

ESTUDO DA VIDA DE FERRAMENTAS DE CORTE EM PROCESSOS DE USINAGEM ATRAVÉS DE MODELOS DE CONFIABILIDADE

Rogério Santana Peruchi (Universidade Federal da Paraíba) rogerioperuchi@gmail.com
Kássio Yves de Azevedo Albuquerque (Universidade Federal da Paraíba) kassioyves@hotmail.com
George Sousa Evangelista (Universidade Federal da Paraíba) georgesousa@hotmail.com
Tarcisio Gonçalves de Brito (Universidade Federal de Itajubá) brito.tarcisiog@gmail.com
Ligia de Oliveira Franzosi Bessa (Universidade Federal da Paraíba) ligia@ct.ufpb.br

Resumo:

A vida de ferramenta de corte tem influência nos custos finais do produto usinado no processo de usinagem. Desse modo, é fundamental que se tenha critérios para definir a sobrevivência da ferramenta para que esta possa ser substituída ou reafiada antes que apresente falhas que irão influenciar na qualidade da peça. Existem vários modelos estatísticos que são usados na análise de dados de tempo até a falha ocorrer. Portanto, para a análise de vida útil da ferramenta foi comparado o método de Máxima Verossimilhança em relação ao método mais utilizado que é o de Mínimos Quadrados Ordinários, com a finalidade de mostrar quais as vantagens e desvantagens ao utilizar cada método. Após as análises do processo, a combinação de fatores que maximizam o TTF da ferramenta são: para o avanço (f) = 0,38, para a rotação (rpm) = 235 e a geometria quadrada, os dois métodos chegaram a mesma conclusão. O Método de Máxima Verossimilhança apresentou vantagens com maior relevância, pois é capaz de obter informações mais fundamentais para análise da vida da ferramenta. Foi estimada a confiabilidade da ferramenta para uma sobrevivência de 1000 mm e foi estimada a sobrevivência para as confiabilidades de 5% e 50%, para todas as combinações entre os níveis de avanço, rotação e geometria.

Palavras chave: Máxima Verossimilhança, Mínimos Quadrados Ordinários, Vida da Ferramenta.

STUDY OF THE LIFE OF CUTTING TOOLS IN MACHINING PROCESSES THROUGH RELIABILITY MODELS

Abstract

The life of cutting tool has influence on the final costs of the product machined in the machining process. Thus, it is fundamental to have criteria to define the survival of the tool so that it can be replaced or re-fired before it presents flaws that will influence the quality of the part. There are several statistical models that are used in the analysis of time data until failure occurs. Therefore, for the tool life analysis, the Maximum Likelihood method was compared to the most commonly used method, which is the Ordinary Least Squares method, in order to show the advantages and disadvantages of using each method. After the process analyzes, the combination of factors that maximize the TTF of the tool are: for the feed rate (f) = 0.38, for the rotation (rpm) = 235 and the square geometry, the two methods reached the same conclusion. The Maximum likelihood estimation method presented advantages with greater relevance, since it is able to obtain more fundamental information for analysis of the life of the tool. The reliability of the tool was estimated for a survival of 1000 mm and survival was estimated for 5% and 50% reliabilities, for all combinations between levels of feed, rotation and geometry.

Key-words: Maximum likelihood estimation, Ordinary Least Squares, Tool Life.

1. Introdução

Nos processos de usinagem a escolha do material a ser usinado é tão importante quanto a seleção de ferramentas, fluido de corte, equipamento e condições de usinagem, pois permite vantagens econômicas de grande relevância impactando positivamente na produtividade (MICHELS, 2011).

Para o entendimento dos processos muitas vezes são realizados procedimentos para análise de modelos muitas vezes obtidos pela regressão linear. Segundo Figueiredo Filho et al. (2011) um dos métodos mais utilizados para análise de modelos de regressão linear é o método de mínimos quadrados que determina os valores dos coeficientes de regressão linear e o modelo correspondente.

Para Severino (2011) o Projeto de Experimentos (DOE) é caracterizado por utilizar técnicas com a finalidade de planejar experimentos capazes de gerar dados aptos para realizar uma avaliação estatística que ocasionem em conclusões relevantes e objetivas. Ainda segundo ele, inúmeros cientistas têm empregado a metodologia DOE nas pesquisas experimentais de otimização em diversos tipos de processos de usinagem e materiais.

Em geral, os estimadores de máxima verossimilhança possuem melhores propriedades estatísticas do que os estimadores dos mínimos quadrados. Os estimadores dos mínimos quadrados exigem apenas pressupostos sobre o valor esperado, variâncias e covariâncias entre os erros aleatórios. Já os estimadores de máxima verossimilhança requerem uma hipótese de distribuição total, neste caso que os erros aleatórios seguem uma distribuição normal com os mesmos segundos momentos que necessário para as estimativas de mínimos quadrados (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2015).

