



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DOEHLERT APLICADO NA DETERMINAÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DE SUPERFÍCIES USINADAS COM UTILIZAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE

Ricardo Medeiros Rodrigues, ricardo.medeiros@engmecanico.com.¹
Rômulo Diêgo Marinho Siqueira, romulodiegoms@hotmail.com.¹
Bruno Alencar Carneiro, brunoalnk@hotmail.com.¹
Dalmir dos Santos Matos, matosengenharia.ma@gmail.com.¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Av. Getúlio Vargas, nº 04- Monte Castelo - São Luis-MA, CEP 65025-001, Brasil.

Resumo: O Planejamento Experimental Doehlert aplicado à usinagem (Determinação do Acabamento Superficial Usinadas com Utilização de Fluido de Corte) com o objetivo de se determinar e avaliar a correlação entre a rugosidade (variável de saída) sob a influência da aplicação de fluido de corte de base vegetal LB 2000 na forma de Mínima Quantidade de Fluido (MQF), em função das variáveis - velocidade de corte e avanço (variáveis de entrada) - no processo de usinagem do material ABTN 1045, ferramenta metal duro classe P20. O procedimento experimental consistiu na aquisição de dados segundo a matriz de planejamento com um ponto central, adotando-se como níveis da primeira variável (avanço f) -1(inferior); -0.5; 0(central); +0.5; +1(superior); e para a segunda variável (Velocidade de corte V_c) -0.866, 0 e +0.866. A partir dos experimentos foi determinada a variável de saída (desgaste) ajustada pelo método dos mínimos quadrados, no qual a relação entre as variáveis de entrada foi determinada por modelos propostos com até três parâmetros com e sem interação, nos quais foi considerada a análise de variância para chegar ao modelo final.

Palavras-chave: Planejamento Fatorial, Usinagem, Doehlert

1. INTRODUÇÃO

O planejamento experimental é procedimento no qual alterações propositais são realizadas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se avaliem as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões destas alterações (Montgomery, 2004). Ao iniciar experimentos a fim de buscar resultados em função de variáveis de entrada, encontra-se dificuldade na forma de como conduzir os experimentos, visto que qualquer falha no planejamento poderá resultar em dados inválidos, agravando assim o erro experimental. No caso da usinagem que é um processo inconstante, ou seja, tudo muda a todo instante, devido à temperatura, vibração, desgaste da ponta da ferramenta, entre outros fatores, deve ter uma atenção especial nos experimentos e tratamentos dos dados assim otimizando o resultado final.

A utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental possibilitou a redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação; o estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos; a determinação da confiabilidade dos resultados; a realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios; a seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios; a representação do processo estudado através de expressões matemáticas e a elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

Utiliza-se para sanar essa dificuldade o planejamento Doehlert que funciona de forma análoga ao planejamento fatorial, da qual representa um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo (Button, 2005), dessa forma possibilita a obtenção de um número ideal de experimentos, permitindo o aprimoramento do processo, a redução da variabilidade dos resultados, redução de tempos de análise e dos custos envolvidos.

2. OBJETIVO

Apresentar as etapas realizadas no que se refere ao Planejamento Dohelert Determinação do Acabamento superficial usinadas com Utilização de Fluido de Corte do material SAE 1045 com a ferramenta HSS (aço rápido).

O objetivo geral do trabalho é estabelecer relações entre os parâmetros de usinabilidade com os parâmetros de entrada – velocidade de corte e avanço – e os parâmetros de saída – percurso de avanço da ferramenta de corte até atingir a falha – e também estabelecer o número ideal de experimentos que leve à obtenção de resultados com um dado grau de confiabilidade no respectivo processo de usinabilidade. Além disso, também entender e aplicar os conceitos do planejamento Doehlert ou Matriz Doehlert, difundir os conceitos básicos de estatística, aplicar testes de hipóteses, realizar análise de variância e comparar modelos, determinar intervalo de confiança e determinar a superfície resposta.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Torneamento Cilíndrico

O processo que se baseia no movimento da peça em torno de seu próprio eixo chama-se torneamento. O torneamento é uma operação de usinagem que permite trabalhar peças cilíndricas movidas por um movimento uniforme de rotação em torno de um eixo fixo. O torneamento, como todos os trabalhos executados com máquinas-ferramenta, acontece mediante a retirada progressiva do cavaco da peça trabalhada. O cavaco é cortado por uma ferramenta de um só gume cortante, que deve ter uma dureza superior à do material a ser cortado. A ferramenta penetra na peça, cujo movimento rotativo ao redor de seu eixo permite o corte contínuo e regular do material. A força necessária para retirar o cavaco é feita sobre a peça, enquanto a ferramenta, firmemente presa à porta-ferramenta, contrabalança a reação dessa força. Para realizar o torneamento, são necessários três movimentos relativos entre a peça e a ferramenta. São eles:

- Movimento de corte: é o movimento principal que permite cortar o material. O movimento é rotativo e realizado pela peça.
- Movimento de avanço: é o movimento que desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça.
- Movimento de penetração: é o movimento que determina a profundidade de corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior da peça e assim regular a profundidade do passe e a espessura do cavaco.

3.2. Desgaste

É a perda progressiva de material devida ao movimento relativo entre a superfície e a substância com a qual entra em contato. Estão relacionados com interações entre as superfícies e, mais especificamente, a remoção e a deformação do material sobre uma superfície resultante da ação mecânica da superfície oposta. A necessidade de movimento relativo entre as duas superfícies de contato e mecânica inicial entre asperezas é uma importante distinção entre desgaste mecânico em comparação com outros processos com resultados semelhantes.

3.3. Planejamento Doehlert

O planejamento Doehlert ou Matriz Doehlert foi apresentado por David H. Doehlert em 1970, sendo uma alternativa bastante útil e atrativa aos planejamentos experimentais de segunda ordem. Os pontos da matriz Doehlert correspondem aos vértices de um hexágono gerado de um simplex regular e, em geral, o número total de pontos experimentais no planejamento é igual a $k^2 + k + pc$, em que k é o número de fatores e pc é o número de experimentos no ponto central. Uma importante propriedade do planejamento Doehlert diz respeito ao número de níveis que cada variável possui. Além disso, ele descreve um domínio circular para duas variáveis, esférico para três e hiperesférico para mais de três variáveis, o que acentua a uniformidade no espaço envolvido. Embora suas matrizes não sejam ortogonais nem rotacionais, elas não apresentam divergências significativas que comprometam a qualidade necessária para seu uso efetivo. Para duas variáveis, a matriz Doehlert consiste de um ponto central e mais seis pontos adicionais formando um hexágono regular e, por esse motivo, situada sob um círculo (Fig.1).

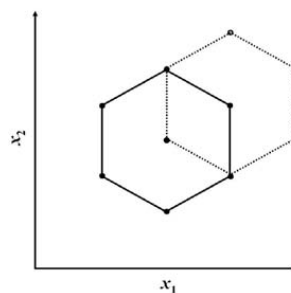


Figura 1. Planejamento Doehlert com duas variáveis (—) com adição de novos experimentos (Button, 2005).

Cada planejamento é definido considerando o número de variáveis e os valores codificados (x_i) da matriz experimental. A relação entre os valores experimentais e os valores codificados é dada pela Eq.(1) abaixo:

$$x_i = \left(\frac{Z_i - Z_i^o}{\Delta Z_i} \right) * \beta_d \quad (1)$$

O termo x_i é o valor codificado para o nível do fator i ; Z_i é o seu experimental; ΔZ_i é a distância entre o valor experimental no ponto central e o experimental no nível superior ou inferior, β_d é o maior valor limite codificado na matriz para cada fator e Z_i^o é o valor experimental no ponto central.

3.4. Técnica da Superfície de Resposta

Em processos industriais, é muito comum a existência de muitos fatores ou variáveis que afetam a qualidade global do produto final. Neste contexto, alguns estatísticos vêm estudando a Metodologia de Superfície de Resposta (SR), desde 1970. Em essência, esta metodologia consiste em estimar coeficientes da regressão polinomial para a geração de um modelo empírico. Então, usando a metodologia é possível aproximar um modelo empírico a uma relação (inicialmente desconhecida ou conhecida) entre os fatores e as respostas do processo (Saramago, 2006).

3.5. Análise de Resíduos e Avaliação do Modelo

As superfícies de respostas ajustam os dados, mas não se sabe ainda a qualidade desses ajustes. Ou seja, ainda não se tem uma ferramenta capaz de avaliar se a superfície ajustada (ou modelo) é uma representação adequada para uma função. Além disso, caso esta representação seja adequada, deseja-se saber em que faixa de variação pode-se considerar tal ajuste. A análise dos resíduos é fundamental na avaliação da qualidade do ajuste de qualquer modelo. Um modelo que deixe resíduos consideráveis é obviamente um modelo ruim. O modelo ideal não deixaria resíduo algum: todas as suas previsões coincidiriam com os resultados observados.

Então uma boa prática é examinar a distribuição dos resíduos, pois ajuda a verificar se não há nada de errado com o modelo. Neste caso, pode-se fazer um gráfico dos valores estimados pelo modelo ($\hat{y}_i$) com os valores da diferença entre os valores observados experimentalmente (y_{ij}) e seus respectivos valores estimados, isto é, ($\hat{y}_i$) versus ($y_{ij} - \hat{y}_i$). Se os resíduos não estiverem aleatoriamente distribuídos, deve-se desconfiar do modelo e investir em outros recursos para sua melhoria (Duarte, 2007).

A maneira mais confiável de se avaliar a qualidade do ajuste do modelo é empregando a Análise de Variância (ANOVA). Na ANOVA a variação total da resposta é definida como a soma quadrática de dois componentes: a soma quadrática da regressão (SQ_{REGR}) e a soma quadrática dos resíduos (SQ_{RES}). A soma quadrática da variação total, corrigida para a média (SQ_{TOTAL}) pode assim, ser escrita como a Eq.(2):

$$SQ_{TOTAL} = SQ_{REGR} + SQ_{RES} \quad (2)$$

Onde que SQ_{REGR} e SQ_{RES} são apresentadas com mais detalhes na Eq.(3) e Eq.(4), respectivamente:

$$SQ_{REGR} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{r_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$SQ_{RES} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{r_i} (y_{ij} - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

Da Eq.(3) e Eq.(4), m é o número total de níveis do planejamento, isto é, pontos experimentais do planejamento; $\hat{y}_i$ é o valor estimado pelo modelo para o nível i e y é o valor médio das réplicas (r). No entanto, caso não haja réplicas, a média das réplicas nos níveis é o próprio valor observado do ensaio no nível. No segundo somatório indica que se deve fazer o quadrado das diferenças inclusive com cada repetição (quando houver). (Teófilo et al, 2005).

O coeficiente de determinação (R^2) é dado pela Eq.(5):

$$R^2 = \frac{SQ_{REGR}}{SQ_{TOTAL}} = 1 - \frac{SQ_{RES}}{SQ_{TOTAL}} \quad (5)$$

Obviamente, o maior valor possível para R^2 obviamente é um, e só ocorrerá se não houver resíduo algum e, portanto toda a variação em torno da média for explicada pela regressão. É fácil notar que quanto mais perto de um estiver o valor de R^2 , melhor terá sido o ajuste do modelo aos dados observados. Por exemplo, $R^2 = 0,98$ significa que 98% da variação total em torno da média são explicadas pela regressão, ficando apenas 2% com os resíduos (Duarte, 2007).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Após o estudo específico do planejamento, foi dado início à etapa experimental. Inicialmente houve uma seleção dos materiais a serem utilizados, após isso foi definida a metodologia para conduzir o planejamento experimental e, por conseguinte a análise dos resultados obtidos.

4.1. Materiais Utilizados

4.1.1. Matlab 2011a

Programa matemático computacional usado para a manipulação dos dados experimentais, cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento. Esse sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagem Fortran, Basic ou C. Além disso, as soluções dos problemas são expressas quase exatamente como elas são escritas matematicamente.

4.1.2. Excel 2010

É a melhor plataforma eletrônica para criação de planilhas, onde este software que lhe permite criar tabelas e calcular e analisar dados. Este tipo de software é denominado software de folha de cálculo. O aplicativo Excel é usado para realizar uma infinidade de tarefas como: cálculos simples e complexos, criação de lista de dados, elaboração de relatórios e gráficos sofisticados, projeções e análise de tendências, análises estatísticas e financeiras, além de trazer incorporada uma linguagem de programação baseada em Visual Basic.

4.1.3. Torno

É uma máquina operatriz extremamente versátil utilizada na confecção ou acabamento em peças, onde se utiliza de placas para fixação da peça a ser trabalhada, a qual permite a usinagem de variados componentes mecânicos: possibilita a transformação do material em estado bruto, em peças que podem ter seções circulares, e quaisquer combinações destas seções. Basicamente é composto de uma unidade em forma de caixa que sustenta uma estrutura chamada cabeçote fixo.

4.1.4. Ferramenta de Corte

Insertos de metal duro de especificação SNMG 120404-P20, com suporte DSBNR 2020 K12 (ângulo de posição (χ_r) 75°, ângulo de saída (γ_0) 6° e ângulo de inclinação (σ_λ) 0° (Fig.2).

