

ANÁLISE DOS ESFORÇOS DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 52100 ENDURECIDO

José Edmilson Martins Gomes, jedmilsongomes@yahoo.com.br

Étory Madrilles Arruda, etory@msn.com

José Veríssimo Ribeiro de Toledo, verissimo@unifei.edu.br

João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br

Gilbert Silva, gilbert@unifei.edu.br

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) - Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá - MG

Resumo: Com a evolução dos processos de usinagem, no que tange ao desenvolvimento de máquinas-ferramentas mais rígidas e precisas à altas rotações, e de materiais para ferramentas de corte mais duros e resistentes ao desgaste em altas temperaturas, atualmente é possível tornear materiais endurecidos, o que há alguns anos só podiam ser usinados por retificação. O torneamento de materiais endurecidos, quando comparado à retificação, pode apresentar algumas vantagens, como: possibilidade de não usar fluido de corte, eliminação de etapas do processo de fabricação, aumento da produtividade, baixo consumo de energia por volume de material usinado e possibilidade de realizar várias operações numa mesma fixação, garantindo as características geométricas da peça e reduzindo o tempo de usinagem. O objetivo deste trabalho consistiu em analisar os esforços de corte provenientes da operação de torneamento a seco do aço ABNT 52100 endurecido (60 ± 2 HRC), utilizando a metodologia de superfície de resposta. As ferramentas de corte utilizadas foram insertos de cerâmica mista ($Al_2O_3 + TiC$) revestidos com TiN e as variáveis de entrada foram a velocidade de corte, o avanço da ferramenta e a profundidade de usinagem. Desta forma, pôde-se verificar que todas as variáveis de entrada apresentaram influência sobre os esforços de corte. A força passiva apresentou a maior componente entre os esforços de corte, sendo seguida pela força de corte e pela força de avanço, respectivamente. Os menores esforços de corte foram obtidos utilizando baixos valores de avanço, profundidade de usinagem e velocidade de corte.

Palavras-chave: torneamento duro, aço ABNT 52100, esforços de corte, metodologia de superfície de resposta.

1. INTRODUÇÃO

O chamado torneamento duro é definido como o torneamento de materiais com dureza superior a 45 HRC, utilizando baixos valores de avanço e de profundidade de usinagem (Revel et al, 2016 e Bouacha et al, 2010). De acordo com Campos (2015) e Davim (2011), a usinagem de materiais na forma endurecida era, há poucos anos, executada em sua grande maioria por retificação. No entanto, atualmente, o torneamento duro tem se tornado uma alternativa viável na substituição da retificação em várias indústrias (Revel et al, 2016).

Segundo Matsumoto (1998), uma das principais vantagens do torneamento duro é a possibilidade de se obter as dimensões finais de uma peça sem a necessidade da retificação, contribuindo desta forma com a redução do custo de produção e com o aumento da produtividade. Segundo Abrão (2005), uma outra vantagem do torneamento duro é a eliminação do risco de distorções da peça durante a etapa de tratamento térmico e o subsequente retrabalho.

Uma comparação entre as características do torneamento duro e da retificação é apresentada na Fig. (1), onde os pontos destacados próximos à periferia da figura correspondem aos melhores resultados. Assim, observa-se que o torneamento duro apresenta melhores resultados que a retificação no que diz respeito à: possibilidade de usar geometrias complexas; é um processo mais flexível; permite alta taxa de remoção de material e também possui maior compatibilidade ambiental, pois permite eliminar o uso de fluidos de corte durante a usinagem. Por outro lado, a retificação apresenta melhores resultados que o torneamento duro em relação à: precisão de forma e dimensão de peças; alta qualidade no acabamento superficial e maior confiabilidade do processo.

De acordo com a Fig. (1), pode-se verificar que a retificação gera menores valores de tensão residual na peça usinada quando comparado ao torneamento duro, entretanto, segundo Campos (2015), as tensões residuais geradas pela retificação são geralmente de tração e são ocasionadas pelo efeito térmico durante a usinagem. Em contrapartida, as tensões residuais geradas no torneamento são geralmente compressivas e ocorrem devido às deformações plásticas e elásticas inerentes à formação do cavaco. Segundo Machado et al (2009) e Abrão & Aspinwall (1996), as tensões residuais compressivas geradas pelo torneamento proporcionam maior vida aos componentes quando submetidos à fadiga mecânica.

De acordo com Campos (2015), os parâmetros de corte utilizados no torneamento duro são típicos de operações de acabamento, sendo os valores de velocidade de corte (V_c) e profundidade de usinagem (a_p) inferiores aos valores utilizados no torneamento de materiais não endurecidos. Os valores de avanço da ferramenta (f) são definidos de acordo com o acabamento superficial desejado para a peça. Segundo Meddour et al (2015), como as condições de corte do torneamento duro são diferentes das condições de corte do torneamento convencional, o comportamento dos esforços de corte destas

operações também é diferente. De acordo com Abrão (2005), os esforços de corte no torneamento duro podem ser até 80% maiores que no torneamento de materiais não endurecidos.

