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

Paulo Henrique Campos[1], João Roberto Ferreira[2], Anderson Paulo de Paiva[3], Pedro Paulo Balestrassi[4]

1-Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Av. BPS, 1303 – Itajubá, MG – Brasil, (paulohcamposs@hotmail.com)

2-Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Av. BPS, 1303 – Itajubá, MG – Brasil, (jorofe@unifei.edu.br)

3-Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Av. BPS, 1303 – Itajubá, MG – Brasil, (andersonppaiva@yahoo.com.br)

4-Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Av. BPS, 1303 – Itajubá, MG – Brasil, (ppbalestrassi@gmail.com)

Resumo

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 geometrias especiais e materiais para ferramentas de elevada dureza e resistência ao desgaste em altas temperaturas, aliados ao surgimento de máquinas ferramentas com rigidez e precisão dimensional em altas rotações, é possível a usinagem destes materiais pelo processo de torneamento. A substituição do processo de retificação pelo torneamento duro traz 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, máquinas-ferramenta de menor custo e também a possibilidade da realização de várias operações numa mesma fixação, o que garante as características geométricas da peça e reduz o tempo de usinagem. 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, 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, 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. É neste contexto que surge a metodologia de projetos de experimento (DOE), bem como a metodologia de superfície de resposta (MSR) através da qual se pode estabelecer um relacionamento funcional adequado entre as características do produto usinado e ou da ferramenta utilizada (vida de ferramenta, rugosidade da superfície usinada, custo do processo, tempos de usinagem) e parâmetros 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. Este trabalho trata especificamente do modelamento matemático de rugosidade (Ra, Rt) da peça e da vida da ferramenta 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 matemáticos serão obtidos pela metodologia de superfície de resposta tendo como variáveis de influência os parâmetros velocidade de corte, taxa de avanço e a profundidade de usinagem.

Palavras-chave: Modelamento com MSR, Rugosidade Ra e Rt, Vida de ferramenta, Torneamento duro, Cerâmica *Wiper*.

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 [1,2,3,4].

Trata-se da remoção de materiais cuja dureza é superior a 45 HRC. A operação de torneamento é realizada com materiais de ferramenta avançadas, por exemplo, cerâmica mista (Al_2O_3 + TiC), boro cúbico nitreto (CBN), que induz um benefício significativo, tais como curto tempo de ciclo de corte, flexibilidade do processo, baixa rugosidade da superfície de corte , alta taxa de remoção de material, precisão dimensional e ambiente seguro na usinagem sem fluido de corte. É também de referir que este processo aproveita a capacidade de movimento de máquinas-ferramentas modernas, que permitem produzir diferentes geometrias de contorno e gerar formas complexas no material que está sendo usinado.

O torneamento duro reduz significativamente os custos de produção [5], tempo de preparação [6, 7] e melhora a qualidade global do produto [5-8]. Principalmente considerando a sua eficiência na redução de tempo de processamento consumido em cada operação, consumo reduzido de energia [9], 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 [10]. 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 [10]. Huang Liang [11] e [12] relatou que as propriedades e composição dos materiais para ferramentas são fundamentais para o comportamento das forças de usinagem, que por sua vez pode afetar o acabamento superficial e vida útil da ferramenta.

Relacionadas com a contribuição da geometria da ferramenta para a melhoria do processo de torneamento duro, vários trabalhos apresentam o uso de pastilhas Wiper como uma ferramenta de usinagem [6, 9,10]. Grzesik e Wanat [13] apresentaram resultados experimentais para a usinagem do aço AISI 5140 (DIN 41Cr4) peça com uma dureza de 60 HRC usando ferramenta com raio convencional e raio multi-ponto (limpador) geometria mista (Al_2O_3), carbeto de titânio (TiC), pastilhas de cerâmica.Theile et al. [19], apresentou resultados de pesquisa de um investigação experimental dos efeitos da tecnologia de ponta(geometria) e da dureza da peça de trabalho em tensões residuais com acabamento em torneamento duro de aço AISI 52100. Yen et al. [20], investigaram os efeitos de borda na preparação da ferramenta de corte na formação de cavacos, forças de corte e variáveis do processo (estresse, temperatura e pressão) em corte ortogonal, conforme determinado pelo método de elementos finitos (FEM) simulações.

Ozel [21] investigaram a influência da geometria da aresta na ferramenta cerâmica CBN que diz respeito ao desenvolvimento de tensão e temperatura através de simulações de elementos finitos no torneamento duro. Zhou et al. [22] apresentou um estudo do efeito do ângulo do chanfro no desgaste da ferramenta de PCBN no torneamento duro e investigou a correlação entre desgaste da ferramenta de corte, força e vida da ferramenta. Stachowiak [23] observaram que cerâmica mista, ferramentas de desgaste tipo entalhe, apresentam durante a usinagem de materiais duros desgaste de 0,4 mm após 20 min de teste de corte (cerca de 0,3 mm após 15 min), com velocidade de corte de 270 m/min e avanço de 0,12 mm/volta.

Este tipo de inserção permite a utilização de uma taxa de avanço muito maior quando comparado com as ferramentas tradicionais, graças à sua geometria multi-raio [10]. Com esta modificação na geometria, é possível dobrar a taxa de alimentação, aumentando a produtividade e mantendo a rugosidade da superfície da peça o mais baixo possível. Klocke [24] observou que ferramenta multi-raios de modelagem, conhecida como geometria Wiper são empregados com sucesso, pois resulta em uma melhoria substancial do acabamento da superfície mantendo-se abaixo de 0,4 μm. Gaitonde et al. [25], estudando os efeitos dos parâmetros de corte em uma operação de torneamento duro(aço inox AISI D2), analisa os efeitos de profundidade de corte e usinagem de tempo sobre aspectos de usinabilidade, como rugosidade superficial e desgaste da ferramenta utilizando modelos matemáticos de segunda ordem. Utilizando ferramentas wiper CC650, CC650WG e GC6050WH confirmou que a ferramenta de cerâmica mista apresentou melhores rugosidades da superfície da peça e melhor desempenho do desgaste 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] indicam que a rugosidade superficial média (Ra) é atingível com ferramentas wiper, obtendo valores em torno de 0,20 μm. Lima et al. [12] resultados apresentados por torneamento duro de aço ferramenta AISI D2 (58 HRC) utilizando as pastilhas de cerâmica de alumina misturada com geometria convencional relatou que a superfície de acabamento é superior a que é produzida pela retificação cilíndrica. No entanto, os potenciais benefícios promovidos pelo torneamento duro para a qualidade da superfície e o aumento da taxa de produtividade dependem intrinsecamente de uma configuração ideal para os parâmetros do processo como a velocidade de corte (Vc), velocidade de avanço (f) e profundidade de corte (ap). Esses parâmetros são diretamente responsáveis por muitas das propriedades de usinagem previsível como o desgaste da ferramenta, a vida da ferramenta, acabamento de superfície e quantidade de material removido [10]. Nesse sentido, tentando conseguir uma melhor compreensão do processo de torneamento duro, vários trabalhos tem sido feito recentemente [26, 27]. Alguns trabalhos estudaram o efeito das condições de corte (Vc, f, ap) [26-10, 4-5], a influência da dureza da peça [26] e da geometria da ferramenta na rugosidade [26, 10, 28, 29], os efeitos dos fluidos de corte [12-30], o desgaste da ferramenta e sua influência para o erro geométrico como a influência de lubrificantes sólidos [31], a integridade da superfície (rugosidade e danos na camada térmica) [18], os efeitos de arrefecimento [32]. A maioria dessas obras estabelecem uma relação entre as propriedades de saída do processo (vida da ferramenta, rugosidade da superfície, as forças de corte) e as entradas (velocidade de

