

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS ABNT 52100 USANDO MODELOS DE CONFIABILIDADE

Rogério Santana Peruchi (UFPB) rogeriopерuchi@ct.ufpb.br
Rodrigo Cardoso (UFPB) rodrigo-cardoso22@hotmail.com
José Flávio Rique Junior (UFPB) flavioriqueproducao@gmail.com
Ligia de Oliveira Franzosi Bessa (UFPB) ligia@ct.ufpb.br

Resumo:

Este trabalho aborda um estudo de modelagem e otimização de um processo de torneamento de aços endurecidos ABNT 52100 usando modelo de confiabilidade. Deste modo, esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de aplicar o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) para a função de regressão da Rugosidade Superficial. Já para modelar a função de regressão da Vida útil da ferramenta de corte o método de Máxima Verossimilhança (MV) foi aplicado como sendo o mais indicado, uma vez que, a maioria das pesquisas utilizam o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) para modelar variáveis de confiabilidade. Ao aplicar a otimização multiobjetivo através do Método do Critério Global Normalizado (MCGN) foi gerado soluções de Pareto-ótimas. A fim de descobrir qual era a solução ótima do conjunto das soluções de Pareto-ótimas, aplicou-se mais um método, o do Erro Percentual Global (EPG), gerando um ponto ótimo com as seguintes configurações: A velocidade de corte (V_c) teve o valor igual a 209,43 m/min, o avanço (F_n) igual a 0,0402 mm e a profundidade de corte (A_p) igual a 0,1745 mm, resultando assim, os valores otimizados das seguintes variáveis de respostas, a rugosidade (R_a) igual a 0,2866 mm e a vida útil da ferramenta de corte (T) igual a 16,5712 min. Esses resultados foram os melhores obtidos através da otimização simultânea, para melhor tomada de decisão, do que os resultados obtidos com a otimização individual de cada variável de resposta.

Palavras chave: Rugosidade, Confiabilidade, Máxima Verossimilhança, Mínimos Quadrados Ordinários, Otimização Multiobjetivo.

Hardened turning optimization of AISI 52100 steels using reliability models

Abstract

This work deals with a modeling and optimization study of an ABNT 52100 hardened steel turning process using a reliability model. Thus, this research was developed with the objective of applying the Ordinary Least Squares (OLS) method to the Surface Roughness regression function. The maximum likelihood method (MV) was applied as the most suitable method, since most of the studies use the Ordinary Least Squares (OLS) method for modeling the regression function of reliability variables. When applying multiobjective optimization through the Normalized Global Criterion Method (MCGN), Pareto-optimal solutions were generated. In order to find out the optimum solution of the Pareto-optimal solutions, another method was applied, the Global Percent Error (EPG), generating an optimum point with the following configurations: The shear rate (V_c) had the value equal to 209.43 m / min, the feed rate (F_n) equal to 0.0402 mm and the depth of cut (A_p) equal to 0.11745 mm, resulting in the optimized values of the following response variables, the roughness (R_a) equal to 0.2866 mm and the life of the cutting tool (T) equal to 16.5712 min. These results were the best obtained through simultaneous optimization, for better decision making, than the results obtained with the individual optimization of each response variable.

Keywords: Roughness, Reliability, Maximum Likelihood, Ordinary Least Squares, Multiobjective Optimization.

1. Introdução

A usinagem tradicional de materiais endurecidos, geralmente, requer alguns processos de torneamento, tratamento térmico e retificação. No entanto, o torneamento de aços endurecidos pode eliminar parte desses processos. Com isso, o tempo de ciclo do processo é diminuído, enquanto a produtividade é aumentada e o custo reduzido. Esta operação tornou-se um importante processo de fabricação dentro de uma ampla gama de aplicações industriais, tais como engrenagens, eixos, rolamentos, cames, peças forjadas, moldes e matrizes (PERUCHI et al., 2017).

A rugosidade superficial, é uma característica da qualidade da peça usinada e que segundo Davim (2008) é de grande importância e a mesma deve ser garantida pelo processo de usinagem. Devido à utilização de parâmetros incorretos, no decorrer do processo, surgem problemas relacionados ao acabamento superficial tais como: tensões concentradoras na superfície usinada, propagação de trincas, ruptura do material e etc. Em um processo de torneamento de aço endurecido, a propriedade vida da ferramenta é característica de confiabilidade, assim, aumentar a vida da ferramenta é essencial para a diminuição dos custos de produção.