Com auxílio desses recursos é possível calcular a vida da ferramenta com precisão. Assim, ocorre influência nos custos finais da produção, evitando a perda do material utilizado na usinagem por poder prever quando a ferramenta irá falhar. Além disso, é possível ter um aumento na produção evitando que haja parada por falha da ferramenta e ainda ter uma maior qualidade nas peças usinadas. Com isso, é importante que se faça uso de um melhor modelo estatístico de análise de confiabilidade.

O presente artigo objetiva comparar os modelos de vida de ferramenta de corte obtidos pelo método de Máxima Verossimilhança e por Mínimos Quadrados Ordinários e identificar o mais adequado para análise do processo de torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico.

O trabalho está composto por cinco sessões para melhor entendimento do desenvolvimento de ideias. A introdução como forma de apresentar contexto, fundamentação teórica para embasamento conceitual, metodologia para detalhamento de procedimentos metodológicos utilizados, análise de resultados e discussões dos dados obtidos a partir da aplicação da metodologia e conclusão da pesquisa.

2. Fundamentação teórica

2.1 Vida de ferramentas de corte em processos de usinagem

Uma definição para a vida de uma ferramenta está relacionada ao tempo efetivo gasto pela ferramenta na execução de uma operação, sem alterar sua função de corte e que tenha seus critérios de tempo até a falha já determinados. Chegando ao limite desses critérios, indica que a ferramenta deverá ser trocada ou ser reafiada (ALMEIDA, 2005).

Godim (2008) alerta que as falhas na ferramenta de corte, ocasionadas por desgastes (contínuos) ou avarias (aleatórias), influenciam diretamente na qualidade do produto, afetando significativamente o tempo até a falha.

Para Diniz et al. (2008) o aumento no desgaste da ferramenta é influenciada principalmente pela velocidade de corte, pelo avanço e pela profundidade de usinagem, respectivamente.

Segundo Severino (2011), existem vários fatores que modificam significativamente a performance final da ferramenta, o que sugere que esta seja escolhida levando-se em conta tais

fatores. Com isso, ele afirma ainda que é importante a manutenção de estudos constantes necessários para analisar mais profundamente os mecanismos e processos de desgaste e de avarias nas ferramentas de corte.

2.2 Análise de regressão com dados de confiabilidade de processos

Para Montgomery (2012) é interessante, em muitos problemas, explorar a relação de duas ou mais variáveis. O relacionamento entre variáveis caracteriza-se por um modelo matemático chamado modelo de regressão. O modelo de regressão é adequado a um conjunto de dados de amostra.

2.2.1 Método de mínimos quadrados ordinários

Segundo Montgomery (2012), o método dos mínimos quadrados é tipicamente usado para estimar os coeficientes de regressão em um múltiplo modelo de regressão linear. Pode-se escrever a equação do modelo (2.1) em termos das observações como:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i; \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

O método dos mínimos quadrados escolhe os β 's na Equação (2.1) para que a soma dos quadrados dos erros, ε_i , seja minimizado. A função de mínimos quadrados (2.2) é:

$$L = \sum_{j=1}^k \varepsilon_j^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_j x_{ij})^2 \quad (2.2)$$

Os valores de $\hat{\beta}_0$ e $\hat{\beta}_j$ demonstrados nas equações (2.3) e (2.4) são chamados Estimadores de Mínimos Quadrados (EMQ).

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_j \bar{X} \quad (2.3)$$

$$\hat{\beta}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{X}^2} \quad (2.4)$$

Em que $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ e $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ são as médias de x e da variável Y , respectivamente. O modelo de regressão linear simples ajustado é então: $\bar{Y} = \beta_0 + \beta_j \bar{X}$.

2.2.2 Método de máxima verossimilhança para estimar modelos de confiabilidade

O método dos mínimos quadrados pode ser usado para estimar os parâmetros em um modelo de regressão linear independentemente da forma de distribuição dos erros. Conhecendo a forma da distribuição dos erros, pode-se utilizar como parâmetro de estimativa, o método de máxima verossimilhança (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2015).

Para o modelo de regressão linear simples com erros normais, a função de verossimilhança é:

$$\begin{aligned} L(y_i, x_i, \beta_0, \beta_1, \sigma^2) &= \prod_{i=1}^n (2\pi\sigma)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2\right] \\ &= (2\pi\sigma)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2\right] \end{aligned}$$

Os estimadores de máxima verossimilhança são os valores dos parâmetros, assume-se que $\bar{\beta}_0$,

$\bar{\beta}_1$ e $\bar{\sigma}^2$, maximize L ou, de forma equivalente, em L. Assim,

$$\ln L(y_i, x_i, \beta_0, \beta_1, \sigma^2) = -\left(\frac{n}{2}\right) \ln 2\pi - \left(\frac{n}{2}\right) \ln \sigma^2 = -\left(\frac{1}{2\sigma^2}\right) \sum (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2$$

Os estimadores de máxima verossimilhança são apresentados nas equações (2.5), (2.6) e (2.7).

$$\bar{\beta}_0 = \bar{y} - \bar{\beta}_1 \bar{x} \quad (2.5)$$

$$\bar{\beta}_1 = \frac{\sum y_i (x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.6)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2}{n} \quad (2.7)$$

Observa-se que os estimadores de máxima verossimilhança da interceptação e inclinação, $\bar{\beta}_0$ e $\bar{\beta}_1$ são idênticos aos estimadores de mínimos quadrados desses parâmetros. Além disso, $\bar{\sigma}^2$ é um estimador tendencioso.

