



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**KÁSSIO YVES DE AZEVEDO ALBUQUERQUE**

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

**JOÃO PESSOA**

**2018**

KÁSSIO YVES DE AZEVEDO ALBUQUERQUE

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção da UFPB como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi

JOÃO PESSOA

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Kassio Yves do Azevedo Albuquerque

Título do trabalho: Estudo da vida de ferramentas de corte em processos de usinagem através de modelos de confiabilidade

Trabalho de Conclusão do Curso defendido e aprovado em 08/05/2018 pela banca examinadora:

Orientador(a) - Profa. Dr. Rogério Santana Peruchi

Examinador(a) interno - Prof. Dr. Paulo Botelho Junior

Examinador(a) interno - Profa. Dr. Ligia de Oliveira Franzosi Bessa

A158e Albuquerque, Kássio Yves de Azevedo

Estudo da vida de ferramentas de corte em processos de usinagem através de modelos de confiabilidade. – Kássio Yves de Azevedo Albuquerque, João Pessoa, 2018.

72f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia de Produção)  
Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Máxima Verossimilhança 2. Mínimos Quadrados Ordinários da Ferramenta. I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 658.5 (043)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente ao nosso Senhor, Jesus Cristo.

Aos meus pais Francisco de Assis Cartaxo e Francisca Neta por sempre me guiarem pelo melhor caminho, nunca duvidarem da minha capacidade de ir sempre mais longe e me apoiarem incondicionalmente.

Aos meus irmãos Kaique e Kaio pelo apoio e companheirismo.

À minha namorada Morgana Meira pela paciência e por me acompanhar durante todo o curso.

Aos meus amigos Leonardo, André Higo, Nelson, Itallo, Gmael, Pedro e Wéber, além de familiares, dentre outros que de alguma forma me ajudaram durante o curso.

Ao professor Rogério Peruchi por me guiar no decorrer deste trabalho

## 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. No presente trabalho, 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

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introdução</b> .....  | <b>9</b>  |
| 1.1 Justificativa .....   | 10        |
| 1.2 Objetivo geral .....  | 10        |
| 1.3 Objetivos específicos .....   | 10        |
| <b>2. Fundamentação teórica</b> .....   | <b>11</b> |
| 2.1 Vida de ferramentas de corte em processos de usinagem .....                     | 11        |
| 2.2 Análise de regressão com dados de confiabilidade de processos .....             | 11        |
| 2.2.1 Método de mínimos quadrados ordinários .....                                  | 12        |
| 2.2.2 Método de Máxima Verossimilhança para estimar modelos de confiabilidade ..... | 13        |
| <b>3. Método proposto de pesquisa</b> .....   | <b>15</b> |
| 3.1 Classificação da pesquisa .....   | 15        |
| 3.2 Método proposto .....   | 15        |
| 3.2.1 Declaração do problema de confiabilidade .....                                | 15        |
| 3.2.2 Definição da variável de tempo até a falha ocorrer .....                      | 15        |
| 3.2.3 Definição das variáveis de controle e seus níveis .....                       | 16        |
| 3.2.4 Escolha do arranjo experimental .....   | 16        |
| 3.2.5 Realização dos experimentos .....   | 16        |
| 3.2.6 Análise estatística dos dados .....   | 17        |
| 3.2.7 Conclusões e recomendações .....  | 19        |
| <b>4. Análise de Resultados</b> .....   | <b>19</b> |
| 4.1 Declaração do problema de confiabilidade .....                                  | 19        |
| 4.1.1 Declaração do problema de confiabilidade .....                                | 20        |
| 4.1.2 Definição da variável de tempo até a falha ocorrer .....                      | 20        |
| 4.1.3 Definição das variáveis de controle e seus níveis .....                       | 21        |
| 4.1.4 Escolha do arranjo experimental .....   | 21        |
| 4.1.5 Realização dos experimentos .....   | 22        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.1.6 Análise estatística dos dados .....             | 22        |
| 4.1.6.1 Método de Máxima Verossimilhança.....         | 22        |
| 4.1.6.2 Método dos Mínimos Quadrados Ordinários ..... | 25        |
| 4.1.7 Conclusões e recomendações .....                | 27        |
| <b>5. Conclusões .....</b>                            | <b>29</b> |
| <b>Referências BIBLIOGRÁFICAS .....</b>               | <b>30</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, o mercado vem optando por valorizar mais seus processos de usinagem de olho em fatores importantes como o tempo, à qualidade e a redução de custos (MARCONDES, 2001). Segundo Michels (2011) selecionar corretamente o material que será usinado é tão importante quanto escolher as ferramentas, o fluido de corte, o equipamento e as condições de usinagem, pois proporcionam vantagens econômicas de grande relevância, podendo influenciar positivamente na produtividade. Os custos e tempo da produção serão reduzidos no processamento, a partir da definição correta dos parâmetros. Assim, Correa (2013) afirma que a vida da ferramenta se torna relevante nos custos finais do processo de fabricação de produtos através da usinagem, para isso é importante que se tenha um maior tempo de vida da ferramenta de corte.