Segundo Tamizharasan; Sevaraj e Haq An (2006) a maioria das características de desempenho de torneamento de aços endurecidos são previsíveis e, portanto, podem ser modeladas. Preocupados com o aspecto da melhoria da usinagem, alguns pesquisadores investigaram o uso de métodos de otimização multiobjetivo na usinagem de aço endurecidos. Singh e Rao (2007) conduziram uma investigação experimental dos efeitos das condições de corte e da geometria da ferramenta na rugosidade da superfície no torneamento de acabamento de aço endurecido ABNT 52100 em uma peça de rolamento. Em pesquisas de Paiva et al. (2009); Gomes (2013); Benga e Abrão (2003); Campos (2011) entre outros, que modelaram a vida da ferramenta, o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) é utilizado. Porém, essa pesquisa tem como base para melhor modelar a variável de tempo até a falha ocorrer, ou seja, vida útil da ferramenta de corte, através do método de Máxima Verossimilhança (MV).

Assim, baseado no contexto discutido anteriormente o objetivo desta pesquisa é determinar qual a configuração dos parâmetros de corte do processo de torneamento do aço endurecido ABNT 52100 que otimizam simultaneamente a confiabilidade e a qualidade do processo.

2. Método experimental proposto

Montgomery (2013) sugere que para usar a abordagem estatística, na concepção e análise de um experimento, é necessário que todas as pessoas envolvidas no experimento tenham uma ideia clara sobre o que deve ser estudado, como os dados devem ser coletados e, pelo menos, um entendimento qualitativo de como esses dados devem ser analisados.

2.1 Reconhecimento e declaração do problema de qualidade e de confiabilidade

Segundo Montgomery (2013) é necessário desenvolver todas as ideias sobre os objetivos do experimento. Normalmente, é importante solicitar a participação de todas as partes interessadas: engenharia, garantia de qualidade, fabricação, marketing, gerenciamento, clientes e pessoal operacional (que geralmente têm muita visão e que muitas vezes são ignorados). Por esse motivo, Montgomery (2013) recomenda uma abordagem em equipe para projetar experimentos. Uma declaração clara do problema,

geralmente, contribui para uma melhor compreensão do fenômeno estudado e ao final uma solução do problema.

2.2 Definição das variáveis de resposta

Segundo Montgomery (2013) ao selecionar a variável de resposta, o experimentador deve ter certeza de que esta variável, realmente, fornece informações úteis sobre o processo em estudo. Geralmente é extremamente importante identificar questões relacionadas à definição das respostas de interesse e como elas devem ser mensuradas antes de realizar o experimento (MONTGOMERY, 2013).

Segundo Fogliatto (2009) o tempo-até-falha de um sistema pode ser entendido como o tempo decorrido no momento em que o sistema é inserido em operação até a sua primeira falha. Por estar submetido a variações aleatórias, o tempo-até-falha é explicitado como sendo uma variável aleatória.

2.3 Definição das variáveis de controle e seus níveis

Ao considerar os fatores que podem influenciar o desempenho de um processo ou sistema, o experimentador, geralmente, descobre que esses fatores podem ser classificados como potenciais fatores de arranjo ou fatores incômodos. Os fatores de arranjo são os fatores efetivamente selecionados para estudo na experiência. Os fatores constantes são variáveis que podem exercer algum efeito na resposta, mas, para fins do presente experimento, esses fatores não são de interesse, então, eles serão mantidos em um nível específico (MONTGOMERY, 2013). Tais situações, tem como objetivo encontrar as configurações dos fatores de projeto controláveis que minimizam a variabilidade transmitida pelos fatores de ruído (MONTGOMERY, 2013). Isso às vezes é chamado de estudo de robustez do processo ou de um problema de design robusto.

2.4 Escolha do arranjo experimental

Segundo Montgomery (2013) se as atividades de planejamento pré-experimental, acima mencionadas, forem feitas corretamente, esta etapa é relativamente fácil. A escolha do arranjo envolve a consideração do tamanho da amostra, a seleção de uma ordem de execução adequada para os ensaios experimentais e a determinação de envolvimento de bloqueios ou outras restrições de randomização. Nesta etapa podem ser utilizados softwares estatísticos (Minitab, excel, Statistica), que ajudem a usar as técnicas de planejamento e análise de experimentos, os gráficos lineares, e os gráficos de probabilidades normais oferecendo suporte a esta fase de projeto experimental (WERKEMA; AGUIAR, 1996; MONTGOMERY, 2013).

2.5 Realização dos experimentos

Ao executar o experimento, é vital monitorar cuidadosamente o processo para garantir que tudo esteja sendo feito de acordo com o planejado. Os erros no procedimento experimental, nesta fase, geralmente extinguirão a validade experimental. O planejamento inicial para prevenir erros é crucial para o sucesso do processo (MONTGOMERY, 2013).

2.6 Análise estatística dos dados

Montgomery (2013), ressalta que a principal vantagem dos métodos estatísticos é que eles adicionam objetividade ao processo de tomada de decisão. Para Montgomery (2013), como muitas das perguntas que o experimentador quer responder podem ser lançadas em uma estrutura de teste de hipóteses, os testes de hipóteses e os procedimentos de estimativa do intervalo de confiança são muito úteis na análise de dados de uma experiência projetada. A análise residual e a verificação da adequação do modelo também são técnicas importantes de análise.

A sequência lógica para a análise estatística dos dados para o método de máxima verossimilhança seria primeiro realizar o teste com os modelos de distribuição visando encontrar qual deles melhor se ajusta aos dados de confiabilidade. A distribuição escolhida será aquela que possuir o menor valor estatístico de Anderson-Darling para resíduos padronizados, depois indicar os coeficientes dos fatores estudados, em seguida verificar no modelo, quais fatores têm maior influência na resposta do problema, e realizar o teste de normalidade dos resíduos e a influência dos fatores para um percentil de 95%. E por fim, determinar o nível dos fatores que otimize a variável de resposta para percentuais de 95%.

O passo a passo para análise estatística dos dados para o método dos mínimos quadrados ordinários seria primeiro realizar a análise do teste de normalidade para a ferramenta de corte sobre os resíduos, observando se os coeficientes de Anderson-Darling (AD) possuem $P\text{-valor} > 5\%$ de significância. Dado que os resíduos são calculados pela equação (1):

$$e_i = Y' - Y \quad (1)$$

Onde,

e_i = resíduo;

Y' = valor previsto do modelo;

Y = valor experimental observado.

Em seguida analisar os efeitos estimados e coeficientes da resposta, observando seus níveis de significância. O próximo passo seria indicar o nível de significância do modelo de regressão através do $P\text{-valor}$, adotando $P\text{-valor} < 5\%$. Para o teste de falta de ajuste com $P\text{-valor} > 0,05$, não se pode afirmar que o modelo não justifica de maneira correta a variação da resposta. E por fim determinar o nível dos fatores que otimize a variável de resposta.

Para a otimização multiobjetivo deve-se primeiro elaborar uma matriz payoff a partir da determinação das otimizações e depois construir as funções normalizadas usando as equações (2) e (3) para obter as respostas desejadas.

$$\bar{f}_i(\mathbf{x}) = \frac{f_i(\mathbf{x}) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U} \text{ para minimizar} \quad (2);$$

$$\bar{f}_i(\mathbf{x}) = \frac{f_i^U - f_i(\mathbf{x})}{f_i^U - f_i^N} \text{ para maximizar} \quad (3).$$

Em seguida formular o problema de otimização multiobjetivo com base no método do Critério Global Normalizado, Eq. (4), somando-se as duas funções normalizadas e atribuindo o valor peso diferente a cada uma das funções normalizada.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } F(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^q w_i \bar{f}_i(\mathbf{x}) \\ \text{Sujeito a : } g_j(\mathbf{x}) &\leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

$g_j(x) \leq 0$, restrição da otimização.

2.7 Conclusões e recomendações

Uma vez que os dados foram analisados, o experimentador deve tirar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um curso de ação. Os métodos gráficos são, frequentemente, úteis nesta fase, particularmente, na apresentação dos resultados a outros. As corridas de acompanhamento e o teste de confirmação também devem ser realizados para validar as conclusões da experiência (MONTGOMERY, 2013).

3. Análise de resultados

Este caso foi explorado com base no estudo experimental de Paiva *et al* (2009), que expõe sobre “Uma otimização de erro quadrático médio multivariada de torneamento de aço temperado ABNT 52100”.

3.1 Declaração do problema de qualidade e de confiabilidade

A pesquisa foi realizada para a obtenção da otimização multiobjetivo, de uma característica da qualidade Ra (rugosidade superficial) e uma característica de confiabilidade T (Vida da ferramenta de corte) de um processo de torneamento de aços endurecidos ABNT 52100.

O objetivo principal foi determinar qual a configuração dos parâmetros de corte do processo de torneamento que otimiza as variáveis de respostas, simultaneamente, bem como mostrar os modelos de regressão, identificar os parâmetros de corte que mais influenciam na qualidade e na confiabilidade e aplicar um indicador para selecionar a melhor solução Pareto-ótima.

3.2 Definição das variáveis resposta

A Figura 1 exibe o processo em andamento com o que ocasionará a remoção do cavaco. Para avaliar as condições de usinagem, um critério de fim da vida da ferramenta foi adotado, assim como, a quebra da aresta de corte da ferramenta. Ao adotar esta condição experimental, as peças de trabalho foram usinadas, usando-se a gama de parâmetros definidos na Tabela 1, tendo no conjunto de respostas gravadas, Vida da ferramenta (T), Rugosidade da superfície (Ra) na Tabela 2.

Ao finalizar o experimento, necessitou-se de outra avaliação com intuito de otimizar, simultaneamente, as variáveis de resposta para encontrar a melhor solução Pareto-ótima utilizando-se de métodos de otimização, uma vez que, necessitava-se maximizar Vida da ferramenta e esperava-se minimizar a rugosidade.



Fonte: Paiva (2008)

Figura 1 - Processo

3.3 Definição das variáveis de controle e seus níveis

De acordo com a pesquisa experimental de Paiva *et al* (2009), os ensaios mostraram variação nos parâmetros de usinagem sendo como variáveis de controle, adotando-se, por exemplo, os níveis -1 e +1, a velocidade corte (V_c) entre os níveis 200 m/min e 240 m/min, o avanço de usinagem (F_n) tem como 0,050 mm/rot e 0,100 mm/rot e profundidade de corte (A_p) 0,150 mm e 0,300 mm, como mostra a Tabela 1.

Parâmetros de Controle	Símbolo	Unidade	Níveis (codificados)				
			-1,633	-1	0	1	+1,633
Velocidade de corte	V_c	m/min	187,34	200	220	240	256,66
Avanço	F_n	mm/rot	0,0342	0,050	0,075	0,100	0,1158
Profundidade de corte	A_p	mm	0,1025	0,150	0,225	0,300	0,3475

Fonte: Adaptado de Paiva *et al*. (2009)

Tabela 1: Níveis de fatores CCD

3.4 Escolha do arranjo experimental

No estudo experimental empírico de Paiva *et al* (2009), foi utilizado um arranjo central composto com quatro pontos centrais (tipo 0), seis pontos axiais (tipo -1) com distância de 1,633 e oito pontos fatoriais (tipo 1).

3.5 Realização dos experimentos

Para cumprir os objetivos da pesquisa experimental de Paiva *et al* (2009), o mesmo utiliza no experimento as peças de aço ABNT 52100 (1,03% C; 0,23% Si; 0,35% Mn; 1,40% Cr; 0,04% Mo; 0,11% Ni; 0,001% S; 0,01% P) com dimensões de $\Phi 49 \times 50$ mm utilizados no processo de torneamento. As peças utilizadas no processo foram temperadas antes da usinagem e após o tratamento térmico apresentaram valores de dureza entre 53 e 55 HRC até uma profundidade de 3 mm abaixo da superfície. A máquina-ferramenta utilizada foi um torno CNC com motor de fuso de 5.5 KW com rolamentos de rolos convencionais. As inserções de cerâmica mista ($Al_2O_3 + TiC$), código ISO CNGA 120408 S01525, foram revestidas com uma camada muito fina de nitreto de titânio apresentando um chanfro nas bordas e fabricadas pela Sandvik Coromant (Sandvik classe CC6050). O porta-ferramentas apresentou uma geometria negativa com o código ISO DCLNL 1616H12 e ângulo de entrada $\gamma_r = 95^\circ$. As medidas de desgaste do flanco da ferramenta (VB_{max}) foram realizadas através de um microscópio óptico.

Tendo realizado o experimento, organizou-se na Tabela 2 os resultados da Vida da ferramenta (T) em minutos e Rugosidade superficial (Ra) em milímetros, para as dezoito condições ensaiadas necessárias à obtenção dos pontos fatoriais.

Ponto	Experimento	Vc	Fn	Ap	T	Ra
1	1	200	0,05	0,15	16,75	0,33
1	2	240	0,05	0,15	11,5	0,28
1	3	200	0,1	0,15	9,85	0,7
1	4	240	0,1	0,15	8,5	0,57
1	5	200	0,05	0,3	11,5	0,25
1	6	240	0,05	0,3	7,45	0,42
1	7	200	0,1	0,3	8,2	0,57
1	8	240	0,1	0,3	6,25	0,61
0	9	220	0,075	0,225	8,6	0,36
0	10	220	0,075	0,225	6,8	0,42
-1	11	187,34	0,075	0,225	10,1	0,34
-1	12	252,66	0,075	0,225	4,6	0,45
-1	13	220	0,03418	0,225	17,5	0,32
-1	14	220	0,11583	0,225	7,2	0,72
-1	15	220	0,075	0,10253	12	0,36
-1	16	220	0,075	0,34748	6,7	0,31
0	17	220	0,075	0,225	7,2	0,37
0	18	220	0,075	0,225	9,1	0,29