Para modelos de regressão com distribuição Weibull, Exponencial, Lognormal ou Loglogístico, a equação utilizada será:

$$Y = \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^k (\beta_j x_{ij} + \varepsilon_i); \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2.8)$$

Já para modelos de distribuição Normal, Valor extremo ou Logístico, a equação utilizada será:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i; \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2.9)$$

Analogamente, tem-se como resposta os estimadores de máxima verossimilhança das equações (2.5), (2.6) e (2.7) citados anteriormente. Para calcular o tempo até a falha ocorrer (TTF), tem-se que:

$$TTF = \exp[\ln(Y)] \quad (2.10)$$

3. Método proposto de pesquisa

3.1 Declarar o problema de confiabilidade

Para Montgomery (2012) iniciar um experimento é de grande utilidade selecionar os principais problemas ou questões específicas que serão abordados. Uma declaração objetiva contribui para uma melhor compreensão da atividade que está sendo estudada, além de gerar uma solução final consistente para o problema.

3.2 Definir a variável de resposta (tempo até a falha ocorrer)

O pesquisador deve conhecer a variável que irá selecionar como resposta, de modo que forneça informações que serão de grande utilidade para o processo em estudo (MONTGOMERY, 2012).

Conforme NBR 5462 (1994) “Tempo-até-falha é a duração acumulada dos tempos de operação de um item, desde sua colocação em um estado de disponibilidade até a ocorrência da falha, ou do instante do restabelecimento funcional até a ocorrência da próxima falha”.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009) em um estudo de confiabilidade, normalmente, são realizados

testes de vida em componentes (ou sistemas) para se obter informações sobre dados estatísticos. Nesses testes, para obter o registro de dados de tempo-até-falha, várias unidades semelhantes e relacionadas entre si do componente são postas em uso. Se o teste for guiado até que todas as unidades do sistema falhem, o conjunto de dados de tempo-até-falha obtido é dito completo. Diz-se censurado, um conjunto de dados incompletos de tempo-até-falha. Dados censurados são aqueles que não se conhece seu valor exato, são dados perdidos no processo.

3.3 Definir as variáveis de controle e seus níveis

As escolhas dos fatores no processo experimental podem influenciar significativamente em seu desempenho, esses fatores podem ser classificados como fatores relevantes (variáveis dependentes e respostas do experimento) para o projeto ou fatores irrelevantes (MONTGOMERY, 2012).

Segundo Coleman e Montgomery (1993) é importante que esses fatores sejam classificados por categorias, pois terão influência nas respostas do experimento e irão facilitar a análise do pesquisador.

3.4 Escolher arranjo experimental

Segundo Montgomery (2012), a escolha do arranjo experimental depende de variáveis como o tamanho da amostra, do passo a passo de execução do projeto, do tipo de problema que se pretende analisar, dentre outros fatores. É importante utilizar softwares que trabalhem usando dados estatísticos gerando gráficos, tabelas e outros tipos de resultados facilitando a análise e auxiliar no desenvolvimento dos resultados para o projeto.

3.5 Realizar experimentos

Para assegurar que o projeto seja executado de acordo com o planejamento inicial, faz-se necessário que haja um monitoramento adequado do andamento do processo experimental, erros nessa fase prejudicam a análise do experimento, pois aumentam as chances do aparecimento de falhas (MONTGOMERY, 2012). Conforme Coleman e Montgomery (1993) é importante realizar testes pré-projeto. Essas fases geram informações importantes que vão auxiliar na prevenção de acontecimentos que invalidem os dados coletados e influenciem na análise final do experimento.

3.6 Análise estatística dos dados

A figura 1 apresenta 4 passos da análise estatística dos dados para o Método de Máxima Verossimilhança.



Figura 1 – Fluxograma com o passo a passo da análise estatística dos dados para o método de máxima verossimilhança

Passo 1: Realizar o teste com os modelos de distribuição visando encontrar qual deles melhor se ajusta aos dados de confiabilidade. Daí, a distribuição escolhida será aquela que possuir o menor valor estatístico de Anderson-Darling para resíduos padronizados, com o intuito de determinar qual a distribuição que melhor se ajusta ao modelo de confiabilidade. Passo 2: Indicar os coeficientes dos fatores estudados, calculados a partir das equações (2.6), (2.7) e (2.8); Passo 3: Verificar no modelo quais fatores têm maior influência na resposta do problema e a Influência dos fatores para um percentil de 5% e 50% de falha acumulada; Passo 4: Verificar qual conjunto de dados apresenta

maior vida útil da ferramenta de corte para os referidos percentuais de 5% e de 50%.

