do atrito causada por esse aumento (Fig. 2a). Com o aumento de v_c tem-se uma oscilação das componentes, inicialmente devido à formação da aresta postiça de corte; acima de um valor crítico (quando a aresta postiça de corte não se forma mais), tem-se uma redução

das componentes pela diminuição da pressão específica de corte em virtude da redução da dureza do cavaco e da diminuição do atrito causados pelo aumento da temperatura (Fig. 2c). Além dos parâmetros de entrada, a lubrificação e o material da peça também influenciam nas forças de corte (Klocke, 2011).

1.2. Meios Lubrificação

Hoje na indústria metal mecânica existe uma demanda crescente para redução de custos, alta produtividade e boa qualidade do produto. Alta produtividade é inerentemente associada a elevadas taxas de remoção de material, que elevam de forma significativa o calor gerado na região de corte. Consequentemente, a precisão dimensional, a vida da ferramenta e a integridade da superfície usinada da peça são prejudicadas.

De acordo com Lisboa *et al.* (2013), devido ao atrito que ocorre nas interfaces ferramenta-peça e cavaco-ferramenta é gerada uma grande quantidade de calor durante o processo. Isso pode desgastar a ferramenta além do normal e aumentar as dimensões da peça (dilatação térmica). Para diminuir e/ou extrair da ferramenta e da peça o calor, usam-se fluidos como lubrificante e/ou refrigerante.

Ao cumprir as suas funções principais (refrigeração e lubrificação) bem como o transporte dos cavacos, os fluidos de corte fazem uma contribuição substancial para o alto nível de desempenho de muitos processos de usinagem. Isto é conseguido através da remoção de calor de processo por arrefecimento e da redução do atrito nas interfaces peça/ferramenta/cavaco através da lubrificação. Em geral, quando bem aplicado, este tipo de corte pode conseguir uma redução significativa no valor da força de usinagem. No entanto, apesar de todos os benefícios dos fluidos de corte, sua aplicação cria severos problemas para o ambiente e a humanidade. Componentes dos fluidos de corte tais como bactericidas e fungicidas, reagem com produtos originários do fluido de corte e incluem substâncias estranhas que podem se tornar a causa de doenças aos operadores e contaminação da água e do solo (poluição). Neste cenário, tendências tecnológicas visam reduzir ou eliminar o uso dos fluidos de corte nos processos de usinagem, tais como a utilização de quantidade reduzida de fluido (QRF) e o corte a seco (Machado *et al.*, 2009; Klocke, 2011).

1.2.1. Corte com quantidade reduzida de fluido de corte (QRF)

A técnica QRF tem por função aplicar por pulverização (*spray*) o óleo lubrificante em vazões muito baixas (0,01 a 10 l/h) na região de corte através de uma mistura com gás (ar, nitrogênio, argônio, hélio, e dióxido de carbono) sob pressão que varia de 2 a 10 Bar. Dependendo da vazão utilizada, pode-se ainda ter as denominações MQL (mínima quantidade de lubrificante: 0,05 a 0,5 l/h) ou NDM (*near dry machining* ou usinagem quase a seco: abaixo de 0,05 l/h).

Na técnica por QRF, o *spray* é pulverizado contra a saída do cavaco ou entre a superfície de folga da ferramenta e a peça fazendo com que a pequena quantidade de óleo possa ser suficiente para reduzir o atrito nestas interfaces e diminuir a tendência à aderência. Dessa forma o cavaco sai do processo de usinagem praticamente seco, sem necessidade de tratamento. Todavia, o vapor, a névoa e a fumaça de óleo podem ser considerados subprodutos indesejáveis, aumentando o poluente em suspensão no ar, sendo necessária, por vezes, a implantação de um sistema de exaustão. Ademais, o fluido é considerado sem retorno. Dessa forma podem-se obter bons resultados quanto à redução das forças utilizando esse processo (Kurgin, 2013).

Segundo Ji *et al.* (2014), a influência do corte com QRF nas forças de usinagem depende essencialmente da velocidade de corte (v_c). Assim, existe um valor máximo de vazão efetiva de óleo lubrificante para cada v_c ; ao superar este valor, a mistura ar/óleo não gera mais resultados nas forças.

1.2.2. Corte a seco

O uso do corte a seco estabelece certas exigências em relação aos seus fatores influentes, devendo ser observadas uma seleção correta do material de trabalho, das especificações dos parâmetros de corte e principalmente das ferramentas de corte utilizadas. Quanto ao material da peça, a maioria dos aços pode ser usinada sem aplicação de fluidos de corte. Geralmente é a situação que gera maiores valores de força, de temperatura e, portanto, maior desgaste de ferramenta e maior consumo de energia. Outro aspecto positivo é a redução do choque térmico, além da redução de trincas e lascamentos na ferramenta de corte. Esta técnica está se popularizando por problemas econômicos (custos de aquisição, manutenção, armazenamento e eliminação dos fluidos de corte) e ambientais (Lisboa *et al.*, 2013).