Fonte: Adaptado de Paiva *et al.* (2009)

Tabela 2: Planejamento Fatorial para o tempo até a falha (T) e Rugosidade (Ra)

Pode-se observar que na Tabela 2 a Menor Rugosidade Superficial (Ra) foi de 0,25 mm no experimento 5, com uma velocidade de corte (Vc) de 200 m/min, um avanço (Fn) de 0,05 mm, uma profundidade de corte (Ap) de 0,3 mm e uma Vida da ferramenta (T) ruim de 11,5 minutos. Já no experimento 13 observou-se uma maior Vida da ferramenta (T) com 17,5 min., com uma velocidade de corte (Vc) de 220 m/min, um avanço (Fn) de 0,03418 mm, uma profundidade de corte (Ap) de 0,225 mm e uma rugosidade superficial (Ra) de 0,32 mm.

3.6 Análise estatística dos dados

3.6.1 Método de máxima verossimilhança (MV)

De acordo a sequência lógica descrita anteriormente, o primeiro passo foi a execução da análise, mudando-se no Minitab®, as distribuições para saber qual se ajusta aos dados. O modelo de melhor ajuste aos dados de Confiabilidade é o baseado na Normal, diante disso, apresentou o valor de Anderson-Darling de 0,880, sendo o menor valor entre outras distribuições avaliadas.

No segundo passo foram encontrados os coeficientes Modelo de Regressão para a Vida da Ferramenta (T). A Tabela 3 mostra o modelo de regressão encontrado pelo método de Máxima Verossimilhança e usando-se a distribuição Normal.

Já no terceiro passo, a análise estatística dos fatores do modelo de regressão é feita através da significância do *P-valor* < 5% e a importância dos fatores feita através do *Z-valor*, que em módulo tem que ser o maior valor. Na Tabela 4, que se refere aos fatores de vida da ferramenta (T), os mais significativos foram os termos simples Vc, Fn e Ap, os

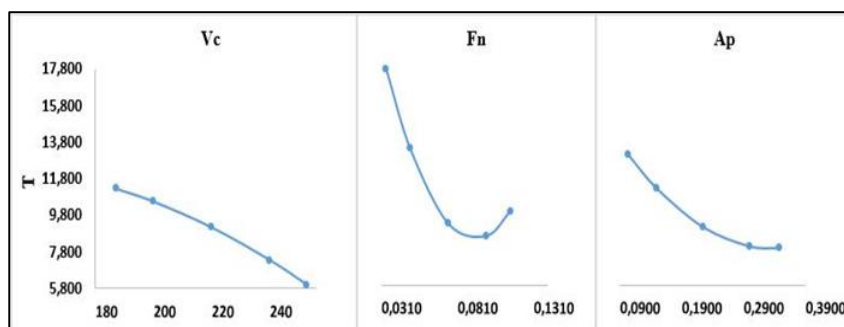
termos quadráticos F_n^2 e A_p^2 e os termos de interação $(V_c)*(F_n)$ e $(F_n)*(A_p)$. Já o mais importante em módulo foi o termo F_n com Z-valor igual a 11,49.

Termos	Coefficientes	Erro	Z-Value	P-Value
Constante	7,91609	0,369874	21,40	0,000
V_c	-1,61861	0,203762	-7,94	0,000
F_n	-2,34148	0,203762	-11,49	0,000
A_p	-1,63911	0,203762	-8,04	0,000
V_c^2	-0,192236	0,217771	-0,88	0,377
F_n^2	1,68275	0,217771	7,73	0,000
A_p^2	0,557758	0,217771	2,56	0,010
$(V_c)*(F_n)$	0,75	0,263056	2,85	0,004
$(V_c)*(A_p)$	0,075	0,263056	0,29	0,776
$(F_n)*(A_p)$	0,675	0,263056	2,57	0,010
Scale	0,744036	0,124006	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 3: Modelo de Regressão para a Vida da Ferramenta (T)