A Figura 2 representa o fluxograma 4 passos da análise estatística dos dados para o método dos Mínimos Quadrados Ordinários.

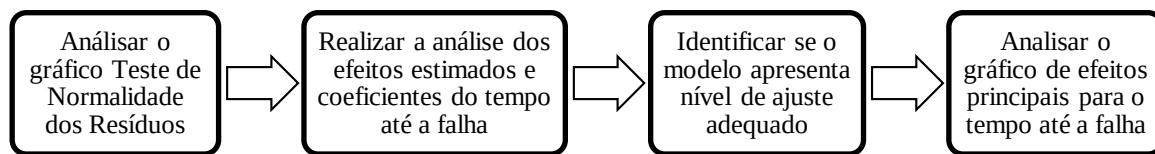


Figura 2 - Fluxograma com passo a passo da análise estatística dos dados para o método dos mínimos quadrados ordinários.

Passo 1: Realizar o teste de normalidade para a ferramenta de corte sobre os resíduos, observando se os coeficientes de Anderson-Darling (AD) possuem P-Valor > 5% de significância. Dado que os resíduos são calculados pela equação (3.1):

$$e_i = y' - y \quad (3.1)$$

Onde: e_i = resíduo; y' = valor previsto do modelo; y = valor experimental observado.

Passo 2: Análise dos efeitos estimados e coeficientes do tempo até a falha, observando seus níveis de significância; Passo 3: Indicar o nível de significância do modelo de regressão através do P-valor, adotando P-valor < 5%. O experimento em estudo apresenta dados com réplicas, com isso, a soma de quadrados do erro pode ser fracionada em duas partes: o erro puro e a falta de ajuste. Para o teste de falta de ajuste com P-valor > 0,05, então, não se pode afirmar que o modelo não justifica de maneira correta a variação da resposta. Indicar os valores de R^2 e R^2 (ajustado) que é, respectivamente, a porcentagem da variação explicada pelo seu modelo e a porcentagem ajustada para o número de termos em seu modelo e o número de observações no estudo; Passo 4: Comparar a influência dos fatores para a sobrevivência da ferramenta.

3.7 Realizar conclusões e recomendações sobre os resultados

Uma vez que os dados foram analisados, o pesquisador 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 para outros. Segundo Montgomery (1991) esta etapa é importante porque demonstra que o estudo desenvolvido é um processo contínuo de aprendizado.

4. Análise de resultados

Este caso foi explorado com base no estudo experimental de Severino (2011), que trata sobre a otimização do torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico utilizando ferramenta de metal duro com geometria especial.

4.1 Declaração do problema de confiabilidade

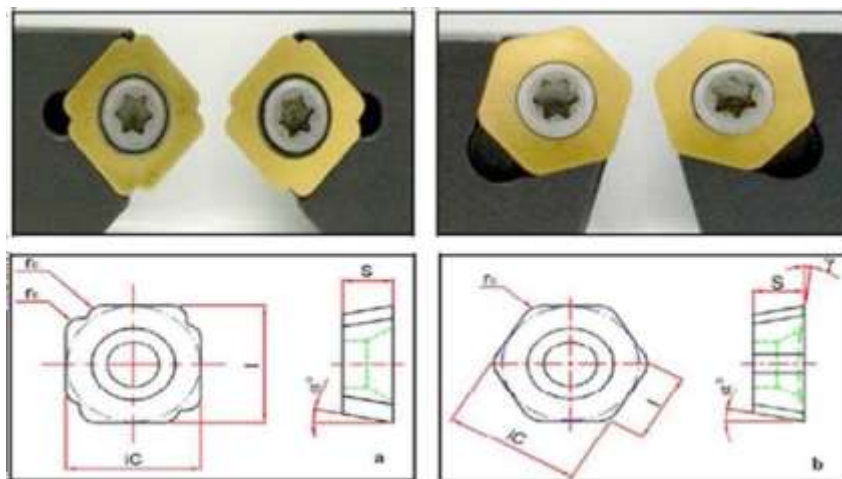
A pesquisa foi realizada buscando avaliar o método mais adequado de usinagem para o processo de torneamento vertical duplo dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico.

4.2 Definição da variável de tempo até a falha ocorrer

A definição da variável de tempo até a falha ocorrer da ferramenta foi influenciada pelo critério do desgaste de flanco máximo $VB_{Max} = 0,3$ mm para a ferramenta externa por ser mais afetada pelo processo de usinagem.