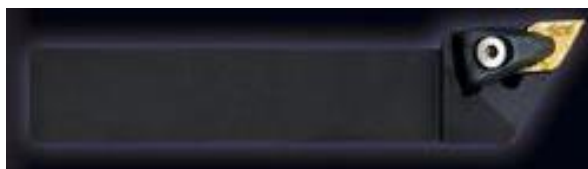


Figura 2. Ferramenta de Corte de especificação SNMG 120404-P20, com suporte DSBNR 2020.

4.1.5. Aplicador e Fluido de Corte

O fluido de corte utilizado foi o Accu-Lube®/LB-2000 (fluido de corte de base vegetal, produzido pela ITW Chemical Products Ltda.), na vazão de 50 ml/h (Fig.3). Este fluido, biodegradável, atóxico e insolúvel em água, é uma composição química de óleos vegetais (soja, milho e canola) e aditivos anticorrosivos com as características descritas conforme a Tab. 1.

Tabela 1. Características típicas do óleo vegetal Accu-Lube®/LB2000.

Propriedade	Valor
Densidade, g/ml (20 $\pm$ 3 °C)	0,900 – 0,940
Ponto de Ebulição	>100°C
Ponto de Fulgor	>300°C



Figura 3. Aplicador de MQF Accu-Lube®/LB-2000 aplicado sob vazão de 50 ml/h (Accu-Lube, 2011).

4.1.6. Material Usinado

O material dos corpos de provas para os testes experimentais foi o aço ABNT 1045. Este material segundo a NBR 172/2000 é classificada como aço para construção mecânica, ao carbono e especial. Esta última consideração deve-se às exigências de ensaio de impacto no estado temperado e revenido. Ele utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior a dos aços de baixo carbono convencionais. Aplicado principalmente em eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, grampos, braçadeiras, pinças, cilindros, pregos, colunas, na fabricação de eixos de ventiladores e de bombas, por exemplo. O aço foi adquirido na forma de barras cilíndricas (tarugo) de diâmetro 500 mm e comprimento de 104 mm (Fig. 4).



Figura 4. Aço ABNT 1045 usado no experimento, adquirido na forma de barras cilíndricas, e as respectivas separações.

A composição química deste material é descrita de acordo com a norma NBR NM 87/2000, que estabelece as composições químicas dos aços para construção mecânica, o aço ABNT 1045 deve apresentar a composição química apresentada na Tab. 2 e sua dureza média é aproximadamente de 185 HB.

Tabela 2. Composição química do Aço ABNT 1045 (GGD Metals, 2015).

Material	C	Mn	P _{MÁX}	S _{MÁX}	Si
Aço ABNT 1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	0,10-0,60

4.2. Metodologia

A metodologia aplicada para desenvolver este trabalho consistiu inicialmente na realização dos experimentos segundo a Matriz de Planejamento Doehlert a duas variáveis. Em seguida as réplicas foram realizadas para análise do erro experimental. A partir destes ensaios foram estabelecidas as análises: cálculo dos efeitos e interpretação geométrica dos efeitos; estudo do modelo; análise de variância do modelo; comparação de modelos utilizando teste de hipótese F, verificação da hipótese da distribuição normal; determinação do intervalo de confiança para o melhor modelo e por último a obtenção da superfície de resposta das variáveis de saída em função das variáveis de entrada (Fig.5).

Após a metodologia ser definida foram realizados os experimentos conforme a matriz de planejamento Doehlert para duas variáveis (Tab. 3) com dois pontos centrais, cumprindo os passos a seguir: levantamento dos dados experimentais, realização dos tratamentos dos dados adquiridos a fim de obter a variável de saída (Desgaste) para cada combinação da variável de entrada, obtenção da correlação empírica para o cálculo do

desgaste gerado na superfície usinada mediante a aplicação do MQF de acordo com o melhor modelo, da qual foi determinada por testes de comparação entre modelos e a análise de variância e por último teste de validação.

Para esse experimentos foram adotados *Parâmetros de Usinagem*, pois são os fatores que influenciam durante a operação deste processo de torneamento por faceamento:

- Velocidade de Corte (VC): É a velocidade periférica da ponta da ferramenta na peça onde é obtida através de tabelas dos fabricantes de ferramentas, Eq.(6).

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (6)$$

Avanço (f): É o deslocamento que a ferramenta de corte ou a peça faz numa volta da peça ou da ferramenta, Eq.(7).

$$a = f = (\text{mm/rot}) \quad (7)$$

Tabela 3. Planejamento Doehlert para duas variáveis.