No quarto e último passo são determinados os níveis de fatores que otimiza a variável de resposta. Na Figura 2, o gráfico Vida da ferramenta de corte (T) em função da Velocidade de corte (V_c), têm o avanço (F_n) e a profundidade de corte (A_p) fixados e igualados a zero. Assim, para que tenha uma maior Vida (T), ou seja, para maximizar a Vida da ferramenta, a velocidade de corte (V_c) tem de assumir um valor igual a 187,34 m/min. No gráfico, Vida da ferramenta de corte (T) em função do avanço (F_n), têm a velocidade de corte (V_c) e a profundidade de corte (A_p) fixadas e igualadas a zero. Dessa forma, o avanço igual a 0,0342 mm faz com que maximize a vida da ferramenta (T). Da mesma forma, o gráfico Vida da ferramenta de corte (T) em função da profundidade de corte (A_p), tem o avanço (F_n) e a velocidade de corte (V_c) fixados e igualados a zero. Já em termo de profundidade de corte (A_p) o valor ideal será igual a 0,1025 mm para que otimize a Vida da ferramenta (T).

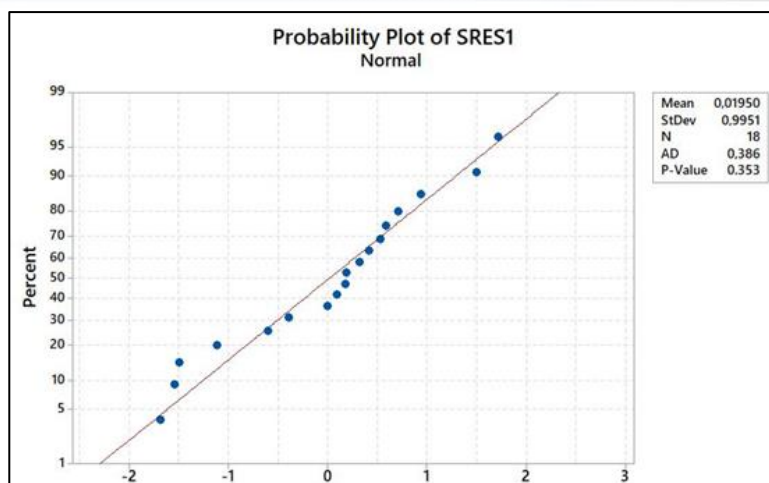


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 2: Gráfico dos efeitos principais das variáveis de controle para Vida da ferramenta

3.6.2 Método dos mínimos quadrados ordinários (OLS)

Seguindo os passos para a análise dos dados pelo método de Mínimos Quadrados Ordinários temos que o primeiro passo foi feito a execução da análise da Figura 3, que indica o gráfico do teste de normalidade dos resíduos para a Rugosidade superficial (R_a), os resíduos foram calculados a partir da equação (1). A Figura 3 indica que os resíduos possuem uma distribuição normal, aceitável para o tempo até a falha, pois apresentam o coeficiente de AD < 1 e P-Valor > 5% de significância.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 3: Gráfico do teste de normalidade dos resíduos

No segundo passo foram encontrados os coeficientes modelo de regressão para Rugosidade (Ra). A Tabela 5 mostra o modelo de regressão encontrado pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários usando a distribuição Normal.

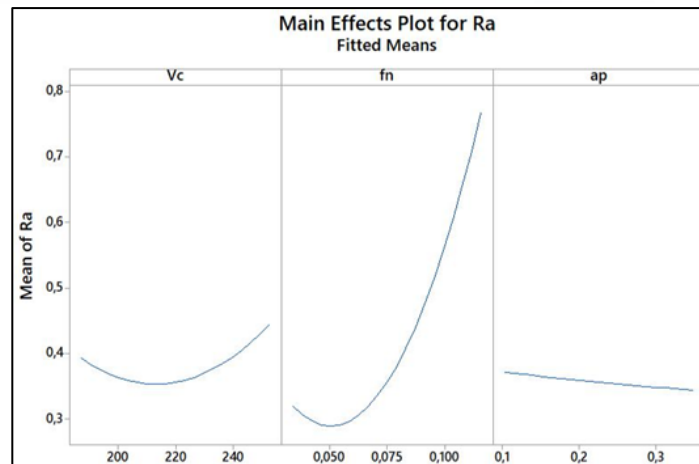
Termos	Coefficientes	Erro	T-Value	P-Value
Constante	0,3561	0,0244	14,57	0,000
Vc	0,0157	0,0135	1,17	0,276
Fn	0,1367	0,0135	10,16	0,000
Ap	-0,0084	0,0135	-0,62	0,551
Vc ²	0,0234	0,0144	1,63	0,143
Fn ²	0,0703	0,0144	4,88	0,001
Ap ²	0,0009	0,0144	0,06	0,953
(Vc)*(Fn)	-0,0262	0,0174	-1,51	0,169
(Vc)*(Ap)	0,0488	0,0174	2,81	0,023
(Fn)*(Ap)	-0,0188	0,0174	-1,08	0,312

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4: Modelo de Regressão para Rugosidade (Ra)

Já no terceiro passo, a análise estatística dos fatores do modelo de regressão é feita através da significância do *P-valor* < 5% e a importância dos fatores através do *T-valor*, que em módulo, tem que ser o maior valor. Na Tabela 5, que se refere aos fatores de Rugosidade (Ra), os mais significativos foram o termo Fn, o termo quadrático Fn² e o termo de interação (Vc)*(Ap). Já o mais importante em módulo foi o termo fn com *T-valor* igual a 10,16.