Vários tipos de modelos estatísticos são usados na análise de dados de vida útil e na modelagem de processos de envelhecimento ou falha. Entre os modelos univariados, algumas distribuições ocupam uma posição central devido à sua utilidade demonstrada nas mais variadas situações. Dentre as distribuições têm-se: exponenciais, *Weibull*, log-normal, *log-logistic* e gama (LAWLESS, 2003). É importante tomar decisões sensatas ao estabelecer condições de usinagem para estimar o fim de vida de ferramenta através de algum modelo matemático e, assim, utilizar equações já existentes para chegar a condições de usinagem iniciais (DINIZ, 1989).

Com isso, para Figueiredo Filho et al. (2011) um dos métodos mais utilizados para análise de modelos de regressão linear é o método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). A análise de regressão usa o método dos mínimos quadrados para determinar 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 procedimentos experimentais comuns, o foco maior é na média ou resposta média. Já nos testes de vida, o foco é aplicado em percentis de probabilidade de ocorrência de falha. Para estudos estatísticos percentis mínimos de 5% e 10% são geralmente mais utilizados (RIGDON et al., 2012).

Os estimadores de Máxima Verossimilhança (MV) variam de acordo com o tamanho da amostra “n” e tem mínima variância em relação aos demais estimadores imparciais, possuem

também mínima diferença do valor do parâmetro verdadeiro à medida que “n” cresce, e eles contém toda a "informação" na amostra original de tamanho “n”. Já Os estimadores dos mínimos quadrados exigem apenas pressupostos sobre o valor esperado, variâncias e covariâncias entre os erros aleatórios. 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).

### *1.1 Justificativa*

Calcular a vida da ferramenta com precisão terá grande influência nos custos finais da produção, evitando a perda do material utilizado na usinagem por poder prever quando a ferramenta irá falhar. Além disso, as empresas poderão 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.

### *1.2 Objetivo geral*

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.

### *1.3 Objetivos específicos*

- Destacar as vantagens do método de Máxima Verossimilhança em relação ao de Mínimos Quadrados;
- Discutir as limitações do método de Máxima Verossimilhança.
- Identificar os fatores do processo que mais impactam a vida da ferramenta de corte usando os métodos MQO e MV;
- Determinar as condições de usinagem que maximizam a vida da ferramenta de corte usando os métodos MQO e MV.

O objetivo desta pesquisa é destacar as vantagens da modelagem da vida de ferramentas de corte, através de modelos de confiabilidade, em relação ao método tradicional de mínimos quadrados ordinários.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O referencial teórico foi subdividido em: Vida de ferramentas de corte em processos de usinagem; Análise de regressão com dados de confiabilidade de processos; Método de mínimos quadrados ordinários; Método de Máxima Verossimilhança para estimar modelos de confiabilidade. Nos tópicos posteriores estão detalhados cada um desses itens.

### 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).

Assim, 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.

Portanto, para Teles (2007) é importante a escolha correta do tipo de material para a ferramenta, pois resultará numa análise cautelosa de vários fatores que atuam em conjunto, resultando num mecanismo complexo e difícil de ser quantificado.

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.

Portanto, segundo Severino (2011), 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. Em geral, suponha que exista uma única variável ou resposta dependente que dependa em  $k$  variáveis independentes ou regressoras, por exemplo,  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . O relacionamento entre essas variáveis caracteriza-se por um modelo matemático chamado modelo de regressão. O modelo de regressão é adequado a um conjunto

de dados de amostra. Os métodos de regressão também são muito úteis em experimentos projetados em que há a presença de dados.

### 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. Suponha que  $n > k$  as observações sobre a variável de resposta são, com  $y_1, y_2, \dots, y_n$ . Junto com cada resposta observada  $y_i$ , teremos uma observação em cada variável de regressão e deixe  $x_{ij}$  denotar a  $i$ -ésima observação ou nível de variável  $x_j$ . Assumimos que o termo de erro  $\epsilon$  no modelo tem  $E(\epsilon) = 0$  e  $V(\epsilon) = \sigma^2$  e que o  $\{\epsilon\}$  são variáveis aleatórias não correlacionadas. Pode-se escrever a equação do modelo em termos das observações como:

$$\begin{aligned} y_i &= \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \epsilon_i \\ &= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \epsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.1)$$

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

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad (2.2)$$

Para encontrarmos estimativas para os parâmetros, vamos minimizar (2.2) em relação aos parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_j$ . Para isto, derivamos em relação aos parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_j$ . Assim,

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(\beta_0, \beta_j)}{\partial \beta_0} &= -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right) \\ \frac{\partial L(\beta_0, \beta_j)}{\partial \beta_j} &= -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right) x_{ij} \end{aligned}$$

Substituindo  $\beta_0$  e  $\beta_j$  por  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_j$ , para indicar valores particulares dos parâmetros que minimizam  $L$ , e igualando as derivadas parciais a zero, obtemos, finalmente, as seguintes equações para  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_j$ :

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

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

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.

Os valores de  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_1$  assim determinados são chamados Estimadores de Mínimos Quadrados (EMQ).

