

APLICAÇÃO DE PROJETO DE EXPERIMENTOS PARA A OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE USINAGEM EM TORNO CNC

Angélica Alebrant Mendes (UFRGS)

angelica@producao.ufrgs.br



Os parâmetros de processo representam um papel importante na performance e eficiência das operações de usinagem em torno CNC. Devido ao alto custo do capital investido nessas máquinas, qualquer ganho relativo à produtividade e qualidade do processo torna-se significativo. Este artigo apresenta um estudo da otimização dos parâmetros do processo de usinagem em um torno CNC. Através da metodologia de Projetos de Experimentos os parâmetros significativos para as variáveis de resposta são determinados e otimizados. Para tanto, inicialmente são utilizadas tabelas ANOVA e Regressão Múltipla, com o objetivo de verificar a significância dos parâmetros. Por fim, é aplicada a Função de Perda Multivariada, para otimização do processo através de uma solução de compromisso entre as variáveis de resposta definidas

Palavras-chaves: Usinagem, torneamento CNC, parâmetro do processo, Projeto de Experimentos

1. Introdução

Há, aproximadamente, um século, as indústrias de manufatura tentam estabelecer eficientes parâmetros de usinagem. A otimização desses parâmetros é de grande importância em um ambiente onde operações de usinagem econômicas têm papel fundamental para a manutenção da competitividade no mercado (TOLOUEI-RAD e BIDHENDI, 1997).

Devido ao alto custo de capital investido e aos custos operacionais das máquinas CNC quando comparadas com máquinas convencionais, existe a necessidade de uma operação eficiente, a fim de se obter um retorno de investimento substancial. Visto que os custos operacionais são sensíveis aos parâmetros de usinagem utilizados, a determinação de valores ótimos de operação é essencial para uma produção lucrativa (TOLOUEI-RAD e BIDHENDI, 1997).

Este trabalho visa determinar um valor otimizado para os parâmetros de usinagem em torno CNC, com o objetivo de reduzir os custos operacionais. Para conduzir esse estudo, serão utilizadas técnicas de Projetos de Experimentos.

Conforme Ribeiro e Caten (2003), a metodologia de Projetos de Experimentos é apoiada fortemente em conceitos estatísticos e busca otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento que, por sua vez, tenta melhorar o desempenho de um sistema.

2. Metodologia de Projeto de Experimentos

Para estudar o efeito de qualquer fator controlável sobre a variável de resposta é preciso fazê-lo variar e observar o resultado dessa variação. Isto implica na realização de, no mínimo, dois valores em que cada fator será estudado. A classe de experimentos a dois níveis é geralmente a primeira a ser utilizada em um determinado estudo, através desta pode se identificar as variáveis que interferem significativamente em uma determinada resposta. Para a obtenção de uma equação que represente com maior precisão a resposta estimada em função das variáveis independentes é recomendável a utilização de um planejamento com um número maior de níveis (RAMOS *et al.*, 2003).

3. Estudo Aplicado

3.1 Definição dos fatores controláveis e variáveis de resposta

Os parâmetros de usinagem que mais influenciam o sucesso da operação são: a profundidade de corte, o avanço e a velocidade de corte. No entanto, na prática, apenas os dois últimos são passíveis de controle, pois a profundidade de corte é predeterminada em função da potência da máquina e geometria da peça (TOLOUEI-RAD e BIDHENDI, 1997).

A Figura 1 apresenta de forma simplificada o que representa o avanço e a velocidade de corte em um processo de torneamento.

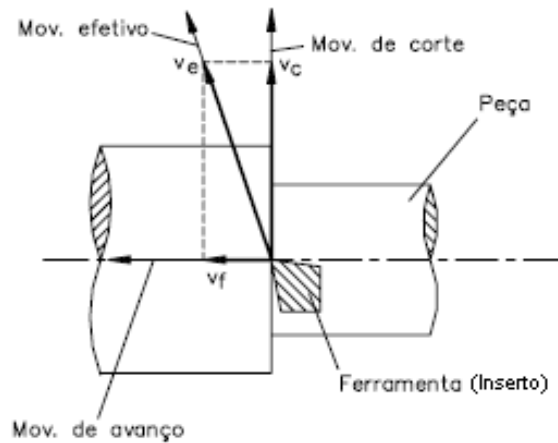


Figura 1 - Movimentos de avanço e velocidade de corte no torneamento

Fonte: Costa, (2006).