No quarto e último passo é determinado os níveis de fatores os quais otimizam a variável de resposta. Observando o gráfico na Figura 4 para que seja minimizada a Rugosidade (Ra) em termos de velocidade de corte (Vc), o valor tem que ser mais próximo possível do *centerpoint* que é igual a 220 m/min; para o termo de taxa de avanço (Fn) o ideal seria mais próximo do limite inferior igual a 0,050 mm, já em termos de profundidade de corte (Ap) o ideal seria próximo de 0,3 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 4: Gráfico dos efeitos principais das variáveis de controle para Rugosidade

3.6.3 Otimização multiobjetivo

Para a otimização multiobjetivo temos a análise e a determinação dos dados pelo Método do Critério Global Normalizado (MCGN) e o Erro Percentual Global das respostas Pareto-ótimas. No primeiro passo foi elaborada uma matriz payoff a partir da determinação das otimizações e T e os pontos de Utopia e de Nadir R_a^U , T^U e R_a^N , T^N :

$$\begin{bmatrix} R_a^U & T^N \\ R_a^N & T^U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,24 & 9,94 \\ 0,29 & 16,60 \end{bmatrix} \quad (5)$$

No segundo passo foram construídas as funções normalizadas usando as equações (3) e (5) para obter as respostas desejadas:

$$R_a(\mathbf{x}) = 0,3561 + 0,0157Vc + 0,1367fn - 0,0084ap + 0,0234Vc^2 + 0,0703fn^2 + 0,0009ap^2 - 0,0262Vc * fn + 0,0488Vc * ap - 0,0188fn * ap \quad (6)$$

$$\bar{R}_a(\mathbf{x}) = \frac{R_a(\mathbf{x}) - R_a^U}{R_a^N - R_a^U} = \frac{R_a(\mathbf{x}) - 0,2366}{0,2880 - 0,2366} \quad (7)$$

$$\bar{R}_a(\mathbf{x}) = 0,2726 \quad (8)$$

$$T(\mathbf{x}) = 7,9161 - 1,6186Vc - 2,3415fn - 1,6391ap - 0,1922Vc^2 + 1,6828fn^2 + 0,5578ap^2 + 0,75Va * fn + 0,075Vc * ap + 0,675fn * ap \quad (9)$$

$$\bar{T}(\mathbf{x}) = \frac{T^U - T(\mathbf{x})}{T^U - T^N} = \frac{16,6014 - T(\mathbf{x})}{16,6014 - 9,9450} \quad (10)$$

$$\bar{T}(\mathbf{x}) = 0,0045 \quad (11)$$

Já no terceiro passo foi formulado o problema de otimização multiobjetivo com base no Método do Critério Global Normalizado (MCGN) para modelar, somando as duas funções normalizadas atribuindo o valor peso diferente a cada uma das funções normalizada para que ocorra a otimização simultânea.

$$\text{Minimizar } F(\mathbf{x}) = w[R_a(\mathbf{x})] + (1-w)[T(\mathbf{x})]$$

$$\text{Sujeito a: } \mathbf{x}'\mathbf{x} \leq \rho^2$$

$F(\mathbf{x})$ – Função Objetivo;

w – Peso;

$(1-w)$ – Complemento do peso;

ρ^2 – 2,67, distancia axial.

3.7 Conclusões e recomendações

Para determinar a solução ótima do processo foi necessário aplicar dois métodos, que são, Método do Critério Global Normalizado (MCGN) para modelar e otimizar as variáveis de repostas uma de característica de qualidade e outra de confiabilidade e o indicador Erro Percentual Global (EPG) para encontrar qual a configuração dos parâmetros de corte otimiza, simultaneamente, as respostas, ou seja, encontra o ponto ótimo. A partir das análises com base nesses dois métodos, o resultado que se deseja é otimizar simultaneamente a variável de qualidade rugosidade superficial (R_a) com a de variável de confiabilidade vida da ferramenta (T). Porém, ao aplicar o método Erro Percentual Global (EPG) sendo o indicador, quanto menor erro possível melhor será a solução ótima das soluções Pareto-ótimas, assim, foi identificada a melhor solução entre o conjunto de soluções de Pareto-ótimas. Ao longo do processo, o peso 0,35 foi o melhor, assim, o resultado mais expressivo entre eles será ao usar velocidade de corte (V_c) 209,43 m/min, um avanço (F_n) de 0,0402 mm e uma profundidade de corte (A_p) de 0,1745 mm; se forem usadas essas configurações no processo, espera-se uma rugosidade superficial (R_a) de 0,2866 mm e uma vida da ferramenta (T) de 16,5712 min.