1.3. Ferramenta Alisadora (*Wiper*)

Conforme Sandvik (2012), as ferramentas alisadoras (*wiper*) possuem uma geometria com r_e modificado, com geralmente três ou mais raios (podendo chegar a nove), conferindo uma diferente interação com a superfície da peça e consequente mudança no acabamento da superfície usinada. Isso aumenta o comprimento de contato das pastilhas e o efeito das taxas de avanço f de modo positivo. A redução nos tempos de corte com estas pastilhas giram em torno de 30% por conseguirem atuar em altos f gerando ainda bom acabamento superficial e boa quebra de cavaco. O r_e da geometria *wiper* resulta em uma menor altura do perfil na aresta de corte (efeito de alisamento na superfície torneada).

A Figura (2a) mostra a geometria convencional (*standard*) e a rugosidade máxima teórica (R_{max}) gerada na superfície usinada para um avanço f . As Fig. (3b, c) ilustram comparativamente o perfil de rugosidade gerado durante a

usinagem usando ferramenta com geometria alisadora (*wiper*) devido ao seu r_e modificado, evidenciando que um mesmo valor de rugosidade pode ser encontrado com as ferramentas com geometria *standard* e *wiper*, mas utilizando o dobro do avanço com a segunda.

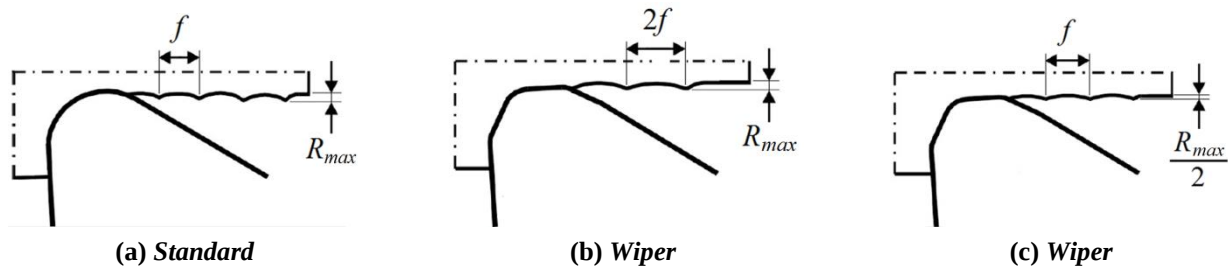


Figura 2. Rugosidade máxima teórica gerada durante o processo de torneamento (adaptado de Stachurski *et al.*, 2012).

A ferramenta com geometria *wiper* também pode ser usada para baixas profundidades de corte por ser uma ferramenta predominantemente de acabamento, já que altas profundidades de corte podem gerar vibrações indesejáveis. Para ilustrar, Nassif *et al.* (2013) analisaram comparativamente as forças geradas no torneamento do aço inoxidável AISI 420 utilizando ferramentas com geometrias convencional e alisadora, e concluíram que os valores médios obtidos são menores com o uso da ferramenta *wiper*. Porém, ao analisar as variações dinâmicas de tais forças, a utilização da ferramenta *wiper* pode resultar em uma maior amplitude, ou seja, uma maior oscilação da força (maior vibração).

2. METODOLOGIA

Para realizar o experimento, foi utilizado o torno de comando numérico Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II, mostrado na Fig.(3a). Como peça de trabalho, utilizou-se um tarugo cilíndrico de aço AISI 420C dividido em 8 segmentos como mostra a Fig.(4b). Cada segmento, de comprimento aproximado 8 mm, corresponde a uma amostra. No experimento, foram analisadas 24 amostras, o que corresponde à usinagem do mesmo corpo de prova nas três situações de lubrificação.

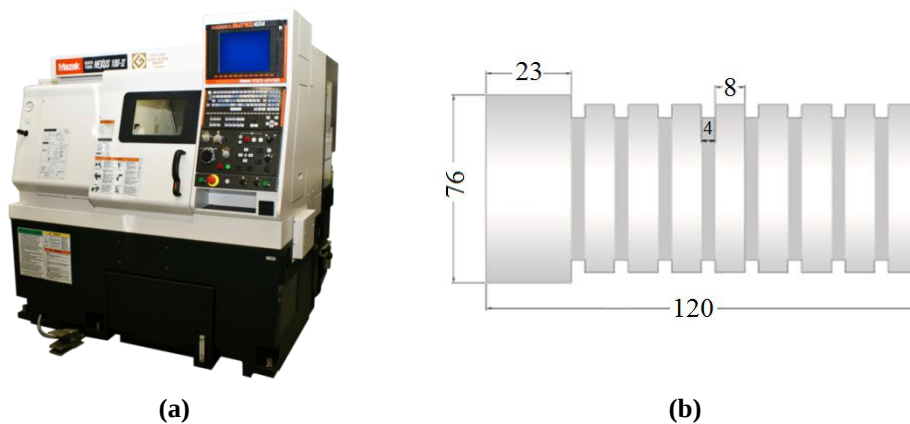


Figura 3. (a) Torno CNC Mazak QTN 100-II; (b) Dimensões do corpo de prova [mm].

