

# MODELAGEM DA RUGOSIDADE (RA, RT) NO TORNEAMENTO DURO COM CERÂMICA MISTA ALISADORA UTILIZANDO PROJETOS DE EXPERIMENTOS(DOE)

**PAULO HENRIQUE DA SILVA CAMPOS (UNIFEI)**

paulohcampos@bol.com.br

**Anderson Paulo de Paiva (UNIFEI)**

andersonppaiva@yahoo.com.br

**Joao Roberto Ferreira (UNIFEI)**

jorofe@unifei.edu.br

**Pedro Paulo Balestrassi (UNIFEI)**

pedro\_brazil@me.utexas.edu



*No estudo da rugosidade média das superfícies usinadas, pelo processo de torneamento, verifica-se a influência de vários fatores de processo, como por exemplo, a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem. Na análise convencional da influência destes fatores num processo de usinagem, geralmente é estudada a influência de cada um deles isoladamente. É neste contexto que surge a metodologia de projetos de experimentos (DOE), que é um conjunto de técnicas estatísticas que permite a análise de vários fatores de influência de um processo de maneira simultânea. Esta abordagem de cunho estatístico consiste em planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma eficaz análise, o que resulta em conclusões válidas e objetivas. Este trabalho trata especificamente do modelamento matemático de diversos parâmetros de rugosidade da peça (Ra, Rt) no processo de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido (50 HRC) com ferramenta de cerâmica mista revestida com nitreto de titânio utilizando geometria wiper (alisadora). Os modelos serão obtidos pela metodologia de projeto de experimento (DOE) tendo como variáveis de influência os parâmetros velocidade de corte, taxa de avanço e a profundidade de usinagem.*

*Palavras-chaves: Torneamento duro, Modelamento da rugosidade, Cerâmica com geometria Wiper, DOE.*

## 1. INTRODUÇÃO

O torneamento de materiais duros vem sendo cada vez mais utilizado ao longo dos últimos anos, devido ao crescente aumento da demanda de produção e à necessidade de redução dos custos de fabricação, oriundos da exigência cada vez maior das novas tecnologias empregadas nos processos industriais. Hoje, devido ao desenvolvimento de materiais para ferramentas de elevada dureza e resistência ao desgaste em altas temperaturas, aliados ao surgimento de máquinas ferramentas de maiores rigidez e precisão dimensional em altas rotações, é possível a usinagem destes materiais pelo processo de torneamento.

O torneamento duro reduz significativamente os custos de produção, Paiva et.al.(2007), tempo de preparação, Mandal (2011), Ozel et.al.(2007) e melhora a qualidade global do produto (Grzesik 2009). Principalmente considerando a sua eficiência na redução de tempo de processamento consumido em cada operação, consumo reduzido de energia, Gaitonde (2009), a eliminação de refrigeração, a melhoria das propriedades dos materiais, além da capacidade de promover os valores baixos para o acabamento da superfície, removendo material da peça em um único corte, em vez de uma longa operação de retificação. Esses benefícios, no entanto, só pode ser alcançado com valores adequados para os parâmetros do processo como também a escolha correta do revestimento e da geometria da ferramenta. Segundo Sales (2004), é possível obter-se em tornos CNC, rugosidades de 0,2 a 0,3  $\mu\text{m}$ , que correspondem às obtidas nos processos de retificação. A substituição do processo de retificação pelo torneamento duro, trás inúmeras vantagens, dentre as quais podem ser citadas: a possibilidade de trabalhar sem fluido de corte, a eliminação de etapas no processo de fabricação, maior produtividade, baixo consumo de energia por volume de material usinado, e etc.

No estudo da vida de ferramentas e da rugosidade média das superfícies usinadas, pelo processo de torneamento, verifica-se a influência de vários fatores de processo, como por

exemplo, a velocidade de corte, a taxa de avanço e a profundidade de usinagem. Na análise convencional da influência destes fatores num processo de usinagem, geralmente é estudada a influência de cada um deles isoladamente, o que demanda um grande número de ensaios, elevado consumo de material de usinagem e ferramentas, além da necessidade de utilização de muitas horas-máquina, o que em geral torna os custos com a experimentação proibitivos. Dentro deste aspecto, a preocupação em atuar simultaneamente sobre a qualidade e o custo de cada processo obriga as empresas a usarem técnicas não triviais de planejamento e melhoria da qualidade. Para atingir tais objetivos muitos processos tem utilizado a modelagem experimental. Modelos matemáticos podem ser construídos a partir da observação e experimentação planejadas. Esta estratégia observacional é conhecida como Metodologia de Projeto de Experimentos (DOE, do inglês Design of Experiments), que consiste em planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma eficaz análise estatística, o que resulta em conclusões válidas e objetivas (Montgomery, 2004).

Diversos pesquisadores têm empregado esta metodologia para o estudo da usinabilidade dos materiais. Noordin et.al.(2004) aplicaram o DOE para descrever o desempenho de ferramentas de metal duro no torneamento de um aço ABNT 1045. Chouldhury et.al.(1998) e Dhavlikar et.al.(2003) também empregam a abordagem para modelar a vida de ferramentas utilizadas no torneamento de aços de alta resistência. Alauddin et.al.(1997) realizaram um trabalho similar. Estes modelos podem ser utilizados na otimização, simulação ou previsão do comportamento do processo de torneamento, principalmente dentro da faixa experimental (Paiva et.al.2009). Bouacha et al.(2010) usou o MSR para construir modelos quadráticos para rugosidade e forças de corte no estudo do aço endurecido AISI 52100.