Confrontando os resultados na forma experimental da Tabela 3 (Planejamento Fatorial para o tempo até a falha (T) e Rugosidade (R_a)) remete que no momento que prioriza a menor rugosidade superficial (R_a) 0,25 mm a solução será com velocidade de corte (V_c) 200 m/min, avanço (F_n) 0,05 mm e profundidade de corte (A_p) 0,3 mm com uma vida da ferramenta (T) com o tempo ruim de 11,5 min; já priorizando a melhor vida da ferramenta (T) 17,5 min a solução será com velocidade de corte (V_c) 220 m/min, avanço (F_n) 0,03418 mm e profundidade de corte (A_p) 0,225 mm, com uma rugosidade superficial (R_a) de 0,32 mm insatisfatória para qualidade do processo.

Então, uma solução que consegue atender ambas as respostas de melhor qualidade e maior confiabilidade para achar um equilíbrio, será a da otimização simultânea Tabela 07 (Otimização simultânea ente uma característica de qualidade R_a e de confiabilidade T).

4. CONCLUSÃO

Neste estudo obteve-se uma configuração dos parâmetros de corte que otimizam, simultaneamente, qualidade e confiabilidade, tendo como ponto ótimo de velocidade de corte (V_c) igual a 209,43 m/min, um avanço (F_n) de 0,0402 mm e uma profundidade de corte (A_p) de 0,1745 mm. Essa configuração gerou uma rugosidade superficial (R_a) de 0,2866 mm e uma vida da ferramenta (T) de 16,5712 min.

É evidente a contribuição do estudo perante o avanço da literatura sobre a otimização do processo de torneamento de aço endurecido ABNT 52100 usando modelos

de confiabilidade e sua aplicação em casos reais, uma vez que, todos os estudos pesquisados trazem limitações sobre otimização simultânea usando modelos de confiabilidade, há escassez de literatura sobre o tema e principalmente em sua aplicação em indústria, organizações, entre outras instituições reais.

Para trabalho futuro recomenda-se um foco em testes de confirmação para que se possa realizar um comparativo com a pesquisa explorada e explorar outras variáveis usando o mesmo procedimento adicionando mais respostas como produtividade, custo, tempo de processo, entre outras, para uma melhor tomada de decisão no processo de usinagem.

Referências

- BENGA G. C., ABRÃO A. M.** Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools. *J Mater Process Technol* 143–144:237–241 doi:10.1016/S0924-0136(03) 00346-7, 2003.
- CAMPOS, P. H. S.** Otimização Robusta Multivariada do Processo de Torneamento do Aço Endurecido ABNT 52100 com Ferramenta Cerâmica Alisadora. 43p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2011.
- DAVIM, J. P.** Machining: fundamentals and recent advances. London: Springer Science & Business Media, 2008.
- FOGLIATTO, F. S.** Confiabilidade e Manutenção Industrial. São Paulo: Elsevier, 2009.
- GOMES, J. H. F.** Método dos polinômios canônicos de misturas para otimização multi-objetivo. 52p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2013.
- MONTGOMERY, D. C.** Design-and-Analysis-of-Experiments, 2013.
- PAIVA, A. P.; PAIVA, E. J.; FERREIRA, J. R.; COSTA, S. C..** A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. *Int J Adv Manuf Technol* 43:631–643 DOI 10.1007/s00170-008-1745-5, 2009.
- PERUCHI, R. S.; JUNIOR, P. R.; BRITO, T. G.; LARGO, J. J. J.; BALESTRASSI, P. P.** Multivariate process capability analysis applied to AISI 52100 hardened steel turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017.
- TAMIZHARASAN T, SEVARAJ T, HAQ AN.** Analysis of tool wear and surface finish in hard turning. *Int J Adv Manuf Technol* 28:671–679 doi:10.1007/s00170-004-2411-1, 2006.
- WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S.** Planejamento e análise de experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo. Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni. v.8, 1996.