Planejamento (Entrada)			Respostas (saída)
<i>Ensaios</i>	X_1	X_2	Desgate
1	0	0	
2	1	0	
3	0,5	0,866	
4	-1	0	
5	-0,5	-0,866	
6	0,5	-0,866	
7	-0,5	0,866	
8	0	0	

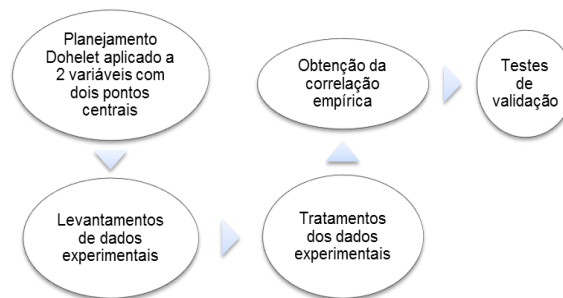


Figura 5. Fluxo do planejamento Doehlert.

Os experimentos de torneamento por faceamento com a aplicação do fluido de corte (Fig.6), sob justificativa que o desempenho de fluidos de corte, quando aplicado a diferentes materiais de trabalho e operações é de importância decisiva a fim de melhorar a eficiência da maioria das usinagens convencionais (Ávila, 2001). Após isso foi faceada do furo de centro¹ até a máxima distância que pode ser obtida através dos parâmetros de corte (avanço e rotação) sob a justificativa que haveria uma melhor otimização do recolhimento dos dados através da usinagem, e assim foram adquiridos os dados de saída segundo a matriz de planejamento e em seguida foi realizada réplicas (adotando-se como critério de parada da usinagem quando o material apresenta-se uma fagulha), onde foram coletados os parâmetros de desgaste da ferramenta para análise posterior em softwares como o Matlab e Excel para obtenção e apuramento dos resultados, conforme listadas pelas Tab. 4.



Figura 6. Realização dos experimentos para Desgaste Superficial da superfície usinada sob aplicação de Fluido de Corte.

Tabela 4. Resultados experimentais para comparação da primeira batelada de testes e réplicas obtidos conforme o roteiro de atividades do projeto.

Nº	Planejamento				Experimento	Réplica
	X_1	Avanço (f) [mm]	X_2	Rotação (V_c) [rpm]	Distancia percorrida (diâmetro) [mm]	Distancia percorrida (diâmetro) [mm]
01 ²	0	0,151	0	800	63,35	61,35
02	1	0,199	0	800	58,10	57,70
03	0,5	0,176	0,866	1000	49,00	51,20
04	(-1)	0,091	0	800	73,30	74,60
05	(-0,5)	0,125	(-0,866)	630	67,60	63,85
06	0,5	0,176	(-0,866)	630	79,00	75,10
07	(-0,5)	0,125	0,866	1000	58,00	58,20

Obs.1: Nos experimentos o furo de centro tinha o diâmetro de aproximadamente de 7,70 mm.

Obs.2: O experimento nº 01 ele foi referenciado como o ponto central da matriz Doherlet

Após a coleta dos parâmetros de desgaste da ferramenta, foi dado início a análise dos resultados, com o objetivo de obter a interação ideal entre a velocidade de corte e o avanço durante o processo de torneamento por faceamento do tarugo. Utilizamos como ferramenta de suporte, uma rotina do programa MATLAB desenvolvido especialmente para essa pesquisa, onde auxiliou nos cálculos necessários para chegar ao modelo ideal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização do experimento e réplica, apresentam-se os valores do desgaste da superfície usinada em função das variáveis de entrada assim como sua superfície resposta e testes de validação. A partir destes experimentos realizados segundo a matriz de planejamento Doherlet e a aplicação da técnica de superfície resposta chegamos aos modelos para o desgaste da ferramenta, onde através das análises de resíduos, e do R^2 de cada modelo escolhemos o melhor modelo para representar o experimento. A Tab. 5 mostra os modelos simulados com suas respectivas análises:

X_1 = Velocidade de corte (V_c)

X_2 = Avanço (f)

Tabela 5. Modelos obtidos com todas as interações da matriz Doherlet.

Modelo	Modelos obtidos pelo Planejamento Doherlet	R^2
Modelo 01	$y(x_1)=27.945313+-3.979687*x_1$	0.546029
Modelo 02	$y(x_1)=27.376786+-1.526415*x_2$	0.084339
Modelo 03	$y(x_1,x_2)=27.927397+(-3.854281*x_1)+(-0.413747*x_2)$	0.551683
Modelo 04	$y(x_1,x_2)=28.287500+(-4.184375*x_1)+(0.313943*x_2)+(-2.529590*x_1*x_2)$	0.994780

De acordo com a tabela os valores do avanço f : 0.091, 0.025, 0.152, 0.176, 0.199 representam respectivamente os níveis do planejamento Doehler, -1, -0.5, 0, +0.5, +1, e os valores da velocidade de corte V_c : 630, 800, 1000, representam respectivamente -0,866, 0, +0,866, sendo 0.152 para o avanço f e 800 para velocidade de corte V_c os pontos centrais do planejamento.

Para melhor visualização dos resultados, foi gerado um gráfico (Fig.7) a fim de mostrar a não disparidade entre os o experimento e a replica, provando assim que o experimento foi realizado de forma correta, possibilitando um resultado final aceitável.

Observa-se com a interpretação dos gráficos que os dados coletados (experimentos e réplicas) possuem um alto grau de aceitabilidade visto que a disparidade entre os testes foi muito pequena. Para calcular o vetor de coeficientes de regressão para os modelos com e sem interação, foi tirado à média entre o 1º experimento e o 2º experimento (réplica), depois foi aplicado o MMQ (Correlação Empírica). A Tab. 4 mostra a matriz de planejamento Doehler onde denominamos as variáveis de entrada, X_1 e X_2 , como sendo o avanço f , e a velocidade de corte V_c respectivamente e a variável de saída y , representando cada parâmetro de desgaste superficial. Com posse dos resultados e com o auxílio do MATLAB, ajustamos com o uso do método dos mínimos quadrados (MMQ) para modelos sem e com interação entre as variáveis. A Tab. 5 mostra os modelos propostos para análise qualitativo através do coeficiente R^2 , análise de resíduos e distribuição de Fischer. A seguir estão os gráficos dos resíduos dos respectivos modelos (Fig.8).

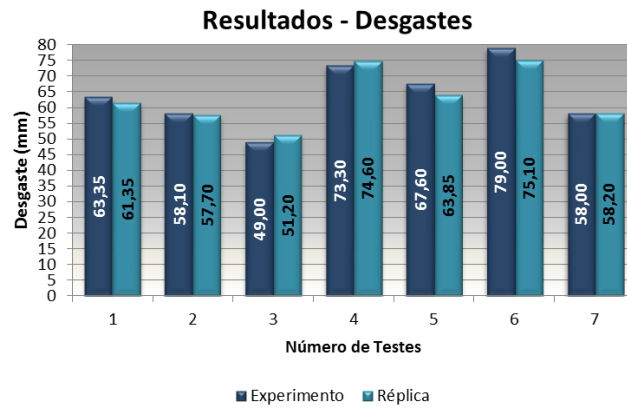


Figura 7. Resultados para Desgastes Superficiais da superfície usinada.

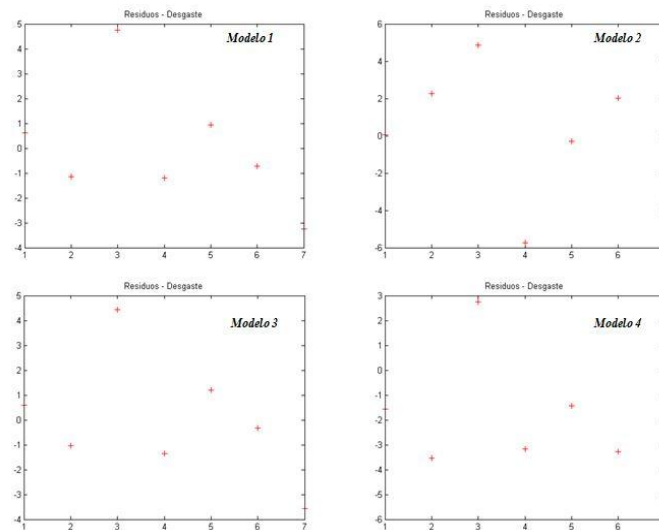


Figura 8. Distribuição dos resíduos para o modelo 1 (f), o modelo 2 (V_C), o modelo 3 (Sem interação) e o modelo 4 (Com interação) entre as variáveis de entrada para o parâmetro Desgaste Superficial.

Quanto à análise de *Regressão Linear*, os modelos dispuseram-se da seguinte forma da Fig.9, enquanto isso a Fig.10 apresenta as *Superfícies de Respostas* para cada modelo para verificar qual delas se aplica o melhor modelo e a Fig.11 mostra uma comparação entre os modelos simulados.

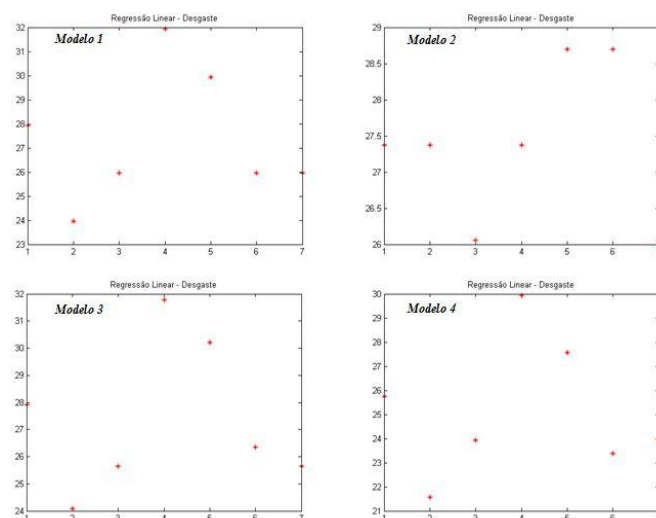


Figura 9. Análise de Regressão Linear para o modelo 1 (f), o modelo 2 (V_C), o modelo 3 (Sem interação) e o modelo 4 (Com interação) entre as variáveis de entrada para o parâmetro Desgaste Superficial.

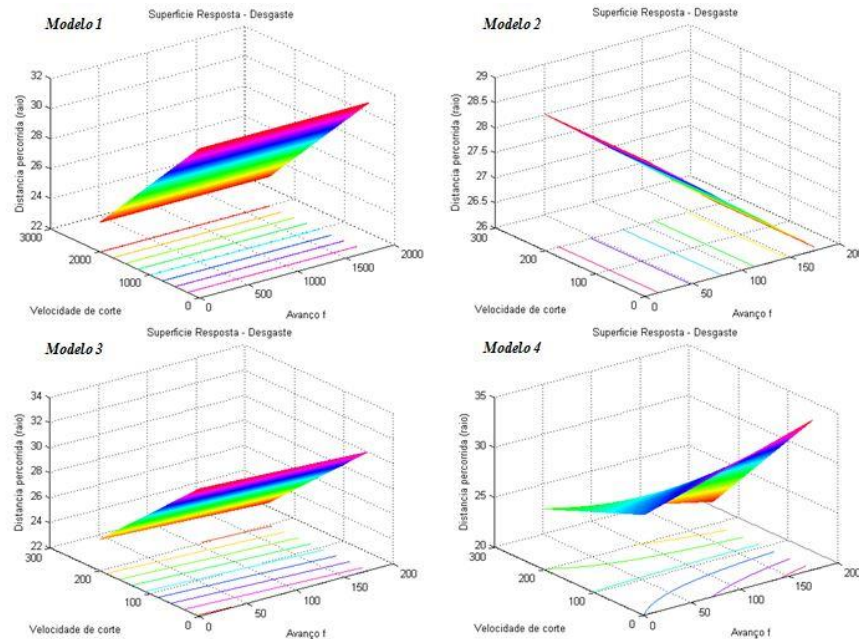


Figura 10. Superfície de Resposta referente ao modelo 1 (f), o modelo 2 (V_c), o modelo 3 (Sem interação) e o modelo 4 (Com interação) entre as variáveis de entrada para o parâmetro Desgaste Superficial.

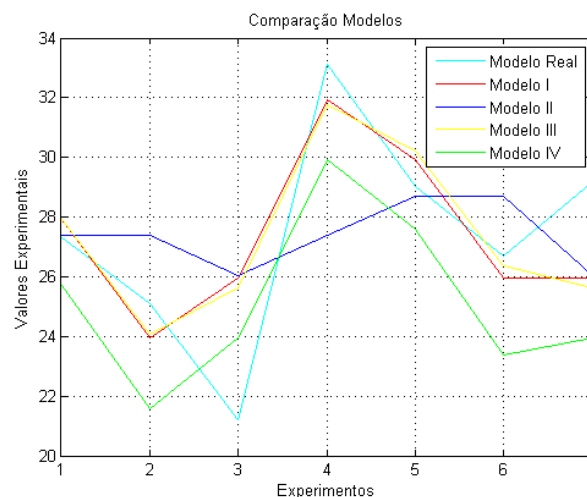


Figura 11. Comparação entre modelos obtidos com os resultados dos experimentos.