O modelo de regressão linear simples ajustado é então:

$$\bar{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \bar{x}$$

Sendo que  $\bar{Y}$  um estimador pontual da média da variável  $Y$  para um valor de  $x$ , ou seja,

$$E(Y | x_1) = \beta_0 + \beta_1 \bar{x}$$

### 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  $\varepsilon$ . Os mínimos quadrados produzem melhores estimadores lineares de  $\beta_0$  e  $\beta_1$ . Outros procedimentos estatísticos, como testes de hipóteses e construção de intervalos de confiança, assumem que os erros seguem uma distribuição normal. Conhecendo a forma da distribuição dos erros, pode-se utilizar como parâmetro de estimativa, o método de máxima verossimilhança (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2015).

Considere os dados  $(y_i, x_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Assume-se que os erros na regressão modelo são NID  $(0, \sigma^2)$ , então as observações  $y_i$  nesta amostra são variáveis aleatórias normalmente e independentemente distribuídas com  $\beta_0 + \beta_1 x_i$  e variância  $\sigma^2$ . A função de verossimilhança surge a partir da distribuição conjunta das observações. Se considerarmos esta distribuição conjunta com as observações dadas e os parâmetros  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\sigma^2$  constantes desconhecidas, temos a função de verossimilhança. Para o modelo de regressão linear simples com erros normais, a função de verossimilhança é:

$$\begin{aligned} L(y, x, \beta_0, \beta_1, \sigma^2) &= \prod_{i=1}^n (2\pi\sigma^2)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2\right] \\ &= (2\pi\sigma^2)^{-\frac{n}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2\right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Os estimadores de máxima verossimilhança são os valores dos parâmetros, digamos  $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$  e  $\hat{\sigma}^2$ , que maximize  $L$  ou, de forma equivalente, em  $\ln L$ . Assim,

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

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

e os estimadores de máxima verossimilhança  $\bar{\beta}_0$ ,  $\bar{\beta}_1$  e  $\bar{\sigma}^2$  devem satisfazer:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_0} = \left(\frac{1}{\sigma^2}\right) \sum (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_1} = \left(\frac{1}{\sigma^2}\right) \sum (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) x_i = 0$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma^2} = -\frac{n}{\sigma^2} + \frac{n}{\sigma^4} \sum (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 = 0$$

A solução para a Eq. fornece os estimadores de máxima verossimilhança:

$$\bar{\beta}_0 = \bar{y} - \bar{\beta}_1 \bar{x} \quad (2.6)$$

$$\bar{\beta}_1 = \frac{\sum y_i (x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.7)$$

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{\beta}_0 - \bar{\beta}_1 x_i)^2}{n} \quad (2.8)$$

Observa-se que os estimadores de máxima verossimilhança da intercepção e inclinação,  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são idênticos aos estimadores de mínimos quadrados desses parâmetros. Além disso, é um estimador tendencioso de  $\sigma^2$ . O estimador tendencioso está relacionado ao estimador imparcial por  $\bar{\sigma}^2 = \left[ \frac{(n-1)}{n} \right] \sigma^2$ . O viés é pequeno se n for moderadamente grande. Geralmente

o estimador imparcial é usado.

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

$$Y = \exp\left(\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \epsilon_i\right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.9)$$

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

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \epsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.10)$$

Analogamente, Teremos como resposta os estimadores de máxima verossimilhança das equações (2.6), (2.7) e (2.8) citados anteriormente.

Para calcular o tempo até a falha ocorrer (TTF), temos que:

$$TTF = \exp[\ln(Y)] \quad (2.11)$$

### 3. MÉTODO PROPOSTO DE PESQUISA

No método proposto de pesquisa é abordada a classificação da pesquisa.

#### 3.1 *Classificação da pesquisa*

Para Gil (2002) as pesquisas experimentais são bastante utilizadas para testar hipóteses que estabelecem relações de causa e efeito entre as variáveis. É valiosa por viabilizar várias alternativas de monitoramento, os testes promovem maior garantia do que qualquer outro delineamento de que a variável independente causa efeitos na variável dependente. A pesquisa experimental consiste basicamente em designar um objeto de estudo, elencar as variáveis capazes de atuar e limitar as formas de controle e de análise dos efeitos que a variável produz no objeto. Trata-se, portanto, de uma pesquisa em que há a participação direta do pesquisador, sendo o delineamento mais respeitado no âmbito científico.

#### 3.2 *Método proposto*

O método proposta está subdividido nos tópicos posteriores que são: declaração do problema de confiabilidade, definição da variável de tempo até a falha ocorrer, definição das variáveis de controle e seus níveis, escolha do arranjo experimental, realização dos experimentos, análise estatística dos dados, conclusões e recomendações.

##### 3.2.1 *Declaração do 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. Também não se devem esquecer os objetivos gerais do experimento. Existem várias razões diferentes para praticar atividades experimentais e cada tipo de conhecimento irá gerar sua própria lista de questões específicas que precisam ser abordadas.

##### 3.2.2 *Definição da variável de 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. Na maioria das vezes, a média ou desvio padrão (ou ambos) de uma característica medida será a variável de resposta (MONTGOMERY, 2012).

Conforme NBR 5462 “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” (ABNT, 1994).