4.3 Definição das variáveis de controle e seus níveis

Foram analisadas duas geometrias distintas, sendo a primeira delas com geometria especial quadrada com duas pontas de corte, Figura (3a) e, a segunda, com geometria de corte hexagonal, Figura (3b).



Fonte: Severino (2011)

Figura 3 - Ferramenta Quadrada (a) e Hexagonal (b)

Nos ensaios houve variação nos parâmetros de usinagem, adotando-se avanço de usinagem (f) entre os níveis 0,32 mm/rot. e 0,38 mm/rot., rotação (rpm) entre os níveis 235 rpm e 275 rpm e tipo de geometria da ferramenta hexagonal e quadrada, como mostra a Tabela 1.

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	NÍVEIS	
			-1	1
Avanço	f	mm/rot	0,32	0,38
Rotação	rpm	rpm	235	275
Geometria da Ferramenta	Geometria	-	Hexagonal	Quadrada

Fonte: Severino (2011)

Tabela 1 - Fatores e Níveis do Fatorial Completo 2^3

4.4 Escolha do arranjo experimental

O experimento foi realizado com três réplicas, utilizando um planejamento fatorial completo 2^3 , adotando-se como parâmetros de corte os fatores de avanço (f), de rotação (rpm) e de geometria da ferramenta. Para o fator resposta, adotou-se o tempo até a falha (T) medida em comprimento total usinado (mm).

4.5 Realização dos experimentos

A tabela 2 apresenta os resultados da vida (T) em milímetros, para as oito condições ensaiadas necessárias à obtenção dos pontos fatoriais, seguidos de suas respectivas três réplicas, totalizando-se 24 experimentos.

N	f	Rpm	Geometria	T(mm)		
				Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
1	0,32	275	Hexagonal	450	300	450
2	0,32	235	Quadrada	2102	2252	2252
3	0,38	275	Hexagonal	901	1051	1051
4	0,32	235	Hexagonal	1351	1201	1502

5	0,32	275	Quadrada	1802	1802	2102
6	0,38	235	Hexagonal	751	751	601
7	0,38	275	Quadrada	1802	1652	1952
8	0,38	235	Quadrada	3153	3003	3003

Fonte: Severino (2011)

Tabela 2 - Planejamento Fatorial para o tempo até a falha (T)

4.6 Análise estatística dos dados

4.6.1 Método de máxima verossimilhança

De acordo com os passos da figura 1, tem-se a análise dos dados pelo método de Máxima Verossimilhança.

A Tabela 3 mostra o resultado dos testes com os modelos de confiabilidade baseados em diversas distribuições de probabilidade.

Distribuição de Probabilidade	Weibull	Exponencial	Normal	Lognormal	Logístico	Loglogístico
Valor de Anderson-Darling	1,24	5,977	1,004	0,778	0,843	0,713

Tabela 3 - Teste modelos de confiabilidade para as distribuições de probabilidade

A Tabela 3 indica que o modelo de melhor ajuste aos dados de Confiabilidade é o Loglogístico, pois apresentou o valor de Anderson-Darling de 0,713, sendo o menor valor entre as demais distribuições.

A tabela 4 mostra a o modelo de regressão encontrado, os coeficientes foram calculados a partir das equações (2.5), (2.6) e (2.7).

Termos	Coeficientes	Erro	Z	p-value
Constante	9,21114	1,09928	8,38	0,00
f	2,22953	2,11526	1,05	0,292
rpm	-0,00902	0,00316	-2,85	0,004
Geometria	-1,01914	0,13882	-7,34	0,00
Quadrada				
Escala	0,17690	0,02984	-	-

Tabela 4 - Modelo de Regressão

A Tabela 5 apresenta a análise estatística dos fatores do modelo de regressão com os valores estimados de confiabilidade para os percentis de 5% e 50%, o TTF foi calculado a partir da equação (2.10).

Percentil (%)	f	rpm	Geometria	T(mm)
5	0,32	235	Quadrada	1455,50
5	0,38	235	Quadrada	1663,83
5	0,32	275	Quadrada	1014,50
5	0,38	275	Quadrada	1159,70
5	0,32	235	Hexagonal	525,297
5	0,38	235	Hexagonal	600,483
5	0,32	275	Hexagonal	366,137
5	0,38	275	Hexagonal	418,543
50	0,32	235	Quadrada	2450,33
50	0,38	235	Quadrada	2801,05
50	0,32	275	Quadrada	1707,90
50	0,38	275	Quadrada	1952,36
50	0,32	235	Hexagonal	884,337
50	0,38	235	Hexagonal	1010,91

50	0,32	275	Hexagonal	616,392
50	0,38	275	Hexagonal	704,617

Tabela 5 - Análise estatística dos fatores do modelo de regressão

Logo, para o percentil 5%, a combinação de fatores que maximizam o TTF da ferramenta é $f = 0,38$; $rpm = 235$ e a geometria quadrada, com $T = 1663,83$ mm.