corte, avanço e profundidade de corte). Davim e Figueira [33] investigou a usinabilidade do aço AISI D2 com dureza 60 HRC em torneamento duro com ferramentas de cerâmica de alumina misturados com revestimento de TiN, analisando a influência dos parâmetros corte (velocidade de corte e alimentação) sob o desgaste de flanco, força específica de corte e rugosidade da superfície utilizando técnicas experimentais e estatísticas (análise de variância (ANOVA)) e desenvolveu modelos de redes neurais para prever o desgaste da ferramenta e a superfície rugosidade.

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) [26, 34, 4, 5, 30,]. Nesta metodologia, o efeito dos parâmetros de corte nas saídas de usinagem são obtidos através de experimentos capazes de gerar um conjunto de dados adequados para a análise estatística eficiente, que por sua vez, produz modelos válidos e objetivos [35]. Estes modelos podem ser utilizados na otimização, simulação ou previsão do comportamento do processo de torneamento, principalmente dentro da faixa experimental [4, 5, 35]. Bouacha et al. [26] usou o RSM para construir modelos quadráticos para rugosidade e forças de corte no estudo do aço endurecido AISI 52100 . Mandal et al. [34] empregaram a metodologia de superfície de resposta para estudar o desgaste de flanco e para descobrir os níveis de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte que minimiza o desgaste da ferramenta. Benga e Abrão [36] estudaram a vida da ferramenta e o acabamento da superfície de aço endurecido 100Cr6 utilizando pastilhas de cerâmica e PCBN com metodologia de superfície de resposta. Singh e Rao [28] realizou uma investigação experimental dos efeitos das condições de corte e geometria da ferramenta sobre a rugosidade da superfície do aço AISI 52100, com pastilhas de cerâmica mista composta de óxido de alumínio e carbonitretos de titânio. Sahin e Motorcu [37] utilizaram a metodologia de superfície de resposta para a rugosidade da superfície do modelo (Ra, Rz e Rmax) no torneamento de aços endurecidos AISI 1050 por nitreto de boro cúbico (CBN).

Diante de tais considerações o objetivo principal deste trabalho experimental trata específicamente do modelamento matemático, isto é, funções de aproximação do fenômeno para expansão em série de Taylor (truncada no termo quadrático) dos parâmetros de rugosidade da peça (Ra, Rt) e da vida da ferramenta (T) em relação à velocidade de corte, taxa de avanço e à profundidade de usinagem, no processo de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido (50 HRC) com ferramenta de cerâmica mista 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 [38] e Taguchi [39], entre outros Prvan et.al. [40], 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 [41]. 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 [41], 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 [41].

Box [38] oferece uma retrospectiva sobre as origens da MSR com uma filosofia geral da aprendizagem seqüencial. Myers et al. [42], apresenta uma discussão aprofundada da MSR. Discute o estado MSR no final dos anos 90 e dá algumas direções para futuras pesquisas. Hill e Hunter [43] oferecem uma extensa bibliografia e aplicações na indústria química e de processo. Drapper e Lin [44] discutem vários aspectos da MSR.

Desde o seu surgimento em 1951 Box [45], a metodolo-

gia de superfície de resposta(MSR) foi transformada em uma das ferramentas mais eficazes para o processo e o produto de desenvolvimento. MSR é composto de técnicas de otimização estatística e numérica para examinar a relação entre uma ou mais variáveis de resposta e um conjunto de variáveis quantitativas experimentais ou outros fatores.

A análise dos dados durante a fabricação, utilizando adequados modelos estatísticos é de grande importância para a precisão e avaliação a ser obtido 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 de superfície de resposta (MSR). Na maioria dos problemas de MSR, existe uma relação funcional entre as respostas e as variáveis independentes e essa relação pode ser explicada através o modelo a seguir [41].

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).

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

Onde: y é a resposta de interesse, xi parâmetros de entrada, β0, βi, βii, βij são coeficientes a serem estimados e k= p número de parâmetros de entrada considerados e ε 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).

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

Neste trabalho, a metodologia foi utilizada como ferramenta de projeto para obtenção da modelagem matemática da rugosidade (Ra,Rt) e da vida da ferramenta (T). 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 [46].

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), fabricante Sandvik, classe GC 6050WH, recoberta com nitreto de titânio (TiN), com geometria alisadora ISO CNGA 120408 S01525WH. O suporte da ferramenta tem Modelo ISO DCLNL 1616H12; Ângulo de posição de 95º, ângulo de saída de -6º, ângulo de inclinação de -6º e ângulo de folga de 7º.

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

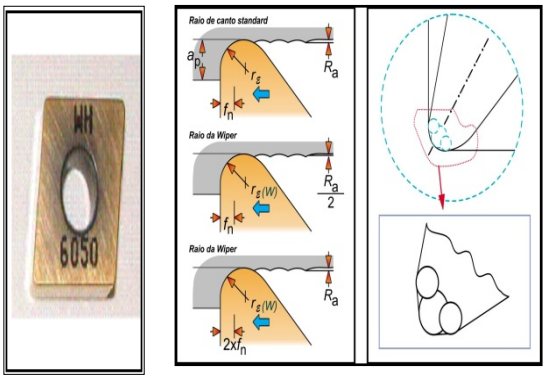


Figura 1. Ferramenta wiper e Geometria do raio de ponta para ferramentas alisadora (Sandvik, 2010).

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 com pré-aquecimento por duas horas, á uma temperatura de 500°C, aquecido por quarenta minutos, á 830°C, seguido por um resfriamento de trinta minutos (martêmpera a 180°C), resfriado ao ar até 80°C, revenido por duas horas a 200°C e novamente resfriado ao ar até aproximadamente 30°C, sendo revenido por duas horas a 200°C e resfriado ao ar. 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):

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

Para as medições necessárias de parâmetros de rugosidade Ra e Rt utilizou-se um instrumento de ponta, Rugosímetro modelo Mitutoyo, SJ 201 com um corte de 0,25 mm, em conformidade com a norma ISO / DIS 4287/1E. O desgaste da ferramenta foi monitorado utilizando-se um microscópio óptico Olympus SZ 61 com câmera digital com 30 x ampliação e resolução de 1 mm. O desgaste admissível de flanco foi estabelecido de acordo com norma ISO 3685 (1993).

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 [47] e também foi elaborado um planejamento fatorial (três parâmetros e

dois níveis e um ponto central) para a realização dos ensaios.

Tabela 2. Parâmetros de usinagem utilizados.

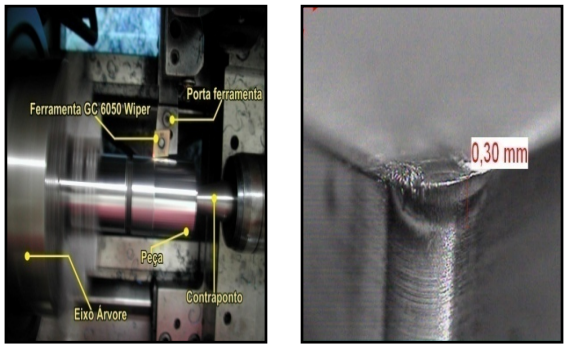
Símbolo	Unidade	Níveis dos fatores		
		-1	0	+1
Vc	m/min	200	220	240
f	mm/rev	0,20	0,30	0,40
ap	mm	0,15	0,225	0,30

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 (Ra, Rt) e da 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 (Ra<0,5) µm e desgaste de flanco VB_{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_{max}).

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



a)Torneamento duro com ferramenta wiper b) Ferramenta desgastada

Figura 2. Processo de Torneamento Duro com Ferramenta de Cerâmica Mista

As medições de rugosidade foram realizadas sempre quatro vezes nos pontos (A, B, e C), conforme esquema ilustrado na Figura (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.

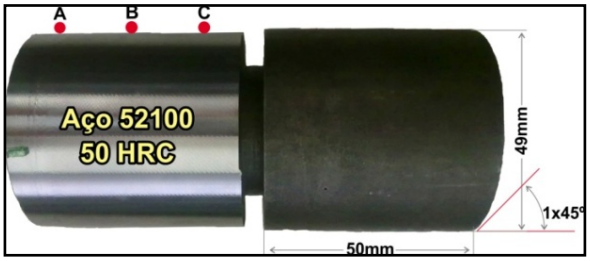


Figura 3. Posições de leitura da rugosidade nos corpos de prova

4. Resultados e Discussão

Através da elaboração de um arranjo fatorial completo com cinco pontos centrais proceder-se-á à analise 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.

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

Nº exp	Vc m/min	f mm/v	ap 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	220	0,3	0,225	0	0	0	4,89	0,26	1,81
10	220	0,3	0,225	0	0	0	5,01	0,26	1,71
11	220	0,3	0,225	0	0	0	4,77	0,26	1,71
12	220	0,3	0,225	0	0	0	5,01	0,26	1,71
13	220	0,3	0,225	0	0	0	5,12	0,26	1,71

A partir dos dados da Tabela 3 realizou-se a análise de variância (ANOVA) - que consiste de um teste para comparar-se médias, do fatorial completo para os três fatores e dois níveis (2^3), com pontos centrais, para a resposta vida da ferramenta(T) e rugosidades (Ra,Rt).

A análise dos dados das Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, permitem concluir que os níveis adotados para os fatores no arranjo encontram-se nas proximidades da região de ótimo, uma vez que o P-value 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 Central Composite Design (CCD). O CCD é um arranjo experimental do tipo "Superfície de Resposta" (RSM - Response Surface Methodology) 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 3.1. Fatorial completo 2^3 para as resposta vida da ferramenta(T)

Termo	Efeito	Coef	SE coef	T	p
Constante		8,248	0,0470	175,28	0,000
Vc	-1,823	-0,912	0,0470	-19,37	0,000
f	-6,199	-3,099	0,0470	-65,87	0,000
ap	-3,026	-1,513	0,0470	-32,15	0,000
Vc*f	2,121	1,060	0,0470	22,53	0,000
Vc*ap	1,833	0,916	0,0470	19,47	0,000
f*ap	2,874	1,437	0,0470	30,54	0,000
Vc*f*ap	-0,060	-0,030	0,0470	-0,64	0,557
Ct Pt		-3,283	0,0758	-43,27	0,000
	S= 0,1330	R-Sq= 99,96 %	R-Sq (adj)= 99,87%		

Seria bom escrever algo na parte superior para preencher este vazio?

Tabela 3. 2. Fatorial completo 2^3 para as respostas de rugosidades Ra

Termo	Efeito	Coef	SEcoef	T	p
Constante		0,2800	0,0006	470,10	0,000
Vc	-0,0105	-0,0048	0,0006	-7,96	0,001
f	0,0370	0,0276	0,0006	45,11	0,000
ap	0,0050	0,0008	0,0006	1,43	0,226
Vc*f	-0,0275	-0,0121	0,0006	-19,80	0,000
Vc*ap	0,0025	-0,0078	0,0006	-12,86	0,000
f*ap	0,0130	0,0061	0,0006	10,00	0,001
Vc*f*ap	0,0125	-0,0016	0,0006	-2,65	0,057
Ct Pt		-0,0238	0,0009	-24,18	0,000
	S= 0,0017	R-Sq= 99,88%	R-Sq (adj)= 99,64%		

Tabela 3.3. Fatorial completo 2^3 para as respostas de rugosidades Rt

Termo	Efeito	Coef	SE coef	T	p
Constante		1,8067	0,0159	113,40	0,000
Vc	0,1120	0,0560	0,0159	3,51	0,025
f	0,5280	0,2640	0,0159	16,57	0,000
ap	-0,0940	-0,0470	0,0159	-2,95	0,042
Vc*f	-0,1055	-0,0527	0,0159	-3,31	0,030
Vc*ap	-0,0575	-0,0287	0,0159	-1,80	0,145
f*ap	-0,0445	-0,0222	0,0159	-1,40	0,235
Vc*f*ap	0,0320	0,0160	0,0159	1,00	0,372
Ct Pt		-0,0733	0,0256	-2,86	0,046
	S= 0,0450	R-Sq= 98,55%	R-Sq (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 no diagrama de pareto dos efeitos padronizados que constam nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, onde respectivamente mostram estas análises para as respostas da vida da ferramenta e rugosidades (Ra,Rt) sucessivamente.

Observa-se que os elementos que exercem maior influência na vida da ferramenta (Figura 4.1) são os efeitos principais. Em primeiro lugar, nota-se o fator avanço de usinagem como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na vida da ferramenta, seguidos da profundidade de corte e as interações entre avanço e profundidade de usinagem e da velocidade de corte e avanço de usinagem e entre velocidade e profundidade de usinagem, assim como a velocidade de corte, a interação tripla não possuem influência significativa para a vida da ferramenta.

Da mesma maneira observando-se os elementos que exercem maior influência na rugosidade Ra (Figura 4.2) são os efeitos principais. Em primeiro lugar, nota-se o fator avanço de usinagem como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na rugosidade Ra, 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 usinagem, entre velocidade e profundidade de usinagem e entre avanço 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 usinagem. A profundidade de corte não possue influência significativa para a rugosidade Ra.

Os elementos que exercem também maior influência na rugosidade Rt (Figura 4.3) são os efeitos principais. Em primeiro lugar, nota-se o fator avanço de usinagem como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na rugosidade Rt, seguidos da velocidade de corte e entre as interações velocidade de corte e avanço de usinagem e pela profundidade de corte. As interações entre velocidade e profundidade de usinagem, avanço e profundidade de usinagem e a interação tripla não possuem influência significativa para a rugosidade Rt.

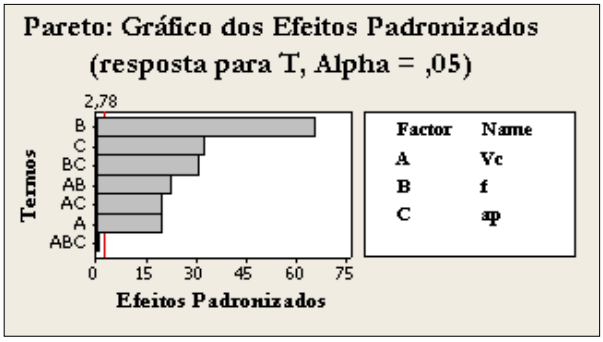


Figura 4.1. Efeitos para (T)

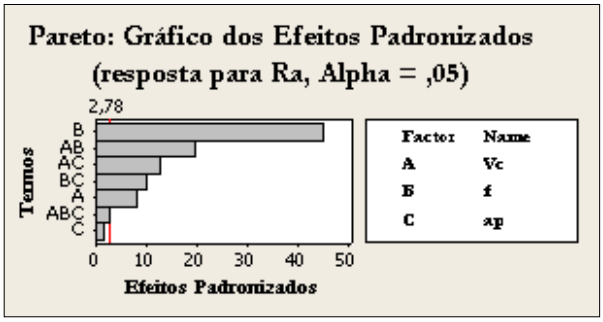


Figura 4.2. Efeitos para Ra

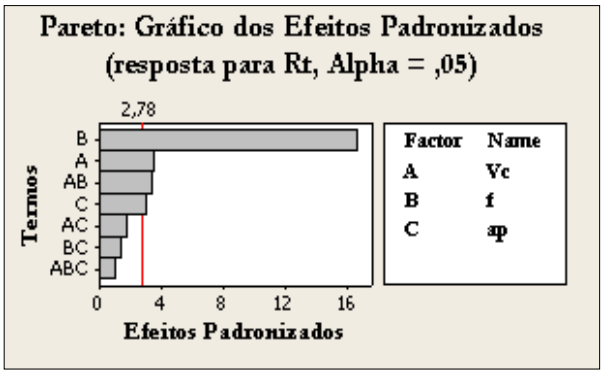


Figura 4.3. Efeitos para Rt

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 fornecem os gráficos dos efeitos principais Vc, f e a p na vida da ferramenta (T) e nas rugosidades (Ra,Rt) sucessivamente.

Nota-se no gráfico 5.1 que todos os efeitos principais concorrem para a redução da vida da ferramenta (T) quando estão em seu nível superior, ou seja, o aumento da velocidade de corte (Vc), do avanço (f) ou da profundidade de usinagem (ap), reduzem a vida da ferramenta.

Observando a Figura 5.2, que fornece o gráfico dos efeitos principais Vc, f e ap na rugosidade média da superfície da peça, pode-se notar que, dentre todos os efeitos principais, quanto maior o valor do avanço de usinagem (f), maior é a rugosidade(Ra) e a velocidade de corte(Vc) possuem influência significativa sobre o valor da rugosidade média.

A Figura 5.3 fornece o gráfico dos efeitos principais Vc, f e ap na rugosidade Rt, nota-se que quanto maior o da velocidade e do avanço maior a rugosidade (Rt) e quando a profundidade de corte esta em seu nível superior, ou seja, o aumento da profundidade de corte (ap) reduz a Rugosidade (Rt).

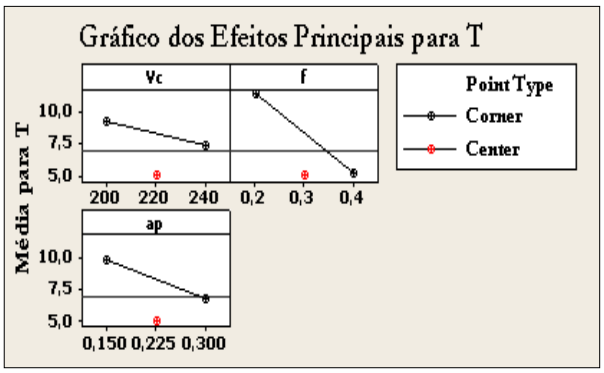


Figura 5.1. Efeitos de Vc, f e ap em (T)

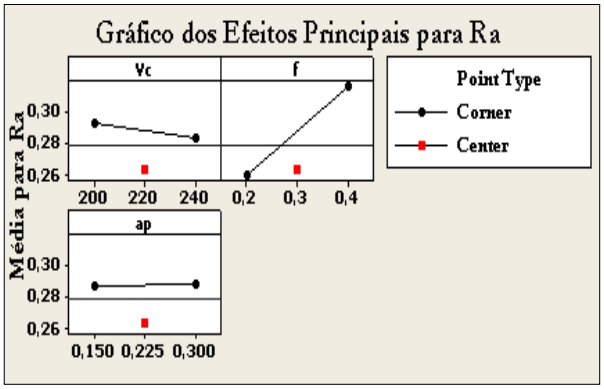


Figura 5.1. Efeitos de Vc, f e ap em (Ra)

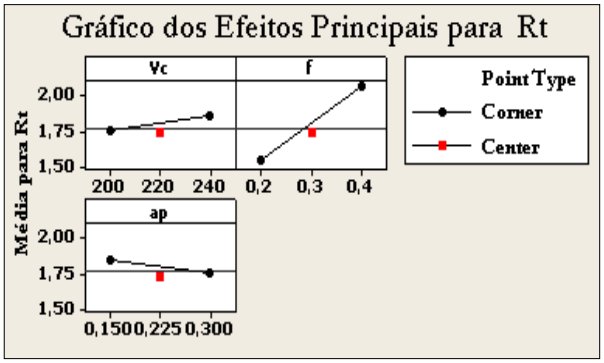


Figura 5.1. Efeitos de Vc, f e ap em (Rt)

Para a obtenção do Central Composite Design (CCD), anteriormente mencionado, serão utilizados os resultados do fatorial da Tabela 3, executando-se complementarmente 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 (T) 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 (T) e as rugosidades da peça (Ra, Rt).

A Tabela 3 apresenta o cálculo das rugosidades (Ra, Rt) e da vida da ferramenta (T) para o modelo de superfície de resposta, com 19 experimentos.

Tabela 4. Parâmetros de corte e resultados para o MSR das respostas vida da ferramenta e rugosidades (Ra,Rt)

Nº exp	Vc m/min	f mm/v	ap mm	A	B	C	T min	Ra µm	R tµm
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

Realizando-se uma análise de variância para os dados do CCD disposto na Tabela 4, para a resposta vida da ferramenta (T) e rugosidades (Ra,Rt), obtém-se os resultados da Tabela 4.1, 4.2, 4.3 sucessivamente.

Tabela 4.1– ANOVA do fatorial completo 2^3 com cinco pontos centrais para resposta vida(T)

TERMO	COEF	SEcoef	T	P
Constante	4,9696	0,084	59,05	0,000
Vc	-0,8600	0,050	-16,86	0,000
f	-3,0533	0,050	-59,89	0,000
ap	-1,4396	0,050	-28,23	0,000
Vc x Vc	1,1143	0,050	21,85	0,000
f x f	1,4558	0,050	28,54	0,000
ap x ap	0,7560	0,050	14,82	0,000
Vc x f	1,0604	0,066	15,91	0,000
Vc x ap	0,9164	0,066	13,75	0,000
f x ap	1,4371	0,066	21,57	0,000
S= 0,1884		R-Sq =99,9 %	RSq(adj) =99,7%	

Tabela 4.1

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Regressão	9	240,78	240,78	26,754	753,71	0,000
Linear	3	165,72	165,72	55,241	1556,24	0,000
Quadrático	3	42,827	42,82	14,275	402,17	0,000
Interação	3	32,236	32,23	10,745	302,71	0,000
Erro Residual	9	0,319	0,319	0,035		
Falta de Ajuste	5	0,249	0,249	0,049	2,81	0,170
Erro Puro	4	0,071	0,071	0,017		

Total	18	241,10				

Seria bom escrever algo na parte superior para preencher este vazio?

Tabela 4.2. ANOVA do fatorial completo 2^3 com cinco pontos centrais para a resposta rugosidade Ra

TERMO	COEF	SEcoef	T	P
Constante	0,2640	0,0019	180,21	0,000
Vc	-0,0064	0,0009	-7,241	0,000
f	0,0282	0,0009	31,82	0,000
ap	0,0013	0,0009	1,549	0,156
Vc x Vc	0,0055	0,0009	6,276	0,000
f x f	0,0011	0,0009	1,298	0,227
ap x ap	0,0175	0,0009	19,81	0,000
Vc x f	-0,0121	0,0018	-10,45	0,000
Vc x ap	-0,0078	0,0018	-6,791	0,000
f x ap	0,0061	0,0018	5,282	0,001
S= 0,0032		R-Sq =99,5%	RSq(adj) =98,9%	

Tabela 4.2

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Regressão	9	0,0177	0,017	0,001	184,42	0,000
Linear	3	0,0113	0,011	0,003	355,95	0,000
Quadrático	3	0,0044	0,004	0,001	136,19	0,000
Interação	3	0,0019	0,001	0,000	61,11	0,000
Erro Residual	9	0,0000	0,000	0,000		
Falta de Ajuste	5	0,0000	0,000	0,0000	5,66	0,059
Erro Puro	4	0,0000	0,000	0,0000		
Total	18	0,0179				

Tabela 4.3. ANOVA do fatorial completo 2^3 com cinco pontos centrais para resposta a rugosidade Rt

TERMO	COEF	SE coef	T	P
Constante	1,7366	0,0289	59,967	0,000
Vc	0,0483	0,0175	2,754	0,022
f	0,2775	0,0175	15820	0,000
ap	-0,0525	0,0175	-2,994	0,015
Vc x Vc	-0,0109	0,0175	-0,623	0,549
f x f	0,0930	0,0175	5,301	0,000
ap x ap	0,0214	0,0175	1,221	0,253
Vc x f	-0,0527	0,0229	-2,301	0,047
Vc x ap	-0,0287	0,0229	-1,254	0,241
f x ap	-0,0222	0,0229	-0,971	0,357
S= 0,0648		R-Sq =97,1%	RSq(adj) =94,3%	

Tabela 4.3

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Regressão	9	1,2826	0,2826	0,1425	33,91	0,000
Linear	3	1,1216	0,1216	0,3738	88,95	0,000
Quadrático	3	0,1282	0,1282	0,0427	10,17	0,003
Interação	3	0,0328	0,0328	0,0109	2,60	0,116
Erro	9	0,0378	0,0378	0,004		
Residual				2		
Falta de Ajuste	5	0,0297	0,0297	0,0059	2,93	0,160
Erro Puro	4	0,0081	0,0081	0,0020		
Total	18	0,0178				

Procedendo-se à análise dos dados da Tabela 4, pode-se obter o modelo de segunda ordem (Modelo Quadrático Completo) para vida da ferramenta(T) e para as rugosidades (Ra,Rt), conforme Tabela 4.1,4.2 e 4.3, pois o coeficiente de determinação dos modelos R-Sq(adj) apresentam exelentes ajustes com valores de R-Sq(adj)=99,7% para (T), RSq(adj)=98,9% para Ra e RSq(adj)=94,3% para Rt, o que significa que o modelo explica adequadamente o fenômeno. 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. Por esta razão decidiu-se empregar neste trabalho o modelo quadrático completo, que pode ser escrito em sua forma decodificada, para a vida da ferramenta(T) e as rugosidades (Ra,Rt) como apresentado pela equação 3.1,3.2 e 3.3 sucessivamente:

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

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

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

Com as equações 3.1, 3.2 e 3.3 pode-se analisar as superfícies de respostas geradas para as variáveis vida da ferramenta (T) e rugosidades (Ra,Rt).

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 mostram as superfície de resposta para as respostas vida da ferramenta(T) e rugosidades (Ra,Rt) sucessivamente.

A figura 6.1 mostra a superfície de resposta para a vida da ferramenta (T) considerando-se a profundidade de usinagem constante e igual a 0,225 mm. Observando a mesma nota-se que para valores crescentes da velocidade de corte (Vc) e do avanço de usinagem (f), a vida da ferramenta diminui.

A Figura 6.2 apresenta a superfície de resposta para a rugosidade Ra em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de corte de 0,225 mm. Enquanto que a Figura 7 (7.2) exibe o gráfico de contorno para a rugosidade média em função da velocidade 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 (f) e a velocidade de corte (Vc). Nota-se que com o aumento do avanço de usinagem e a velocidade de corte a rugosidade aumenta.

A Figura 6.3 apresenta a superfície de resposta para a rugosidade Rt em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de corte de 0,225 mm. A análise do gráfico superfície de resposta, evidenciam o fato de que, o fator que maior influência exerce nos

valores da rugosidade Rt da superfície usinada é o avanço de corte (f) e a velocidade de corte (Vc). Nota-se que com o aumento do avanço de usinagem e a velocidade de corte a rugosidade aumenta.

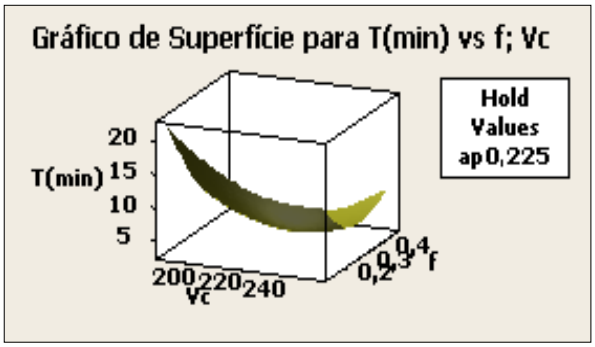


Figura 6.1 Superfície de resposta para T

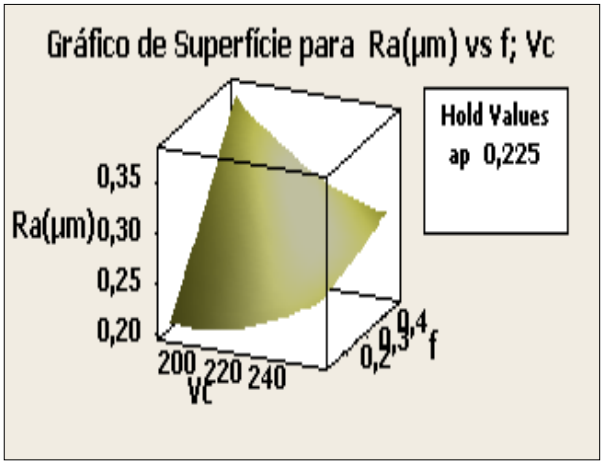


Figura 6.2 Superfície de resposta para Ra

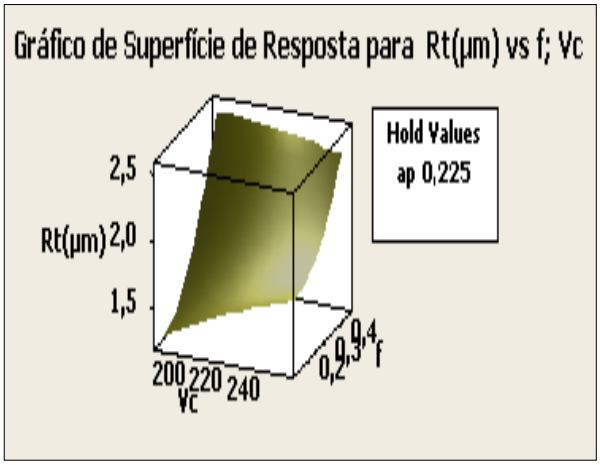


Figura 6.3 Superfície de resposta para Rt

A Figura 7.1, 7.2 e 7.3 mostram os gráficos de contorno para as respostas vida da ferramenta (T) e rugosidades (Ra,Rt). A Figura 7.1 mostra o comportamento da vida da ferramenta, separando-a em diferentes faixas de vida para diversos valores de velocidade de corte e avanço de usinagem, considerando-se a profundidade de usinagem constante e igual a 0,225 mm. Nota-se que um aumento nos valores da velocidade de corte ou do avanço de usinagem, ou mesmo nos dois fatores simultaneamente, acarreta uma redução da vida da ferramenta. Este fato pode ser claramente visualizado na Figura 7.1, onde se observa que um aumento de nível nos valores do avanço de usinagem produz efeito mais acentuado na vida da ferramenta, que um aumento de nível da velocidade de corte. Para o material em questão, com profundidades de corte da ordem de 0,225 mm, velocidades de corte inferiores a 200 m/min e avanços inferiores a 0,2, obtém-se vidas superiores a 17,5 min. Estes níveis para os parâmetros de corte otimizam, portanto, a duração da ferramenta de cerâmica mista (Al_2O_3 +TiC), recoberta com TiN (geometria: ISO CNGA 120408 S01525WH).

No gráfico 7.2 percebe-se que o valor de avanço de usinagem mínimo e de velocidade de corte máxima obtém-se os menores valores de rugosidades Ra.

No gráfico 7.3 nota-se que o valor mínimo de avanço de usinagem e o valor médio de velocidade de corte obtém-se os menores valores de rugosidades Rt.

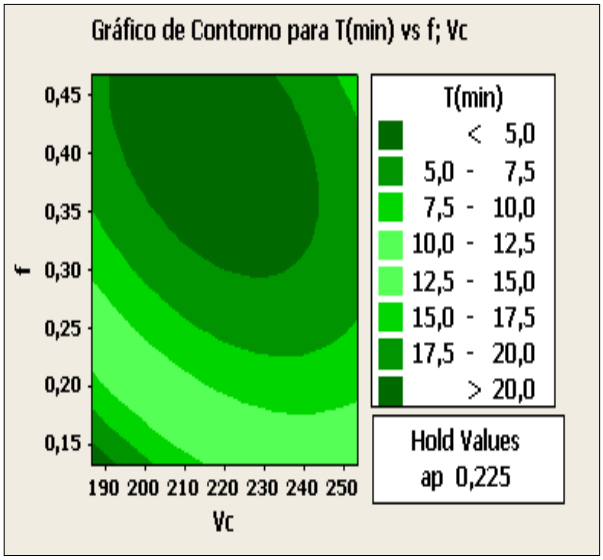


Figura 7.1 Contorno de resposta para T

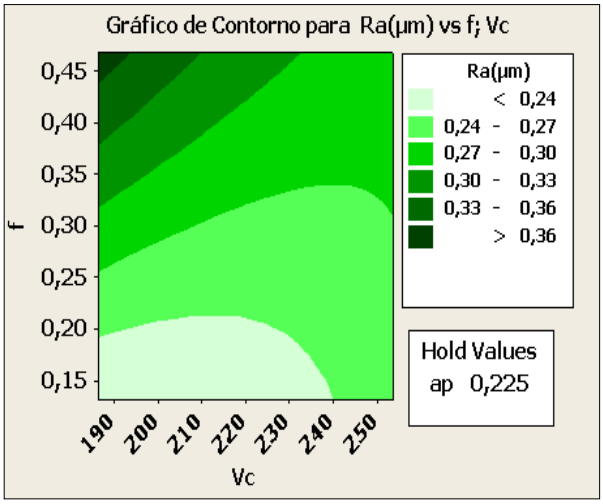


Figura 7.2 Contorno de resposta para Ra

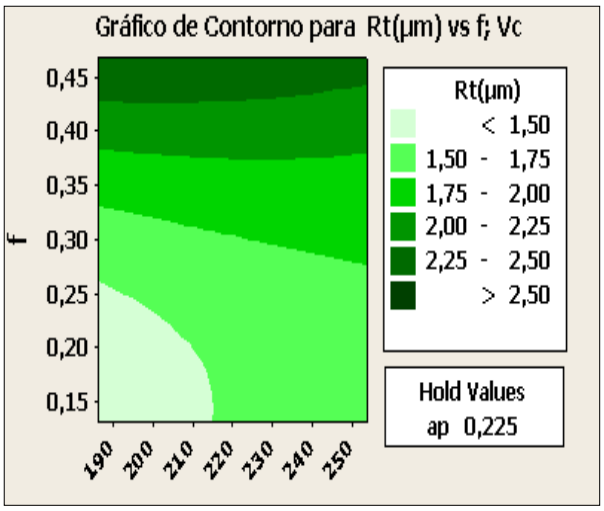


Figura 7.3 Contorno de resposta para Rt

De acordo com as recomendações de vários autores [41, 38], 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. Portanto, toda vez que o arranjo escolhido utilizar réplicas dos experimentos, originar-se-ão resíduos.

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.

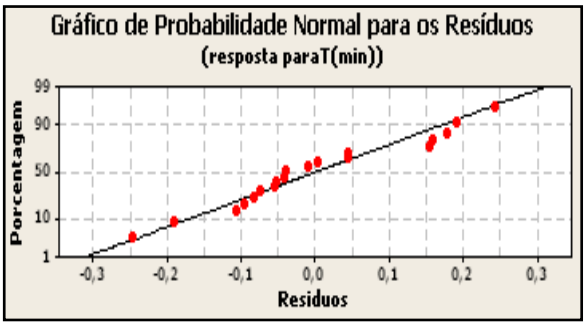


Figura 8.1 Contorno de resposta para T

Figura 8.2 Contorno de resposta para Ra

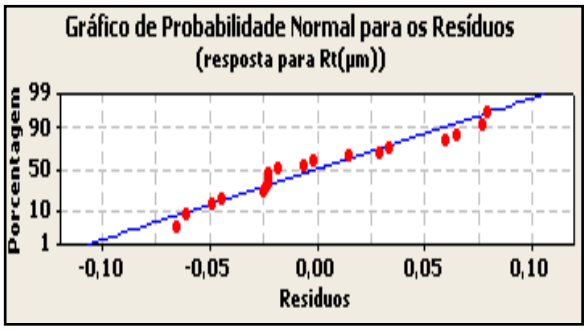


Figura 8.3 Contorno de resposta para Rt

Segundo Montgomery [41] 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 (T) e para as rugosidades Ra e Rt apresentam distribuições normais. A Figura 8 (8.1, 8.2 e 8.3) apresentam as retas de probabilidade normal dos resíduos dos modelos da vida da ferramenta(T) 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 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.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 (5) 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 87%. Assim, optou-se por não apresentar os demais modelos de rugosidades Ry, Rz e Rq. Onde foi considerado * valor de Pearson e ** valores de P-Value.

Tabela 5. 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	0,853	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

Ao analisar-se o comportamento da rugosidade Ra após o último passe de usinagem, percebe-se que para os ensaios que utilizaram avanço de 0,2, 0,3 e 0,4 mm/v, a rugosidade manteve-se dentro dos limites inferiores a 0,4 µm. Atingindo o valor máximo de 0,318 µm para a condição com Vc = 200 m/min e ap = 0,30 mm. Um fato interessante observado nos valores das rugosidades, Tabela 4 é a oscilação dos valores à medida que são usinadas as peças. Isto pode ser explicado pelo aparecimento de pequenos lascamentos ocorridos de forma sucessiva a medida em que as peças foram sendo usinadas, lascamentos estes que modificavam

constantemente a aresta de corte, contribuindo para a oscilação dos valores da rugosidade média. Para o aparecimento destes pequenos lascamentos, um fator preponderante foi o excesso de vibração, ocorrido devido à falta de rigidez do torno e agravado pelas severas condições de usinagem.
Este estudo demonstra, portanto, que não há divergência entre a escolha dos melhores níveis. Assim, velocidades de corte abaixo de 200 m/min, avanços inferiores a 0,15 mm/volta e profundidades de corte menores que 0,15 mm, promovem uma vida maior para as ferramentas e menores rugosidades da peça.

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 investigar a influência de cada um dos parâmetros de usinagem sobre o valor da usinabilidade de avaliação;

- A geometria alisadora da ferramenta propiciou a obtenção de baixas rugosidades Ra na faixa 0,2-0,4 μm com avanços relativamente altos (0,2-0,4 mm/v) e rugosidade Rt na faixa de 1,4-2,8 μm;

- O avanço foi o fator que mais influenciou na vida da ferramenta(T) e nas rugosidades (Ra,Rt);

- Os fatores velocidade de corte (Vc), avanço (f) e profundidade de usinagem (ap), 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 apresentaram excelentes ajustes de explicação dos parâmetros da vida da ferramenta(T) e das rugosidades Ra e Rt, o que demonstra que os fatores velocidade de corte e profundidade de usinagem tem parcela de influência nos parâmetros da vida da ferramenta(T) e das 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(T) e para as rugosidades Ra e Rt, P value de curvatura maior que 0,05, assim fica evidente a importância da interação dos fatores Vc-f-ap;

- O excesso de vibração, ocasionado pela falta de rigidez da máquina, principalmente para as condições de corte mais severas, provocou avarias nas ferramentas de corte como pequenos e grandes lascamentos e até mesmo a quebra da ponta da ferramenta, sendo o responsável em alguns casos pelo fim de vida da ferramenta;

- Os modelos de previsão de vida e acabamento superficial obtidos através da metodologia do projeto de experimento (DOE), realizaram previsões muito próximas à realidade, com margem de erro inferior a 5% para ambos os casos; isto mostra a viabilidade do modelamento de processos de usinagem por esta técnica (DOE);

- 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. Agradecimentos

Á CAPES, CNPq e FAPEMIG pelos recursos dispensados para realização deste trabalho.

7. Referências

[1] Zou JM, Anderson M, Stahl JE. "Identification of cutting errors in precision hard turning process". J Mater Process Tech.;153–154:746–50.2004.

[2] Elbestawi MA, Chen L, Becze CE, EI-Wardany TI. 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 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.

[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 2011; 29:280-273.

[7] 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 2007; 189:198-192.

[8] 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.

[9] Tamizharasan T, Sevaraj T, Haq AN. Analysis of tool wear and surface finish in hard turning. Int J Adv Manuf Technol; 28: 679-671.2006.

[10] 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.

[11] Huang Y, Liang SY. Modelling of CBN Tool crater wear in finish hard turning. Int J Adv Manuf Technol; 24:639-632.2004.

[12] 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.

[18] Zhang XP, Liu CR, Yao Z. Experimental study and evaluation methodology on hard surface integrity, Int J Adv Manuf Technol; 34:148-141.2007.

[19] Thiele JD, Melkote SN, Peascoe RA, Watkins TR. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of AISI 52100 steel. Transactions of the ASME;122:642–649.2000.

[20] Yen YC, Jain A, Altan T. A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries. J Mater Process Technol;146(1):72–81.2004.

[21] Ozel T. Modeling of hard part machining: Effect of insert edge preparation in CBN cutting tools. J Mater Process Technol;141:284–293.2003.

[22] Zhou JM, Walter H, Andersson M, Stahl JE. Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool. Inter J Mach Tools Manufact;43:301–305.2003.

[23] G.W. Stachowiak, G.B. Stachowiak, Wear behaviour of ceramic cutting tools, Key Eng. Mat. 96 137–164.1994.

[24] F. Klocke, E. Brinksmeier, K. Weinert, Capability profile of hard cutting and grinding processes, Ann. CIRP 54/2.557–580.2005.

[25] 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.

[26] Bouacha K, Yallese MA, Mabrouki T, Rigal JF. 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.

[27] Al-Ahmari AMA. Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations. J Mater Process Technol; 190:311-305.2007.

[28] Singh D, Rao PV. A surface roughness model for hard turning process. Int J Adv Manuf Technol 2007; 32:1124-1115.

[29] Ozel T, Hsu TK, 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.

[30] Iqbal A, Ning H, Khan I, Liang L; Dar NU. 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.

[31] Singh D, Rao PV. Performance improvement of hard turning with solid lubricants. Int J Adv Manuf Technol; 38:535-529.2008.

[32] Haq AN, Tamizharasan T. Investigation of the effects of cooling in hard turning operations. Int J Adv Manuf Technol; 30: 816-808.2006.

[33] J.P. Davim, L. Figueira, Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques, J. Mater. Des. 28:1186–1191.2007.

[34] 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.

[35] O. Köksoy. Multiresponse robust design: Mean square error (MSE) criterion. Appl Math Comp; 175(2): 1716-1729.2006.

[36] Benga GC, Abrão AM. Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools. J Mater Process Technol; 143: 241-237.2003.

[37] Sahin Y, Motorcu AR. Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. Int J Refract Metals Hard Mater; 26:90-84.2008.

[38] Box, G. E. P., Hunter, W. G., Hunter, J.S. Statistics for Experimenters. New York, John Wiley & Sons, 1978.

[39] Taguchi, G., "System of Experimental Design", UNIPUB, Kraus International Publications, New York, 1986.

[40] Prvan, T., Street, D. J, An annotated bibliography of application papers using certains classes of fractional factorial and related designs. Journal of Statistical Planning and Inference, n.106, p.245-269, 2002.

[41] Montgomery, D.C, Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, 2004.

[42] Myers, R.H. Response surface methodology-current status and future directions, with discussion, Journal of Quality Technology, Vol. 31, pp.30–44.1999.

[43] Hill, W.J and Hunter, W.G. a Review of response surface methodology: a literature review, tecnometrics, Vol 8, pp.571-590.1996.

[44] Drapper, N. and Lin, D.K.J. Response surface designs, Chapter 11 in Handbook of Statistics, Vol. 13, S. Ghosh and C.R. Rao (Eds.): Design and Analysis of Experiments, pp.343–375, Elsevier Science, Amsterdam.1996.

[45] Box, G.E.P. and Wilson, K.B. On the experimental attainment of optimum conditions, Journal of the Royal Statistical Society B, Vol. 13, pp.1–15.1951.

[46] Shaw, M., "Metal Cutting Principles", Oxford University Press, New York, USA, 672p, 2004.

[47] Sandvik-Coromant. Tecnologia da usinagem dos metais-Manual técnico, Sandviken, Sweden, 2010.