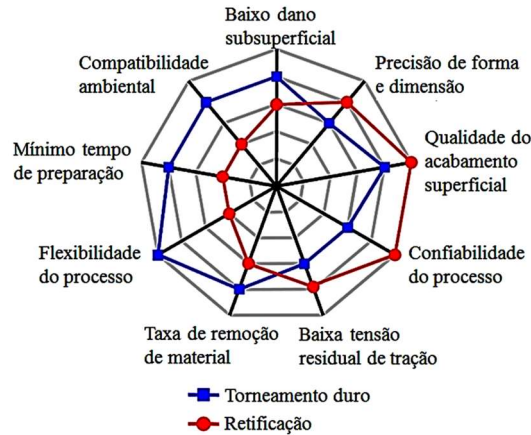


Figura 1. Características do torneamento duro e da retificação (Fonte: adaptado de Klocke et al, 2005).

Meddour et al (2015) estudaram o torneamento do aço ABNT 52100 endurecido (59 HRC), utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (70% Al_2O_3 + 30% TiC), classe CC650. Assim, os autores verificaram uma forte influência da profundidade de usinagem nos esforços de corte. O avanço da ferramenta também se mostrou influente, no entanto, com menor contribuição. Já a velocidade de corte não apresentou influência sobre os esforços de corte. De acordo com os autores, a força passiva se mostrou como a maior componente dos esforços de corte para pequenas profundidades de usinagem (0,05 e 0,15 mm), sendo seguida pela força de corte e de avanço, respectivamente. Entretanto, com o aumento da profundidade de usinagem para 0,25 mm, a força de corte passou a ser a maior componente dos esforços de corte, sendo seguida pela força passiva e de avanço, respectivamente.

Azizi et al (2012) estudaram o torneamento de aços ABNT 52100 endurecidos (46, 52 e 62 HRC), utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (Al_2O_3 + TiC), classe CC6050. Assim, segundo os autores, os esforços de corte mostraram-se influenciados, principalmente, pela profundidade de usinagem, pela dureza do material usinado e pelo avanço da ferramenta. A velocidade de corte apresentou pequena influência sobre os esforços de corte. Os valores encontrados para a força passiva foram, no mínimo, 1,06 vezes superiores aos valores encontrados para a força de corte. Os maiores valores encontrados para a força passiva foram 2,62 vezes superiores aos valores da força de corte. Segundo os autores, as faixas de valores encontrados para a força de avanço (F_f), força passiva (F_p) e força de corte (F_c) foram, respectivamente, de: $F_f = 10,05$ a $118,57$ N; $F_p = 40,26$ a $298,23$ N e $F_c = 28,02$ a $172,30$ N.

De acordo com Machado et al (2009) e Diniz et al (2008), o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nas operações de usinagem são muito importantes, pois eles afetam a potência necessária para o corte, as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta, influenciando a viabilidade econômica da operação. Desta forma, o objetivo deste trabalho consiste em analisar os esforços de corte provenientes da operação de torneamento a seco do aço ABNT 52100 endurecido (60 ± 2 HRC), utilizando como técnica de projeto e análise de experimentos (DOE) a metodologia de superfície de resposta (RSM).

2. METODOLOGIA

Os experimentos de torneamento foram realizados no Laboratório de Automação da Manufatura do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. Para a execução dos experimentos de torneamento utilizou-se um torno CNC Nardini Logic 175, que possui rotação máxima de 4.000 rpm e potência máxima na árvore de 5,5 kW, conforme Fig. (2a).

Os corpos de prova utilizados eram seções cilíndricas do aço ABNT 52100, comumente utilizado na fabricação de componentes automotivos. As dimensões dos corpos de prova eram de 50 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento. Estes corpos de prova foram previamente temperados e revenidos, e assim, obtiveram uma dureza de 60 ± 2 HRC. A composição química típica do aço ABNT 52100 é indicada na Tab. (1).

As variáveis de entrada selecionadas no processo de torneamento foram a velocidade de corte (V_c), o avanço da ferramenta (f) e a profundidade de usinagem (a_p), conforme Tab. (2). Os níveis das variáveis de entrada foram definidos conforme recomendação do fabricante das ferramentas. As ferramentas de corte utilizadas foram insertos de cerâmica mista (Al_2O_3 + TiC) revestidos com TiN, código ISO CNGA 120408 S01525, classe CC6050, e o porta-ferramentas utilizado possui código ISO DCLNR 2525M 12, ambos fabricados pela Sandvik Coromant. A combinação entre a

ferramenta de corte e o porta-ferramentas gera uma geometria efetiva de corte com a seguinte configuração: ângulo de posição (χ_f) = 95°, ângulo de folga (α_o) = 6°, ângulo de saída (γ_o) = -6° e ângulo de inclinação (λ_s) = -6°.

Utilizando das metodologias de projeto de experimentos (DOE) e de superfície de resposta (RSM), os experimentos de torneamento foram aleatorizados por níveis em um arranjo composto central (CCD), sendo cada experimento executado uma única vez com uma ferramenta de corte nova, totalizando vinte experimentos. A Tabela (3) apresenta o arranjo CCD utilizado na execução dos experimentos. Este arranjo corresponde a uma superfície de resposta com oito pontos fatoriais, seis pontos centrais, seis pontos axiais e $\alpha = 1,41$.



Figura 2. a) Torno CNC Nardini Logic 175; b) Detalhe de um experimento (Fonte: autoria própria).