A Tabela 6 mostra a confiabilidade da ferramenta a partir de uma vida estimado de 1000 mm.

T (mm)	f	rpm	Geometria	Percentil (%)
1000	0,32	235	Quadrada	99,3733
1000	0,38	235	Quadrada	99,7048
1000	0,32	275	Quadrada	95,3726
1000	0,38	275	Quadrada	97,7730
1000	0,32	235	Hexagonal	33,2958
1000	0,38	235	Hexagonal	51,5335
1000	0,32	275	Hexagonal	6,0924
1000	0,38	275	Hexagonal	12,1417

Tabela 6 - Probabilidade de sobrevivência da ferramenta para a vida de 1000 mm

A partir da análise da Tabela 6 é possível estimar que para atingir 1000 mm, a ferramenta deverá ter $f = 0,38$, $rpm = 235$ e Geometria Quadrada com 99,7048% de confiabilidade. Ao passo que, se usar $f = 0,32$, $rpm = 275$ e Geometria Hexagonal a chance de que o TTF seja 1000 mm é de apenas 6,0924%.

A Figura 4 mostra o gráfico do comportamento dos fatores em relação ao percentil de 50%. Para determinar os valores de f , foi fixado o valor médio de $rpm = 255$ e utilizada a geometria quadrada. Para os valores de rpm , foi fixado o valor médio de $f = 0,35$ e a geometria quadrada. Para os da geometria, foi utilizado os valores médios de f e de rpm .

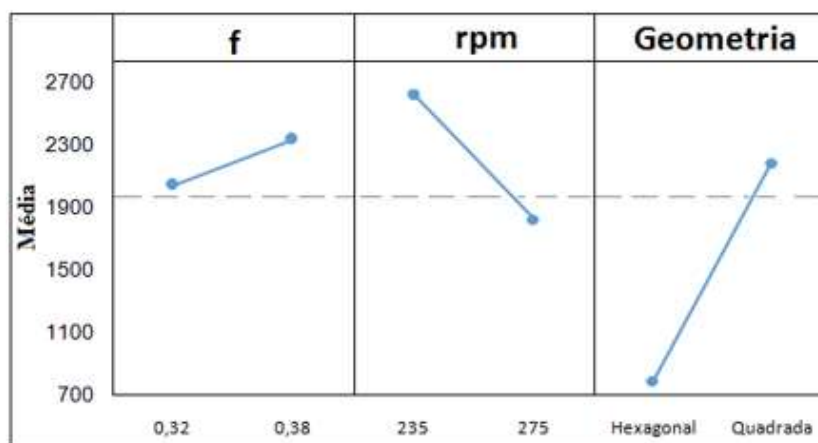


Figura 4 – Gráfico da influência dos fatores para um percentil de 50%

Pode-se perceber para o percentil de 50%, pela Figura 4, que a combinação de fatores é a mesma para a o percentil 5%. Os valores que minimizam o TTF para esse mesmo percentil é $f = 0,32$; $rpm = 275$ e a geometria hexagonal.

4.1.6.2 Método dos Mínimos Quadrados Ordinários

De acordo com os passos da figura 2, tem-se a análise dos dados pelo método dos mínimos quadrados. A figura 5 indica o gráfico do teste de normalidade dos resíduos para TTF, os resíduos foram calculados a partir da equação (3.1).

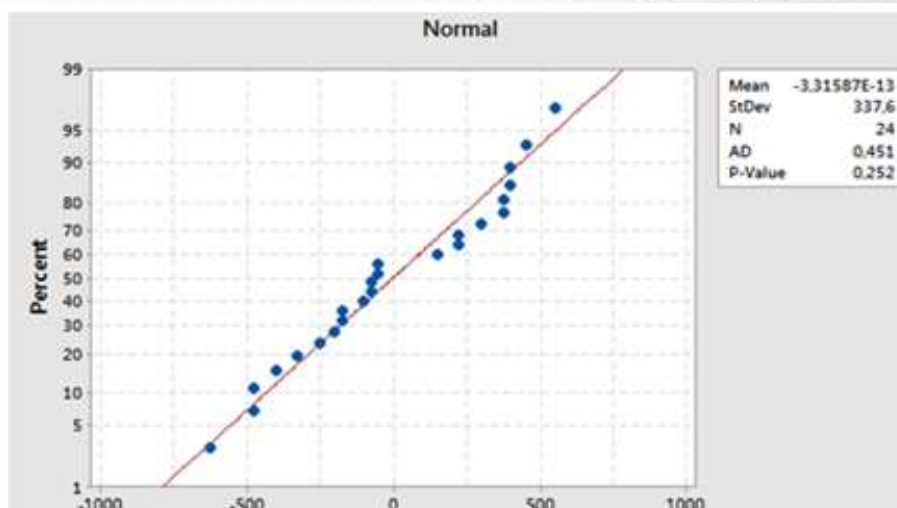


Figura 5 – Gráfico do teste de normalidade dos resíduos

A figura 5 mostra que os resíduos possuem uma distribuição normal aceitável para o tempo até a falha, pois o coeficiente de AD < 1 e P-Valor > 5% de significância. O modelo obteve ainda um ajuste relevante (R^2 (adj) = 81,15%) e a lack-of-fit ou a falta de ajuste obteve nível de significância para P-valor < 5%, indicando que o modelo se ajusta aos dados com precisão. A Tabela 7 mostra a análise dos efeitos estimados e coeficientes do tempo até a falha, os coeficientes foram calculados a partir das equações (2.5) e (2.6).