Todos estes trabalhos objetivam a otimização de variáveis de resposta em processos de usinagem, obtidas a partir de uma pequena, porém, eficiente quantidade de experimentos. Com a inovação das ferramentas de geometrias alisadoras (wiper), tornou-se possível atingir um acabamento de alta qualidade em operações de torneamento quando comparadas com ferramentas convencionais. Para alguns casos, o acabamento também pode se manter para avanços de duas a quatro vezes maiores do que os comuns, conduzindo a um aumento da produtividade. Quando as informações dos experimentos são analisadas estatisticamente, garante-se que o produto será projetado com robustez às variações decorrentes do próprio processo de fabricação, meio ambiente e usuário. Ainda, a análise estatística é importante porque uma pequena diferença entre as especificações técnicas de um produto, ou nos níveis de ajustagem dos fatores de controle de um processo de fabricação, pode significar o ganho ou perda de tempo de produção, ferramentas de usinagem e qualidade do produto, o que se converte em grandes ganhos ou perdas econômicas para a empresa.

Diante de tais considerações o objetivo principal deste trabalho experimental trata especificamente do modelamento dos parâmetros de rugosidade da peça ( $R_a$ ,  $R_t$ ) no processo de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido (50 HRC) com ferramenta de cerâmica mista revestida com nitreto de titânio utilizando geometria wiper (alisadora).

## 2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Desenvolvido entre 1920 e 1930 por Fisher, sendo posteriormente incrementada por importantes pesquisadores na área de estatística como Box, Hunter (1978) e Taguchi (1986), entre outros Prvan et.al.(2002), o Projeto de Experimentos (DOE) é uma técnica relativamente antiga. Depois da segunda guerra mundial, o DOE foi introduzido na indústria química e nos processos industriais de empresas nos Estados Unidos e Europa. O interesse crescente pelo DOE ocorreu também no Brasil e no resto do mundo. Atualmente as empresas aumentam em muito a sua produtividade com a utilização desta ferramenta.

O Planejamento e Análise de Experimentos (DOE) é uma metodologia utilizada para se avaliar a magnitude de várias fontes de variação que influenciam um processo (Montgomery, 2001). Deve-se iniciar com a identificação e seleção dos fatores que possam contribuir para a variação, proceder-se, em seguida, à seleção de um modelo que inclua os fatores escolhidos e planejar experimentos eficientes para estimar seus efeitos. Uma vez realizados os experimentos, procede-se à análise para se estimar os efeitos dos fatores incluídos no modelo utilizando métodos estatísticos adequados, culminando na inferência, interpretação e discussão dos resultados, recomendando melhorias, quando necessário.

Durante a condução das rodadas experimentais, todos os fatores podem ser alterados simultaneamente. Assim, existem diversas maneiras de combiná-los, denominadas de arranjos. O fatorial completo é o arranjo para o qual o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais, elevado ao número de fatores. Os arranjos fatoriais completos podem ser gerados para qualquer quantidade de fatores e os níveis se alteram a cada experimento. Porém, um número grande de fatores pode tornar um procedimento experimental inviável. Neste caso e havendo pouco interesse nas interações, podem-se negligenciá-las, utilizando-se meia fração do experimento completo ( $2^{k-1}$  experimentos).

De acordo com Montgomery (2004), a Metodologia de Projeto de Experimentos (DOE) consiste no uso de técnicas estatísticas capazes de gerar dados apropriados para uma análise estatística que resulte em conclusões válidas e objetivas. Consiste na execução de experimentos nos quais fatores de um processo sob análise são variados simultaneamente, com o objetivo de medir seus efeitos sobre a variável (ou variáveis) de saída de tal processo. Fatoriais completos correspondem a uma técnica do DOE na qual todas as possíveis combinações de níveis dos fatores experimentais são exercitadas, de modo a cobrir todo o espaço experimental. O número de corridas é igual ao número de níveis elevado ao número de fatores. Para experimentos fatoriais em dois níveis, o número total de corridas  $N$  necessárias para avaliar o efeito de  $k$  fatores é dado por  $N = 2^k$ . Na metodologia DOE, o teste empregado para avaliar a significância dos efeitos das mudanças nos níveis dos fatores ou dos efeitos das interações entre níveis sobre a saída do processo é um teste de hipótese para médias. Na técnica do fatorial completo, o teste utilizado é a análise de variância, ou ANOVA (Montgomery, 2004). Neste trabalho, a metodologia foi utilizada como ferramenta de projeto para obtenção da modelagem da rugosidade. Ainda que não haja um modelo teórico único que torne possível a predição da rugosidade, a literatura aponta no sentido de que os parâmetros de corte são determinantes na predição (Shaw, 2004). Cus et.al.(2006), sugeriram modelos empíricos lineares e exponenciais para a rugosidade da peça como função da velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ ).