Utilizou-se o aço inoxidável martensítico AISI 420C na forma de barra cilíndrica recozida com $\varnothing 76$ mm. A composição química foi obtida no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF/UFRGS) através métodos instrumentais com a utilização do Spectrolab – Analytical Instruments – LVFA18B, equipamento para análise de metais por meio de um sistema de leitura óptica. A Tabela 1 mostra os resultados encontrados.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável martensítico AISI 420C.

Elemento	Fe	Cr	C	Mn	Ni	Si	S	Outros
Peso [%]	85,8	12,95	0,329	0,326	0,234	0,176	0,0098	0,185

Foi realizado um ensaio metalográfico com amostras de material que foram submetidas a ataques de reagentes químicos Marble e Ácido Oxálico (Fig. 4), e observou-se sua microestrutura no Microscópio Óptico Olympus BX51M do LAMEF/UFRGS a fim de confirmar se a barra forjada havia passado por algum processo de recozimento prévio.

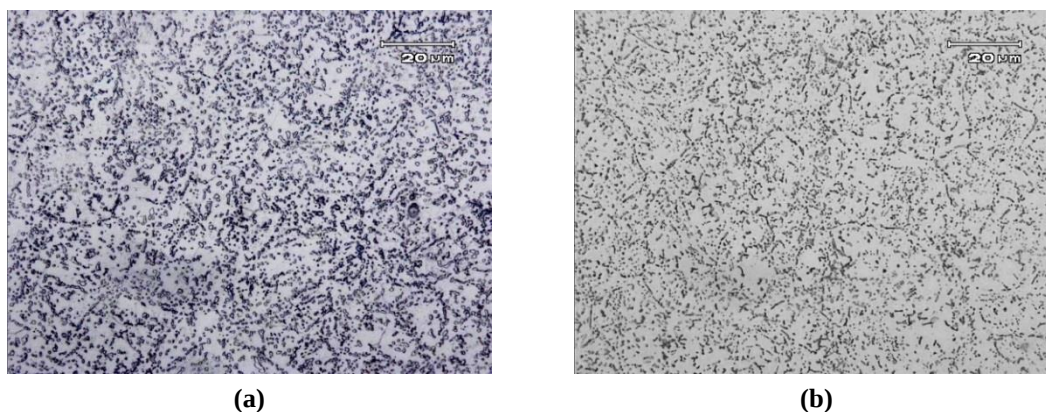


Figura 4. Microestrutura do AISI 420C: (a) carbonetos esferoidizados – ataque com reagente Marble; (b) ataque com reagente de ácido oxálico.

A dureza do material esferoidizado foi determinada no LAMEF/UFRGS a partir da média de cinco medições realizadas em escala Brinell através de um Durômetro Wolpert (carga de 187,5 kgf), cujo resultado foi 170 HB. De acordo com Callister (2012), este valor pode variar de 170 a 220 HB.

A ferramenta *wiper* utilizada (Fig. 5) possui geometria triangular e quebra cavacos para torneamento de acabamento com formato básico negativo (T-Max® P), raio de ponta $r_\epsilon = 0,8$ mm e cobertura MTCVD (*Medium Temperature Chemical Vapor Deposition*) TiCN/Al₂O₃/TiN. O sistema de fixação do inserto no suporte é do tipo cunha-grampo, que minimiza a vibração. O porta-ferramentas MTJNL 2020K utilizado possui ângulo de posição $\chi_r = 93^\circ$.

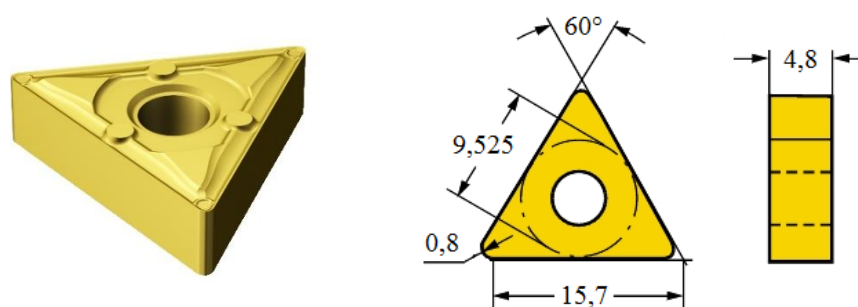


Figura 5 – Representação esquemática da ferramenta *wiper* TNMX 16 04 08-WF 2015 (Sandvik, 2012).

Os parâmetros de entrada utilizados estão representados na Tab. (2). As oito combinações (amostras) foram feitas utilizando as condições com lubrificação abundante, com quantidade reduzida (QRF) e a seco.

Tabela 2 – Combinação de parâmetros aplicados em cada amostra

Amostra	a_p [mm]	f [mm/volta]	v_c [m/min]
1	1	0,1	290
2	1	0,1	240
3	1	0,2	290
4	1	0,2	240
5	2	0,1	290
6	2	0,1	240
7	2	0,2	290
8	2	0,2	240

Nos ensaios com lubrificação abundante empregou-se o sistema do próprio torno Mazak que gera a inundação do fluido em toda a área de corte com uma vazão de aproximadamente 720 l/h. O fluido de corte selecionado foi o biolubrificante isento de óleos BD-Fluid B90 fabricado pela Bondmann Química diluído em água a 5%.