Tabela 1. Composição química do aço ABNT 52100 (Fonte: ASM International Handbook Committee, 1990).

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr
0,98 - 1,10	0,25 - 0,45	0,025	0,025	0,15 - 0,35	1,30 - 1,60

Tabela 2. Variáveis de entrada da operação de torneamento e seus respectivos níveis (Fonte: autoria própria).

Variáveis de entrada	Níveis				
	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Velocidade de corte [m/min]	91,5	105,0	137,5	170,0	183,5
Avanço [mm/rot]	0,03	0,05	0,09	0,13	0,15
Profundidade de usinagem [mm]	0,16	0,20	0,30	0,40	0,44

Tabela 3. Arranjo CCD utilizado na execução dos experimentos (Fonte: autoria própria).

Número de Experimentos	Variáveis de entrada codificadas		
	V_c	f	a_p
1	-1,00	1,00	-1,00
2	0,00	0,00	-1,41
3	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	1,41
5	1,00	1,00	1,00
6	-1,41	0,00	0,00
7	1,41	0,00	0,00
8	0,00	-1,41	0,00
9	0,00	0,00	0,00
10	1,00	-1,00	1,00
11	-1,00	-1,00	1,00
12	0,00	0,00	0,00
13	0,00	1,41	0,00
14	-1,00	-1,00	-1,00
15	1,00	-1,00	-1,00
16	1,00	1,00	-1,00
17	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
20	-1,00	1,00	1,00

As variáveis de resposta da operação de torneamento foram a força de corte (F_c), a força de avanço (F_f) e a força passiva (F_p). Para medição dos esforços de corte foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico estacionário Kistler 9257BA com três canais, um amplificador de sinais Kistler 5233A e o software Dynoware, também fornecido pela Kistler®. Os dados das respostas foram analisados estatisticamente através do software Minitab® e para a geração dos gráficos dos esforços de corte empregou-se o software Scilab®.

A influência das variáveis de entrada e suas interações sobre as respostas força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p) foi verificada utilizando a análise de variância (ANOVA) com 5% de nível de significância (valor-P).

3. RESULTADOS

A Figura (3) apresenta um comportamento típico dos esforços de corte resultantes dos experimentos de torneamento deste trabalho. A Tabela (4) apresenta o arranjo experimental com os resultados dos esforços de corte dos vinte experimentos realizados. Os valores dos esforços de corte apresentados na Tab. (4) representam as médias aritméticas de três medições destes esforços, realizadas no início, durante e ao final de cada intervalo de corte. Entende-se por intervalo de corte, o intervalo de tempo em que a ferramenta de corte efetivamente executa o corte do material. Na Figura (3), por exemplo, o intervalo de corte está compreendido, aproximadamente, entre 3,5 e 41,5 segundos.

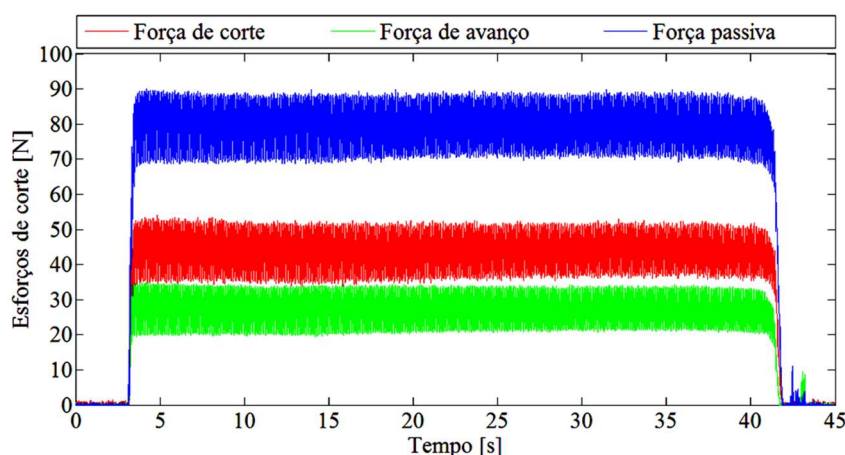


Figura 3. Esforços de corte na operação de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, com $V_c = 137,5$ m/min, $f = 0,09$ mm/rot e $a_p = 0,16$ mm (Fonte: autoria própria).

Tabela 4. Resultados experimentais dos esforços de corte (Fonte: autoria própria).

Número de Experimentos	Variáveis de entrada			Esforços de corte		
	V_c [m/min]	f [mm/rot]	a_p [mm]	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
1	105,00	0,13	0,20	63,57	49,61	111,16
2	137,50	0,09	0,16	43,94	27,18	79,66
3	137,50	0,09	0,30	85,39	64,55	120,88
4	137,50	0,09	0,44	105,70	92,03	139,66
5	170,00	0,13	0,40	118,65	84,57	150,79
6	91,50	0,09	0,30	75,88	58,44	119,28
7	183,50	0,09	0,30	64,15	49,40	106,62
8	137,50	0,03	0,30	45,09	54,47	91,54
9	137,50	0,09	0,30	77,29	62,74	128,38
10	170,00	0,05	0,40	60,47	60,74	115,80
11	105,00	0,05	0,40	70,64	69,43	112,42
12	137,50	0,09	0,30	85,76	68,14	129,80
13	137,50	0,15	0,30	120,65	88,02	163,25
14	105,00	0,05	0,20	27,11	23,77	59,57
15	170,00	0,05	0,20	27,31	20,33	67,02
16	170,00	0,13	0,20	66,58	38,87	105,15
17	137,50	0,09	0,30	83,82	67,52	125,85
18	137,50	0,09	0,30	81,77	67,80	133,97
19	137,50	0,09	0,30	82,81	66,15	127,78
20	105,00	0,13	0,40	125,51	92,84	160,83

De acordo com a Tab. (4), verifica-se que a força passiva (F_p) apresentou-se como a maior componente dos esforços de corte, sendo seguida pela força de corte (F_c) e pela força de avanço (F_f), respectivamente. De acordo com Yallese et al (2009), isto ocorre devido às grandes tensões aplicadas na parte arredondada da ponta da ferramenta, que tem um raio de ponta (R_e) igual a 0,8 mm, e também, por se trabalhar com baixos valores de profundidade de usinagem ($a_{p\max} = 0,55 R_e$). Segundo Tönshoff et al (2000), o uso de um alto ângulo de inclinação (λ_s) negativo também promove o aumento da força passiva, contribuindo para que esta seja a maior componente dos esforços de corte.

O menor valor encontrado para a força passiva foi 2,20 e 2,93 vezes superior aos menores valores encontrados para a força de corte e força de avanço, respectivamente. Por outro lado, o maior valor encontrado para a força passiva foi 1,30 e 1,76 vezes superior aos maiores valores encontrados para a força de corte e força de avanço, respectivamente.

A Tabela (5) apresenta o resultado da ANOVA para a força passiva (F_p). Assim, analisando o valor observado da distribuição F, pode-se verificar que o avanço da ferramenta (f) e a profundidade de usinagem (a_p) apresentam grande significância estatística na variação da resposta, contribuindo com 43,92% e 46,29%, respectivamente. Analisando os termos individuais, a velocidade de corte (V_c) não apresentou significância estatística sobre a força passiva, no entanto, quando analisados os termos quadráticos, verifica-se que a velocidade de corte contribui com 3,53% na variação da resposta. Ainda analisando os termos quadráticos, verifica-se que a profundidade de usinagem também apresenta significância estatística sobre a resposta, contribuindo com 5,22%.

Tabela 5. Análise de variância para a força passiva - F_p (Fonte: autoria própria).

ANOVA - F_p					
Fonte	DF	SS	MS	F	P
V_c	1	44,4	44,44	2,20	0,169
f	1	6279,3	6279,35	311,17	0,000
a_p	1	6618,5	6618,52	327,98	0,000
V_c^2	1	504,7	504,69	25,01	0,001
f^2	1	1,4	1,37	0,07	0,800
a_p^2	1	746,1	746,13	36,97	0,000
$V_c * f$	1	90,3	90,32	4,48	0,060
$V_c * a_p$	1	8,2	8,20	0,41	0,538
$f * a_p$	1	5,0	4,99	0,25	0,630
Erro residual	10	201,8	20,18		
Falta de ajuste	5	107,7	21,54	1,14	0,443
Erro puro	5	94,1	18,82		
Total	19	14650,4			
S		4,49			
Press		949,11			
R^2		98,62%			
R^2 (Adj)		97,38%			
R^2 (Pred)		93,52%			

De acordo com a Tab. (5), o valor-P da “Falta de ajuste” é igual a 0,443, sendo superior ao nível de significância de 0,050. Desta forma, o modelo de regressão explica adequadamente a relação funcional entre as variáveis de entrada e a resposta. A falta de ajuste pode ocorrer se termos importantes do modelo, como interações ou termos quadráticos, não forem incluídos. O coeficiente de correlação R^2 igual a 98,62% é considerado bom e representa a proporção de variação na resposta que é explicada pelo modelo de regressão. O coeficiente que representa a eficiência de previsão do modelo, R^2 (Pred), é igual a 93,52% e está em conformidade com o coeficiente R^2 (Adj) igual a 97,38%, que indica a variabilidade total explicada pelo modelo de regressão após considerar as variáveis significativas. A Equação (1) representa o modelo de regressão para a força passiva, em termos das variáveis de entrada.

$$F_p = -259,283 + 2,262.V_c + 1032,010.f + 854,887.a_p - 0,007.V_c^2 - 249,559.f^2 - 931,987.a_p^2 - 2,585.V_c.f - 0,312.V_c.a_p - 197,500.f.a_p \quad (1)$$

A Figura (4) apresenta a evolução da força passiva (F_p) em função das variáveis de entrada. Em cada gráfico da Fig. (4), as variáveis de entrada não representadas são mantidas constantes em seus níveis médios ($V_c = 137,5$ m/min, $f = 0,09$ mm/rot e $a_p = 0,30$ mm). Desta forma, pode-se verificar que a força passiva é fortemente influenciada pelo avanço da ferramenta e pela profundidade de usinagem. O aumento do avanço da ferramenta e da profundidade de usinagem promoveram o aumento da força passiva. Segundo Chinchani & Choudhury (2013), Azizi et al (2012) e Bouacha et al (2010), o aumento destas variáveis promove o aumento da área da seção de corte, que por sua vez, aumenta não só a força passiva, como também as demais forças de corte e de avanço.

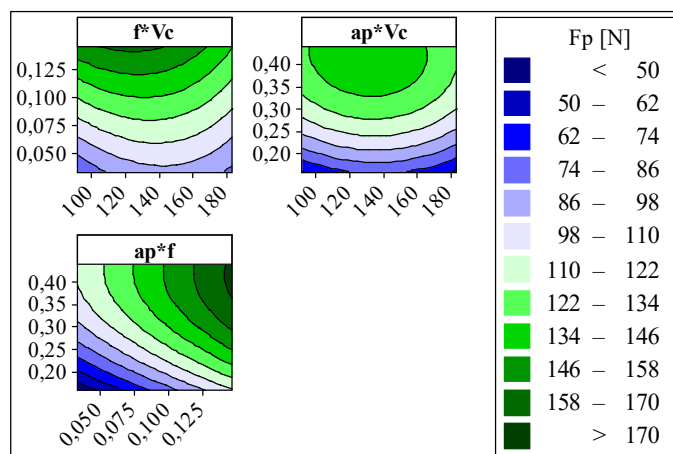


Figura 4. Superfícies de contorno para a força passiva - F_p (Fonte: autoria própria).

O menor valor obtido para a força passiva durante os experimentos foi de 59,57 N, com velocidade de corte de 105 m/min, avanço da ferramenta de 0,05 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,20 mm. Por outro lado, o maior valor obtido para a força passiva foi de 163,25 N, com velocidade de corte de 137,5 m/min, avanço da ferramenta de 0,15 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,30 mm.

A Tabela (6) apresenta o resultado da ANOVA para a força de corte (F_c). Assim, analisando o valor observado da distribuição F, pode-se verificar que o avanço da ferramenta (f) e a profundidade de usinagem (a_p) apresentam grande significância estatística na variação da resposta, contribuindo com 49,63% e 43,91%, respectivamente. A velocidade de corte (V_c) também apresenta significância estatística sobre a força de corte, porém, com menor contribuição, de 0,52%. Analisando os termos quadráticos, verifica-se que a velocidade de corte e a profundidade de usinagem apresentam significância estatística, e contribuem com 3,02% e 1,33% na variação da resposta, respectivamente. A interação entre o avanço da ferramenta e a profundidade de usinagem também apresenta significância estatística na variação da resposta, contribuindo com 1,19%.

Tabela 6. Análise de variância para a força de corte - F_c (Fonte: autoria própria).

ANOVA - F_c					
Fonte	DF	SS	MS	F	P
V_c	1	77,0	76,96	6,91	0,025
f	1	7282,2	7282,25	653,92	0,000
a_p	1	6443,0	6443,00	578,56	0,000
V_c^2	1	442,5	442,52	39,74	0,000
f^2	1	4,3	4,35	0,39	0,546
a_p^2	1	194,7	194,67	17,48	0,002
$V_c \cdot f$	1	4,7	4,68	0,42	0,531
$V_c \cdot a_p$	1	51,2	51,21	4,60	0,058
$f \cdot a_p$	1	174,1	174,10	15,63	0,003
Erro residual	10	111,4	11,14		
Falta de ajuste	5	63,4	12,69	1,32	0,383
Erro puro	5	47,9	9,59		
Total	19	14866,5			
S		3,34			
Press		537,49			
R^2		99,25%			
R^2 (Adj)		98,58%			
R^2 (Pred)		96,38%			

De acordo com a Tab. (6), o valor-P da “Falta de ajuste” é igual a 0,383, sendo superior ao nível de significância de 0,050. Desta forma, o modelo de regressão explica adequadamente a relação funcional entre as variáveis de entrada e a resposta. O coeficiente de correlação R^2 igual a 99,25% é considerado bom e representa a proporção de variação na resposta que é explicada pelo modelo de regressão. O coeficiente que representa a eficiência de previsão do modelo, R^2 (Pred), é igual a 96,38% e está em conformidade com o coeficiente R^2 (Adj) igual a 98,58%, que indica a variabilidade

total explicada pelo modelo de regressão após considerar as variáveis significativas. A Equação (2) representa o modelo de regressão para a força de corte, em termos das variáveis de entrada.

$$F_c = -199,421 + 1,971.V_c + 265,722.f + 519,653.ap - 0,007.V_c^2 - 444,657.f^2 - 476,054.ap^2 + 0,588.V_c.f - 0,778.V_c.ap + 1166,250.f.ap \quad (2)$$

A Figura (5) apresenta a evolução da força de corte (F_c) em função das variáveis de entrada. Em cada gráfico da Fig. (5), as variáveis de entrada não representadas são mantidas constantes em seus níveis médios ($V_c = 137,5$ m/min, $f = 0,09$ mm/rot e $a_p = 0,30$ mm). Desta forma, verifica-se que a força de corte é fortemente influenciada pelo avanço da ferramenta e pela profundidade de usinagem. O aumento destas variáveis promoveu o aumento da força de corte. De acordo com Machado et al (2009) e Diniz et al (2008), a força de corte é diretamente proporcional à pressão específica de corte e à área da seção de corte, no entanto, a pressão específica de corte diminui com o aumento da área da seção de corte. Apesar do aumento do avanço, isto é, o aumento da velocidade de avanço, diminuir o coeficiente de atrito ferramenta-peça, diminuindo a pressão específica de corte, a área da seção de corte foi mais fortemente influenciada pelo aumento do avanço da ferramenta e da profundidade de usinagem, resultando assim, no aumento da força de corte.

Analisando a Fig. (5), verifica-se que, apesar da velocidade de corte se apresentar pouco influente sobre a força de corte, o seu aumento reduziu a influência da profundidade de usinagem sobre a resposta. Além disso, é possível verificar que o aumento da velocidade de corte até 137,5 m/min promoveu o aumento da força de corte, porém, ao aumentar a velocidade de corte acima de 137,5 m/min, a força de corte diminuiu. De acordo com Meddour et al (2015) e Yallese et al (2009), o aumento da velocidade de corte eleva a temperatura de corte, reduzindo a resistência ao cisalhamento do material da peça e aumentando sua plasticidade, promovendo assim a diminuição da força de corte.

O menor valor obtido para a força de corte durante os experimentos foi de 27,11 N, com velocidade de corte de 105 m/min, avanço da ferramenta de 0,05 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,20 mm. Por outro lado, o maior valor obtido para a força de corte foi de 125,51 N, com velocidade de corte de 105 m/min, avanço da ferramenta de 0,13 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,40 mm.

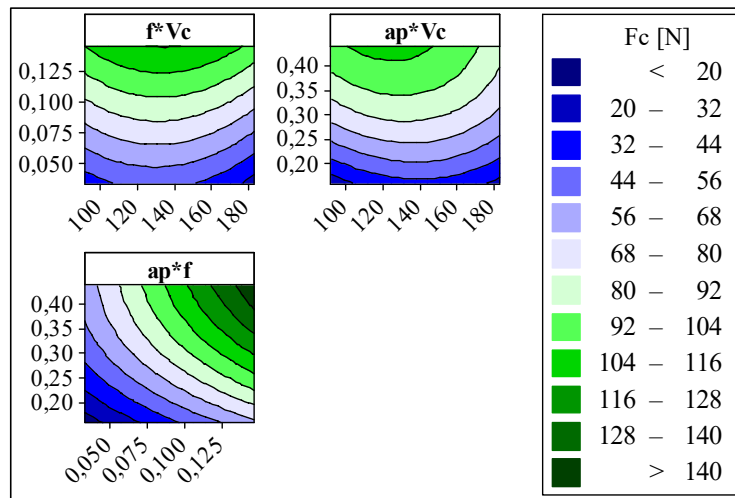


Figura 5. Superfícies de contorno para a força de corte - F_c (Fonte: autoria própria).

A Tabela (7) apresenta o resultado da ANOVA para a força de avanço (F_f). Assim, analisando o valor observado da distribuição F, pode-se verificar que a profundidade de usinagem (a_p) apresenta grande significância estatística na variação da resposta, contribuindo com 70,72%. O avanço da ferramenta (f) e a velocidade de corte (V_c) também apresentam significância estatística sobre a força de avanço, no entanto, com contribuições de 19,23% e 1,92%, respectivamente. Analisando os termos quadráticos verifica-se que a velocidade de corte e a profundidade de usinagem apresentam significância estatística e contribuem com a variação da resposta em 5,71% e 2,17%, respectivamente.

De acordo com a Tab. (7), o valor-P da “Falta de ajuste” é igual a 0,232, sendo superior ao nível de significância de 0,050. Desta forma, o modelo de regressão explica adequadamente a relação funcional entre as variáveis de entrada e a resposta. O coeficiente de correlação R^2 igual a 99,20% é considerado bom e representa a proporção de variação na resposta que é explicada pelo modelo de regressão. O coeficiente que representa a eficiência de previsão do modelo, R^2 (Pred), é igual a 95,51% e está em conformidade com o coeficiente R^2 (Adj) igual a 98,47%, que indica a variabilidade total explicada pelo modelo de regressão após considerar as variáveis significativas. A Equação (3) representa o modelo de regressão para a força de avanço, em termos das variáveis de entrada.

Tabela 7. Análise de variância para a força de avanço - F_f (Fonte: autoria própria).

ANOVA - F_f					
Fonte	DF	SS	MS	F	P
Vc	1	160,82	160,82	23,55	0,001
f	1	1611,55	1611,55	236,02	0,000
ap	1	5927,55	5927,55	868,11	0,000
Vc ²	1	478,57	478,57	70,09	0,000
f ²	1	13,43	13,43	1,97	0,191
ap ²	1	182,13	182,13	26,67	0,000
Vc * f	1	5,92	5,92	0,87	0,374
Vc * ap	1	0,97	0,97	0,14	0,715
f * ap	1	1,02	1,02	0,15	0,707
Erro residual	10	68,28	6,83		
Falta de ajuste	5	45,53	9,11	2,00	0,232
Erro puro	5	22,75	4,55		
Total	19	8493,45			
S		2,61			
Press		381,05			
R ²		99,20%			
R ² (Adj)		98,47%			
R ² (Pred)		95,51%			

$$F_f = -189,429 + 1,922.Vc + 213,496.f + 505,405.ap - 0,007.Vc^2 + 781,425.f^2 - 460,456.ap^2 - 0,662.Vc.f - 0,107.Vc.ap + 89,375.f.ap \quad (3)$$

A Figura (6) apresenta a evolução da força de avanço (F_f) em função das variáveis de entrada. Em cada gráfico da Fig. (6), as variáveis de entrada não representadas são mantidas constantes em seus níveis médios ($V_c = 137,5$ m/min, $f = 0,09$ mm/rot e $a_p = 0,30$ mm). Desta forma, verifica-se que a força de avanço é fortemente influenciada pela profundidade de usinagem. De acordo com Bagawade et al (2012), o aumento da profundidade de usinagem aumenta significativamente a espessura do cavaco, causando um crescimento no volume de material deformado e, consequentemente, um aumento na força de avanço.

Com relação ao avanço da ferramenta, verifica-se na Fig. (6) que o seu aumento promoveu o aumento da força de avanço. De acordo com Machado et al (2009), o aumento do avanço promove o aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, contribuindo, desta forma, para o aumento da força de avanço.

Ainda de acordo com a Fig. (6), verifica-se que o aumento da velocidade de corte até 137,5 m/min promoveu o aumento da força de avanço, no entanto, ao aumentar a velocidade de corte acima de 137,5 m/min a força de avanço diminuiu. De acordo com Meddour et al (2015) e Yallese et al (2009), o aumento da velocidade de corte eleva a temperatura de corte, reduzindo a resistência ao cisalhamento do material da peça e aumentando sua plasticidade, promovendo assim a diminuição da força de avanço.

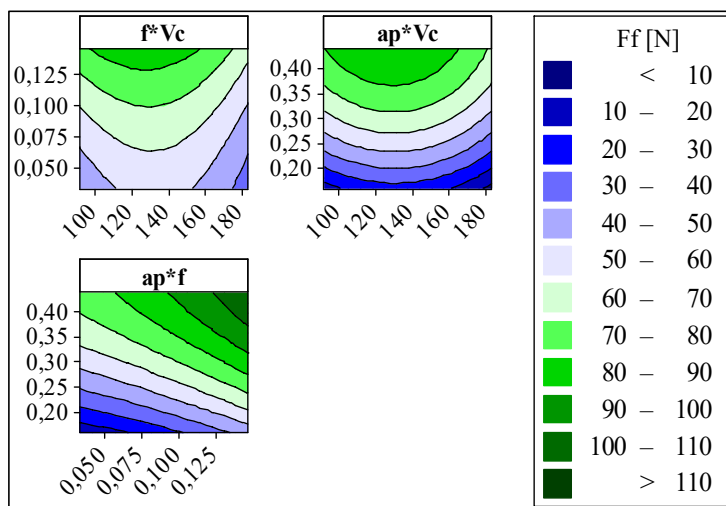


Figura 6. Superfícies de contorno para a força de avanço - F_f (Fonte: autoria própria).

O menor valor obtido para a força de avanço durante os experimentos foi de 20,33 N, com velocidade de corte de 170 m/min, avanço da ferramenta de 0,05 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,20 mm. Por outro lado, o maior valor obtido para a força de avanço foi de 92,84 N, com velocidade de corte de 105 m/min, avanço da ferramenta de 0,13 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,40 mm.

4. CONCLUSÕES

Utilizando das metodologias de projeto de experimentos (DOE) e de superfície de resposta (RSM), pôde-se investigar a influência das variáveis de entrada sobre os esforços de corte na operação de torneamento a seco do aço ABNT 52100 endurecido, com insertos de cerâmica mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) revestidos com TiN. Assim, as conclusões deste trabalho são as seguintes:

- A força passiva (F_p) se mostrou como a maior componente dentre os esforços de corte, sendo seguida pela força de corte (F_c) e pela força de avanço (F_f), respectivamente;
- O menor valor obtido para a força passiva (F_p) foi de 2,20 e 2,93 vezes superior aos menores valores obtidos para a força de corte (F_c) e força de avanço (F_f), respectivamente;
- Os resultados da ANOVA mostram que a profundidade de usinagem e o avanço da ferramenta afetam a força passiva (F_p) em 46,29% e 43,92%, respectivamente;
- Os resultados da ANOVA mostram que a profundidade de usinagem, o avanço da ferramenta e a velocidade de corte afetam a força de corte (F_c) em 43,91%, 49,63% e 0,52%, respectivamente;
- Os resultados da ANOVA mostram que a profundidade de usinagem, o avanço da ferramenta e a velocidade de corte afetam a força de avanço (F_f) em 70,72%, 19,23% e 1,92%, respectivamente;
- O menor valor obtido para a força passiva (F_p) foi de 59,57 N, com velocidade de corte de 105 m/min, avanço da ferramenta de 0,05 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,20 mm;
- O menor valor obtido para a força de corte (F_c) foi de 27,11 N, com velocidade de corte de 105 m/min, avanço da ferramenta de 0,05 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,20 mm;
- O menor valor obtido para a força de avanço (F_f) foi de 20,33 N, com velocidade de corte de 170 m/min, avanço da ferramenta de 0,05 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,20 mm;
- O modelo de superfície de resposta proposto para a força passiva (F_p) apresentou ajuste, $R^2(\text{Adj})$, igual a 97,38%;
- O modelo de superfície de resposta proposto para a força de corte (F_c) apresentou ajuste, $R^2(\text{Adj})$, igual a 98,58%;
- O modelo de superfície de resposta proposto para a força de avanço (F_f) apresentou ajuste, $R^2(\text{Adj})$, igual a 98,47%;
- Os modelos de superfície de resposta desenvolvidos pelo arranjo composto central são capazes de representar adequadamente as condições operacionais do processo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG, a CAPES, o CNPq e a UNIFEI pelo apoio na realização deste trabalho e na participação no COBEF 2017.

6. REFERÊNCIAS

- Abrão, A. M.; Aspinwall, D. K., 1996, "The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel", *Wear*, Vol. 196 (1-2), pp. 279-284.
- Abrão, A. M., 2005, "Torneamento de aços endurecidos" In: *Tecnologias Avançadas de Manufatura*, Ed. Novos Talentos, Jaboticabal, Brasil, Vol. 1, pp. 89-103.
- ASM International Handbook Committee, 1990, "Properties and selection: Irons, steels and high performance alloys". *Metals Handbook*, Vol. 1, 2521p.
- Azizi, M. W., Belhadi, S., Yallese, M. A., Mabrouki, T., Rigal, J. F., 2012, "Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26 (12), pp. 4105-4114.
- Bagawade, A. D., Ramdasi, P. G., Pawade, R. S., Bramhankar, P. K., 2012, "Evaluation of cutting forces in hard turning of AISI 52100 steel by using Taguchi method", *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 1 (6), pp. 1-6.
- Bouacha, K., Yallese, M. A., Mabrouki, T., Rigal, J. F., 2010, "Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool", *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 28, pp. 349-361.
- Campos, P. H. S., 2015, "Metodologia DEA-OTS: Uma contribuição para a seleção ótima de ferramentas no torneamento do aço ABNT H13 endurecido", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- Chinchani, S., Choudhury, S. K., 2013, "Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach", *Measurement*, Vol.46, pp. 1572-1584.
- Davim, J. P., 2011, "Machining of hard materials", Springer, Londres, Inglaterra, 211p.

- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2008, “Tecnologia da usinagem dos materiais”, Ed. Art Liber Ltda., 6ª Ed., São Paulo, Brasil, 262p.
- Klocke, F., Brinksmeier, E., Weinert, K., 2005, “Capability profile of hard cutting and grinding processes”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 54 (2), pp. 22-45.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., da Silva, M. B., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Editora Edgard Blücher, 1ª Ed., São Paulo, Brasil, 384p.
- Matsumoto, H., 1998, “Uma contribuição ao estudo do processo de torneamento de aços endurecidos”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Meddour, I., Yallese, M. A., Khattabi, R., Elbah, M., Boulanouar, L., 2015, “Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 77 (5), pp. 1387-1399.
- Montgomery, D. C., 2012, “Designs and analysis of experiments”, John Wiley & Sons, 8ª Ed., Estados Unidos, 752p.
- Revel, P., Jouini, N., Thoquenne, G., Lefebvre, F., 2016, “High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel”, Precision Engineering, Vol. 43, pp. 24-33.
- Sandvik Coromant, 2012. “Ferramentas para torneamento - Torneamento geral”, Sandviken, Suécia, 529p.
- Tönshoff, H.K., Arendt, C., Amor, R. B., 2000, “Cutting of hardened steel”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 49 (2), pp. 547-566.
- Yallese, M. A., Chaoui, K., Zeghib, N., Boulanouar, L., Rigal, J., 2009, “Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209 (2), pp. 1092-1104.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

ANALYSIS OF CUTTING EFFORTS IN TURNING OF ABNT 52100 HARDENED STEEL

José Edmilson Martins Gomes, jedmilsongomes@yahoo.com.br
Étory Madrilles Arruda, etory@msn.com
José Veríssimo Ribeiro de Toledo, verissimo@unifei.edu.br
João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br
Gilbert Silva, gilbert@unifei.edu.br

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) - Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá - MG

Abstract: The evolution of the machining process, with respect to the development of machine tools more rigid and accurate at high speed, and materials for cutting tools harder and more resistant to wear at high temperatures, allowed the turning hardened materials, which a few years ago could only be machined by grinding. The turning of hardened materials, when compared to the grinding process, may have some advantages, such as: the possibility of don't use cutting fluid, eliminating steps from the manufacturing process, increase of productivity, low power consumption by volume of machined materials and the ability to perform various operations in the same setting, ensuring the geometric characteristics of the piece and reducing machining time. The aim of this work was to obtain responses about the cutting efforts of the ABNT 52100 hardened steel (60 ± 2 HRC) with dry turning, using the response surface methodology. The cutting tools used were mixed ceramic inserts (Al_2O_3+TiC) coated with TiN and the input variables were the cutting speed, feed rate and depth of cut. Thus, it could be noted that all input variables showed an influence on the cutting effort. The passive force had the highest component of the cutting efforts, followed by the cutting force and the thrust force, respectively. The lower cutting efforts were obtained using low feed rates, depth of cut and cutting speed values.

Keywords: hard turning, ABNT 52100 steel, cutting efforts, response surface methodology.