



MODELAGEM DA RUGOSIDADE E DA VIDA DA FERRAMENTA NO TORNEAMENTO DO AÇO DURO ABNT 52100 COM CERÂMICA MISTA WIPER UTILIZANDO METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

P.H.S. CAMPOS^{1,3}, J.R. FERREIRA², A.P. DE PAIVA², P.P. BALESTRASSI², J.P. DAVIM³

¹CAPES Fundação, Ministério da Educação do Brasil
Brasília – DF 70040-020, Brazil

²Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
Av. BPS, 1303 – Itajubá, MG – Brasil

³Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade de Aveiro
Campus Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

(Recibido 1 de julio de 2013, para publicación 7 de noviembre de 2013)

Resumo – Este trabalho trata especificamente do modelamento matemático da rugosidade (R_a , R_t) e da vida da ferramenta no processo de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido (50 HRC). Foi utilizado uma ferramenta de cerâmica mista com geometria wiper (alisadora). Os modelos matemáticos foram obtidos pela metodologia de superfície de resposta (MSR), tendo como variáveis de influência os parâmetros velocidade de corte, avanço de corte e a profundidade de corte. Neste caso, levando-se em consideração a variação simultânea dos fatores, podem-se construir modelos matemáticos de previsão e otimização para as respostas de interesse. 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.

Palavras-chave – Torneamento duro, metodologia de superfície de resposta, rugosidade, vida de ferramenta, cerâmica Wiper.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de torneamento duro tornou-se um importante processo de fabricação e é amplamente utilizado em uma gama de aplicações industriais, tais como: engrenagens, eixos, rolamentos, cames, peças forjadas, moldes e matrizes. Trata-se da remoção de materiais cuja dureza é superior a 45 HRC [1].

A operação de torneamento é realizada com materiais de ferramenta de cerâmica mista (Al_2O_3+TiC) e de nitreto de boro cúbico (CBN), que induz um benefício significativo, tais como: curto tempo de corte, flexibilidade do processo, baixa rugosidade da superfície da peça, alta taxa de remoção de material e precisão dimensional. Referindo-se a este processo, temos o aproveitamento da capacidade de máquinas-ferramentas modernas, que permitem produzir diferentes geometrias de contorno e gerar formas complexas no material que está sendo usinado [2,3,4].

O torneamento duro reduz significativamente os custos de produção, tempo de preparação e melhora a qualidade global do produto em relação ao processo de retificação [5,6,7,8].

Principalmente considerando a sua eficiência na redução de tempo de processamento consumido em cada operação, consumo reduzido de energia, a eliminação de refrigeração, além da capacidade de promover bom acabamento da superfície, removendo material da peça em um único corte, em vez de uma longa operação de retificação [9,10].

Na contribuição da geometria da ferramenta para a melhoria do processo de torneamento duro, vários trabalhos apresentam o uso de pastilhas alisadoras (*Wiper*) [6,9,10]. Ozel *et al.* [11] investigaram a influência da geometria da aresta na ferramenta de CBN relacionadas ao desenvolvimento de tensão e tem-

peratura através de simulações por elementos finitos no torneamento duro. Zhou *et al.* [12] apresentaram um estudo do efeito do ângulo do chanfro no desgaste da ferramenta de CBN no torneamento duro e investigam a correlação entre o desgaste, a força de corte e a vida da ferramenta. Com esta modificação na geometria, é possível dobrar a taxa de avanço, aumentando a produtividade e mantendo menor rugosidade da peça.

Gaitonde *et al.* [13], estudaram o comportamento da rugosidade superficial e do desgaste da ferramenta, utilizaram modelos matemáticos de segunda ordem, com ferramentas cerâmicas com geometria wiper. Confirmam que a ferramenta de cerâmica mista apresenta melhores rugosidades da peça e melhor desempenho da ferramenta quando comparada com uma ferramenta tradicional no torneamento duro do aço AISI D2. Também nos aços AISI D2 com 60HRC, Ozel *et al.* [7] indicaram que a rugosidade média da peça (R_a) com ferramentas de cerâmica com geometria wiper atinge valores em torno de $0,20 \mu\text{m}$.

No entanto, os potenciais benefícios promovidos pelo torneamento duro para a qualidade da superfície e para o aumento da taxa de produtividade dependem intrinsecamente de uma configuração ideal para os parâmetros do processo como a velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte. Alguns trabalhos estudaram o efeito destas condições de corte [14,10,4,5], da influência da dureza da peça, da geometria da ferramenta na rugosidade [14,10], dos fluidos de corte [12,15], do desgaste da ferramenta no erro geométrico e na integridade da superfície (rugosidade e danos na camada térmica) [16,17,18]. A maioria desses estudos estabeleceram uma relação entre as propriedades de saída do processo como vida da ferramenta, rugosidade da peça, as forças de corte e as entradas velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte.

Para modelar as propriedades de usinagem em função dos rígidos parâmetros do processo de torneamento, muitos pesquisadores têm utilizado o Planejamento de Experimentos (DOE) e a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) [4,5,15,19,20].

Bouacha *et al.* [14] usaram o MSR para construir modelos quadráticos para rugosidade e forças de corte no estudo do aço endurecido AISI 52100. Mandal *et al.* [20] empregaram a metodologia de superfície de resposta para estudar o desgaste de flanco em função da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte. Benga e Abrão [21] estudaram a vida da ferramenta e o acabamento do aço endurecido 100Cr6 utilizando pastilhas de cerâmica e PCBN aplicando a MSR. Singh e Rao [22] realizaram uma investigação experimental dos efeitos das condições de corte e da geometria da ferramenta sobre a rugosidade do aço AISI 52100, com pastilhas de cerâmica mista ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$). Diante de tais considerações o objetivo principal deste trabalho experimental trata especificamente do modelamento matemático dos parâmetros de rugosidade da peça (R_a , R_t) e da vida da ferramenta (T) em relação à velocidade de corte, avanço de corte e à profundidade de corte, no processo de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido (50 HRC) utilizando ferramenta cerâmica com geometria wiper.

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

A metodologia de Projeto de Experimentos (DOE) foi desenvolvida entre 1920 e 1930 por Fisher, sendo posteriormente incrementada por importantes pesquisadores na área de estatística como Box, Hunter [23] e Taguchi [24].

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 metodologia.

O DOE é uma metodologia utilizada para se avaliar a magnitude de várias fontes de variação que influenciam um processo [25]. Deve-se iniciar com a identificação e seleção dos fatores que podem contribuir para a variação, proceder-se, em seguida, a seleção de um modelo que inclua os fatores escolhidos e planejar experimentos eficientes para estimar seus efeitos. Uma vez realizados os experimentos, procede-se a 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 necessária.