Já nos ensaios com QRF utilizou-se o Nebulizador IV fornecido pela Tapmatic do Brasil com o bico injetor (pulverizador) fixado a 20 mm da aresta de corte da ferramenta. Foi aplicado o fluido de corte integral sintético à base de água Quimatic Jet a uma vazão de 4 l/h. A pressão na linha de ar comprimido foi mantida em 2 kPa.

O equipamento utilizado para aquisição dos dados de força foi um dinamômetro piezoeletrônico Kistler modelo 9129A que permite a aquisição das três componentes ortogonais da força de usinagem (Fig. 6). As vantagens deste sistema em

forma de plataforma são: a separação das três componentes (eixos X, Y e Z), a altíssima rigidez mecânica e a frequência natural elevada ($\approx 3,75$ kHz) (Nassif *et al.*, 2013).

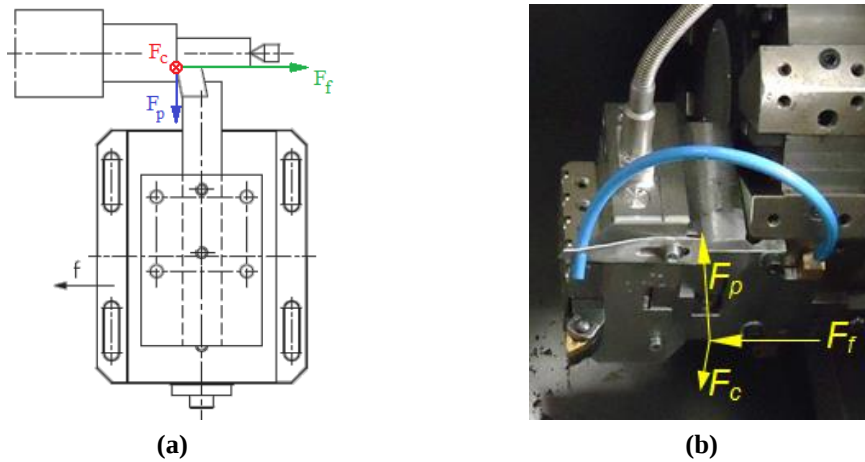


Figura 6. Dinamômetro estacionário Kistler modelo 9129A: (a) esquema das forças durante o torneamento cilíndrico externo (adaptado de Kistler, 2009); (b) sistema instalado no Torno CNC Mazak QTN 100-II.

A partir da montagem do experimento foi realizado o torneamento do corpo de prova de forma a obter as 24 amostras a serem avaliadas. Para tal foi realizado inicialmente o torneamento a seco com a aplicação de uma combinação de parâmetros diferente em cada segmento do corpo de prova. O mesmo procedimento foi repetido para os cortes com fluido em abundância e, por último, com quantidade reduzida (QRF). Dessa forma, os valores individuais das forças [de corte (F_c), de avanço (F_f) e passiva (F_p)] para cada amostra (ou seção) foram obtidos.

3. RESULTADOS

A Figura (7) mostra os gráficos das forças de corte (F_c), de avanço (F_f), passiva (F_p) e de usinagem (F) obtidos a partir dos 24 ensaios realizados (oito amostras para cada condição de lubrificação).