Além do avanço e da velocidade de corte, outros fatores, que não são considerados parâmetros de operação, também influenciam no processo de usinagem, entre eles estão: o tipo de inserto ou ferramenta, a máquina em que será executada a operação, o treinamento do operador e o material a ser usinado. A fim de facilitar o estudo, optou-se por fixar a máquina, o operador e o material a ser usinado. Devido à relação do tipo de inserto com o seu desgaste e, conseqüentemente, com o custo da operação, considerou-se o tipo de inserto como importante variável a ser analisada.

Para a definição do inserto a ser utilizado existem alguns fatores de influência como: sua geometria, a composição do seu material, seu revestimento (COSTA e SANTOS, 2006). Há no mercado um número bastante grande de tipos de insertos que poderiam ser utilizados, contudo optou-se por testar apenas dois tipos de inserto: aqueles mais utilizados pela empresa.

Para as variáveis de resposta, Tolouei-rad e Bidhendi (1997) recomendam o mínimo custo de produção e o mínimo tempo de processamento. Como nem sempre o mínimo tempo de processamento representa o menor custo de produção, torna-se necessário selecionar condições de operação que representem uma solução de compromisso entre as duas variáveis. Na Tabela 1 são apresentadas as variáveis de resposta escolhidas para o estudo.

Variável de resposta	Tipo	Alvo	Limite Superior	Importância relativa	
Y1	Tempo de processamento	Menor-é-melhor	35s	50s	3s
Y2	Desgaste do inserto	Menor-é-melhor	3	4	3

Tabela 1 - Variáveis de resposta

Para a avaliação do desgaste do inserto, foi utilizada uma tabela subjetiva de desgaste, atribuindo-se 1 para um nível de desgaste muito baixo e 5 para um nível de desgaste muito alto.

Quando existe mais de uma variável de resposta de interesse, recomenda-se a utilização da Função de Perda Multivariada. A função de perda é empregada para quantificar a perda que um produto impõe à sociedade pela falta de qualidade (RIBEIRO e CATEN, 2003).

A seguir são apresentadas duas tabelas (TABELAS 2 e 3) contendo os fatores controláveis e os fatores constantes respectivamente. O intervalo de pesquisa dos fatores controláveis foi definido alargando o intervalo já utilizado pela empresa e considerado aplicável na operação, a fim de manter as características de qualidade de acabamento da peça a ser usinada.

Fatores controláveis	Intervalo de Pesquisa	
	Mínimo	Máximo
X1: tipo do inserto	A	B
X2: velocidade de corte (mm/s)	150	230
X3: avanço (mm)	0,2	0,3

Tabela 2 - Fatores controláveis

Fatores constantes	Fixado em:
X4: profundidade de corte	1,8mm
X5: tipo de material	aço 1020
X6: máquina	torno CNC01
X7: treinamento do operador	Beto

Tabela 3 - Fatores constantes

3.2 Execução do experimento

Para a execução do experimento optou-se pelo projeto fatorial completo de três fatores a dois níveis. Três fatores porque foram três as variáveis de entrada consideradas mais importantes para o processo. Foram escolhidos dois níveis, pois, segundo Ribeiro e Caten (2003), são projetos simples de serem analisados, úteis em estágios iniciais de pesquisa, onde há muitos fatores a serem investigados e que exigem um número relativamente baixo de ensaios.

Este projeto do tipo 2^k , onde k é igual a 3, produz oito combinações de fatores, ou seja, 8 ensaios. Foram adicionados dois pontos centrais, um para cada tipo de inserto, a fim de testar a suposição de linearidade do modelo. Ainda que, para um projeto 2^3 , sejam recomendadas repetições para a estimação do termo de erro, devido à restrição experimental referente a indisponibilidade de um sistema de medição sensível à pequena variação de tempo entre os ensaios, neste experimento não foram realizadas repetições.