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. Existem três tipos de dados censurados, a censura à direita que é o tipo mais frequente de censura e é aquela onde se conhece apenas seu limite inferior para um conjunto de dados para o tempo-até-falha, a censura à esquerda é menos frequente em relação ao anterior e a censura por intervalo, onde os dados de tempo-até-falha são agrupados em intervalos. Esta última censura ocorre, normalmente, em experimentos onde não se tem o momento da falha com precisão, já que o esquema de coleta dos dados não o permite.

### *3.2.3 Definição das 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.

### *3.2.4 Escolha do arranjo experimental*

Montgomery (2012) fala que 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. Avalia também a utilização de softwares que trabalham com o uso de dados estatísticos e geram gráficos, tabelas e outros tipos de resultados que irão facilitar a análise do pesquisador e auxiliar no desenvolvimento dos resultados para o projeto.

### *3.2.5 Realização dos 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,

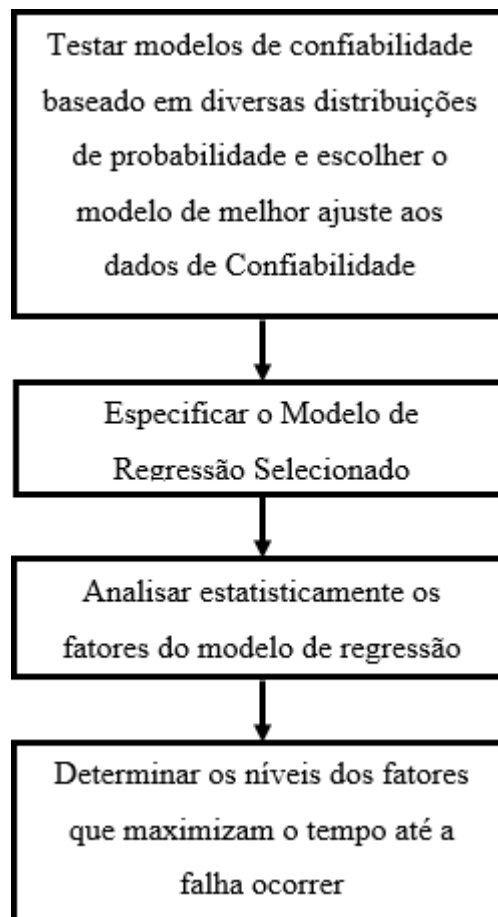
erros nessa fase prejudicam a análise do experimento, pois aumentam as chances do aparecimento de falhas (MONTGOMERY, 2012).

Conforme Coleman e Montgomery (1993) é importante realizar testes pré-projeto. Essas fases geram informações importantes que vão auxiliar na prevenção de acontecimentos que irão comprometer a veracidade dos dados coletados e influenciar bastante na análise final do experimento.

### 3.2.6 Análise estatística dos dados

O Fluxograma 1 apresenta os 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



Fonte - Elaborado pelo autor

**Passo 1:** Realiza-se o teste com os modelos de distribuição visando encontrar qual deles melhor se ajusta aos dados de confiabilidade e escolher a distribuição 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.

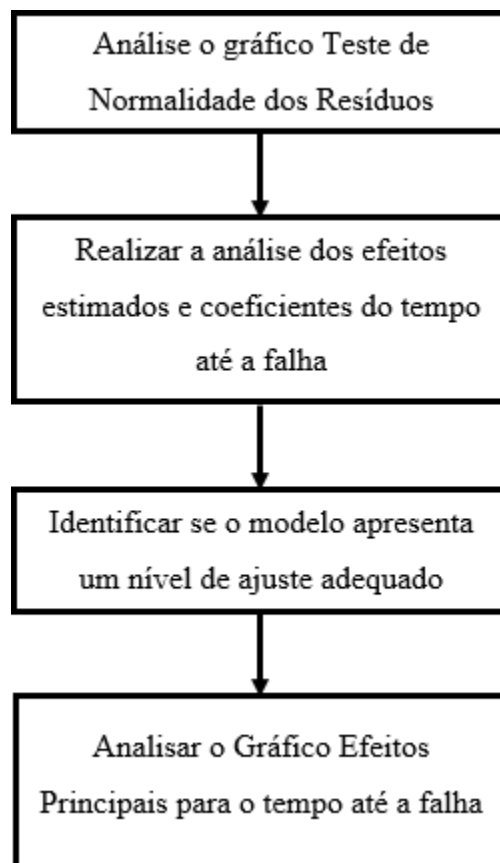
**Passo 2:** Indicar os coeficientes dos fatores estudados, calculados a partir das equações (2.6), (2.7) e (2.8);

**Passo 3:** Verificar no modelo quais fatores têm maior influência na resposta do problema e a Influência dos fatores para um percentil de 50% de falha acumulada, bem como para 5% 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%.

O Fluxograma 2 representa os 4 passos da análise estatística dos dados para o método dos Mínimos Quadrados Ordinários.

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



Fonte - Elaborado pelo autor

**Passo 1:** Realizar o teste de normalidade para a ferramenta de corte sobre os resíduos, observando se os coeficientes de Anderson-Darling (AD) possuem  $P\text{-Value} > 5\%$  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; e

$y$  = valor experimental observado

**Passo 2:** Análise dos efeitos estimados e coeficientes do tempo até a falha, observando seus níveis de significância a vida da ferramenta;

**Passo 3:** Indicar o nível de significância do modelo de regressão através do *P-value*, adotando  $P\text{-value} < 5\%$ . 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  $P\text{-value} > 0,05$ , 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.

### 3.2.7 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 para outros. As corridas de acompanhamento e o teste de confirmação também devem ser realizados para validar as conclusões do experimento (MONTGOMERY, 2012).

Segundo Montgomery (1991) esta etapa é importante porque demonstra que o estudo desenvolvido é um processo contínuo de aprendizado.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nos próximos tópicos serão abordadas as análises do experimento com base no método proposto.

### 4.1 Declaração do problema de confiabilidade.

Este caso foi explorado com base no estudo experimental de Geremias (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.

#### 4.1.1 Declaração do problema de confiabilidade

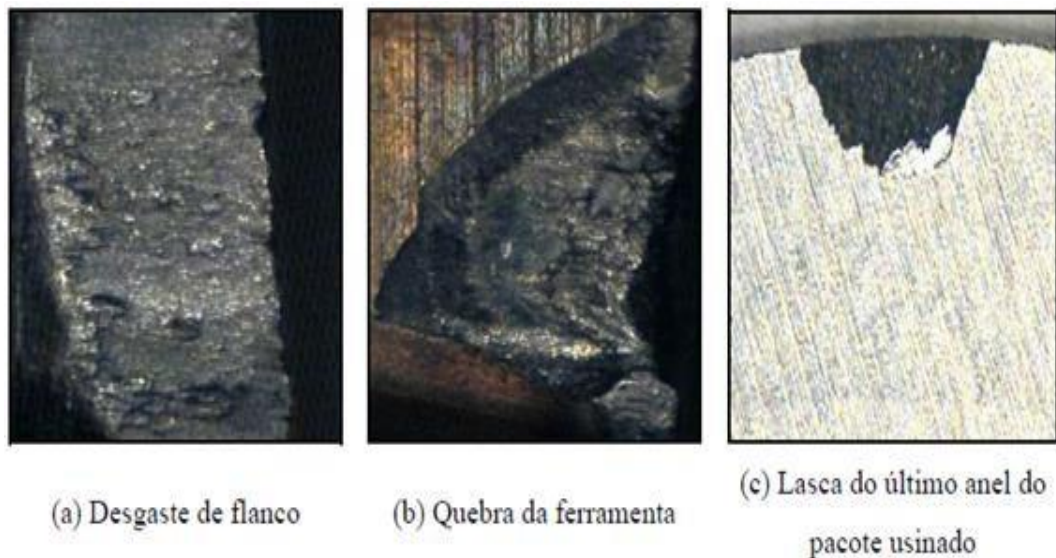
A pesquisa foi realizada buscando avaliar o método mais adequado de usinagem para o processo de torneamento vertical duplo dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico.

O principal objetivo foi a maximização do tempo até a falha de corte a partir da aplicação da ferramenta com a geometria mais adequada para a usinagem dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, mostrando como resultado um modelo de regressão para o tempo até a falha.

#### 4.1.2 Definição da variável de tempo até a falha ocorrer

A definição da variável de tempo até a falha ocorrer da ferramenta foram influenciados pelo critério do desgaste de flanco máximo  $VB_{Max} = 0,3$  mm para a ferramenta externa por ser mais afetada pelo processo de usinagem, como mostra a Figura 3 (a), ou pela quebra da ferramenta, Figura 3 (b), ou ainda, pela lasca do anel de pistão, conforme Figura 3 (c). Sendo que a lasca no último anel do pistão foi escolhido como critério para a definição de tempo até a falha da ferramenta.

Figura 3 - Critérios de Fim Vida da Ferramenta de Corte



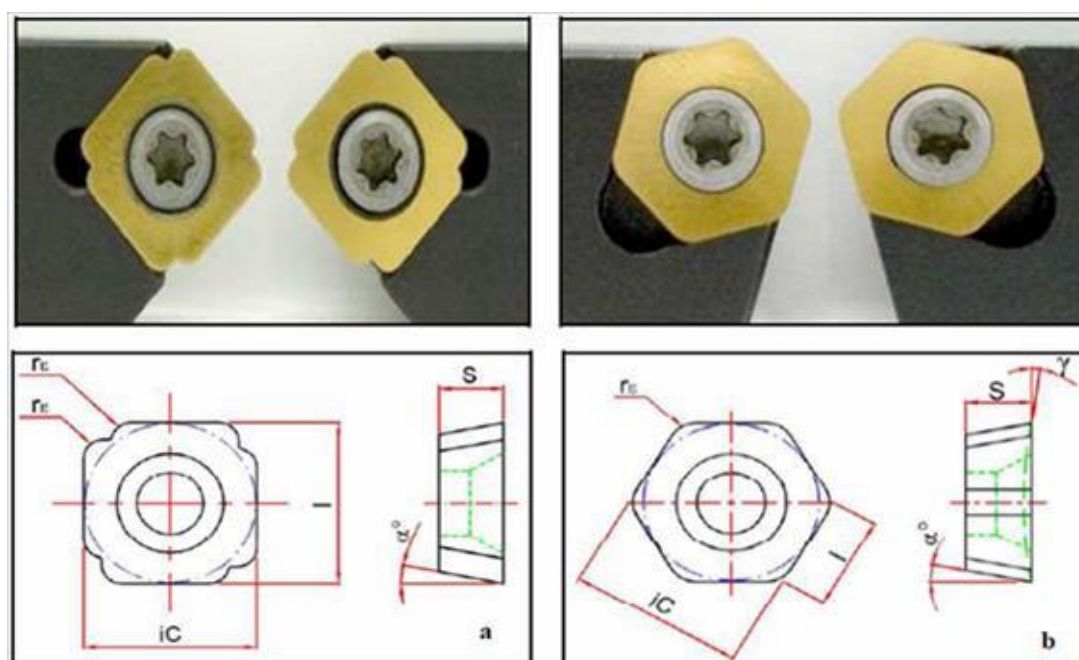
Fonte - (SEVERINO, 2011)

As alterações ocorrem de forma conjunta para as ferramentas de corte, mas a ferramenta externa se desgasta com maior rapidez, pois à mesma descreve um maior perímetro de corte.

#### 4.1.3 Definição das variáveis de controle e seus níveis

No trabalho, foram analisadas duas geometrias distintas, sendo a primeira delas com geometria especial quadrada com duas pontas de corte, Figura (4a) e, a segunda, com geometria de corte hexagonal, Figura (4b).

Figura 4 - Ferramenta Quadrada (a) e Hexagonal (b)



Fonte - (SEVERINO, 2011)

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.

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

| 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)

#### 4.1.4 Escolha do arranjo experimental

No experimento foi utilizado 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

(Gt). Para o fator resposta, adotou-se o tempo até a falha (T) medida em comprimento total usinado (mm).

O experimento foi realizado com três réplicas. O estudo estatístico do arranjo fatorial indicou a presença de questões relevantes da adequação das ferramentas desenvolvidas ao processo, tais como: (a) a determinação da geometria que proporciona a maior vida; (b) a significância dos parâmetros de corte e seus níveis mais adequados para o processo e, os parâmetros de corte.

#### 4.1.5 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.

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

| 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)

#### 4.1.6 Análise estatística dos dados

A análise estatística é realizada com base nos métodos de Máxima Verossimilhança e de Mínimos Quadrados Ordinários.

##### 4.1.6.1 Método de Máxima Verossimilhança

De acordo com os passos do fluxograma 1, temos 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.

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

| <b>DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE</b> | <b>VALOR DE ANDERSON-DARLING</b> |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Weibull</b>                       | 1,24                             |
| <b>Exponencial</b>                   | 5,977                            |
| <b>Normal</b>                        | 1,004                            |
| <b>Lognormal</b>                     | 0,778                            |
| <b>Logistic</b>                      | 0,843                            |
| <b>Loglogístico</b>                  | 0,713                            |

Fonte - Elaborado pelo autor

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 (2.6), (2.7) e (2.8).

Tabela 4 - Modelo de Regressão

| <b>Termos</b>             | <b>Coeficientes</b> | <b>Erro</b> | <b>Z</b> | <b>P-Value</b> |
|---------------------------|---------------------|-------------|----------|----------------|
| <b>Constante</b>          | 9,21114             | 1,09928     | 8,38     | 0,00           |
| <b>f</b>                  | 2,22953             | 2,11526     | 1,05     | 0,292          |
| <b>rpm</b>                | -0,0090239          | 0,0031688   | -2,85    | 0,004          |
| <b>Geometria Quadrada</b> | -1,01914            | 0,138824    | -7,34    | 0,00           |
| <b>Escala</b>             | 0,176901            | 0,0298469   | -        | -              |

Fonte - Elaborado pelo autor

A Tabela 5 mostra 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 (2.11).

Tabela 5 - Análise estatística dos fatores do modelo de regressão

| <b>Percentil (%)</b> | <b>f</b> | <b>rpm</b> | <b>Geometria</b> | <b>T(mm)</b> |
|----------------------|----------|------------|------------------|--------------|
| 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      |

Fonte - Elaborado pelo autor

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  $T = 2801,05$  mm.