Durante a condução dos experimentos, todos os fatores são, via de regra, alterados simultaneamente. Assim, existem diversas maneiras de combiná-los, denominadas de arranjos. O arranjo 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 [25], 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 utilizadas cobrindo 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 ANOVA [25].

MSR é um tipo específico de DOE, incorporando técnicas de otimização e Box [23] oferece uma retrospectiva sobre as origens da MSR com uma filosofia geral da aprendizagem sequencial. Myers et al. [26], apresentaram uma discussão aprofundada da MSR. Discute o estado de MSR no final dos anos 90 e dá algumas direções para futuras pesquisas. Hill e Hunter [27] ofereceram uma extensa bibliografia e aplicações na indústria química e de processo. Drapper e Lin [28] discutiram vários aspectos da MSR, como técnicas de otimização estatística e numérica para examinar a relação entre uma ou mais variáveis de resposta (y) e um conjunto de variáveis quantitativas experimentais (x).

A análise dos dados durante a fabricação, utilizando adequados modelos estatísticos é de grande importância para a precisão e avaliação a serem obtidos pelo processo. Nos experimentos de engenharia, o objetivo geral é determinar as condições que podem levar a melhores resultados. Uma das metodologias para a obtenção do melhor resultado é o método MSR. Na maioria dos problemas de MSR, existe uma relação funcional entre as respostas e as variáveis independentes. Essa relação pode ser explicada através do modelo a seguir [25].

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 formato descrito pela equação 1.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

onde:

y é a resposta de interesse, x_i são os parâmetros de entrada,

$\beta_{ij} x_i x_j$ são coeficientes a serem estimados

$k=p$ representa o número de parâmetros de entrada considerados e ε é o erro.

Entretanto, se existir curvatura no sistema, a função de aproximação mais usada é um polinômio de ordem superior, como o modelo de segunda ordem apresentado pela equação 2.

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

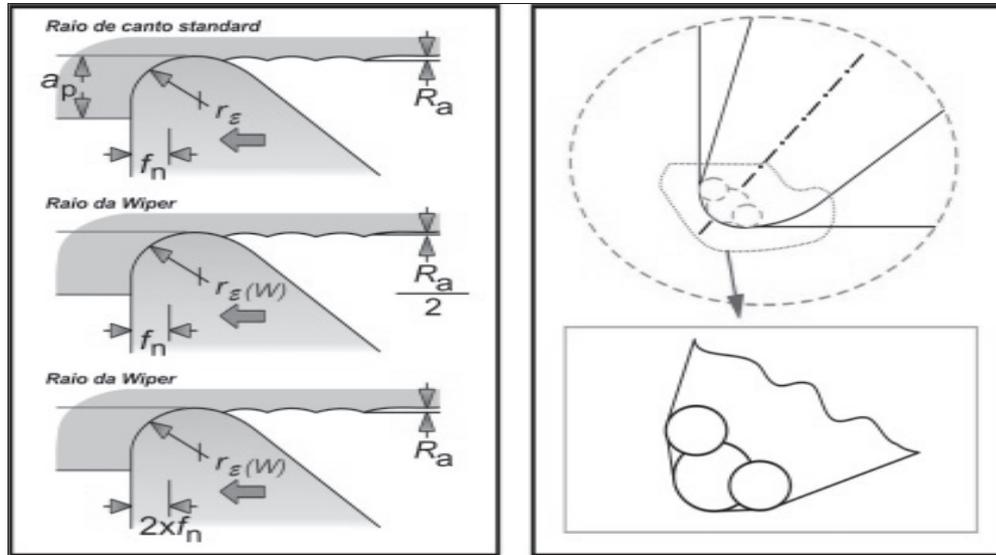


Fig. 1. Ferramenta wiper e Geometria do raio de ponta para ferramentas alisadora (Sandvik-Coromant) [29].

Tabela 1. Composição do Aço ABNT 52100.

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

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 N.m.

Os inserts são de cerâmica mista (Al_2O_3+TiC), recoberta com nitreto de titânio (TiN), classe GC 6050, com geometria alisadora ISO CNGA 120408 S01525WH. O suporte da ferramenta tem Modelo ISO DCLNL 1616H12; ângulo de posição de 95° , ângulo de saída de -6° , ângulo de inclinação de -6° e ângulo de folga de 7° .

A Fig. 1 apresenta os raios alisadores da geometria da ponta da ferramenta e o seu efeito combinado com o avanço na rugosidade da peça usinada.

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.

A dureza do aço ABNT 52100 chegou a 50 HRC. Este aço possui a seguinte composição química de acordo com a tabela 1.

Para as medições necessárias de parâmetros de rugosidade R_a e R_t utilizou-se rugosímetro modelo Mitutoyo, SJ 201. O desgaste da ferramenta foi monitorado utilizando-se um microscópio óptico Olympus SZ 61 com câmera digital com 30 x ampliação. O desgaste admissível de flanco foi estabelecido $VB_{max}=0,3$ mm de acordo com norma ISO 3685 (1993).

Tabela 2. Parâmetros de usinagem utilizados.

Símbolo	Unidade	Níveis dos fatores		
		-1	0	+1
V_c	m/min	200	220	240
f	mm/rev	0,20	0,30	0,40
a_p	mm	0,15	0,22	0,30

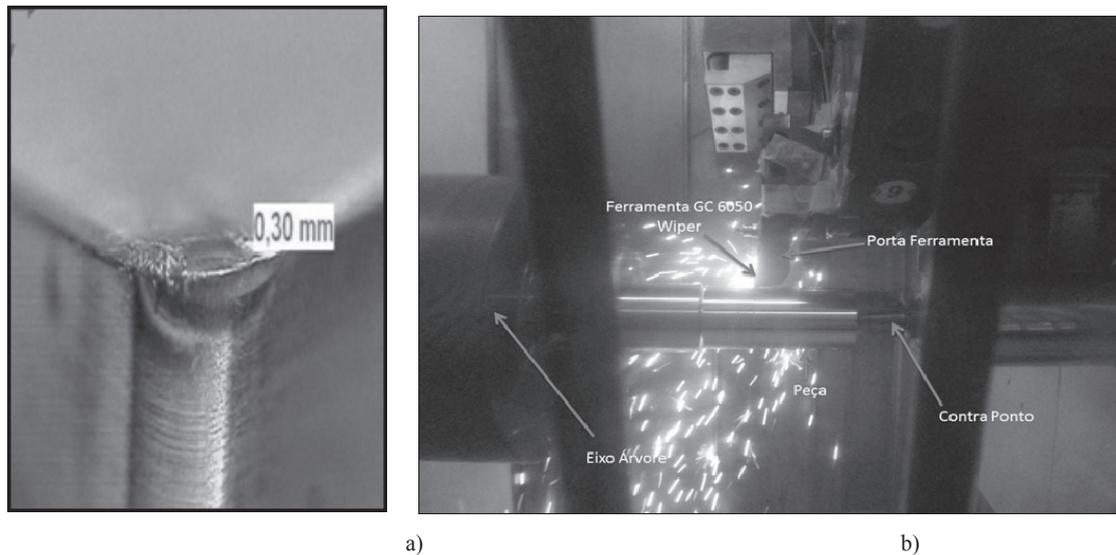


Fig. 2. Processo de torneamento duro com ferramenta de cerâmica mista.