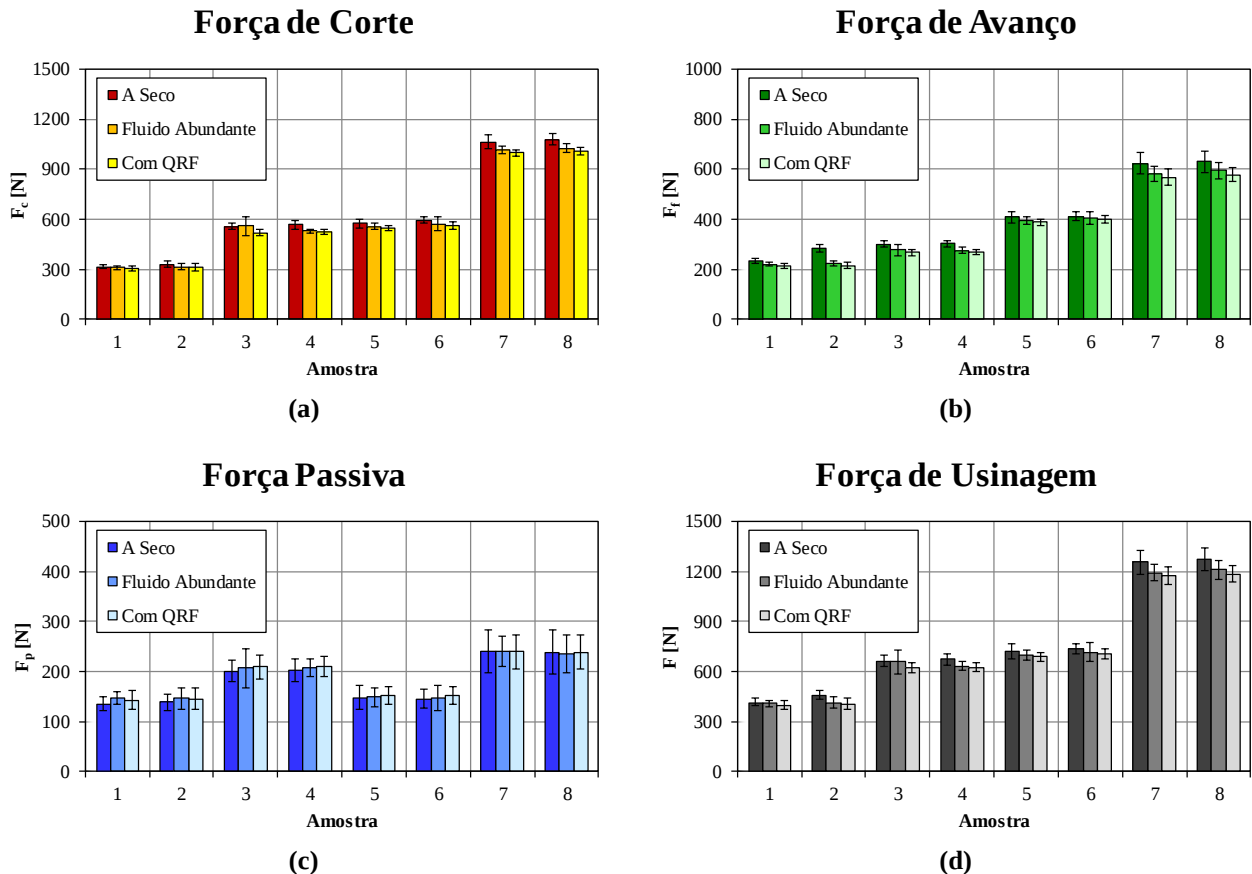


Figura 7. Representação das forças nas três situações de lubrificação: (a) F_c ; (b) F_f ; (c) F_p ; (d) F .

As barras de erros nos gráficos da Fig. (7) representam as variações dos sinais de força (incerteza expandida) determinadas a partir do cálculo do desvio padrão de todos os valores de força obtidos em cada instante de tempo durante o ensaio de cada amostra. O valor do desvio padrão encontrado foi multiplicado por 1,96 obtendo assim a incerteza para uma confiança de 95%. O valor nominal da força refere-se à média dos mesmos valores.

3.1. Influência dos Parâmetros de Corte na Intensidade das Forças

O que se observa pelos gráficos da Fig. (7) é o evidente aumento das forças com o incremento de 100% na profundidade de corte (a_p) e no avanço (f), e um ligeiro aumento das forças com a diminuição de 17% na velocidade de corte (v_c) em todas as condições de lubrificação. Para ilustrar, o aumento médio da força de usinagem (F_c) foi de 86,6% para o acréscimo de a_p , 78,2% para o acréscimo de f e 1,3% para o decréscimo de v_c . Os resultados comprovam o que foi apresentado na Fig. (1).

Como o ângulo de posição é grande ($\chi_r = 93^\circ$), tem-se como resultado uma maior força de avanço (F_f) e uma menor força passiva (F_p), conforme cita Klocke (2011). Além disso, observam-se influências muito mais significativas de a_p sobre F_f (contrária ao movimento de avanço) e de f sobre F_p (contrária ao movimento de profundidade). Isto se deve possivelmente à alteração da geometria da seção de corte: um aumento de a_p promove um aumento da largura de corte (b) que é perpendicular ao avanço longitudinal da ferramenta, enquanto que um aumento de f promove um aumento da espessura de corte (h) que é perpendicular ao avanço transversal da ferramenta.

3.2. Influência do Fluido na Intensidade das Forças

De modo a analisar detalhadamente a influência do fluido de corte nos valores de força, a Tab. (3) mostra a redução (↓) ou o aumento (↑) percentual das forças na usinagem utilizando fluido em abundância e em QRF em comparação à usinagem a seco. Para efeito de julgamento foram considerados somente os percentuais maiores ou iguais a 1%.

Tabela 3. Redução percentual das forças em relação ao corte a seco.

Amostra	Fluido em Abundância				Fluido em Quantidade Reduzida			
	F_c	F_f	F_p	F	F_c	F_f	F_p	F
1	↓1,8	↓5,8	↑7,7	↓2,0	↓4,0	↓9,4	↑4,9	↓4,7
2	↓4,4	↓22	↑5,5	↓9,7	↓5,9	↓24	↑5,0	↓11
3	---	↓7,8	↑2,8	↓1,0	↓6,8	↓11	↑4,2	↓6,6
4	↓6,3	↓9,2	↑2,4	↓6,1	↓7,5	↓11	↑4,1	↓7,1
5	↓3,1	↓3,6	---	↓3,1	↓4,8	↓4,9	↑2,5	↓4,6
6	↓3,6	↓1,5	↑1,2	↓2,8	↓5,6	↓3,2	↑4,3	↓4,4
7	↓4,7	↓6,3	---	↓4,9	↓6,2	↓8,7	---	↓6,6
8	↓4,9	↓5,5	↓1,5	↓4,9	↓6,8	↓8,1	---	↓6,9

De maneira geral, consta-se através da avaliação da Tab. (3) que, independente da combinação de parâmetros de corte, as intensidades das forças de corte (F_c), de avanço (F_f) e de usinagem (F) tendem a diminuir e a da força passiva (F_p) tende a aumentar com a utilização de fluido de corte (seja em abundância ou em QRF) no torneamento do aço inoxidável AISI 420C com ferramenta alisadora (*wiper*).

3.2.1. Situação do corte com fluido em abundância

A redução da força F foi mais significativa para as amostras 2 (9,7%) e 4 (6,1%), as quais combinavam a menor profundidade de corte ($a_p = 1$ mm) com a menor velocidade de corte ($v_c = 240$ m/min). Por outro lado, os piores resultados foram obtidos nas amostras 1 (2,0%) e 3 (1,0%), as quais combinavam a menor profundidade de corte ($a_p = 1$ mm) com a maior velocidade de corte ($v_c = 290$ m/min). Isso se deve, pois quanto maior a velocidade de corte mais difícil é a ação lubrificante do fluido, já que o mesmo tem dificuldade de adentrar nas interfaces peça/ferramenta e ferramenta/cavaco (Machado *et al.*, 2009; Diniz *et al.*, 2010). Entretanto, esse mesmo efeito praticamente não foi sentido com a profundidade de corte maior ($a_p = 2$ mm) utilizada nas amostras de 5 a 8, provavelmente devido à relação a_p/r_e ser grande, o que incentiva as curvaturas lateral e vertical, e a penetração do fluido nas duas interfaces.

Ao analisar a redução na força de corte (F_c), destacam-se as amostras 3 e 4, as quais obtiveram o pior e o melhor resultado, respectivamente. A única diferença entre elas está na redução da velocidade de corte (respectivamente de $v_c = 290$ m/min para $v_c = 240$ m/min), que causa o fenômeno supracitado.

Ao analisar a redução na força de avanço (F_f), destacam-se as amostras 2 e 6, as quais obtiveram o melhor e o pior resultado, respectivamente. A diferença está no aumento da profundidade de corte (respectivamente de $a_p = 1$ mm para $a_p = 2$ mm). Neste caso, a melhor explicação seria o maior comprimento de contato da aresta de corte com o aumento da profundidade, impedindo a penetração do fluido na interface ferramenta/peça.

No caso do aumento da força passiva (F_p), vale analisar separadamente as situações com $a_p = 2$ mm (amostras de 5 a 8) e $a_p = 1$ mm (amostras de 1 a 4). No primeiro caso (maior a_p), pode-se dizer que praticamente não houve influência significativa sobre F_p (a variação máxima foi de $\pm 1,5\%$). Já no segundo caso (menor a_p), a influência do avanço passa a ser significativa: o aumento é maior (5,5 a 7,7%) para o menor avanço ($f = 0,1$ mm/volta). Isto pode estar relacionado com a capacidade de refrigeração e lubrificação do fluido.

3.2.2. Situação do corte com fluido em quantidade reduzida

Os resultados com QRF foram semelhantes entre si com reduções de 4,4 a 7,1% na força F , com exceção para a amostra 2 que se destacou obtendo 11% de redução. Este último, porém, foi puxado mais pela redução na força F_f , a qual foi de 24%. Assim como no caso com lubrificação por inundação, um menor comprimento de contato da aresta de corte com a peça pode vir a facilitar a penetração do lubrificante na interface ferramenta/peça.

Com relação à redução da força F_c , assim como na utilização com fluido em abundância, o melhor resultado encontrado também foi para a amostra 4 ($a_p = 1$ mm, $f = 0,2$ mm/volta, $v_c = 240$ m/min). Já o pior caso foi para a amostra 1 ($a_p = 1$ mm, $f = 0,1$ mm/volta, $v_c = 290$ m/min). Contudo, em todos os casos, houve resultados satisfatórios (redução do coeficiente de atrito pela facilidade de penetração do lubrificante nas interfaces peça/ferramenta/cavaco), com reduções variando de 4,0% a 7,5%. De maneira geral, pode-se afirmar que os resultados com QRF foram ligeiramente superiores em todos os casos. Destaque para a amostra 3 ($a_p = 1$ mm, $f = 0,2$ mm/volta, $v_c = 290$ m/min), onde não houve redução de F_c para o caso com fluido abundante; porém, com QRF, a redução chegou a 6,8%.

No caso do aumento da força passiva (F_p), vale analisar separadamente as situações com $a_p = 1$ mm (amostras de 1 a 4) e $a_p = 2$ mm (amostras de 5 a 8). No primeiro caso (menor a_p), pode-se dizer que não houve variação significativa de f e v_c sobre F_p (os percentuais de aumento mantiveram-se entre 4,1 e 5,0%). Já no segundo caso (maior a_p), a influência do avanço passa a ser significativa: o aumento é maior (2,5 a 4,3%) para o menor avanço ($f = 0,1$ mm/volta). As diferenças nos resultados da força F_p na aplicação do fluido abundante em comparação à QRF podem estar relacionadas com uma maior capacidade de refrigeração do primeiro e uma maior capacidade de lubrificação do segundo em velocidades de corte maiores.

3.3. Projeto Fatorial Completo

Visando justificar estatisticamente os resultados, realizou-se um projeto fatorial completo composto por $2^3 = 8$ tratamentos (a_p , f , v_c) e três condições de lubrificação distintos (a seco, fluido em abundância e QRF) com o auxílio do software Minitab® 17. A Figura (8) mostra os resultados encontrados.

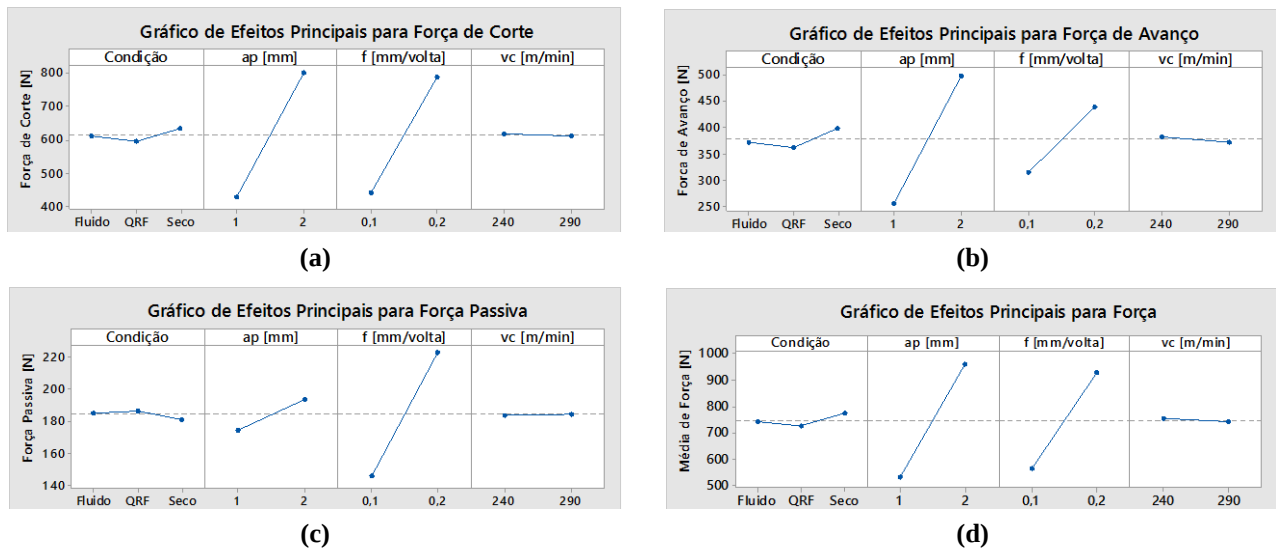


Figura 8. Gráficos dos efeitos principais: (a) Força de corte; (b) Força de avanço; (c) Força passiva; (d) Força de usinagem.

Verificou-se o efeito das variáveis principais de resposta (forças geradas no processo). Assim, pela análise da Fig. (8) foi possível identificar que a_p e f realmente possuem influência direta sobre os valores de força, como visualizado anteriormente pela Fig. (7) e ilustrado na Fig. (1).

Pode-se verificar também que existe pouca influência na variação dos valores de força encontrados na utilização do fluido em abundância e em QRF. Já na condição a seco houve um acréscimo dos valores para as forças de corte (F_c), de avanço (F_f) e de usinagem (F); já na força passiva (F_p) houve uma diminuição, conforme já identificado pela Tab. (3). Observa-se também influências mais significativas de a_p sobre F_f e de f sobre F_p , como supramencionado.

4. CONCLUSÕES

Avaliando os resultados encontrados para as forças geradas no torneamento do aço inoxidável AISI 420C utilizando ferramenta *wiper* em diferentes condições de lubrificação é possível chegar às seguintes conclusões:

- Como consolidado na literatura, as forças aumentam com o aumento da profundidade de corte, com o aumento do avanço e com a diminuição da velocidade de corte.
- Observou-se que a força de avanço sofre maior influência da profundidade de corte e que a força passiva sofre maior influência do avanço.
- O corte a seco apresentou bons resultados. Entretanto, a presença do lubrificante promove a redução da força de usinagem e de suas componentes (força de corte e força passiva). Isso pode aumentar a vida útil da ferramenta, o que geraria uma redução de custos com ferramentas e com consumo de energia.
- Quanto à viabilidade econômica de se utilizar o lubrificante, seria necessária uma análise mais detalhada dos custos associados ao número de troca de ferramentas em cada caso e dos custos adicionais que o fluido geraria.
- Dentre os sistemas por lubrificação, a usinagem com QRF gerou os melhores resultados (menores forças de corte, avanço e usinagem), servindo de alternativa às operações que não dispõem o uso de lubrificante.
- No caso de peças com uma relação comprimento/diâmetro superior a três, deve-se diminuir o avanço para evitar o crescimento acentuado da força passiva, a qual induz vibrações e prejudica o acabamento. No caso dos sistemas de lubrificação, o QRF é o que tende a gerar os maiores valores.

AGRADECIMENTOS

À Bondmann Química, pela doação do biolubrificante BD-Fluid B90; e à Quimatic/Tapmatic, pela doação do sistema Nebulizador IV e do fluido integral sintético à base de água Quimatic Jet.