A função polinomial de primeira ordem desenvolvida para uma Metodologia de Projeto de experimento que relaciona uma dada resposta  $y$  com  $k$  variáveis de entrada apresenta o seguinte formato descrito pela Equação (1) (Montgomery, 2005):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:  $y$  é a resposta de interesse,  $x_i$  parâmetros de entrada,  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$ ,  $\beta_{ij}$  são coeficientes a serem estimados e  $k = p$  número de parâmetros de entrada considerados e  $\varepsilon$  é o erro. Entretanto, se existir curvatura no sistema, então a função de aproximação mais usada é um polinômio de ordem superior, como o modelo de segunda ordem apresentado pela Equação (2).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Segundo Box e Draper (1987) os dois modelos referidos, de primeira ordem, para sistemas sem curvatura, e de segunda ordem, para sistemas com curvatura, conseguem representar quase todos os problemas relacionados à superfície de respostas.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Máquina, ferramentas, materiais e Instrumentos de Medição

Para o processo de torneamento desenvolvido neste trabalho utilizou-se um Torno CNC Nardini Logic 175, com potência máxima de eixo de 7,5 CV; rotação máxima de 4000 rpm; torre com oito posições e torque máximo de 200 Kgf.m.

Os insertos são de cerâmica mista ( $Al_2O_3 + TiC$ ) recoberta com nitreto de titânio (TiN), com geometria alisadora ISO CNGA 120408 S01525WH, classe Sandvik GC 6050. O suporte da ferramenta tem modelo ISO DCLNL 1616H12; Ângulo de posição de  $95^\circ$ , ângulo de saída de  $-6^\circ$ , ângulo de inclinação de  $-6^\circ$  e ângulo de folga de  $7^\circ$ . A Figura (1) apresenta uma comparação da influência dos raios alisadores da geometria da ponta da ferramenta e o seu efeito combinado com o avanço na rugosidade da peça usinada em relação ao raio padrão.

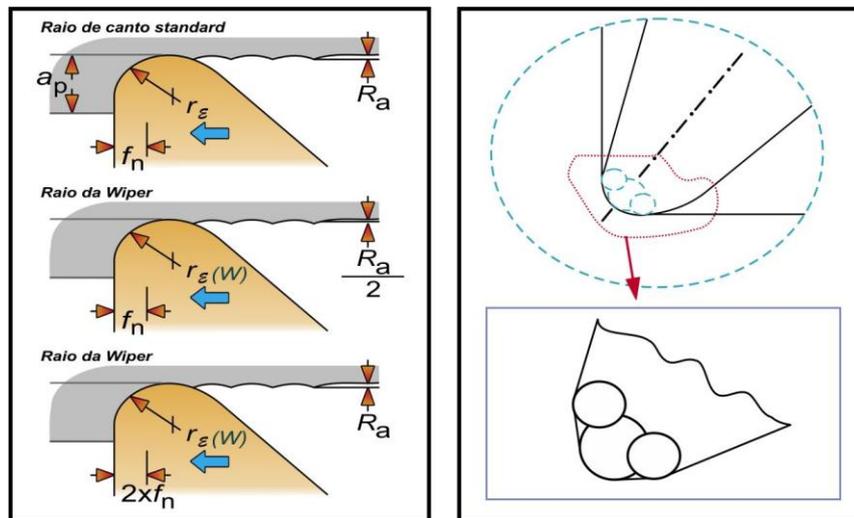


Figura 1. Geometria do raio de ponta para ferramentas alisadora (Sandvik, 2010).

Os corpos de prova utilizados nos ensaios têm dimensões de 49 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento, sendo de Aço ABNT 52100. A Dureza elevada é alcançada neste aço pelo processo de têmpera por indução. Este material geralmente é tratado a uma temperatura de  $850^\circ C$  seguido de têmpera em óleo e, em seguida, revenido na faixa de  $180-250^\circ C$ . Isso resulta em uma microestrutura de martensita com até 5% de austenita retida. A dureza do aço ABNT 52100 chegou a 50 HRC. Este aço possui a seguinte composição química de acordo com a Tabela (1):

Composição Química do Aço ABNT 52100 (% em peso)								
Elemento	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
Teor (%)	1,03	0,23	0,35	1,4	0,04	0,11	0,001	0,01

Tabela 1. Composição do Aço ABNT 52100

Para as medições necessárias, utilizou-se um Rugosímetro modelo Mitutoyo, SJ 201. O desgaste da ferramenta foi monitorado utilizando-se um microscópio óptico Olympus SZ 61 com câmera digital.

### 3.2 Metodologia de ensaios

Nos ensaios realizados foram adotados dois níveis de variação para cada um dos parâmetros de usinagem estudados. A Tabela (2) apresenta os três fatores: velocidade corte, avanço, profundidade de usinagem e seus respectivos níveis de variação. Os níveis foram especificados em função de dados recomendados pelo catálogo do fabricante das ferramentas (Sandvik, 2010) e também foi elaborado um planejamento fatorial (três parâmetros e dois níveis e um ponto central) para a realização dos ensaios.

Parâmetros do processo	Símbolo	Unidade	Níveis dos fatores			
			-1	0	+1	
Velocidade de Corte	$V_c$	m/min	200	220	240	
Avanço	f	mm/rev	0,20	0,30	0,40	
Profundidade de corte	$a_p$	mm	0,150	0,225	0,300	

Tabela 2. Parâmetros de usinagem utilizados.

Os ensaios de torneamento foram dimensionados de forma a proporcionar uma maneira precisa de se estudar a influência da velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem na rugosidade ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  e  $R_y$ ) da peça usinada, através da aplicação da metodologia de projeto de experimentos (DOE).

Foi adotado como critério de troca de ferramenta, principalmente valores de rugosidade ( $R_a < 0,5$ )  $\mu\text{m}$  e desgaste de flanco  $VB_{\text{max}} < 0,3$  mm. Tal critério foi adotado em função do risco de quebra do inserto de cerâmica. A cada corpo de prova usinado, o mesmo era retirado da máquina para medição das rugosidades. Neste momento o inserto também era retirado do suporte para monitoramento do desgaste de flanco ( $VB_{\text{max}}$ ). As medições de rugosidade foram realizadas sempre quatro vezes nos pontos (A, B, e C), conforme esquema ilustrado na Figura (2); após as medições de rugosidade foi realizada a media aritmética dos valores de rugosidade.

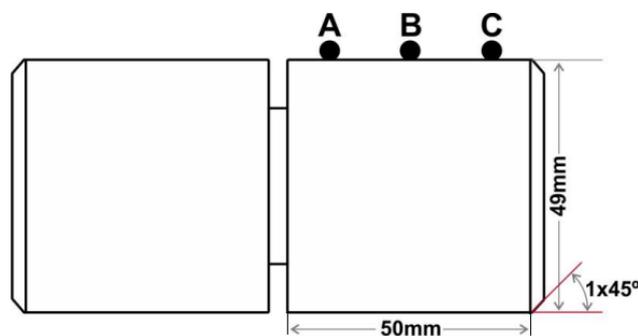


Figura 2. Posições de leitura da rugosidade nos corpos de prova.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz experimental do projeto fatorial completo com cinco pontos centrais e os resultados da rugosidade Ra e Rt são mostradas na Tabela (3). Observa-se que os parâmetros de rugosidades Ra e Rt obtidos nos ensaios para o aço ABNT 52100 foram relativamente baixos, visto que o avanço (f) variou de 0,2 a 0,4 mm/v. A rugosidade média Ra ficou na faixa de 0,15-0,5  $\mu\text{m}$  e a rugosidade máxima Rt ficou na faixa de 1-2,7  $\mu\text{m}$ . Justifica-se estes resultados pelo efeito alisador da geometria de corte da ferramenta de cerâmica e pela alta dureza da peça na faixa de 50HRC. Cabe salientar que o torno CNC utilizado é de pequeno porte e não apresenta grande rigidez.

Nº	Vc (m/min)	f (mm/v)	ap (mm)	A	B	C	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
1	200	0,2	0,15	-1	-1	-1	0,153	0,990
2	240	0,2	0,15	1	-1	-1	0,219	1,161
3	200	0,4	0,15	-1	1	-1	0,388	2,669
4	240	0,4	0,15	1	1	-1	0,382	2,423
5	200	0,2	0,3	-1	-1	1	0,177	1,167
6	240	0,2	0,3	1	-1	1	0,173	1,132
7	200	0,4	0,3	-1	1	1	0,357	2,392
8	240	0,4	0,3	1	1	1	0,412	2,727
9	220	0,3	0,225	0	0	0	0,298	2,047
10	220	0,3	0,225	0	0	0	0,294	2,192
11	220	0,3	0,225	0	0	0	0,308	1,703
12	220	0,3	0,225	0	0	0	0,290	1,919
13	220	0,3	0,225	0	0	0	0,322	1,976

Tabela 3. Fatorial completo  $2^3$  com 5 pontos centrais para as respostas de rugosidades (Ra e Rt)

A Figura (3) mostra uma comparação dos efeitos principais das condições de corte, velocidade, avanço e profundidade de usinagem sobre as rugosidades Ra e Rt. Percebe-se que o efeito principal do avanço é relativamente superior ao da velocidade de corte e da profundidade de usinagem sobre os parâmetros de rugosidade Ra e Rt, sucessivamente. No entanto, cabe salientar a importância do estudo do efeito das interações das condições de corte sobre a rugosidade. A maior influência do avanço deve-se ao maior incremento de seus níveis 0,2-0,4 mm/v, o que provoca maior ondulação na superfície da peça. A influência negativa da velocidade de corte deve-se ao aumento da rotação e um possível aumento da vibração do sistema máquina-ferramenta-peça. As baixas profundidades de usinagem (0,15-0,30 mm) utilizadas, devido à elevada dureza da peça pouco influenciaram na rugosidade.

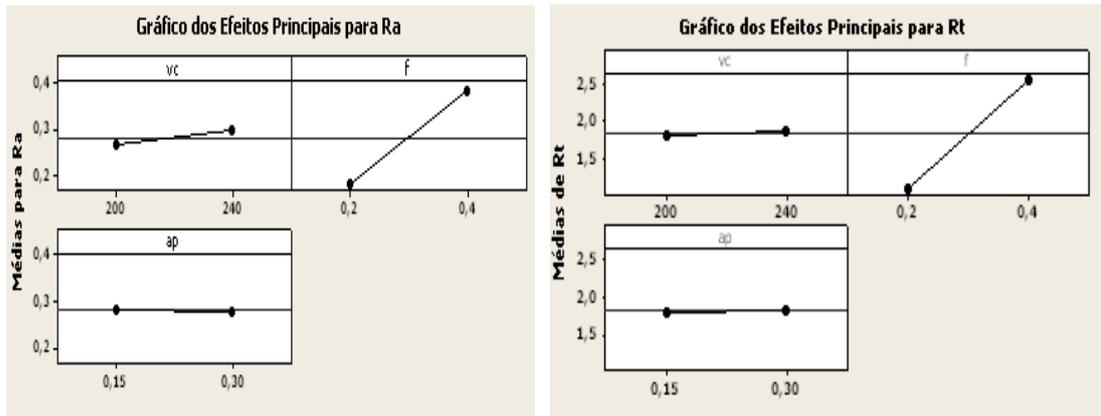


Figura 3. Efeitos principais da velocidade de corte, avanço e profundidade nas rugosidades (Ra,Rt).

A Figura (4) apresenta o gráfico de pareto para os efeitos principais e para as interações das condições de corte (velocidade corte, avanço e profundidade de usinagem) sobre os parâmetros de rugosidade média Ra e máxima Rt. Observa-se no diagrama de Pareto que para a rugosidade Ra, o avanço, a velocidade de corte e a interação entre velocidade-avanço-profundidade são significativas. Para a rugosidade Rt o avanço e a interação entre velocidade-avanço-profundidade são significativas.

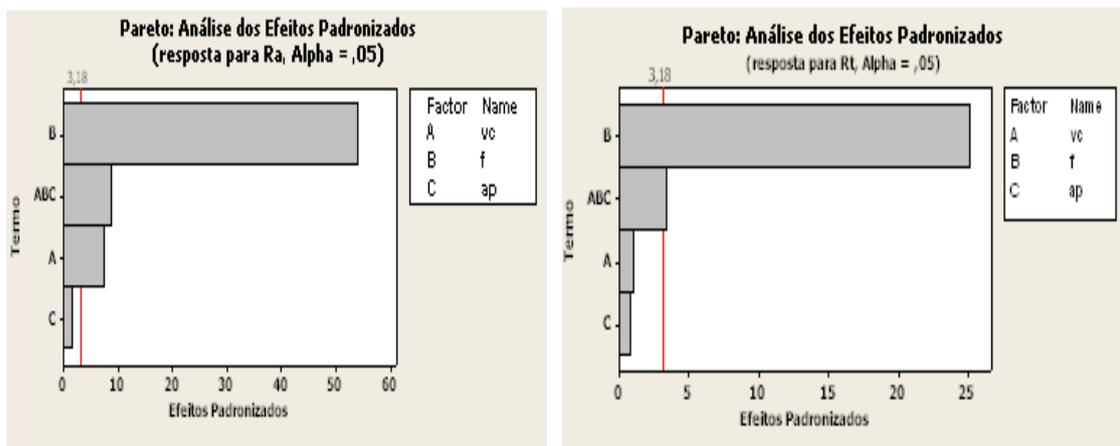


Figura 4. Análise dos efeitos padronizados da velocidade, avanço e profundidade sobre as rugosidades (Ra, Rt)

A Tabela (4) apresenta a análise de variância (ANOVA) para a rugosidade média Ra, onde se observa que os valores P são menores que 5% (nível de significância estatística) para o avanço, para a velocidade de corte e para interação tripla. Em função da ANOVA pode-se constatar que as três condições de corte influenciaram significativamente a rugosidade Ra, pelos seus efeitos principais. Percebe-se que o modelo linear obtido apresenta um excelente ajuste ( $R^2 \text{ adj} = 99,77\%$ ) não considerando a implementação de todos os termos no modelo. O coeficiente de determinação mede o quanto o modelo explica a variação dos dados e quanto mais próximo de 100%, melhor será considerado o modelo. A Equação (3) apresenta o modelo matemático linear obtido, sendo que seus coeficientes levam em consideração as variáveis codificadas. A análise de variância mostrou um valor P significativo (0,054) para o teste de curvatura. Isto demonstra que os níveis experimentais escolhidos conduzem a uma resposta próxima à região de ótimo para a rugosidade Ra. De forma análoga foi realizada a análise de variância (ANOVA) para a rugosidade máxima Rt, onde obteve-se um modelo linear com ajuste de ( $R^2 \text{ adj} = 98,92\%$ ), não considerando a implementação de todos os

termos no modelo. O avanço e a interação tripla apresentaram influência significativas na rugosidade Rt.

A Equação (4) também apresenta o modelo linear obtido pela análise do planejamento fatorial, preservando o melhor ajuste. A análise de variância de um modelo de segunda ordem (modelo quadrático completo), obtido a partir dos resultados do Central Composite Design no modelo foi realizado e percebeu-se um ajuste para Ra e Rt sucessivamente ( $R_2 \text{ adj} = 97,78\%$  e  $R_2 \text{ adj} = 91,28\%$ ), menores que o do modelo linear e com os mesmos termos não significativos. Por esta razão decidiu-se empregar neste trabalho o modelo linear, que pode ser escrito em sua forma codificada, como apresentado pelas equações 3 e 4.

Termo	Efeito	Coef	SE coef	T	p
Constante		0,2826	0,0018	148,98	0,000
Vc	0,0277	0,0138	0,0018	7,31	0,005
f	0,2042	0,1021	0,0018	53,83	0,000
ap	-0,0057	-0,0028	0,0018	-1,52	0,227
Vc*f*ap	0,0327	0,0163	0,0018	8,63	0,003
Ct Pt		0,0197	0,0073	2,70	0,054
	S= 0,0053	R-Sq= 99,90%	R-Sq (adj)= 99,77%		

Tabela 4. ANOVA para a resposta rugosidade média (Ra)

Termo	Efeito	Coef	SE coef	T	p
Constante		1,8326	0,0286	63,99	0,000
Vc	0,0562	0,0281	0,0286	0,98	0,398
f	1,4402	0,7201	0,0286	25,15	0,000
ap	0,0437	0,0218	0,0286	0,76	0,501
Vc*f*ap	0,1967	0,0983	0,0286	3,44	0,041
Ct Pt		0,1347	0,1024	1,32	0,259
	S= 0,0810	R-Sq= 99,54%	R-Sq (adj)= 98,92%		

Tabela 5. ANOVA para a resposta rugosidade máxima (Rt)

$$Ra = 0,2826 + 0,0138V_c + 0,1021f - 0,0028ap + 0,0163V_c*f*ap \quad (3)$$

$$Rt = 1,8326 + 0,0281V_c + 0,7201f + 0,0218ap + 0,0983V_c*f*ap \quad (4)$$

Segundo Montgomery (2005) para que um modelo seja formulado adequadamente, os resíduos não devem ser correlacionados (independentes) e devem ser normalmente distribuídos. Neste trabalho verificou-se que os resíduos dos modelos obtidos para as rugosidades Ra e Rt apresentam distribuições normais. A Figura (5) apresenta as retas de probabilidade normal dos resíduos dos modelos de rugosidades Ra e Rt. Observa-se que os pontos estão distribuídos sobre a reta e o valor P do teste de normalidade de Anderson Darling foi superior a 5%, pode-se concluir que os dados são normalmente distribuídos. Observou-se também que os resíduos apresentaram-se de forma independente e aleatória. Sendo assim pode-se constatar que os modelos encontrados foram satisfatórios. A Figura 6 mostra a superfície de resposta para a rugosidade Ra e Rt, considerando-se a profundidade de usinagem constante e igual a 0,15 mm. Observando a Figura 6(a) nota-se que para valores crescentes da velocidade de corte (Vc) e do avanço de usinagem (f), a rugosidade aumenta. Na Figura 6(b) para os valores crescentes do avanço, a rugosidade Rt aumenta. Na Figura 7(a) nota-se que um aumento nos valores da velocidade de corte ou do avanço de usinagem, ou mesmo nos

dois fatores simultaneamente, acarreta um aumento da rugosidade. Este fato pode ser claramente visualizado na Figura 7, onde se observa que um aumento de nível nos valores do avanço de usinagem produz efeito mais acentuado na rugosidade, que um aumento de nível da velocidade de corte. Na Figura 7(b) nota-se que um aumento nos do avanço de usinagem, acarreta um aumento da rugosidade.

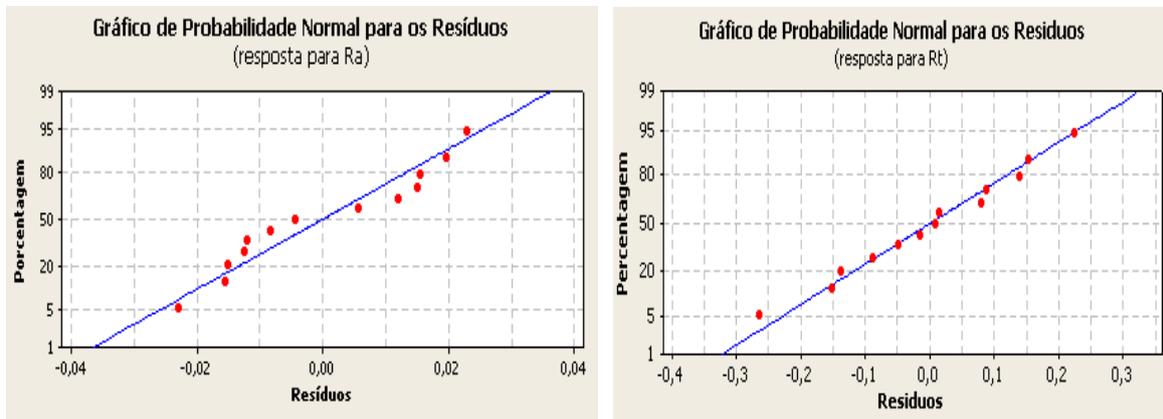


Figura 5. Análise de resíduos dos modelos das rugosidades média e máxima (Ra e Rt)

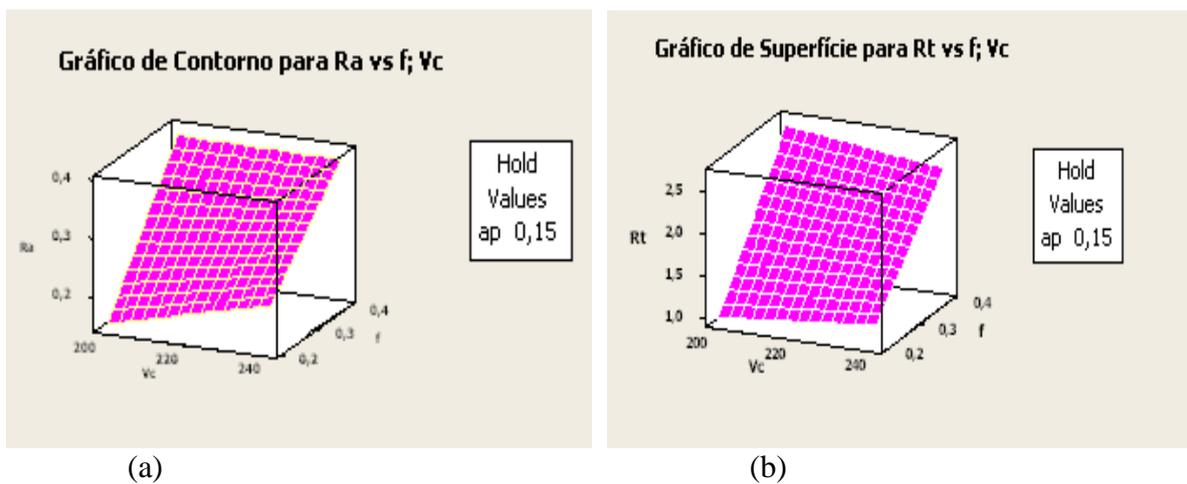


Figura 6. Análise de superfície dos modelos das rugosidades média e máxima (Ra e Rt)

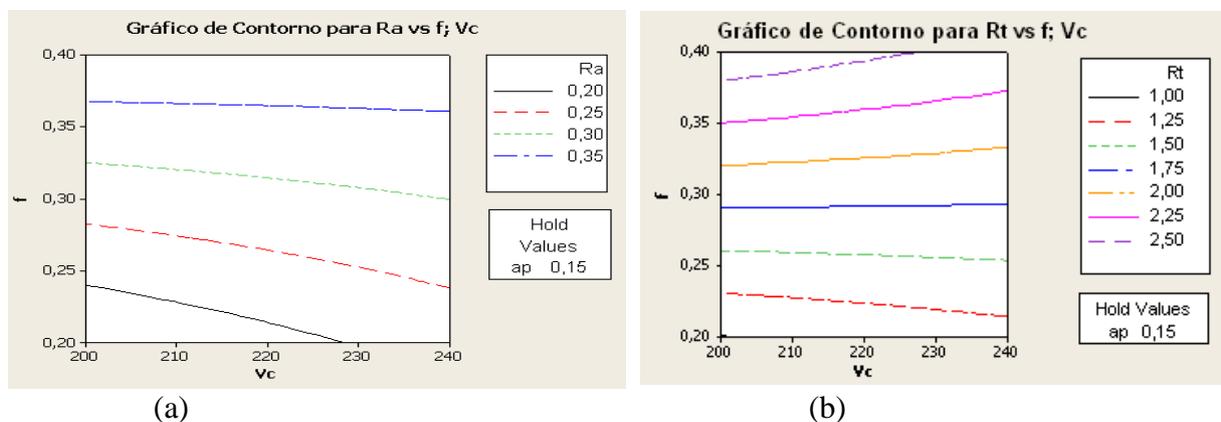


Figura 7. Análise de contornos dos modelos das rugosidades média e máxima (Ra e Rt)

Os parâmetros de rugosidades  $R_y$ ,  $R_z$  e  $R_q$  também foram medidos nos experimentos. De posse destes resultados foi realizada uma análise de correlação entre todos os parâmetros de rugosidade ( $R_a, R_t, R_y, R_z$  e  $R_q$ ). A Tabela (6) apresenta esta análise onde observou-se que todos os parâmetros são correlacionados (valor  $P < 0,05$ ). Como também todos eles apresentam forte grau de correlação, ou seja o coeficiente de correlação de Pearson foi superior a 80%. Assim, optou-se por não apresentar os demais modelos de rugosidades  $R_y$ ,  $R_z$  e  $R_q$ . Onde foi considerado \* valor de Pearson e \*\* valores de P-Value

Correlação: $R_a$ ; $R_y$ ; $R_z$ ; $R_q$ ; $R_t$				
	$R_a$	$R_y$	$R_z$	$R_q$
$R_y$	0,967 *			
	0,000 **			
$R_z$	0,964	0,987		
	0,000	0,000		
$R_q$	0,909	0,853		0,884
	0,000	0,000		0,000
$R_t$	0,967	0,996	0,977	0,828
	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 6. Correlação entre as rugosidades ( $R_a, R_t, R_y, R_z$  e  $R_q$ )

Assim, neste trabalho observou-se que os parâmetros de rugosidades ( $R_a, R_t, R_y, R_z$  e  $R_q$ ) são fortemente influenciados principalmente pelo avanço da ferramenta e depois pela velocidade, facilmente identificados pelos coeficientes dos modelos obtidos.