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 de corte, avanço de corte, profundidade de corte e seus respectivos níveis de variação. Os níveis foram especificados em função de dados recomendados pelo catálogo do fabricante das ferramentas [29] e também foi elaborado um planejamento fatorial (três parâmetros e dois níveis e um ponto central) para a realização dos ensaios.

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) e na vida da ferramenta (T) da peça usinada, através da aplicação da metodologia de projeto de experimentos (DOE) e metodologia de superfície de resposta (MSR).

Foi adotado como critério de troca de ferramenta, principalmente valores de rugosidade ($R_a < 0,5$) μm e desgaste de flanco $VB_{\text{max}} < 0,3$ mm (Fig. 2.a). 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_{max}).

A Fig. 2.b representa o processo de torneamento do aço AISI 52100 usado no estudo experimental.

As medições de rugosidade foram realizadas sempre quatro vezes nos pontos (A, B, e C), conforme esquema ilustrado na Fig. 3, (lados simétricos); após as medições de rugosidade foi realizada a média aritmética dos valores de rugosidade. Para monitoramento da vida da ferramenta foi medido o tempo e o número de passes em cada valor dos parâmetros do processo.

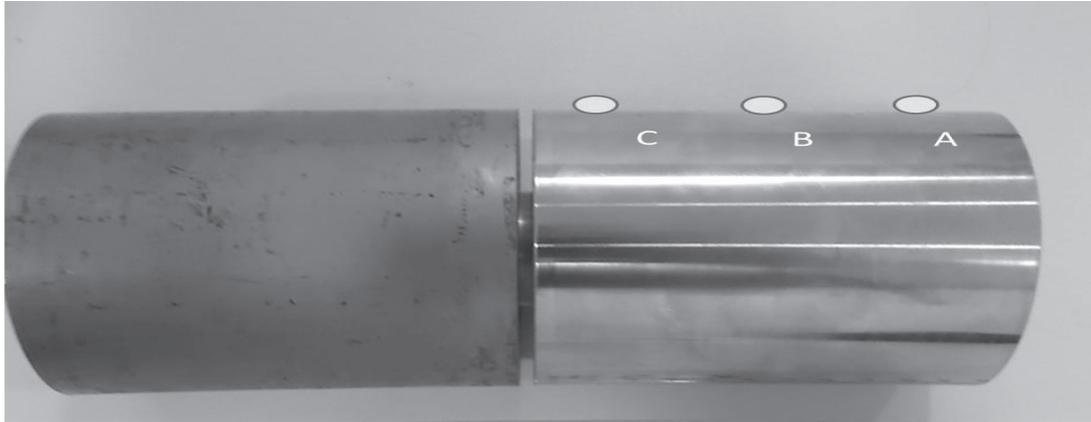


Fig. 3. Posições de leitura da rugosidade nos corpos de prova.

Tabela 3. Fatorial completo 2^3 para as respostas vida da ferramenta(T) e de rugosidades (Ra,Rt).

Nº exp	V_c m/min	f mm/v	a_p mm	A	B	C	T min	Ra μm	Rt μm
1	200	0,2	0,15	-1	-1	-1	17,21	0,25	1,41
2	240	0,2	0,15	1	-1	-1	11,37	0,27	1,72
3	200	0,4	0,15	-1	1	-1	5,96	0,31	2,12
4	240	0,4	0,15	1	1	-1	4,48	0,30	2,15
5	200	0,2	0,30	-1	-1	1	9,42	0,25	1,45
6	240	0,2	0,30	1	-1	1	7,37	0,25	1,58
7	200	0,4	0,30	-1	1	1	4,03	0,34	2,01
8	240	0,4	0,30	1	1	1	6,10	0,29	1,99
9	220	0,3	0,22	0	0	0	4,89	0,26	1,81
10	220	0,3	0,22	0	0	0	5,01	0,27	1,71
11	220	0,3	0,22	0	0	0	4,77	0,26	1,72
12	220	0,3	0,22	0	0	0	5,01	0,27	1,71
13	220	0,3	0,22	0	0	0	5,12	0,26	1,72

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da elaboração de um arranjo fatorial completo com cinco pontos centrais foi feita a análise dos dados obtidos experimentalmente. A tabela 3 apresenta os resultados da vida (T) da ferramenta de cerâmica mista e as rugosidades (Ra, Rt) para as oito condições ensaiadas necessárias à obtenção dos pontos fatoriais e cinco pontos centrais.

A partir dos dados da Tabela 3 realizou-se a ANOVA para comparar as médias dos três fatores em dois níveis (2^3) e com os pontos centrais, tanto para a resposta de vida da ferramenta (T) como para as rugosidades (Ra, Rt).

A análise dos dados das Tabelas 4, 5 e 6, permitem concluir que os níveis adotados para os fatores no arranjo encontram-se nas proximidades da região de ótimo, uma vez que o valor P da curvatura tanto para a vida da ferramenta (T) como para as rugosidades (Ra, Rt) apresentam um valor inferior ao nível de significância (α) de 5%, o que sinaliza a existência de curvatura. Desta forma, pode-se utilizar um Center Composite Design (CCD). O CCD é um arranjo experimental do tipo MSR capaz de gerar modelos quadráticos e é formado por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo, um conjunto de pontos centrais e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados “pontos axiais”.

Tabela 4. Fatorial completo 2^3 para a resposta vida da ferramenta (T).

Termo	Efeito	Coef	SE coef	T	p
Constante		8,248	0,047	175,281	0,000
Vc	-1,823	-0,912	0,047	-19,372	0,000
f	-6,199	-3,099	0,047	-65,871	0,000
a_p	-3,026	-1,513	0,047	-32,154	0,000
Vc*f	2,121	1,060	0,047	22,532	0,000
Vc* a_p	1,833	0,916	0,047	19,475	0,000
f* a_p	2,874	1,437	0,047	30,543	0,000
Vc*f* a_p	-0,060	-0,030	0,047	-0,641	0,557
Ct Pt		-3,283	0,075	-43,274	0,000
	S=0,133	R-Sq=99,96%	RSq(adj)= 99,87%		

Tabela 5. Fatorial completo 2^3 para a resposta de rugosidades Ra.

Termo	Efeito	Coef	SEcoef	T	p
Constante		0,280	0,001	470,101	0,000
Vc	-0,010	-0,004	0,001	-7,962	0,001
f	0,037	0,027	0,001	45,111	0,000
a_p	0,005	0,000	0,001	1,433	0,226
Vc*f	-0,027	-0,012	0,001	-19,801	0,000
Vc* a_p	0,002	-0,007	0,001	-12,861	0,000
f* a_p	0,013	0,006	0,001	10,001	0,001
Vc*f* a_p	0,012	-0,001	0,001	-2,653	0,057
Ct Pt		-0,023	0,001	-24,182	0,000
	S=0,002	R-Sq=99,88%	RSq(adj)=99,64%		

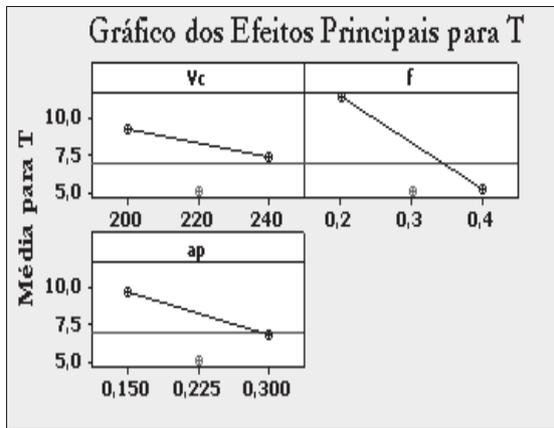
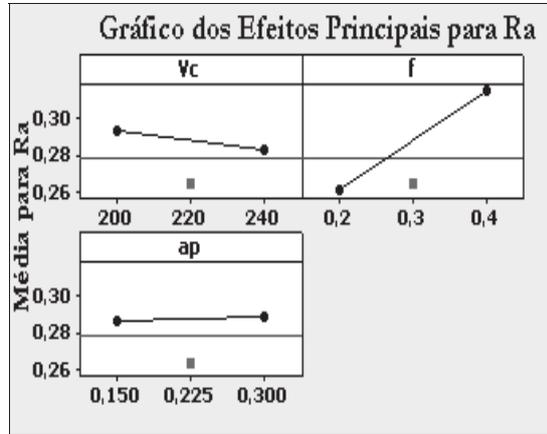
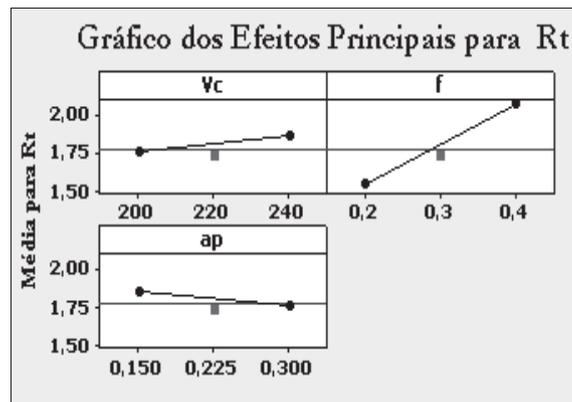
Tabela 6. Fatorial completo 2^3 para a resposta de rugosidades Rt.

Termo	Efeito	Coef	SE coef	T	p
Constante		1,807	0,016	113,402	0,000
Vc	0,112	0,056	0,016	3,513	0,025
f	0,528	0,264	0,016	16,572	0,000
a_p	-0,094	-0,047	0,016	-2,953	0,042
Vc*f	-0,105	-0,053	0,016	-3,311	0,030
Vc* a_p	-0,057	-0,029	0,016	-1,804	0,145
f* a_p	-0,044	-0,022	0,016	-1,403	0,235
Vc*f* a_p	0,032	0,016	0,016	1,002	0,372
Ct Pt		-0,073	0,026	-2,862	0,046
	S=0,045	R-Sq= 98,55%	RSq(adj)=95,65%		

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos e suas interações no comportamento da vida da ferramenta (T) e das rugosidades (Ra, Rt), pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos nas Tabelas 4, 5 e 6, onde respectivamente mostram estas análises para as respostas da vida da ferramenta (T) e rugosidades (Ra, Rt) sucessivamente.

Pode ser observado que o fator que exerce maior influência na vida da ferramenta (Tabela 4) é a velocidade de corte e os efeitos principais. A interação tripla não possui influência significativa para a vida da ferramenta.

Da mesma maneira observando-se o fator que exerce maior influência na rugosidade Ra (Tabela 5) é o avanço de corte. Segue-se a este fator, considerando-se o nível de significância sobre os valores da rugosidade média, as interações entre velocidade de corte e avanço de corte, entre velocidade de corte e pro-

Fig. 4. Efeitos de V_c , f e a_p em (T)Fig. 5. Efeitos de V_c , f e a_p em (Ra).Fig. 6. Efeitos de V_c , f e a_p em (Rt).

fundidade de corte e entre avanço de corte e profundidade de corte, assim como velocidade de corte e a interação tripla porém com um nível de significância inferior ao nível de significância do avanço de corte. A profundidade de corte não possui influência significativa para a rugosidade Ra.

O fator que exerce também maior influência na rugosidade Rt (Tabela 6) é o avanço de corte, seguidos da velocidade de corte e entre as interações velocidade de corte e avanço de corte e pela profundidade de corte. As interações entre velocidade e profundidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte e a interação tripla não possuem influência significativa para a rugosidade Rt.

As Figuras 4, 5 e 6 fornecem os gráficos dos efeitos principais V_c , f e a_p na vida da ferramenta e nas rugosidades (Ra, Rt) sucessivamente.

Nota-se na Fig. 4 que todos os efeitos principais concorrem para a redução da vida da ferramenta quando estão em seu nível superior, ou seja, o aumento da velocidade de corte, do avanço de corte ou da profundidade de corte, reduzem a vida da ferramenta. O aumento destes fatores implicam no crescimento da temperatura e do mecanismo de desgaste por abrasão, fazendo com que os desgastes de flanco e cratera observados durante os ensaios se elevem significativamente. Observando a Fig. 5, que fornece os efeitos principais V_c , f e a_p na rugosidade média da superfície da peça, pode-se notar que, dentre todos os efeitos principais, quanto maior o valor do avanço de corte maior é a rugosidade (Ra). Neste caso a velocidade de corte apresentou uma influência positiva sobre o valor da rugosidade média da peça, ou seja a rugosidade diminui com o aumento da velocidade. Isto pode ser explicado pelo maior desgaste da ferramenta na maior velocidade e também pela maior facilidade de formação do cavaco nesta condição. Com a elevação da velocidade tem-se maior temperatura de corte e melhor cisalhamento do cavaco endurecido.