A Tabela 4 mostra os resultados para o tempo de processamento e desgaste do inserto obtidos nos experimentos.

Velocidade de Corte mm/s (C)	Insero A (A)		Insero B (A)	
	150	230	150	230
Avanço mm (B)				
0,3	38s	26s	33s	33s
		3	4	3
0,2	53s	40s	46s	34s
		2	2	2

Tabela 4 - Tempos de processamento e classificação de desgaste do inserto para as combinações

4. Resultados

4.1 Análise dos dados

A fim de verificar a existência de influência do avanço, da velocidade de corte e do tipo de inserto sobre o tempo de processamento e o desgaste do inserto foram elaboradas duas tabelas ANOVA, sendo uma para cada variável de resposta. Para ambas, considerou-se o efeito do fator controlável significativo quando o valor de F calculado era maior do que o valor de F crítico calculado com base em um nível de significância igual a 0,05.

De acordo com Ribeiro e Caten (2003), quando não há repetições do experimento, não se pode estimar SQR independentemente. Contudo, se houver interações insignificantes, estima-se que a soma do MQ dessas interações é aproximadamente igual à variância do erro experimental, ou seja, MQR.

Para a ANOVA referente ao tempo de processamento, utilizou-se como termo de erro (SQR) a soma dos SQs dos efeitos das interações de primeira e segunda ordem. Apesar de não se saber previamente que as interações eram insignificantes, observou-se que os valores de seus SQ eram bastante inferiores aos valores dos fatores principais de avanço e velocidade de corte.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcalc.	Ftab.	Conclusão
A: Insero	15,125	1	15,125	0,708	7,709	Não significativo
B: Avanço	231,125	1	231,125	10,813	7,709	Significativo
C: Vel corte	171,125	1	171,125	8,006	7,709	Significativo

AB+AC+BC+ABC = SQR	85,50	4	21,375
SQT	502,875	7	

Tabela 5 - ANOVA para tempo de processamento

Pode-se observar na tabela que apenas o avanço e a velocidade de corte têm efeito significativo sobre o tempo de processamento. Como o tipo de inserto não interfere no tempo de processamento, deve-se utilizar o inserto de menor custo.

Para a ANOVA referente ao desgaste do inserto, a estimativa do MQR foi feita utilizando-se o papel de probabilidade, conforme mostrado na Figura 2, onde foram aglutinados os SQs dos efeitos não significativos. A Tabela 6 demonstra que apenas o avanço é significativo para o desgaste do inserto.

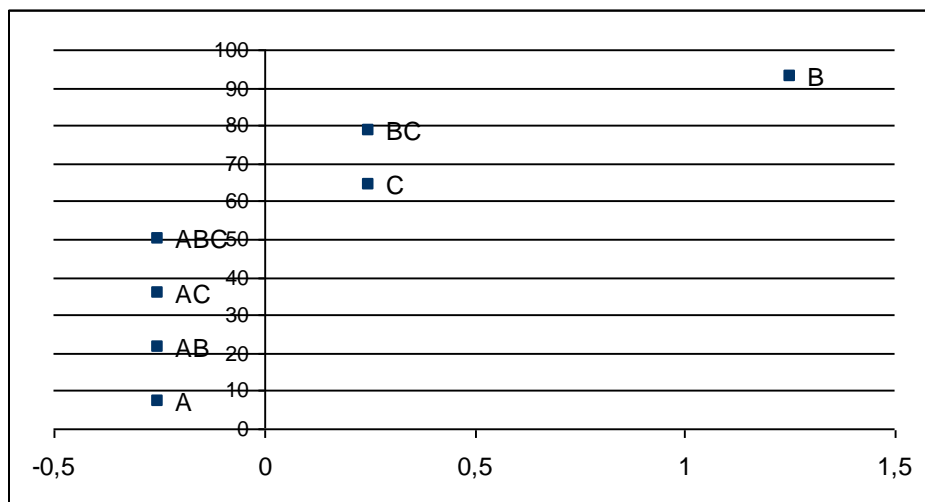


Figura 2 - Papel de probabilidade desgaste do inserto

Fonte	SQ	GDL	MQ	F _{calc.}	F _{tab.}	Conclusão
B: Avanço	3,125	1	3,125	25	7,709	Significativo
C: Vel corte	0,125	1	0,125	1	7,709	Não significativo
BC	0,125	1	0,125	1	7,709	Não significativo
A+AB+AC+ABC= SQR	0,50	4	0,125			
SQT	3,875	7				