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

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

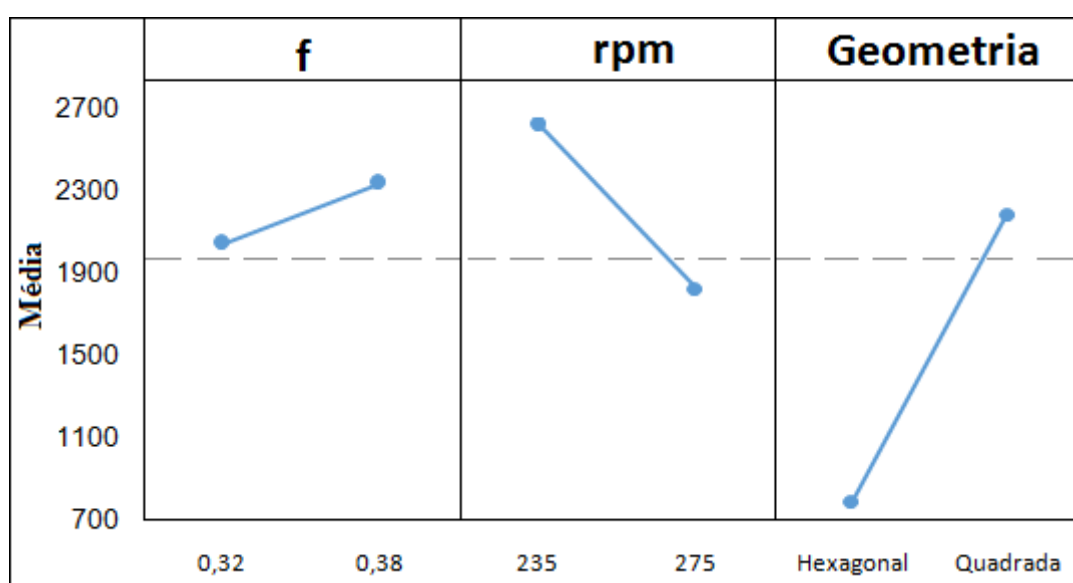
| <b>T (min)</b> | <b>f</b> | <b>rpm</b> | <b>Geometria</b> | <b>Percentil (%)</b> |
|----------------|----------|------------|------------------|----------------------|
| 1000           | 0,32     | 235        | Quadrada         | 99,3733              |
| 1000           | 0,38     | 235        | Quadrada         | 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              |

Fonte - Elaborado pelo autor

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 5 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 5 – Gráfico da influência dos fatores para um percentil de 50%



Fonte - Elaborado pelo autor

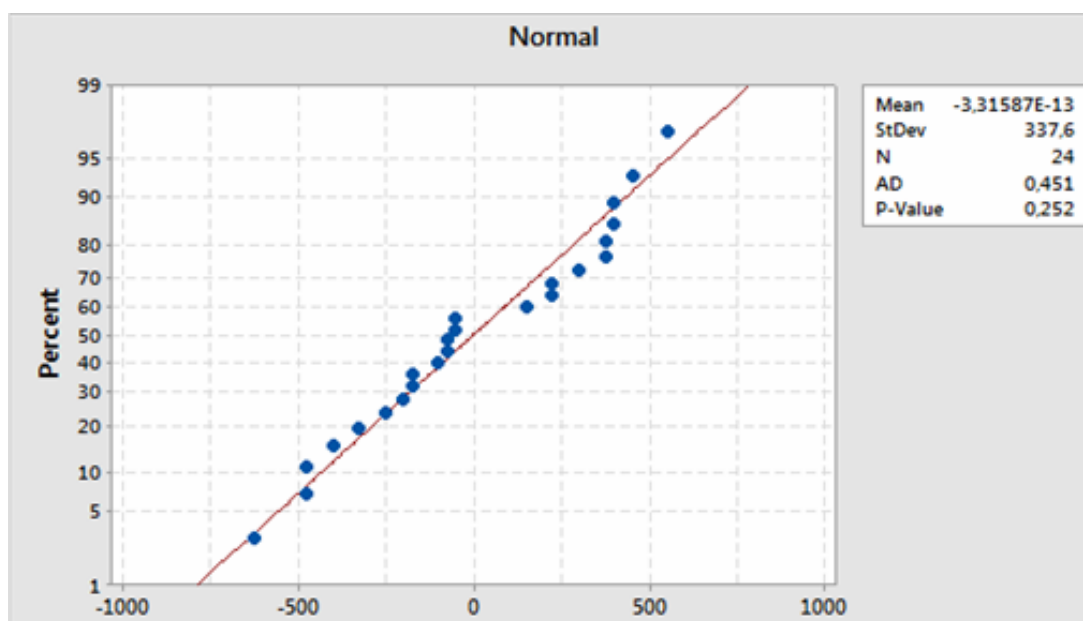
Pode-se perceber para o percentil de 50%, pela figura 5, que a combinação de fatores é a mesma para a o percentil 5%. Os valores que minimizam o TTF para esse mesmo percentil é  $f = 0,32$ ;  $rpm = 275$  e a geometria hexagonal.

#### 4.1.6.2 Método dos Mínimos Quadrados Ordinários

De acordo com os passos do fluxograma 2, temos a análise dos dados pelo método dos mínimos quadrados.

A figura 6 indica o gráfico do teste de normalidade dos resíduos para TTF, os resíduos foram calculados a partir da equação (3.1).

Figura 6 – Gráfico do teste de normalidade dos resíduos



Fonte - Elaborado pelo autor

O modelo obteve ainda um ajuste relevante ( $R^2$  (ajustado) = 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 figura 6 mostra que os resíduos possuem uma distribuição normal aceitável para o tempo até a falha, pois o coeficiente de AD  $< 1$  e  $P$ -Value  $> 5\%$  de significância.

A Tabela 7 mostra a análise dos efeitos estimados e coeficientes do tempo até a falha, os coeficientes foram calculados a partir das equações (2.7) e (2.8).