Termo	Coefficiente	SE Coeficiente	T-Value	P-value	VIF
Constante	3350	1282	2,61	0,017	-
f	2924	2463	1,19	0,249	1,00
rpm	-13,76	3,70	-3,72	0,001	1,00
Geometria	1376	148	9,31	0,000	1,00
Quadrada					

Tabela 7 - Efeitos estimados e coeficientes do tempo até a falha

A Tabela 7 mostra que o fator Geometria é bastante significativo para realizar uma alteração na vida da ferramenta, enquanto que o fator f não possui significância para realizar alterações na vida da ferramenta, pois p-valor > 5%. A figura 6 mostra o gráfico da relação dos efeitos principais para o tempo até a falha.

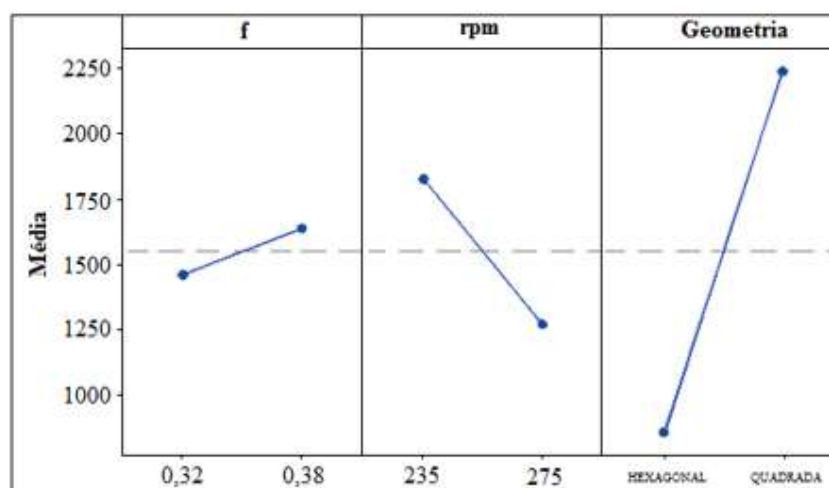


Figura 6 – Gráfico dos efeitos principais para o tempo até a falha

A análise da figura 6 indica que a geometria é o fator com maior significância para a maximização do tempo até a falha. A rotação influencia negativamente no tempo até a falha. Por fim, o avanço terá pouca influência se comparado aos demais fatores, atuará no aumento do tempo até a falha.

4.7 Conclusões e recomendações

A partir das análises feitas com base nos dois métodos estatísticos de confiabilidade em estudo, pode-se observar que o Método de Máxima Verossimilhança apresentou vantagens em relação ao Método dos Mínimos quadrados ordinários:

- a) Pode ser ajustado por distintas distribuições de probabilidade. Quanto menor é o valor de Anderson-Darling (AD), maior será o ajuste no modelo de confiabilidade. Na análise de máxima verossimilhança foi utilizada a distribuição probabilística Loglogístico;
- b) É capaz de estimar confiabilidade para um dado Tempo até a falha ocorrer desejado. O método permite que se encontre o valor probabilístico para a vida da ferramenta que se deseja. Podendo ser aplicado em requisitos exigidos pelo cliente ao fabricante, fornecendo confiabilidade para cada item após horas de testes para cada combinação
- c) Capaz de estimar Tempo até a falha ocorrer desejado para uma dada confiabilidade. Também é possível estimar valores de tempo até a falha para valores de confiabilidade desejados para cada combinação de fatores.

Com relação ao Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, o de Máxima Verossimilhança apresentou limitações:

- a) Não possui análise de testes de adequação de modelo (R^2), que permite mostrar o ajuste do modelo pela porcentagem de variação de seus fatores, em relação ao número de termos em seu modelo e o número de observações no estudo;
- b) O teste *lack-of-fit* ou a falta de ajuste que serve para indicar se o modelo se ajusta aos dados com precisão, mostrando o funcionamento do nível de significância para $P\text{-valor} < 5\%$;

Quanto ao nível de significância, para o método de Máxima Verossimilhança, o fator Geometria quadrada é o mais significativo para realizar uma alteração na vida da ferramenta com $P\text{-valor} = 0,000 < 5\%$, seguido por rpm com $P\text{-valor} = 0,004 > 5\%$, enquanto que o fator f não possui significância para realizar alterações na vida da ferramenta, pois $P\text{-valor} = 0,0292 > 5\%$. O mesmo acontece para o método dos MQO, Geometria Quadrada sendo de maior significância, depois rpm e f, com $P\text{-valor}$ 0,000, 0,001 e 0,249, respectivamente.