Tabela 6 - ANOVA para desgaste do inserto

4.2 Otimização dos parâmetros

Para a otimização dos parâmetros, elaborou-se, inicialmente, uma Regressão Múltipla para cada variável de resposta, posteriormente, aplicou-se a Função de Perda Multivariada,

com o objetivo de se obter valores de parâmetros que considerem tanto o tempo de processamento, quanto o desgaste do inserto.

Os resultados das regressões de ambas as variáveis de resposta são apresentadas nas Tabelas 7 e 8.

Estatística de regressão			Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P
R múltiplo	0,865	Interseção	37,0000	1,3926	26,5693	0,0000
R quadrado	0,748	X2	-4,6250	1,5570	-2,9705	0,0208
R ajustado	0,676	X3	-5,3750	1,5570	-3,4523	0,0107
Erro padrão	4,404					
Observações	10					

Tabela 7 - Regressão para o tempo de processamento

A regressão para o tempo de processamento confirmou os resultados mostrados pela ANOVA, ou seja, apenas a velocidade de corte (X2) e o avanço (X3) são significativos. A equação resultante foi:

$$Y1 = -4,625X2 - 5,375X3 + 37 ; \text{ onde } Y1 \text{ é o tempo de processamento}$$

Estatística de regressão			Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P
R múltiplo	0,716	Interseção	2,7	0,1928	14,0012	0,0000
R quadrado	0,512	X3	0,625	0,2156	2,8989	0,0199
R ajustado	0,451					
Erro padrão	0,610					
Observações	10					

Tabela 8 - Regressão para o desgaste do inserto

A regressão para o desgaste do inserto também confirmou os resultados mostrados pela ANOVA, ou seja, apenas o avanço (X3) é significativo. A equação resultante foi:

$$Y2 = 0,625X3 + 2,7 ; \text{ onde } Y2 \text{ é o desgaste do inserto}$$

A minimização das funções apresentadas anteriormente otimiza o processo individualmente, ou seja, considerando apenas a variável de resposta Y1 ou Y2 e seus parâmetros significativos. Porém, nesse estudo experimental existe mais de uma variável de

resposta de interesse, o que exige o uso de um procedimento multivariado na busca do ajuste ótimo dos fatores controláveis. Escolheu-se a Função de Perda Multivariada.

Devido à necessidade de se comparar os efeitos dos diferentes fatores controláveis (termos) do modelo, foi necessário padronizar seus intervalos de variação, a fim de que os coeficientes pudessem ser diretamente comparáveis entre si. Para tanto, os níveis reais do intervalo de investigação foram convertidos em níveis codificados.

Após a aplicação das funções de otimização individuais apresentadas anteriormente para cada ensaio realizado, foi definida a função de Perda (Z) para cada variável de resposta, e finalmente as perdas individuais (Z1 e Z2) foram somadas para definir a perda total do processo. No cálculo das perdas são considerados o desvio do valor previsto pelo modelo de regressão em relação ao alvo, a importância relativa e o tipo da variável de resposta.

A Tabela 7 apresenta os resultados da otimização final do processo de usinagem em torno CNC.

Fatores controláveis			Variáveis de resposta						Perdas		Perda total	
A ou B	Reais		Codificados			Valores reais		Modelo regressão		Perdas para as variáveis de resposta		
	150 a 230	0,2 a 0,3	-1 a +1	-1 a +1	-1 a +1	Y1	Y2	Y1	Y2	Z1	Z2	Z1+Z2
X1	X2	X3	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y1	Y2	Z1	Z2	Z1+Z2
A	150	0,2	-1	-1	-1	53	3	47	2,075	1,9200	2,5669	4,4869
B	150	0,2	1	-1	-1	46	2	47	2,075	1,9200	2,5669	4,4869
A	230	0,2	-1	1	-1	40	4	37,75	3,325	0,1008	0,3169	0,4177
B	230	0,2	1	1	-1	34	2	37,75	3,325	0,1008	0,3169	0,4177
A	150	0,3	-1	-1	1	38	3	36,25	2,075	0,0208	2,5669	2,5877
B	150	0,3	1	-1	1	33	2	36,25	2,075	0,0208	2,5669	2,5877
A	230	0,3	-1	1	1	26	3	27	3,325	0,8533	0,3169	1,1702
B	230	0,3	1	1	1	33	2	27	3,325	0,8533	0,3169	1,1702
A/B	209,199	0,2480	1	0,48	-0,041	33	2	35	3,000	0,0000	0,0000	0,0000
A	190	0,25	-1	0	0	35	4	37	2,7	0,0533	0,2700	0,3233
B	190	0,25	1	0	0	32	2	37	2,7	0,0533	0,2700	0,3233

Tabela 7 - Otimização do processo de usinagem

Como, de acordo com o experimento, o tipo de inserto não influencia significativamente nem no tempo de processamento, nem no desgaste do inserto, observa-se que há duas situações que otimizam o tempo de processamento: velocidade de corte igual a 150 e avanço igual a 0,3 para o inserto A ou para o inserto B. A utilização desses parâmetros gera a menor perda (Z1) para o tempo de processamento. Da mesma forma, a utilização da velocidade de corte em 190 e do avanço em 0,25 com o inserto A ou B minimiza a perda relacionada ao desgaste do inserto.

Todavia, para se obter uma solução de compromisso entre as variáveis de resposta (tempo de processamento e desgaste do inserto) é necessário minimizar a perda total (Z1+Z2). Os parâmetros que levam esta perda à aproximadamente zero são:

- Velocidade de corte igual a 209,2 mm/s;
- Avanço igual a 0,248 mm;
- Inserto A ou B (escolher o de menor custo).

5. Conclusões

A utilização eficiente dos parâmetros de processo tem sido um problema para as indústrias de manufatura há muito tempo. O problema se torna ainda mais importante quando são empregadas máquinas CNC de alto custo de capital. O uso das técnicas de projeto de experimentos pode auxiliar na determinação dos parâmetros ótimos de operação.

No experimento apresentado neste artigo foi estudado e otimizado um processo de usinagem em torno CNC. Foram estudados os parâmetros relativos ao tipo de inserto utilizado, a velocidade de corte e o avanço. Todos foram analisados quanto aos seus efeitos sobre o tempo de processamento e o desgaste do inserto.

Através de um projeto fatorial completo de três fatores e posterior utilização de uma tabela ANOVA foi identificado que a velocidade de corte e o avanço têm efeito significativo sobre o tempo de processamento. Para o desgaste do inserto, apenas o avanço foi identificado como significativo. O tipo de inserto não apresentou efeito significativo sobre nenhuma variável de resposta deste experimento, sendo que o critério de escolha deve ser o menor custo de aquisição.

O emprego de um modelo de regressão múltipla para cada fator e da técnica de Função de Perda Multivariada possibilitou a definição de um ajuste ótimo para os parâmetros do processo em estudo. A solução de compromisso entre os fatores controláveis que minimizou a perda foi de velocidade de corte igual a 209,2 mm/s e avanço igual a 0,248mm.

Referências

COSTA, E.S.; SANTOS, D.J. *Processos de Usinagem*. Divinópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Curso Técnico em Eletromecânica, 2006.

RAMOS, A.D.; BARROZO, M.A.S.; MACHADO, A.R. *Potência de Corte e Vida de Ferramenta para o Fresamento de Topo do Aço ABNT420 Utilizando Planejamento Experimental*. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2003.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. ten. *Projeto de Experimentos*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2003.

TOLOUEI-RAD, M.; BIDHENDI, I.M. *On the Optimization of Machining Parameters for Milling Operations*. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 37, No. 1, pp. 1-16, 1997.