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

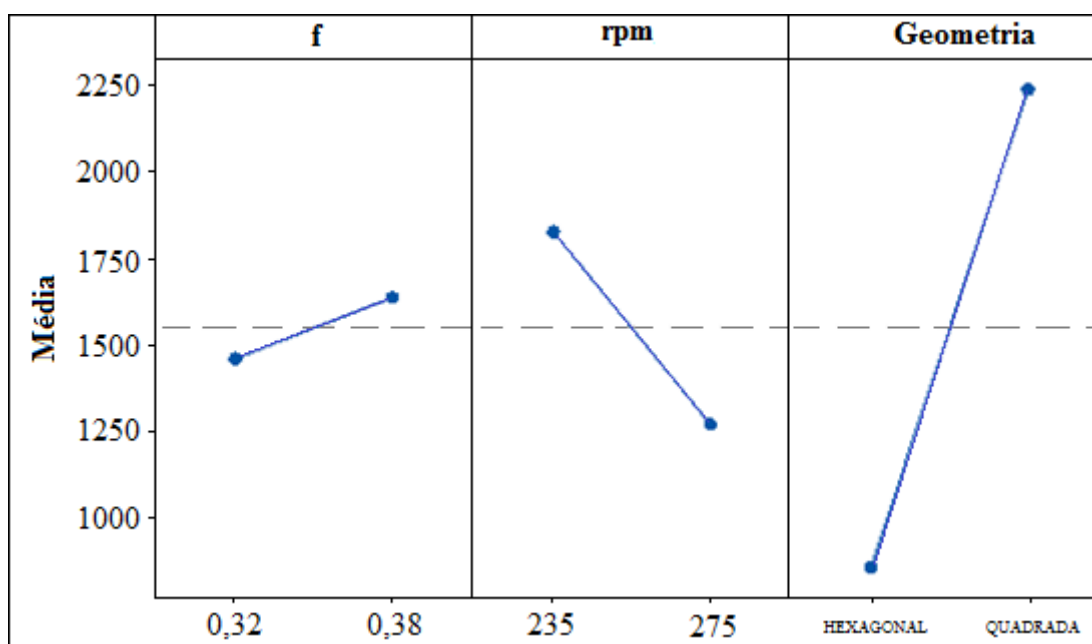
| Termo              | Coefficiente | SE Coeficiente | T-Value | P-Value | VIF  |
|--------------------|--------------|----------------|---------|---------|------|
| Constante          | 3350         | 1282           | 2,61    | 0,017   |      |
| f                  | 2924         | 2463           |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

Fonte - Elaborado pelo autor

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  $p$ -value  $> 5\%$ .

A figura 7 mostra o gráfico da relação dos efeitos principais para o tempo até a falha.

Figura 7 - Gráfico efeitos principais para o tempo até a falha



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da figura 7 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.

#### 4.1.7 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:

- 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, conforme tabela 3;
- Capaz de estimar Tempo até a falha ocorrer desejado para uma dada confiabilidade. Na tabela 5 foi estimada a sobrevivência da ferramenta para os percentis de 5% e 50% de falha acumulada.

- c) É capaz de estimar confiabilidade para um dado Tempo até a falha ocorrer desejado. Na tabela 6 foi estimada a confiabilidade da ferramenta para uma sobrevivência de 1000 mm.

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. Para a análise, o  $R^2$  (ajustado) foi de 81,15% indicando que o modelo se ajusta aos dados com precisão;
- 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  $P\text{-value} < 5\%$ ;

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  $P\text{-value} = 0,000 < 5\%$ , seguido por rpm com  $P\text{-value} = 0,004 > 5\%$ , enquanto que o fator f não possui significância para realizar alterações na vida da ferramenta, pois  $P\text{-value} = 0,0292 > 5\%$ . O mesmo acontece para o método dos MQO, Geometria Quadrada sendo de maior significância, depois rpm e f, com  $P\text{-value}$  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  $P\text{-value} > 5\%$  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 *Loglogistic* 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, o gráfico 1 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, o Gráfico 3 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 BIBLIOGRÁFICAS

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.

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

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.

CORREA, F. S. **Estudos dos esforços de corte e vida de ferramenta no faceamento do aço inoxidável 15-5 PH utilizando fresas com insertos intercambiáveis de metal duro**. Campinas, 2013. 114 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.

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

DINIZ, A. E. **A rugosidade superficial da peça em processos de torneamento: critério de fim de vida da ferramenta e fatores de influência**. Campinas, 1989. 161 p. Universidade Federal de Campinas.

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.

GIL, A. C. **Como classificar as pesquisas**. In: Gil AC. Como elaborar projetos de pesquisa. 4a ed. São Paulo: Atlas, 2002.

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.

MARCONDES, F. C. **Alternativas para a maximização da usinagem sob a ótica da análise ou engenharia de valor**. Campinas: FEM, UNICAMP, 2001.

MICHELS, 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.

LAWLESS, J. F. **Statistical Models and Methods for Lifetime Data**, v. 2, 2003.

RIGDON, S. E. et al. **Experiments for reliability achievement**. **Quality Engineering**, v. 25, n. 1, p. 54–72, 2012.

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

TELES, J. M. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro**. Itajubá, 2007. 124 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.