## 5. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos sobre o torneamento do aço ABNT 52100 endurecido com ferramenta de cerâmica com geometria Wiper utilizando projeto de experimentos (DOE), pode-se concluir que:

- A geometria alisadora da ferramenta propiciou a obtenção de baixas rugosidades  $R_a$  na faixa 0,15-0,5  $\mu\text{m}$  com avanços relativamente altos (0,2-0,4 mm/v) e rugosidade  $R_t$  na faixa de 1-2,7  $\mu\text{m}$ . Essas rugosidades estão nos níveis obtidos pelo processo de retificação;
- O avanço foi o fator que mais influenciou na rugosidade  $R_a$ , seguido pela velocidade de corte e pela interação com a profundidade de usinagem, o que não pode ser descartado no processo. Na rugosidade  $R_t$  o fator que mais influenciou foi o avanço.
- Os modelos lineares obtidos apresentaram excelentes ajustes de explicação dos parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_t$ , o que demonstra que os fatores avanço e velocidade de corte tem parcela de influência nos parâmetros de rugosidade;
- A análise de variância indicou que os níveis das variáveis experimentadas estão numa região de ótimo para a rugosidade  $R_a$ , P-value da curvatura 0,05, assim fica evidente a importância da interação dos fatores  $V_c$ - $f$ - $a_p$ ;
- A viabilidade de se trabalhar com altos avanços ( $f=0,4$  mm/v) com cerâmica wiper em aços duros traz grandes vantagens competitivas para este processo de usinagem, pois implica em redução significativa no tempo de produção.

## 6. REFERÊNCIAS

Alauddin, M., El-Baradie, M. A., Hashmi, M. S. J., Prediction of tool life in end milling by response surface methodology, Journal of Materials Processing Technology, vol. 71, pp.457-465, 1997.

- Box, G. E. P., Hunter, W. G., Hunter, J.S.** Statistics for Experimenters. New York, John Wiley & Sons, 1978.
- Box, G. E. P., Draper, N. R.,** “Empirical Model-Building and Response Surfaces”, John Wiley & Sons, 1 ed., 650p, 1987.
- Choudhury, I.A., El-Baradie,** “Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN)”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 77, pp.319-326, 1998.
- Cus, F., Zuperl, U.,** “Approach to optimization of cutting conditions by using artificial neural networks”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 175, Issue 3, pp. 281-290, 2006.
- Dhavlikar, M. N., Kulkarni, M. S., Mariappan, V.,** “Combined Taguchi and dual response method for optimization of a centerless grinding operation”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 132, pp. 90-94, 2003.
- Galdámez, E. V. C,** Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de Fabricação de Produtos Plásticos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- Gaitonde VN, Karnik SR, Figueira L, Davim JP.** Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. Int J Refract Metals Hard Mater ;27: 763-754, 2009.
- Grzesik.** Wear development on wiper Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC mixed ceramic tools in hard machining of high strength steel. Wear ; 266:1028-1021, 2009.
- Huang Y, Chou YK, Liang SY.** CBN tool wear in hard turning: survey on research progresses. Int J Adv Manuf Technol ; 35: 453-443, 2007.
- Lima JG, Ávila RF, Abrão AM, Faustino M, Davim JP.** Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. J Mater Process Technol ; 169:395-388, 2005.
- Mandal N, Doloi B, Mondal B.** Development of flank wear prediction model of Zirconia Toughened Alumina (ZTA) cutting tool using response surface methodology. Int J Refract Metals Hard Mater ; 29:280-273, 2011.
- Montgomery, D.C,** Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, 2004.
- Montgomery, D. C.,** Runger,G. C.Estatística aplicada a probabilidades para engenheiros, 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.
- Noordin, M.Y. Venkatesh, V. C., Sharif, S., Elting, and Abdullah, A,** “Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 145, pp.46-58, 2004.
- Ozel T, Karpat Y, Figueira L, Davim JP.** Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. J Mater Process Technol ; 189:198-192, 2007.
- Paiva AP, Ferreira JR, Balestrassi PP.** A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. J Mater Process Technol ; 189:35-26, 2007.
- Paiva AP, Paiva EJ, Ferreira JR, Balestrassi PP, Costa SC,** A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. Int J Adv Manuf Technol; 43:643-631, 2009.
- Prvan, T., Street, D. J,** An annotated bibliography of application papers using certain classes of fractional factorial and related designs. Journal of Statistical Planning and Inference, n.106, p.245-269, 2002.
- Sales, G. T,** Torneamento do aço ASTM 300M endurecido com ferramentas de cerâmica e PCBN com geometria “Wiper”. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, 2004.

**Shaw, M.**, “Metal Cutting Principles”, Oxford University Press, New York, USA, 672p, 2004.

**Sandvik-Coromant.** Tecnologia da usinagem dos metais-Manual técnico, Sandviken, Sweden, 2010.

**Taguchi, G.**, “System of Experimental Design”, UNIPUB, Kraus International Publications, New York, 1986.