REFERÊNCIAS

- Astakhov, V. P., 2008, "Ecological machining: near-dry machining". In: Davim, P. J. "Machining: Fundamentals and Recent Advances", Springer-Verlag London, p.195-223.
- Callister, W. D., 2012, "Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução", 8.ed, LTC, Rio de Janeiro, 817p.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L., 2010, "Tecnologia da usinagem dos materiais", 7.ed, Artliber, São Paulo, 206p.
- Favorit, 2012, "Catálogo Técnico Favorit", 12 ed., Favorit Aços Especiais, Brasil (catálogo comercial).
- Ji, X.; Li, B.; Zhang, X.; Liang, S. Y., 2014, "The effects of minimum quantity lubrication (MQL) on machining force, temperature and residual stress", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, v.15, n.11, p.2443-2451.
- Kalpakjian, S.; Schmid, S. R., 2010, "Manufacturing Engineering and Technology", 6.ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1176 p.
- Klocke, F., 2011, "Manufacturing Processes 1: Cutting", RWTH Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 506p.
- Kistler, 2009, "Cutting force measurement: precise measuring systems for metal-cutting", Kistler Group, Winterthur, Switzerland, 44p.
- Kurgin, S., 2013, "Minimum quantity lubrication (MQL) during machining of automotive components", Encyclopedia of Tribology, p. 2262-2266.
- Lisboa, F. C., Moraes, J. J.B., Hirashita, M. A., 2013, "Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências", 33º Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP 2013), 08-11 Outubro, 2013, Salvador, BA, 16p.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., da Silva, M. B., 2009, "Teoria da Usinagem dos Materiais", Edgard Blücher, São Paulo, 371 p.
- Nassif, F. B.; Rosa, G. C.; Souza, A. J., 2013, "Analysis of the resulting machining forces by using standard and wiper tools in dry finish turning of AISI 420", 22nd international Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), 3-7 Nov., Ribeirão Preto, SP, Brasil, 10 p.
- Ribeiro, J. L. S., 2006, "Forças de usinagem no fresamento de aços para matrizes", 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (POSMEC, 2006), 11-13 Dezembro, Uberlândia, 10 p.
- Rosa, G. C.; Souza, A. J., 2014, "Estudo comparativo das ferramentas alisadora e convencional através das forças e rugosidades resultantes do processo de torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420C", 8º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2014), 10-15 de agosto, Uberlândia, MG, 10p.
- Sandvik, 2012, "Manual Técnico de Usinagem, Parte A – Torneamento Geral", Sandvik Coromant, São Paulo, 433 p.
- Silva, L. R.; Coelho, R. T.; Bezerra, A. A.; Braghini Jr., A., 2003, "Influências da mínima quantidade de lubrificante no torneamento do Inconel 718 usando alta velocidade de corte", 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF 2003), 18-21 de março, 2003, Uberlândia, MG, 10 p.
- Stachurski, W.; Kruszyński, B.; Midera, S., 2012, "Influence of cutting conditions in turning with wiper type inserts on surface roughness and cutting forces", Mechanics and Mechanical Engineering, v. 16, n. 1, p. 25-32.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

VERIFICATION OF THE FORCES GENERATED ON THE AISI 420C TURNING USING WIPER TOOL WITH DRY, FLOOD AND REDUCED QUANTITY LUBRICANT

André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br

Roberto Isoppo Rodrigues, roberto.ir@hotmail.com

Guilherme Cortelini da Rosa, guilherme.cortelini@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) – Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) – Rua Sarmento Leite, 425 – Porto Alegre, RS – CEP 90050-170.

Abstract: A comparative verification of the status of the force signals generated in the AISI 420C stainless steel cylindrical turning applying carbide tool with wiper geometry and corner radius $r_c = 0.8$ mm for different combinations of cutting parameters and cutting fluids is intended. For this purpose, two depths of cut (a_p), two feed-rates (f) and two cutting speeds (v_c) were considered according to the tool manufacturer's recommendations. The methods of cutting-fluid applications involve flooding, reduced quantity lubricant (QRF) cutting and dry cutting. The force signals of the orthogonal components of machining force F (passive force F_p , main cutting force F_c and feed force F_f) acquired for the 24 samples show that, for all cutting-fluid applications, the increment of depth of cut affects significantly on increasing F_c and F_f components and minor in F_p . The increment of feed-rate affects over the increased F_c , followed by F_p and, finally, F_f . However the increment of cutting speed caused a small decrease in F_c and F_f , but did not change the intensity of F_p . The application of QRF generated a small reduction of F_c and F_f values and a small increase F_p in comparison with the use of flood cutting; for dry cutting was observed the opposite: increased of F_c and F_f and reduction of F_p . Furthermore, the lowest values of machining force F was generated with the application of QRF, both the average values as to their fluctuations. Thus, the use of QRF ensures a better penetration of the lubricant through the cutting zone, reducing the coefficient of friction and easing the AISI 420C stainless steel turning.

Keywords: Turning, Machining forces, AISI 420C stainless steel, Wiper tool geometry, Cutting fluids