Conforme análise das figuras detectamos que o melhor modelo do desgaste da ferramenta proposto é $y(x_1, x_2) = 28.287500 + (-4.184375 * x_1) + (0.313943 * x_2) + (-2.529590 * x_1 * x_2)$, apresentando o $R^2 = 0.994780$ (modelo 4). Podemos inferir, empiricamente, que a presença do fluido de corte interferiu de maneira positiva, pois com a presença deste o acabamento superficial ele percorre uma área maior na peça usinada e apresenta mais qualidade no acabamento superficial da peça.

6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos o desgaste da ferramenta é influenciado pelos dois parâmetros analisados (V_c e f), mas com predomínio da variável de entrada velocidade de corte (V_c). Sendo o modelo proposto o modelo linear com dois parâmetros e com ou sem interação. E que o modelo com aplicação de fluido de corte é mais aconselhável se aplicar em usinagens de acabamento superficiais.

7. AGRADECIMENTOS

IFMA, CNPq e FAPEMA

8. REFERÊNCIAS

- Avila, R. F.; Abrao A. M., 2001, The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 119 pp. 21 – 26.
- Button S. T., 2005, “Metodologia Para Planejamento Experimental E Análise De Resultados”. Campinas - SP.
- Doehlert, 1970, D. H.; *Applied Statistics*, pp. 19-231.
- Duarte, M.A.V.; Meola, T., 2007, “Curso de Planejamento Experimental”, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais.
- Montgomery, D.C., Runger, G.C., Hubele, N.F., 2001, “Estatística Aplicada à Engenharia”, 2ª ed., New York: John Wiley & Sons, Inc., Tradução: Verônica Calado, D.Sc.
- Saramago S. F. P.; Silva N., 1986, Uma Introdução ao Estudo de Superfícies de Resposta, 2006. Uberlândia – MG Clark, J.A. Private Communication, University of Michigan, Ann Harbor.
- Teófilo, R.F., Ferreira, M. M. C., 2005, “Quimiometria II: Planilhas Eletrônicas para Cálculos de Planejamentos Experimentais, um Tutorial”, *Química Nova*, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 338-350, maio/dez.

9. RESPONSABILIDADE AUTURAL

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

DOEHLERT EXPERIMENTAL PLANNING APPLIED IN DETERMINING THE SURFACE FINISH MACHINED SURFACES WITH CUTTING FLUID USE

Ricardo Medeiros Rodrigues, ricardo.medeiros@engmecanico.¹

Rômulo Diêgo Marinho Siqueira, romulodiegoms@hotmail.com.¹

Bruno Alencar Carneiro, brunoalnk@hotmail.com.¹

Dalmir dos Santos Matos, matosengenharia.ma@gmail.com.¹

¹Federal Institute of Education, Science and Technology of Maranhão, Av. Getúlio Vargas, nº 04- Monte Castelo - São Luis-MA, CEP 65025-001, Brazil.

Abstract. In this project we used the Experimental Planning Doehlert applied to machining (Determination of Surface Machined finish with Cutting Fluid for use) in order to determine and evaluate the correlation between the roughness (output variable) under the influence of applied fluid vegetable-based cutting LB 2000 in the form of fluid Minimum Quantity (MQF), depending on the variables - cutting speed and feed (input variables) - in the material machining process ABNT 1045 metal tool hard P20 class. The experimental procedure consisted of data acquisition according to the planning matrix with a center point, adopting as the first variable levels (f forward) -1 (bottom); -0.5; 0 (center); +0.5; +1 (Top); and the second variable (Cutting speed Vc) -0866, 0 and +0866. From the experiments was determined output variable (wear) adjusted by the least squares method in which the relationship between the input variables was determined by the proposed models with up to three parameters with and without interaction, where it was considered analysis variance to reach the final model. The experiments were performed according to Matrix Planning Doehlert the two variables. Where it was analyzed the effect of the arithmetic average value of machining parameters of all deviations. Then replicates were performed for analysis of experimental error, then the response surface was presented to the correlation obtained in addition to the respective graphics, outline, waste and comparison models. In addition carried out the validation test of the obtained correlation and uncertainty analysis of the results, and then compared to the model obtained from dry Doehlert planning (without application of MQF) under the same conditions.

Keywords: Factorial Planning, Machining, Doehlert