Tabela 7. Níveis dos fatores da metodologia de superfície de resposta.

Símbolo	Unidade	Níveis dos fatores				1,68
		-1,68	-1	0	+1	
V_c	m/min	186	200	220	240	254
f	mm/rev	0,13	0,20	0,30	0,40	0,46
a_p	mm	0,09	0,15	0,22	0,30	0,35

Tabela 8. Parâmetros de corte e resultados para o MSR das respostas vida da ferramenta e rugosidades (Ra,Rt).

Nº exp	V_c m/min	f mm/v	a_p mm	A	B	C	T min	Ra μm	Rt μm
1	200	0,2	0,15	-1	-1	-1	17,21	0,25	1,41
2	240	0,2	0,15	1	-1	-1	11,37	0,27	1,72
3	200	0,4	0,15	-1	1	-1	5,96	0,31	2,12
4	240	0,4	0,15	1	1	-1	4,48	0,30	2,15
5	200	0,2	0,3	-1	-1	1	9,42	0,25	1,45
6	240	0,2	0,3	1	-1	1	7,37	0,25	1,58
7	200	0,4	0,3	-1	1	1	4,03	0,34	2,01
8	240	0,4	0,3	1	1	1	6,10	0,29	1,99
9	186	0,3	0,22	-1,68	0	0	9,51	0,29	1,69
10	254	0,3	0,22	1,68	0	0	6,86	0,26	1,81
11	220	0,13	0,22	0	-1,68	0	14,18	0,21	1,54
12	220	0,47	0,22	0	1,68	0	4,12	0,31	2,54
13	220	0,3	0,1	0	0	-1,68	9,42	0,31	1,94
14	220	0,3	0,35	0	0	1,68	4,92	0,31	1,74
15	220	0,3	0,22	0	0	0	4,89	0,26	1,81
16	220	0,3	0,22	0	0	0	5,0	0,26	1,71
17	220	0,3	0,22	0	0	0	4,77	0,26	1,71
18	220	0,3	0,22	0	0	0	5,01	0,26	1,71
19	220	0,3	0,22	0	0	0	5,12	0,26	1,71

A Fig. 6 fornece os efeitos principais V_c , f e a_p na rugosidade Rt. Nota-se que quanto maior o valor da velocidade de corte e do avanço de corte maior a rugosidade (Rt) e quando a profundidade de corte está em seu nível superior, ou seja, o aumento da profundidade de corte reduz a Rugosidade (Rt).

Para a obtenção do CCD, anteriormente mencionado, serão utilizados os resultados do fatorial da Tabela 3 e como complemento apenas os pontos axiais do arranjo.

Utilizou-se um arranjo de superfície de resposta do tipo CCD para três fatores. Com este arranjo experimental, 19 ensaios em condições controladas foram realizados. Para cada condição experimental foram observadas a vida da ferramenta e a rugosidade (Ra, Rt) da peça usinada. Considerando-se os valores obtidos, esta pesquisa procurou estudar um modelo através da Metodologia de Superfície de Resposta para a vida da ferramenta e as rugosidades da peça (Ra, Rt).

A Tabela 2 apresenta os três fatores: velocidade de corte, avanço de corte, profundidade de corte e seus respectivos níveis de variação e os pontos axiais.

A Tabela 8 apresenta o cálculo das rugosidades (Ra, Rt) e da vida da ferramenta para o modelo de superfície de resposta, com 19 experimentos.

Realizando-se uma análise de variância para os dados do CCD disposto na tabela 8, para a vida da ferramenta e rugosidades Ra e Rt, obtém-se os resultados da tabela 9, 10 e 11 sucessivamente.

Tabela 9. ANOVA do fatorial completo 2^3 com cinco pontos centrais para resposta vida.

TERMO	COEF	SEcoef	T	P
Constante	4,969	0,084	59,05	0,000
V_c	-0,860	0,050	-16,86	0,000
f	-3,053	0,050	-59,89	0,000
a_p	-1,439	0,050	-28,23	0,000
$V_c \times V_c$	1,114	0,050	21,85	0,000
$f \times f$	1,455	0,050	28,54	0,000
$a_p \times a_p$	0,756	0,050	14,82	0,000
$V_c \times f$	1,060	0,066	15,91	0,000
$V_c \times a_p$	0,916	0,066	13,75	0,000
$f \times a_p$	1,437	0,066	21,57	0,000
S= 0,188		RSq= 99,9%	RSq(adj)= 99,7%	

Tabela 10. ANOVA do fatorial completo 2^3 com cinco pontos centrais para a resposta rugosidade Ra.

TERMO	COEF	SEcoef	T	P
Constante	0,264	0,001	180,211	0,000
V_c	-0,006	0,000	-7,241	0,000
f	0,028	0,000	31,822	0,000
a_p	0,001	0,000	1,549	0,156
$V_c \times V_c$	0,005	0,000	6,276	0,000
$f \times f$	0,001	0,000	1,298	0,227
$a_p \times a_p$	0,017	0,000	19,812	0,000
$V_c \times f$	-0,012	0,001	-10,452	0,000
$V_c \times a_p$	-0,007	0,001	-6,791	0,000
$f \times a_p$	0,006	0,001	5,282	0,001
S= 0,0032		R-Sq = 99,5%	RSq(adj)= 98,9%	

Tabela 11. ANOVA do fatorial completo 2^3 com cinco pontos centrais para resposta a rugosidade Rt.

TERMO	COEF	SE coef	T	P
Constante	1,736	0,028	59,967	0,000
V_c	0,048	0,017	2,754	0,022
f	0,277	0,017	15820	0,000
a_p	-0,052	0,017	-2,994	0,015
$V_c \times V_c$	-0,010	0,017	-0,623	0,549
$f \times f$	0,093	0,017	5,301	0,000
$a_p \times a_p$	0,021	0,017	1,221	0,253
$V_c \times f$	-0,052	0,022	-2,301	0,047
$V_c \times a_p$	-0,028	0,022	-1,254	0,241
$f \times a_p$	-0,022	0,022	-0,971	0,357
S= 0,0648		R-Sq = 97,1%	RSq(adj) = 94,3%	

Procedendo-se a análise dos dados da tabela 8, pode-se obter o modelo de segunda ordem (Modelo Quadrático Completo) para vida da ferramenta e para as rugosidades (R_a , R_t), conforme tabela 9, 10 e 11 o coeficiente de determinação dos modelos R-Sq(adj) apresenta excelentes ajustes com valores de R-Sq(adj)=99,7% para (T), RSq(adj)=98,9% para R_a e RSq(adj)=94,3% para R_t , o que significa que os modelos explicam adequadamente os fenômenos. Por esta razão decidiu-se empregar neste trabalho o mode-

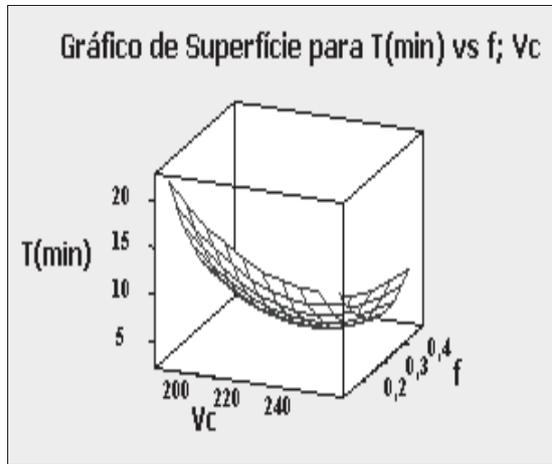


Fig. 7. Superfície de resposta para T .

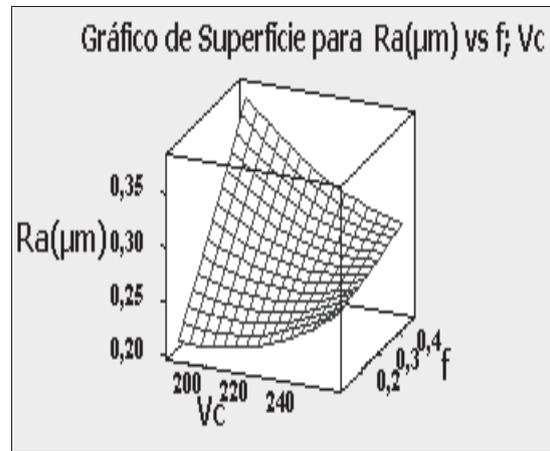


Fig. 8. Superfície de resposta para Ra.

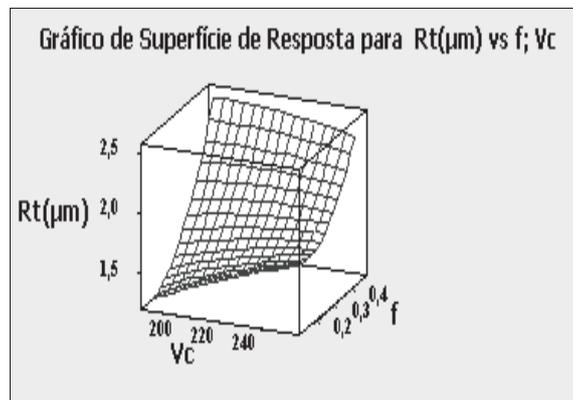


Fig. 9. Superfície de resposta para Rt.

lo quadrático completo, que pode ser escrito em sua forma decodificada, para a vida da ferramenta e as rugosidades (Ra, Rt) como apresentado pelas equações 3.1, 3.2 e 3.3 sucessivamente:

$$T=4,9696-0,8600Vc-3,0533f-1,4396 a_p +1,1143Vc*Vc+1,4558f*f+0,7560 a_p * a_p +1,0604Vc*f+0,9164Vc*a_p +1,4371*f*a_p \quad (3.1)$$

$$Ra=0,2640-0,0064Vc+0,0282f+0,0013a_p+0,0055Vc*Vc+0,0011f*f+0,0175a_p*a_p-0,0121Vc*f-0,078Vc*a_p +0,0061f*a_p \quad (3.2)$$

$$Rt=1,7366+0,0483Vc+0,2775f-0,0525a_p-0,0109Vc*Vc+0,0930f*f+0,0214a_p*a_p-0,0527Vc*f-0,00287Vc*a_p-0,0022f*a_p \quad (3.3)$$

Com estas equações pode-se analisar as superfícies de respostas geradas para a vida da ferramenta e rugosidades (Ra, Rt). As Figuras 7, 8 e 9 mostram as superfícies de resposta para as respostas vida da ferramenta e rugosidades (Ra, Rt) sucessivamente.

A Fig. 7 mostra a superfície de resposta para a vida da ferramenta considerando-se a profundidade de corte constante e igual a 0,225 mm. Observando a mesma nota-se que para valores crescentes da velocidade de corte e do avanço de corte, a vida da ferramenta diminui.

A Fig. 8 apresenta a superfície de resposta para a rugosidade Ra em função da velocidade de corte e do avanço de corte para uma profundidade de corte de 0,225 mm. Enquanto que a Fig. 11 exibe o gráfico de contorno para a rugosidade média em função da velocidade de corte e avanço de corte. A análise dos gráficos, tanto a superfície de resposta, como o gráfico de contorno, evidenciam o fato de que, o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média Ra da superfície usinada é o avanço de corte e a

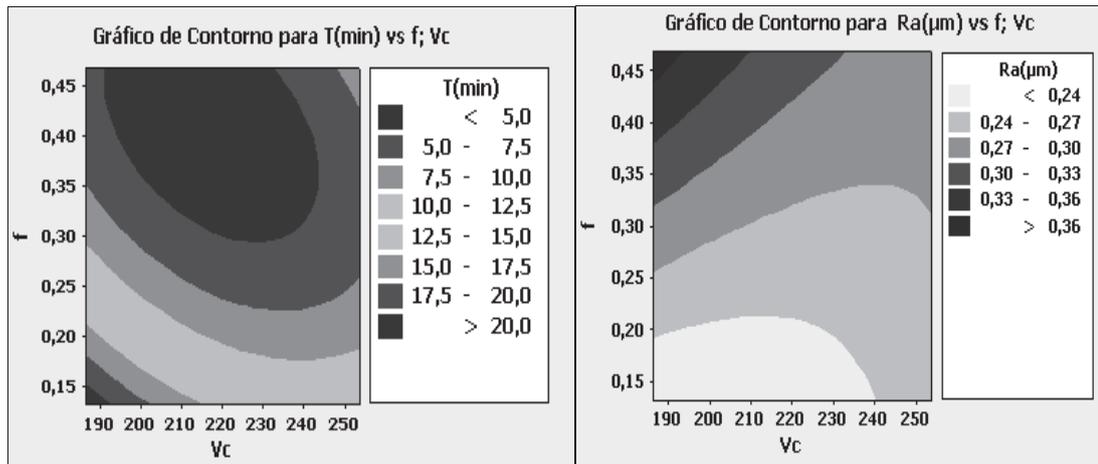


Fig. 10. Contorno de resposta para T.

Fig. 11. Contorno de resposta para Ra.

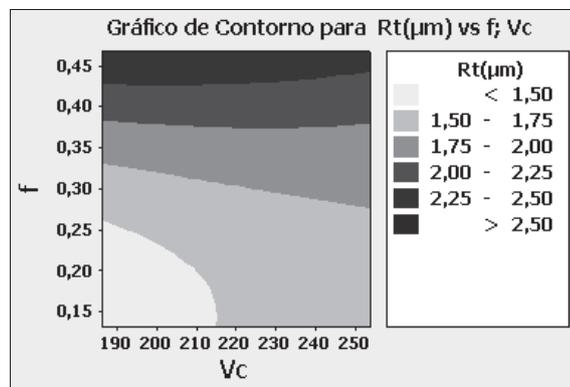


Fig. 12. Contorno de resposta para Rt.

velocidade de corte. Nota-se que com o aumento do avanço de corte e a velocidade de corte a rugosidade aumenta.

A Fig. 9 apresenta a superfície de resposta para a rugosidade R_t em função da velocidade de corte e do avanço de corte para uma profundidade de corte de 0,225 mm. A análise do gráfico de superfície de resposta evidencia o fato de que, o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade R_t da superfície usinada é o avanço de corte e a velocidade de corte. Nota-se que com o aumento do avanço de usinagem e velocidade de corte a rugosidade aumenta.

A Fig. 10, 11 e 12 mostram os gráficos de contorno para as respostas vida da ferramenta e rugosidades (R_a , R_t). A Fig. 10 mostra o comportamento da vida da ferramenta, separando-a em diferentes faixas de vida para diversos valores de velocidade de corte e avanço de corte, considerando-se a profundidade de corte constante e igual a 0,225 mm. Nota-se que um aumento nos valores da velocidade de corte ou do avanço de corte, ou mesmo nos dois fatores simultaneamente, acarreta uma redução da vida da ferramenta. Este fato pode ser claramente visualizado na Fig. 10, onde se observa que um aumento de nível nos valores de velocidade de corte produz efeito mais acentuado na vida da ferramenta. Para o material em questão, com profundidades de corte da ordem de 0,225 mm, velocidades de corte de 200 m/min e avanços de corte de 0,3 mm/rev obtém-se vidas de ferramentas entre 15 min e 17,5 min. Estes níveis para os parâmetros de corte otimizam a vida da ferramenta de cerâmica mista wiper.

Na Fig. 11 percebe-se que com o valor de avanço de corte na faixa de 0,4 mm/v encontrou-se a rugosidade R_a abaixo de 0,4 μm . Na Fig. 12 observa-se que para elevados avanços de corte (até 0,40 mm/rev),

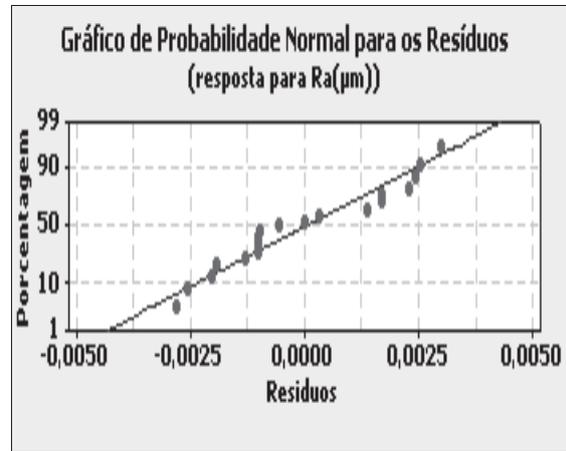


Fig. 13. Análise de resíduos da resposta vida (T). Fig. 14. Análise de resíduos da resposta rugosidade Ra.

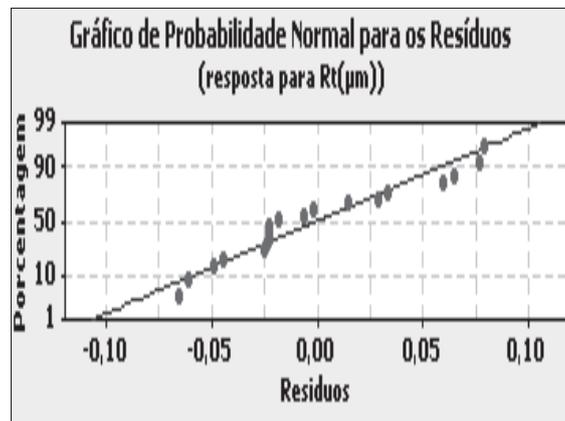


Fig. 15. Análise de resíduos da resposta rugosidade Rt.

para diversos valores de velocidade de corte na faixa de 190-250 m/min obtém-se valores de rugosidade Rt relativamente baixos na faixa de até 2,5 μm .

De acordo com as recomendações de vários autores [23, 25], em todo DOE deve-se realizar uma análise dos resíduos das respostas. Resíduos são as diferenças entre duas ou mais observações e a média formada por estas observações. A análise de resíduos tem a finalidade de avaliar a qualidade dos resultados; em outras palavras, demonstrar se os resultados são reais ou se não passam de mera coincidência. Além disso, servem para identificar discrepâncias ou erros, tais como: inversão de valores, digitação incorreta, inadequação do resultado ao experimento, etc. Segundo Montgomery [25] 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 vida da ferramenta e para as rugosidades Ra e Rt apresentam distribuições normais. A Fig. 13, 14 e 15 apresentam as retas de probabilidade normal dos resíduos dos modelos da vida da ferramenta e das 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%, porém conclui-se que os resíduos 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. Os parâmetros de rugosidades Ry, Rz e Rq também foram medidos nos experimentos. De posse destes resultados foi realizada uma análise de correlação entre todos os parâmetros de rugosidade (Ra, Rt, Ry, Rz e Rq). A tabela 12 apresenta esta análise onde se observou 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 87%. Assim, optou-se por não apresentar os demais modelos de rugosidades Ry, Rz e Rq.

Tabela 12. Correlação entre as rugosidades (Ra,Rt,Ry,Rz e Rq).

Correlações: Ra; Ry; Rz; Rq; Rt				
	Ra	Ry	Rz	Rq
Ry	0,967*			
	0,000**			
Rz	0,964	0,987		
	0,000	0,000		
Rq	0,909	0,883	0,884	
	0,000	0,000	0,000	
Rt	0,967	0,996	0,977	0,878
	0,000	0,000	0,000	0,000

* valor de Pearson

** valor de P-Value

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 análise dos parâmetros de usinagem utilizando a técnica de MSR tem a vantagem de mostrar a influência de cada um dos parâmetros de usinagem bem como suas interações;
- A geometria alisadora da ferramenta propiciou a obtenção de baixas rugosidades Ra na faixa 0,2-0,4 μm com avanços de corte relativamente altos (0,2-0,4 mm/v) e rugosidade Rt na faixa de 1,4-2,8 μm ;
- O avanço de corte foi o fator que mais influenciou nas rugosidades (Ra, Rt);
- A velocidade de corte foi o fator que mais influenciou na vida da ferramenta (T) .
- Os fatores velocidade de corte (V_c), avanço de corte (f) e profundidade de usinagem (a_p), exercem influência significativa no tempo de vida da ferramenta, sendo que o aumento de cada um deles contribui para a redução da vida da ferramenta de corte;
- Os modelos completos obtidos pela MSR apresentaram excelentes ajustes dos parâmetros da vida da ferramenta e das rugosidades Ra e Rt, o que demonstra que os fatores avanço, velocidade e profundidade de corte, bem como suas interações têm influência significativa na vida da ferramenta e nas rugosidades Ra e Rt;
- A análise de variância indicou que os níveis das variáveis experimentadas estão numa região de ótimo para a vida da ferramenta e para as rugosidades Ra e Rt, pois o valor de P de curvatura é menor que 5%.
- 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.

AGRADECIMENTOS

O Autor P.H.S. Campos (CAPES- Process N° 9801-12.0). Gostaria de expressar a sua gratidão ao CAPES pelo apoio a esta pesquisa, por meio do Programa Institucional - PDSE.

REFERÊNCIAS

- [1] Suresh, R., Basavarajappa, S., Gaitonde, V.N., Samuel, G.L., Davim, J.P., “State-of-the-art research in machinability of hardened steels”, *Proc I Mech E Part B: J. Engineering Manufacture*, **227**(2),191–209 (2013)
- [2] Elbestawi, M.A., Chen, L., Becze, C.E., El-Wardany, T.I., “High-speed milling of dies and molds in their hardened state”, *Ann CIRP*, **46**(1), 57–62 (1997)
- [3] Koenig, W., Komanduri, R., Toenshoff, H.K., Ackeshott, G., “Machining of hard metals”, *Ann. CIRP*, **33**(2), 417–427 (1984)
- [4] Toenshoff, H.K., Arendt, C., Ben Amor, R., “Cutting hardened steel”, *Ann. CIRP*, **49**(2), 1–19 (2000)
- [5] Paiva, A.P., Ferreira, J.R., Balestrassi, P.P., “A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization”, *J. Mater Process Technol.*, **189**, 35-26 (2007)
- [6] 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)
- [7] Ozel, T., Karpaz, Y., Figueira, L., Davim, J.P., “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)
- [8] Huang, Y., Chou, Y.K., Liang, S.Y., “CBN tool wear in hard turning: survey on research progresses”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **35**, 453-443 (2007)
- [9] Tamizharasan, T., Sevaraj, T., Haq, A.N., “Analysis of tool wear and surface finish in hard turning”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **28**, 679-671 (2006)
- [10] Ozel, T., Karpaz, Y., Figueira, L., Davim, J.P., “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)
- [11] Ozel, T., Hsu, T.K., Zeren, E., “Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel”, *Int J Adv Manuf Technol.*, **25**, 269-262 (2005)
- [12] Zhou, J.M., Walter, H., Andersson, M., Stahl, J.E., “Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool”, *Inter. J. Mach. Tools Manufact.*, **43**, 301–305 (2003)
- [13] Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Figueira, L., Davim, J.P., “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)
- [14] Bouacha, K., Yallese, M.A., Mabrouki, T., Rigal, J.F., “Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool”, *Int J Refract Metals Hard Mater.*, **28**, 361-349 (2010)
- [15] Iqbal, A., Ning, H., Khan, I., Liang, L., Dar, N.U., “Modeling the effects of cutting parameters in MQL-employed finish hard-milling process using D-optimal method”, *J. Mater. Process Technol.*, **199**, 390-379 (2008)
- [16] Singh, D., Rao, P.V., “Performance improvement of hard turning with solid lubricants”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **38**, 535-529 (2008)
- [17] Zhang, X.P., Liu, C.R., Yao, Z., “Experimental study and evaluation methodology on hard surface integrity”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **34**,148-141 (2007)
- [18] Haq, A.N., Tamizharasan, T., “Investigation of the effects of cooling in hard turning operations”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **30**, 816-808 (2006)
- [19] Davim, J.P., Figueira, L., “Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques”, *J. Mater. Des.*, **28**,1186–1191 (2007)
- [20] 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)
- [21] Benga, G.C., Abrão, A.M., “Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools”. *J Mater Process Technol*; **143**: 241-237 (2003)
- [22] Singh, D., Rao, P.V., “A surface roughness model for hard turning process”. *Int J Adv Manuf Technol.*, **32**:1124-1115 (2007)
- [23] Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S., *Statistics for Experimenters*, New York, John Wiley & Sons (1978)

- [24] Taguchi, G., *System of Experimental Design*, UNIPUB, Kraus International Publications, New York (1986)
- [25] Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons (2004)
- [26] Myers, R.H., “Response surface methodology-current status and future directions, with discussion”, *Journal of Quality Technology*, **31**, 30–44 (1999)
- [27] Hill, W.J., Hunter, W.G., “A Review of response surface methodology: a literature review”, *Tecnometrics*, **8**, 571-590 (1996)
- [28] Drapper, N., Lin, D.K.J., *Response surface designs*, Chapter 11 in Handbook of Statistics. Vol. 13. (1996)
- [29] Sandvik-Coromant, *Tecnologia da usinagem dos metais-Manual técnico*, Sandviken, Sweden (2010)

MODELING OF SURFACE ROUGHNESS AND TOOL LIFE IN AISI 52100 STEEL HARD TURNING WITH WIPER MIXED CERAMICS USING SURFACE METHODOLOGY

Abstract – This work specifically addresses the mathematical modeling of surface roughness (R_a , R_t) and the life of tool in the process of turning ABNT 52100 hardened steel (50 HRC). A tool mixed with ceramic wiper (wiper) geometry was used. Mathematical models were obtained by the response surface methodology (RSM), having as variables influence the cutting speed parameters, cutting feed and depth of cut. In this case, taking into account the simultaneous variation of factors, one can construct mathematical models of forecasting and optimization to the responses of interest. This statistical nature approach is to design experiments capable of generating appropriate data for effective analysis, resulting in valid and objective conclusions.

Keywords – Hard turning, Response Surface Methodology, Surface roughness, Tool life, Ceramic Wiper.