O fator mais importante, foi o da Geometria que causa bastante diferença em relação ao cálculo de TTF sendo que a escolha da geometria quadrada maximiza os valores de TTF e a escolha de uma ferramenta com geometria hexagonal minimiza tempo até a falha ocorrer.

Após as análises do processo, a combinação de fatores que maximizam o TTF da ferramenta são: para o avanço (f) = 0,38, para a rotação (rpm) = 235 e a geometria quadrada, os dois métodos chegaram a mesma conclusão.

Como recomendações para trabalhos futuros outros aspectos poderiam ser avaliados, como: analisar as interações entre a geometria e os parâmetros de corte e observar quais interações possuem $P\text{-valor} > 5\%$ para excluí-las e realizar nova análise, realizar análise de variância (ANOVA), utilizar outros parâmetros e testar novas ferramentas.

5. Conclusões

O presente trabalho buscou comparar os métodos estatísticos de Máxima Verossimilhança e de Mínimos Quadrados Ordinários e identificar o mais adequado para análise do processo de usinagem utilizando ferramenta de corte.

Através das análises estatísticas feitas no capítulo anterior foi possível destacar as vantagens do método de Máxima Verossimilhança que possui métodos de análises de grande relevância para se prever condições extremas de avaliação de tempo até a falha, podendo estimar valores de confiabilidade para determinados TTF, tais valores foram observados na Tabela 6 onde foi utilizado o valor de 1000 mm para calcular as confiabilidades, bem como foi possível estimar também valores de TTF para as confiabilidades que se deseja, como observado na Tabela 5 onde foi utilizado os percentis de 5% e 50%. Através do teste de AD foi utilizado um modelo de regressão de melhor ajuste aos dados de confiabilidade, a Tabela 4 mostra que o menor valor foi o da distribuição Loglogístico com 0,713.

Com relação aos fatores do processo que mais impactam e as condições de usinagem que maximizam a vida da ferramenta de corte usando o método Máxima Verossimilhança, a figura 4 mostra que a Geometria é o fator que causa maior impacto no processo e a combinação dos fatores $f = 0,32$; $\text{rpm} = 235$ e a Geometria quadrada irão influenciar maximizando a vida da ferramenta de corte. Já para o método de Mínimos Quadrados Ordinários, a figura 6 mostra basicamente o mesmo resultado, apontando a Geometria como fator de maior impacto, e a combinação $f = 0,32$; $\text{rpm} = 235$ e a Geometria quadrada como principal condição de usinagem para maximizar a vida de ferramenta de corte.

Apesar das limitações relacionadas ao método dos Mínimos Quadrados Ordinários, pode-se concluir que o método de Máxima Verossimilhança fornece informações bem mais fundamentais para a análise da vida de Ferramenta de corte, com uma adequação aos dados estatísticos bastante significativa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. C. *Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) no Torneamento do Aço-de-Corte-Fácil ABNT 12L14*. Itajubá, 2005, 152 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. (1993). *A systematic approach to planning for a designed industrial experiment*, Technometrics, v. 35, n.1, p. 1-12.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, 6 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008. 262 p.

FIGUEIREDO FILHO, D.; NUNES, F., DA ROCHA, E. C., SANTOS, M. L., BATISTA, M., & SILVA JÚNIOR, J. A. *O que Fazer e o que Não Fazer com a Regressão: pressupostos e aplicações do modelo linear de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO)*. Revista Política Hoje, Vol. 20, n. 1, 2011.

FOGLIATTO, S. F. e RIBEIRO, D. L. J. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2009.

GODIM, R. M. *Aplicação da distribuição de Weibull no monitoramento da operação de torneamento*. Uberlândia, 2008. 103 p. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia.

MICHEL, E. P. *Determinação da Curva de Vida de Ferramentas em Usinagem*. SIEF – Semana Internacional das Engenharias da FAHOR, 2011. 10 p.

MONTGOMERY, D.C. *Diseño y análisis de experimentos*. Trad. por Jaime Delgado Saldivar. Mexico Iberoamérica, 1991.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. [s.l: s.n.]. v. 2, 2012.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. *Introduction to Linear Regression*. v. 1, 2015.

NBR 5462, *Confiabilidade e Manutenibilidade*. Rio de Janeiro, 1994. p. 37

SEVERINO, G. *Otimização do torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico utilizando ferramenta de metal duro com geometria especial*. Itajubá, 2011. 128 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção