

RAQUEL MARIA GONDIM

**APLICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL NO
MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE
TORNEAMENTO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2008

RAQUEL MARIA GONDIM

**APLICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL NO
MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos básicos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Marcus A. Viana Duarte

**UBERLÂNDIA – MG
2008**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G637a Gondim, Raquel Maria, 1976-
Aplicação da distribuição de weibull no monitoramento da
operação de torneamento / Raquel Maria Gondim. - 2008.

103 f. : il.

Orientador: Marcus A. Viana Duarte.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Usinagem - Teses. 2. Usinagem - Estatística - Teses. I. Duarte,
Marcus Antonio Viana. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.9

RAQUEL MARIA GONDIM

**APLICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL NO
MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO**

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcus A. Viana Duarte - UFU - Orientador

Prof. Dr. - Márcio Bacci da Silva - UFU

Prof. Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães – UFU

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão – UFMG

Uberlândia, 07 de março de 2008.

Aos meus pais, Manoel e Iolanda,
À meus irmãos, cunhadas e sobrinhos.
E a todos meus amigos, aqueles que
me são próximos: que me
auxiliaram, que me incentivaram,
que participaram da minha luta
e que hoje compartilham a vitória.

“ ... quem ama o que faz não é carente
de reconhecimento pois, traz
o sucesso consigo mesmo ...”

Alair Martins do Nascimento

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força alcançada durante todo o processo.

Aos meus pais Manoel e Iolanda pelo amor, dedicação e incentivo.

Ao Prof. Dr. Marcus A. Viana Duarte pela confiança, pela orientação, pelo incentivo, pela paciência e pela compreensão.

Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva pelo apoio e incentivo durante a realização deste trabalho.

Às doutorandas Tatiana Meola e Flávia Cristina de Souza pelo apoio durante o trabalho.

As minhas amigas Aninha, Marta, Vanessa e Viviane pelo apoio e companheirismo.

Ao técnico do Laboratório de Pesquisa e Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia (LEPU), Reginaldo Ferreira de Souza pelo apoio durante a realização dos experimentos.

A todos os outros professores que de forma direta ou indireta colaboraram no decorrer do trabalho.

A todos os colegas da FEMEC por toda ajuda prestada, pelas sugestões e pelo trabalho em equipe.

A Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de participar deste curso.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

A FAPEMIG e a Capes pelo apoio financeiro.

GONDIM, R. M. **Aplicação da Distribuição de Weibull no Monitoramento da Operação de Torneamento**. 2008, 86. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

Resumo

O objetivo deste trabalho é determinar o momento ideal da troca da ferramenta de corte no processo de torneamento utilizando um procedimento de manutenção preditiva que visa calcular os valores limites de vibrações através do método estatístico de Weibull. O procedimento experimental foi o torneamento a seco de aço inox, sem variar as condições de corte, no qual avaliou o desgaste de cinco ferramentas de corte. Tendo como critério de parada a quebra da ferramenta. Durante os experimentos foram coletados os sinais de vibrações no porta-ferramenta em dois canais e a rugosidade superficial em dois pontos das peças usinadas, os sintomas vibratórios estimados foram constituídos pelos níveis de potência de aceleração em 26 bandas de frequências de 1/3 de oitava centradas entre 10 e 3160 Hz e cinco sintomas estatísticos no domínio do tempo. Estudaram-se 32 parâmetros de rugosidade para definição de critério de fim de vida. Após a escolha de oito parâmetros de rugosidade, buscou-se via análise de correlação determinar os melhores sintomas vibratórios correlacionadas com a evolução da rugosidade ao longo do tempo e os melhores sintomas vibratórios foram 2500 Hz para o canal 1 e 800 Hz para o canal 2. Depois de escolhidos os parâmetros de rugosidade e as bandas de frequências, os valores limites de vibrações foram determinados. Os testes realizados com um ensaio de controle mostraram que o monitoramento da vibração correlacionado com os parâmetros de rugosidade, é um método adequado para avaliar o desgaste da ferramenta de corte no processo de torneamento e estabelecer o fim de vida da mesma.

GONDIM, R. M. **Application of the Distribution of Weibull in the Monitoramento of the Operation of Turning**. 2008, 86. M. Sc Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia.

Abstract

The objective of this work is to determine the ideal moment to exchange the cutting tool in the machining process, using a predictive maintenance procedure, by calculating the vibration values limits through the Weibull statistical method. The experimental procedure was the machining of a stainless steel without cutting fluid and keeping constant all cutting conditions, in which were evaluated the wear of five cutting tools. Where the stop criteria was the cutting tool breaking. During the experiments, signals of vibrations were collected in the tool holder in two channels and also the superficial roughness showed in two points of the machined sample, the vibration symptoms were estimated and constituted by the power levels of acceleration in 26 frequency bands of 1/3 of eighth centered between 10 Hz and 3160 Hz and five statistical symptoms in the domain of the time. 32 roughness parameters had been studied for definition of the criteria of tool end-of-life. After the choice of eight roughness parameters, it was searched, by correlation analysis, the determination of the best correlated vibratory symptoms with the roughness evolution and the time spent. The best vibration signals had been 2500 Hz for canal 1 and 800 Hz for canal 2. After the roughness parameters and the frequencies bands were chosen, the vibrations limit values were determined. The tests carried out within a controlled trial showed that the monitoring of the vibration correlated with the roughness parameters is the adequate method to evaluate the wearing of the cutting tool in a turning process and to establish the end-of-life end life of the tool.

Keywords: Turning, Monitoring of the Vibration, Roughness.

Lista de Figuras

1.1	Etapas de um processo de manutenção preditiva via monitoramento de vibrações	3
2.1	Probabilidade de falha $F(x)$ de um determinado elo sob uma carga x	21
2.2	Diagrama de decisão da distribuição de Weibull em relação ao fator forma	24
2.3	Exemplo de variação do fator forma	25
2.4	Curva da vida dos sintomas	29
2.5	Diagrama da operação de torneamento.....	33
2.6	Quantificação de um sinal harmônico.....	35
2.7	Parâmetro de Rugosidade R_a	38
2.8	Parâmetro de Rugosidade R_p	38
2.9	Parâmetro de Rugosidade R_q	39
2.10	Parâmetro de Rugosidade R_t	39
2.11	Parâmetro de Rugosidade R_z	40
2.12	Parâmetro de Rugosidade R_{3z}	40
2.13	Parâmetro de Rugosidade R_c	41
3.1	Esquema para minimizar o erro.....	44
3.2	Representação do esquema de monitoramento.....	47
3.3	Foto da montagem do sistema de monitoramento.....	48
3.4	Posicionamento dos acelerômetros.....	49
3.5	Medição da rugosidade utilizando um rugosímetro digital	53
4.1	Ferramenta 1.....	55
4.2	Ferramenta 2.....	55
4.3	Ferramenta 3.....	56
4.4	Ferramenta 4.....	56
4.5	Parâmetro R_{sk} para as quatro ferramentas na parte inicial da barra.....	57
4.6	Parâmetro R_a para as quatro ferramentas na parte inicial da barra.....	58
4.7	Parâmetro R_a para as quatro ferramentas na parte final da barra	59
4.8	Parâmetro R_p para as quatro ferramentas na parte final da barra.....	59
4.9	Parâmetro R_q para as quatro ferramentas na parte final da barra.....	60
4.10	Parâmetro R_t para as quatro ferramentas na parte final da barra.....	60
4.11	Parâmetro R_z para as quatro ferramentas na parte final da barra.....	61
4.12	Parâmetro R_{3z} para as quatro ferramentas na parte final da barra.....	61
4.13	Parâmetro R_c para as quatro ferramentas na parte final da barra.....	62
4.14	Parâmetro R_{rms} para as quatro ferramentas na parte final da barra.....	62

4.15	Evolução do rms com o tempo para o Canal 1.....	63
4.16	Evolução do rms com o tempo para o Canal 2.....	64
4.17	Coeficiente de Correlação Rp do Canal 1.....	68
4.18	Coeficiente de Correlação Rp Canal 2.....	68
4.19	Confiabilidade das quatro ferramentas.....	71
4.20	Ferramenta de validação.....	73
4.21	Parâmetro Ra, Rp, Rq e RT, da ferramenta de validação.....	74
4.22	Parâmetro Rz, R3z, Rc e Rrms, da ferramenta de validação.....	75
4.23	Comparação dos valores calculados versos experimentais para o Canal 1.....	77
4.24	Comparação dos valores calculados versos experimentais para o Canal 2.....	77

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros de torneamento para ferramenta 1	50
3.2	Parâmetros de torneamento para ferramenta 2	51
3.3	Parâmetros de torneamento para ferramenta 3	51
3.4	Parâmetros de torneamento para ferramenta 4	52
3.5	Parâmetros de torneamento para ferramenta 5	52
4.1	Coeficiente de correlação entre parâmetros de rugosidade e parâmetros estatísticos (Canal 1)	64
4.2	Coeficiente de correlação entre parâmetros de rugosidade e níveis de potência vibratória em bandas de 1/3 de oitava (Canal 1)	65
4.3	Coeficiente de correlação entre parâmetros de rugosidade e parâmetros estatísticos (Canal 2)	66
4.4	Coeficiente de correlação entre parâmetros de rugosidade e níveis de potência vibratória de 1/3 de oitava (Canal 2)	67
4.5	Tempo de vida das ferramentas	69
4.6	Tempo de falhas e frequências observadas	70
4.7	Valores da regressão linear	70
4.8	Valores calculados dos sintomas vibratórios	72
4.9	Parâmetros de torneamento para ferramenta de validação.....	73
4.10	Valores calculados dos sintomas vibratórios da ferramenta de validação.....	76
4.11	Valores dos sintomas vibratórios da ferramenta de validação.....	76

Simbologia

Letras Latinas

A	evento
A_G	evento da distribuição geométrica
ap	profundidade de corte
A_w	reparos desnecessários
As	Assimetria
c	Curtose
d	diâmetro da peça
D_1	diâmetro inicial da peça usinada
D_2	diâmetro final da peça usinada
$E(X)$	esperança matemática
f	avanço
f	freqüência
$f(t)$	função densidade de probabilidade (fdp)
$F(t)$	função densidade (fd)
$F(x)$	probabilidade de falhas
$F(X_N)$	função densidade de probabilidade
F_c	fator de crista
H_0	hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
k	fator forma de Weibull
k_b	parâmetro da distribuição binomial
k_G	parâmetro da distribuição geométrica
k_H	número de variações dos parâmetros da distribuição hipergeométrica
k_p	variável aleatória discreta de Poisson
L	comprimento do percurso para o parâmetro R_a
l_e	comprimento de medição unitário
L_m	comprimento de um percurso
N	distribuição normal
n	número de elos
N	número de máquinas em operação
n	número de repetições
n_b	número de repetições da distribuição binomial

N_e	número apropriado de máquinas para controle
N_g	número de peças na distribuição hipergeométrica
N_H	número de peças de um lote
n_H	número de peças escolhidas na distribuição hipergeométrica
N_r	número apropriado de máquinas para reparos
n_r	número de rotações
N_w	número de leitura diferentes
P	probabilidade
$P(x)$	probabilidade de sobrevivência
p_b	parâmetro da distribuição binomial
P_g	eficiência dos índices par um grupo de máquinas
p_G	probabilidade da distribuição geométrica
p_h	probabilidade da distribuição hipergeométrica
P_n	Probabilidade de sobrevivência d uma corrente de n elos
q_G	probabilidade complementar de p_G
q_h	complementar da probabilidade na distribuição geométrica
$R(t)$	função de confiabilidade do sistema
r	Coeficiente de correlação
r_g	parâmetro da distribuição gama
r_H	número de peças defeituosas
RMS	nível médio quadrático global
$\bar{S}$	média do sinal de vibração
S	sintoma da vibração
S_0	valor característico do sintoma
S_a	valor de alerta
S_b	valor de pane
S_L	valores limites para o sintoma de vibração
S_n	valor mínimo do sintoma
T	duração de vida
t	tempo
t	tempo de cada passada
t_0	vida mínima
t_0	tempo inicial
t_E	parâmetro da taxa de falhas exponencial
t_e	tempo total de controle
t_f	tempo da lei de falhas

TMEF	tempo médio entre falhas
t_r	tempo total de reparo
$V(X)$	variância
V_c	velocidade de corte
V_f	velocidade de avanço
x	carga
X	variável aleatória
x_0	carga inicial
X_b	número de vezes que ocorre um evento A
x_E	variável aleatória da distribuição exponencial
X_G	número de repetições da distribuição geométrica
x_g	parâmetro da distribuição gama
X_g	variável aleatória contínua
X_H	número de peças defeituosas encontradas
X_N	variável aleatória infinita
X_p	variável aleatória discreta de Poisson
x_R	variável aleatória contínua positiva
y_{pi}	medidas dos picos
y_{vi}	medidas dos vales
Z	comprimento da peça
$Z(t)$	taxa de falhas
Z_i	rugosidade

Letras Gregas

α_a	razão de alerta
α_S	desvio padrão dos sinais de vibração
α_P	parâmetro da distribuição de Poisson
α_g	parâmetro da distribuição gama
α_R	parâmetro da distribuição de Rayleigh
α_e	parâmetro da taxa de falhas exponencial
α_{NP}	probabilidade condicional de falhar
ξ	experimento
μ	média
μ_N	média da distribuição normal
μ_f	média até falhar
σ_N	desvio padrão da distribuição normal
σ_f	desvio padrão de falhas
α_E	parâmetro da distribuição exponencial
Γ	função gama
Φ	parâmetro da distribuição de Weibull
η	vida característica
β	fator forma
β_p	razão de pane
σ	desvio padrão
σ^2_N	variância da distribuição normal
θ	tempo de vida
θ_a	tempo de vida para alerta
θ_b	tempo de vida para pane
ϖ_1	desvio na fabricação
ϖ_2	nível de interação dinâmica
ϖ_3	diferença entre a carga da máquina em operação
ϖ_4	qualidade de manutenção
λ	média do tempo de pane
θ_g	valor mínimo, garante a vida da máquina

SUMÁRIO

Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	x
Simbologia	xi
1. Introdução	1
1.1 Medições de Vibração na Manutenção Preditiva	2
2. Revisão Bibliográfica	9
2.1 Confiabilidade	9
2.2 Taxa de falha	11
2.3 Modelos de Distribuições	12
2.3.1 Distribuições Aleatórias Discretas	13
2.3.1.1 Distribuição de Poisson	13
2.3.1.2 Distribuição Binomial	13
2.3.1.3 Distribuição Geométrica	14
2.3.1.4 Distribuição Hipergeométrica	15
2.3.2 Distribuições Aleatórias Contínuas	16
2.3.2.1 Distribuição Normal	16
2.3.2.2 Distribuição Exponencial	16
2.3.2.3 Distribuição Gama	17
2.3.2.4 Distribuição de Rayleigh	18
2.3.2.5 Distribuição de Weibull.....	18
2.4 Leis de Falhas	19
2.4.1 Lei de Falhas Normal	19
2.4.2 Lei de Falhas Exponencial	20
2.5 Análise de Weibull	20
2.5.1 Função de Weibull	21
2.5.2 Distribuição de Weibull na Manutenção Preditiva	25
2.5.3 Teoria da Decisão de Newmann-Pearson	29
2.6 Coeficiente de Correlação	32
2.7 Monitoramento do Processo de Usinagem	33
2.7.1 Quantificação de um sinal Harmônico	35
2.7.2 Rugosidade	37
2.7.3 Parâmetros de Rugosidade	37

3. Metodologia e Procedimento Experimental	42
3.1 Metodologia.....	42
3.2 Equipamentos utilizados e montagem do sistema de medição	46
4. Resultados	54
4.1 Resultados.....	54
4.1.1 Tipos de Desgaste.....	54
4.1.2 Escolha do Parâmetro de Rugosidade.....	56
4.1.3 Determinação do Sintoma Vibratório.....	63
4.1.4 Identificação da vida da ferramenta utilizando a Distribuição de Weibull	69
4.1.4.1 Estimativa do tempo de vida da ferramenta através da distribuição de Weibull....	69
4.1.4.2 Estimativa da Vida da Ferramenta Através do Procedimento de Manutenção Preditiva via Distribuição de Weibull	72
4.2 Validação dos Resultados.....	73
5. Conclusões e Proposta para Trabalhos Futuros.....	78
5.1 Trabalhos Futuros.....	80
6. Referências Bibliográficas	81

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O conceito de manutenção tem passado por profundas mudanças ao longo do tempo, e estas mudanças é devido à alta competitividade no mercado mundial. A manutenção é uma função estratégica dentro de uma organização e assim o seu desempenho afeta, diretamente, o desempenho de uma empresa (PINTO, XAVIER, 2001). Contudo, as empresas estão à procura de uma manutenção que além de um custo baixo (adequado), possa garantir a disponibilidade da função dos equipamentos, de modo que atenda a um processo de produção ou serviço com confiabilidade e segurança. Neste contexto, a manutenção preditiva ganha espaço, pois pode prever as falhas nos equipamentos através da observação de diversos parâmetros com os equipamentos em funcionamento. Dentre os parâmetros pode-se destacar: medições de vibrações, medições de ruídos, medição de temperatura, análise de óleo, técnicas de emissão acústica entre outros. Os parâmetros a serem medidos, devem fornecer informações que permitam a inspeção de elementos específicos da máquina ou tipo de falha. A opção pelo parâmetro e a forma de investigação mais adequada, que retrate com maior acuidade o que se investiga, são fatores relevantes e determinantes.

A medição de vibrações é a que mais se adapta no experimento em máquinas rotativas, na qual é capaz de acompanhar e identificar 80% dos defeitos (DUARTE, 1997), sendo de grande importância já que estas máquinas são as mais comuns dentro de uma indústria. Através da observação deste parâmetro é possível prever as condições do equipamento e quando possivelmente ocorrerão as falhas, podendo assim se evitar a quebra com intervenções programadas de manutenção, ou seja, uma manutenção corretiva planejada. Através dos dados conseguidos pode-se ter uma análise técnica, onde os resultados desta análise indicarão a natureza da falha que se pode esperar; e estabelecer quais são os elementos críticos do sistema. Pode-se, ainda, montar um histórico do

equipamento, que permitirá estabelecer quais são os elementos de falha mais freqüentes e o tempo decorrido entre as falhas.

1.1 Medições de Vibração Na Manutenção Preditiva

O processo de manutenção inclui todas as atividades técnicas e organizacionais para garantir que as máquinas e equipamentos em geral operem dentro da confiabilidade esperada. Manutenção e trabalhos de reparo, que seguem determinadas diretrizes básicas, reduzem as chances de falhas inesperadas e conseqüentes perda de produção, tempo e gastos desnecessários. A manutenção tem como objetivo garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações para atender a um processo de produção ou de serviço com confiabilidade.

As máquinas são elementos mecânicos complexos e articulados. As peças que sofrem excitação podem oscilar e as oscilações transmitem-se pelas articulações aos demais elementos acoplados. O resultado é um espectro de freqüências complexo que caracteriza o sistema.

Cada vez que uma peça altera suas características mecânicas por desgaste ou trinca, uma componente de freqüência do sistema será alterada. Havendo alteração no acoplamento entre as peças, altera o coeficiente de transmissão do sinal, em conseqüência, a forma de freqüência global do sistema. Folgas, defeitos ou desalinhamentos de rolamentos ou mancais de máquinas rotativas refletem-se na alteração de freqüências ou no surgimento de novas freqüências.

Decidindo sobre a necessidade e viabilidade da utilização das técnicas de manutenção preditiva via monitoramento de vibrações, as etapas básicas que deverão ser obedecidas para a implementação do processo podem ser as representadas na Fig. 1.1. Dado um sistema mecânico genérico deve seguir os seguintes passos:

- Primeiro passo: consiste em conhecer as características dinâmicas do sistema.
- Segundo passo: consiste em determinar quais sensores e equipamentos serão utilizados, onde localizar os sensores, freqüência com que os dados deverão ser adquiridos.
- Terceiro passo: faz-se a primeira redução de dados e conseqüente classificação do estado geral da máquina via curvas de mérito.
- Quarto passo: este depende do passo anterior tendo detectado algum problema, um processamento mais apurado dos dados necessita ser realizado

para que numa classificação qualitativa a origem da falha seja identificada, onde as providências de intervenção possam ser realizadas.

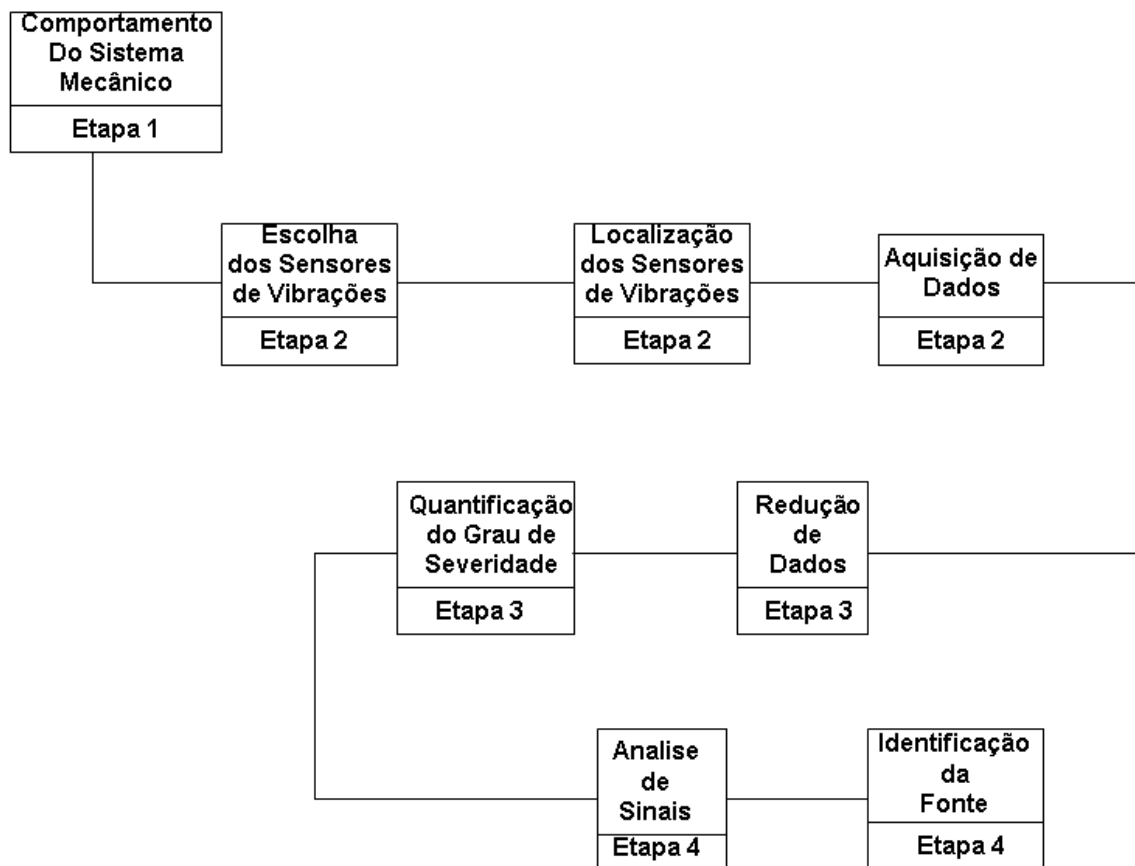


Figura 1.1 - Etapas de um processo de manutenção preditiva via monitoramento de vibrações.

A premissa fundamental sobre a qual se baseia a análise de vibração como técnica aplicada à manutenção industrial é: "Cada componente ou cada tipo de deficiência mecânica de uma máquina em operação produz uma vibração de frequência específica que em condições normais de funcionamento, alcança uma amplitude máxima determinada" (YA'CUBSOHN, 1983). Através desta definição é possível, medindo-se e analisando-se a vibração, estabelecer sua origem, identificar cada componente da máquina e o tipo de falha que está gerando, além, de avaliar o estado mecânico do componente que a produz ou a gravidade da deficiência detectada.

A manutenção preditiva, também conhecida por manutenção sob controle ou manutenção com base no estado do equipamento foi definida, segundo Pinto, Xavier (2001), da seguinte forma: "É a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática". Seu objetivo

é prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível, ou seja, deseja prever as condições dos equipamentos. Quando o grau de degradação se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido é tomada a decisão de intervenção, isto é, o estado do equipamento indica a necessidade de intervenções, a avaliação do equipamento se dá através da medição, acompanhamento dos parâmetros pré-estabelecidos. Podendo ser feito de três formas de monitoração: subjetiva que se baseia na experiência dos profissionais, objetiva que é feita com base em medições realizadas utilizando instrumentos especiais e a contínua que também é uma monitoração objetiva que esta associada à parada ou desligamento do equipamento uma vez atingido o valor limite estipulado. Dentre as técnicas de monitoramento direto (medição das forças de cortes) e indireto (acústica, potência elétrica, ruído, etc). O monitoramento via medições de vibração se destaca pelo fato do sistema de medição não ser intrusivo, a instrumentação ser relativamente barata e pelos resultados alcançados.

A utilização manutenção da preditiva requer que o sistema envolvido apresente determinadas condições, as quais são relacionadas abaixo:

- O equipamento, sistema ou instalação devem permitir algum tipo de monitoramento/medição.
- O equipamento, sistema ou instalação devem merecer esse tipo de ação, em função dos custos envolvidos.
- As falhas devem ser oriundas de causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada.
- Seja estabelecido um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado.

Considerando o monitoramento do desgaste de uma ferramenta num processo de usinagem como sendo um caso particular de manutenção preditiva, é possível monitorar todos os processos dinâmicos de corte via análise dos sinais de vibração. A utilização da análise de vibração no monitoramento do processo de torneamento tem chegado a bons resultados (DINIZ, PIGARE, 1994) e o acabamento superficial no processo de torneamento pode ser monitorado com grande precisão via parâmetros de usinagem e medições das vibrações (MEOLA et al, 2004).

Os sistemas de usinagem convencionais utilizam a intervenção humana para detectar anormalidades, inspecionar a qualidade do produto e controlar o processo, sendo que, os critérios para a interrupção do processo podem ser definidos de forma diferente por cada operador, e em muitas vezes estes critérios não são bem sucedidos nas rotinas de monitoramento em que são aplicados. Isso tem forçado a troca da ferramenta de corte, por

exemplo, muito antes de atingir o momento adequado para a sua substituição. Por isso, o monitoramento da usinagem de materiais baseado em técnicas que permitem diminuir a intervenção do operador e substituir algumas das funções do homem na produção de bens manufaturados por sensoriamento inteligente, é hoje uma área crescente de pesquisa, incluindo casos em ambientes reais de trabalho na indústria. As principais características desejáveis de um bom sistema de monitoramento incluem confiabilidade, baixo custo, simplicidade, capacidade de suportar o ambiente industrial e não ser influenciado por ruídos externos. O parâmetro medido deve ser dependente somente da variável desejada (o que se quer monitorar), o sistema deve ser pouco intrusivo e apresentar um tempo de resposta baixo, ou seja, o sensor deve ser suficientemente rápido para responder as variações do sistema e não deve interferir na operação de usinagem (MATSUMOTO, DINIZ, 1998).

A fratura da ferramenta usualmente acarreta uma parada na produção. Além disso, pode trazer conseqüências caras e desastrosas se a falha não for identificada e, por conseguinte, refugos forem produzidos. Portanto, a detecção de fraturas (microlascamentos, lascamentos e quebra) tem uma alta prioridade na usinagem de acabamento. As falhas na ferramenta de corte, provocadas por desgastes (contínuas) ou avarias (aleatórias), afetam a qualidade do produto direta e significativamente. A fratura sempre ocorre inesperadamente e pode provocar danos irreversíveis na peça ou até na máquina-ferramenta. Segundo Weingaertner (2005), a detecção em tempo real de indícios da fratura é crucial para a automação de processos; os sinais de vibração contêm informações muito úteis e oferecem excelentes possibilidades para diagnósticos, em tempo real, de muitos problemas críticos da usinagem dos materiais, incluindo desgaste da ferramenta.

Segundo Meola, et al (2002) a medição do desgaste pode ser realizada de forma direta ou indireta. Aquela, com o auxílio de um microscópio ferramenteiro, e, esta, através da medição da rugosidade superficial na peça, usando-se um rugosímetro, e, por meio dos erros de forma com equipamentos específicos. Tais procedimentos apresentam, no entanto, para os processos automatizados, a necessidade de interrupção do processo de usinagem para fazer as medições. Espera-se que as máquinas automatizadas sejam capazes de realizar o controle do desgaste e a troca das ferramentas, sem a interferência do homem (DU et al, 1995). Tal ocorrência só é permitida com o desenvolvimento de técnicas de monitoramento do processo de usinagem em tempo real, as quais são fundamentadas em medições de parâmetros que se relacionam com o desgaste da ferramenta e/ou o acabamento superficial da peça.

Existem diferentes critérios para o estabelecimento do fim de vida de uma ferramenta, cada um com suas considerações. Basicamente, estes critérios podem ser divididos em falhas na ferramenta, tolerâncias da peça, degradação do acabamento da superfície usinada

e fatores econômicos. Em processos de torneamento em acabamento, em que o desgaste da ferramenta não chega a atingir valores em que se receia a quebra da mesma e o crescimento da força de usinagem também não chega a comprometer o funcionamento da máquina, o que determina o fim de vida da ferramenta é qualidade da peça (BONIFÁCIO, 1993).

SICK (2002) mostra que um sistema inteligente consiste, na maioria das vezes, de uma seqüência de subsistemas para a condução dos dados, desde a detecção dos sinais até o diagnóstico do estado da ferramenta: aquisição (sensoriamento); pré-processamento (condicionamento de sinais); representação (tratamento de sinais); avaliação e resposta (reação ou tomada de decisão).

Como os sinais gerados por apenas um sensor são em geral insuficientes para fornecer a informação cabível ao monitoramento do processo e da ferramenta, propôs-se para a aquisição de dados a utilização simultânea de diferentes sensores, posicionados em diferentes locais da máquina-ferramenta. Sinais de diferentes fontes são integrados para fornecer a máxima informação necessária às tarefas de monitoramento. A tarefa de identificação usualmente envolve em seu estágio preliminar o processamento dos sinais adquiridos através de análises estatísticas ou espectrais, visando à extração de características e a geração de índices de monitoramento. Segundo Meola (2003), a localização do sensor é em via de regra, numa região de alta rigidez e o mais próximo possível da fonte que se deseja monitorar. Como os valores medidos pelos sensores de vibração dependem da função de resposta em frequência da máquina, em função da operação da mesma, é necessário realizar análise de sensibilidade para identificar o melhor local da máquina para o posicionamento dos sensores de vibração (SOUZA, 1998). Assim, variações nas funções respostas em frequência poderão ocorrer em máquinas que movimentam grandes inércias ao longo do processo de torneamento.

A análise espectral implica em uma grande redução de dados, uma vez que com poucos dados conseguiremos representar histórias temporais de sinais bastante complexos. Mesmo no caso do espectro em frequência ter muitas componentes harmônicas, a redução de dados ainda é significativa, pois o que nos interessa são as componentes com maiores amplitudes, ou seja, as frequências que contribuem para a vibração do sistema.

A grande maioria das máquinas e equipamentos existentes executam movimentos com ciclo limitado, isto é: movimentos rotativos ou alternativos. Devido a este fato, o espectro de frequência das grandezas vibratórias destas máquinas e equipamentos é caracterizado por um ruído de banda larga somado a componentes discretos de amplitudes significativas, cujas frequências estão intimamente relacionadas com a cinemática do movimento de cada parte dos mecanismos ou com as frequências naturais do sistema. Após

o processamento dos sinais, o estágio posterior utiliza-se das características geradas para refinar a tomada de decisão quanto ao estado resultante da ferramenta e assim, auxiliar no diagnóstico de falhas.

Durante a operação da máquina, vários modos próprios de vibração do sistema são excitados e a amplitude com que estes modos vibram refletem as características de rigidez do sistema; a inércia, as tolerâncias de fabricação, níveis de atrito entre as partes, choques mecânicos e outros parâmetros típicos do sistema (BOTTON et al., 1998). Segundo Meola (2003), operações irregulares que resultam em variações nas excitações ou variações nas características dinâmicas do sistema, afetam a resposta de vibração do sistema, sendo que as variações na assinatura dos sinais de vibração podem ser detectadas utilizando ferramentas de análise apropriadas, sendo que as mais comuns são: análise espectral (energia do sinal versus frequência), nível médio quadrático do sinal (energia global), fator de crista (excursões do sinal fora da normalidade), técnicas do envelope (eliminar portadora) entre outras.

Recentes trabalhos vêm sendo desenvolvidos no laboratório de pesquisa e usinagem da Universidade Federal de Uberlândia (LEPU). Estas pesquisas visam estimar o tempo de vida e o momento da troca da ferramenta de corte em função do nível de vibração relacionado com os parâmetros de rugosidade. Santos (2001) realizou uma pesquisa em que usou alguns parâmetros de entrada (velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, percurso de avanço, potência e a vibração em dois pontos da máquina-ferramenta), para treinamento de uma rede neural, cujo objetivo da pesquisa foi monitorar o desgaste de flanco máximo e a rugosidade, no qual conseguiu bons resultados.

O objetivo deste trabalho é a aplicação de técnicas estatísticas que defina os valores limites de vibrações, através da Distribuição de Weibull, estabelecendo assim o momento adequado de troca da ferramenta. Segundo Dirikolu; et all (2002) o Método de Weibull é um modelo estatístico que se mostra adequado à análise de vibrações, pois é capaz de modelar os dados experimentais com diferentes características, indicando a vida útil da máquina e fazendo uma previsão adequada de falhas.

Desta forma, pretende contribuir com o desenvolvimento de uma modelagem estatística que possa ser implementada pelas empresas, auxiliando-as no aperfeiçoamento do protocolo da análise dos resultados dos ensaios. O foco é a utilização da distribuição de Weibull em monitoramento de sistemas.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo I – Introdução
- Capítulo II – Revisão Bibliográfica – divide-se basicamente em dois assuntos, no primeiro momento aborda as distribuições estatísticas dando ênfase a distribuição de

Weibull, e em segundo aborda o processo de torneamento; bem como pontos referentes a estes assuntos que sejam considerados importantes para a compreensão do estudo.

- Capítulo III – Metodologia e Procedimento Experimental – são descritos os materiais usados nos ensaios e métodos aplicados, para designação de valores sintomas para troca de ferramenta de corte.
- Capítulo IV – Resultados – este capítulo apresenta os resultados obtidos, abordando o tipo de desgaste ocorrido, a correlação dos parâmetros de rugosidade superficial com os níveis de vibração e o ajuste de Weibull.
- Capítulo V – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros – envolve análise e conclusões dos resultados apresentados, como sugestões de continuidade de trabalho para o tema abordado.
- Capítulo VI – Referência Bibliográfica – inclui todos os trabalhos pesquisados na elaboração deste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A implementação eficiente de um sistema de monitoramento e sua utilização não são tarefas simples de serem executadas, pois existe uma ampla variedade de processos de usinagem que podem ser usados em vários campos de atuação, o que se requer um levantamento de muitas informações específicas a respeito do processo que se deseja monitorar.

Segundo Godoy (1999), a confiabilidade tornou-se um atributo cada vez mais necessário e obrigatório às empresas que objetivam atender melhor o usuário de seus produtos ou serviços. Esta exerce grande influência na percepção e avaliação da qualidade, tornando-se sinônimo de sucesso no mundo globalizado.

Destaca-se neste capítulo a abordagem teórica de algumas distribuições estatísticas e das técnicas aplicadas em análise de sinais de vibração mecânica utilizadas para a predição da vida da ferramenta de corte no processo de torneamento.

2.1 Confiabilidade

O objetivo da manutenção é garantir que os equipamentos atendam o processo de produção ou de serviço, com confiabilidade. O termo confiabilidade é muito usado na manutenção e teve origem na década de 50 nos Estados Unidos para análise de falha em equipamentos eletrônicos de uso militar.

Segundo Dias (1996), confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar uma determinada função de forma adequada, durante um intervalo de tempo, sob condições especificadas. Compreender esta definição é prestar atenção ao fato de que ela contém quatro estruturas fundamentais ou quatro categorias: probabilidade, comportamento

adequado, período de uso e condições de uso. Estas categorias e seus significados devem ser considerados integralmente em cada etapa do ciclo de vida do produto, no desenvolvimento do projeto, bem como na análise da atividade para garantia da confiabilidade.

Confiabilidade $R(t)$, matematicamente, é a probabilidade de um item não falhar entre um tempo inicial t_0 , e um tempo final t , considerando que o item esteja atuando desde t_0 . O complemento da função confiabilidade é denominado de função de probabilidade acumulativa $F(t)$ que é a probabilidade de o item falhar no intervalo de tempo $[t_0, t]$. A probabilidade de ocorrer um e outro evento, em qualquer tempo t é igual a 1. Portanto:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2.1)$$

O valor t não pode ser previsto a partir de um modelo determinístico, isto é, componentes “idênticos” sujeitos a esforços “idênticos” falharão em diferentes e imprevisíveis instantes. Deste modo, o emprego de um modelo probabilístico, considerando t uma variável aleatória, constitui-se no único tratamento realista do assunto. Sendo $R(t)$ a função de confiabilidade de um sistema ou componente no tempo t , definida como $R(t) = P(T > t)$, onde T é o tempo de vida e P é a probabilidade.

A função densidade de probabilidade (fdp) de T , f é dada pela Eq. (2.2).

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(s) ds \quad (2.2)$$

Em termos da função densidade acumulada (fd) de T , R é dada pela Eq. (2.3).

$$R(t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t) \quad (2.3)$$

A função $F(t)$, dependendo da aplicação, é mais freqüentemente representada pela distribuição de Weibull e Exponencial, e dependendo do caso a distribuição Normal, Log-Normal, Poisson e Binomial também se mostram adequadas. Porém, a distribuição de Weibull é a que melhor representa o evento relacionado com a taxa de falha do sistema (DIAS, 1996), pois não tem a exigência da taxa de falha ser constante como acontece, por exemplo, na distribuição exponencial.

2.2 Taxa de Falha

Segundo Pinto, Xavier (2001), a falha pode ser definida como a cessação da função de um item ou incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho previsto. A taxa de falhas $Z(t)$ é uma função importante em manutenção dada por:

$$Z(t) = \text{n}^\circ \text{ de falha} / \text{n}^\circ \text{ total de horas de operação.}$$

Ou ainda por:

$$Z(t) = \text{n}^\circ \text{ de falha} / \text{unidades testadas} \times \text{n}^\circ \text{ de horas de teste.}$$

O conceito matemático de taxa de falha é:

Seja $F(t)$ a função densidade acumulada (fd) de uma variável aleatória T qualquer, que representa o tempo até falhar, ou duração da vida, e seja $f(t)$ a sua função densidade de probabilidade (fdp). Então $F(t)$ é dada pela Eq. (2.4).

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(s) ds \quad (2.4)$$

A função taxa de falha denotada por $Z(t)$ é definida pela Eq. (2.5).

$$Z(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.5)$$

$$Z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{para } F(t) < 1 \quad (2.6)$$

Como a taxa de falhas e a confiabilidade estão diretamente ligadas, Spiegel (1993) menciona um interessante teorema:

Se T , a duração até falhar, for uma variável aleatória contínua, com fdp $f(t)$ e se $F(0)=0$, onde F é a fd de T , então $f(t)$ poderá ser expressa em termos da taxa de falhas $Z(t)$, da forma da Eq. (2.7):

$$f(t) = Z(t) e^{-\int_0^t Z(s) ds} \quad (2.7)$$

Este teorema mostra que a taxa de falhas $Z(t)$ determina univocamente a fdp $f(t)$, valendo à recíproca.

A taxa de falha é dependente em relação ao tempo. Baseado neste aspecto pode-se ter uma taxa constante, decrescente ou crescente em relação ao tempo. A fase inicial representa as falhas de partida com a taxa de falha decrescente, o intervalo seguinte representa uma estabilização da taxa de falha que permanece constante, ou seja, vida útil, a última fase do equipamento é onde a taxa de falha é crescente, é a fase da degradação.

Apresenta-se a definição de cada fase.

- Falha de Partida - Há grande incidência de falhas causadas por componentes com defeitos de fabricação ou deficiência de projeto. Essas falhas também podem ser oriundas de problemas de instalação.
- Vida Útil - A taxa de falhas é sensivelmente menor e relativamente constante ao longo do tempo. A ocorrência de falhas decorre de fatores menos controláveis, como fadiga ou corrosão acelerada, fruto de interações dos materiais com o meio. Assim, a sua previsão é mais difícil.
- Final de Vida ou Degradação - Há um aumento na taxa de falhas decorrente do desgaste natural, que será tanto maior quanto mais passar o tempo.

Os conceitos de confiabilidade e taxa de falhas estão entre as mais importantes ferramentas necessárias para um estudo profundo dos “modelos de falhas” dos quais surgem às seguintes questões:

- Qual modelo matemático é adequado para a descrição de um fenômeno observável?
- Que “Lei de Falhas” subjacentes será razoável admitir? (Isto é, que forma a fdp de T deve ter?)

Para responder as questões acima usa-se o ponto de vista estritamente matemático, e assume-se qualquer função densidade de probabilidade para T , depois, simplesmente estuda-se as consequências dessa hipótese. Contudo, o interesse é ter um modelo que represente os dados de falhas disponíveis.

2.3 Modelos de Distribuições

Verifica-se que, na construção de modelos não determinísticos para fenômenos observáveis, algumas distribuições de probabilidade são mais usadas que outras. Abaixo estão citadas algumas destas distribuições e suas aplicações.

2.3.1 Distribuições Aleatórias Discretas

2.3.1.1 Distribuição de Poisson

Seja X_p uma variável aleatória discreta (VAD), tomando os seguintes valores $p=0,1,...,n,...$. Se a função de densidade de probabilidade for dada pela Eq. (2.8), onde $k_p=0,1,2,...,n_p,...$, então X_p tem a distribuição de Poisson, com parâmetro $\alpha_p > 0$.

$$P(X_p = k_p) = \frac{\exp(-\alpha_p) \cdot \alpha_p^{k_p}}{k_p!} \quad (2.8)$$

$$E[(X_p)] = \alpha_p \quad (2.9)$$

$$V(X_p) = \alpha_p \quad (2.10)$$

Onde:

$E[(X)]$ é a Esperança Matemática, expresso na Eq. (2.9).

$V(X)$ é a Variância, expresso na Eq. (2.10).

Aplicações:

- Modelar eventos aleatórios que ocorrem com uma determinada frequência, onde a média α_p é conhecida e é constante o intervalo entre os eventos.
- Aplicada no controle de qualidade e modela o número de falhas em relação ao tempo de produção.

2.3.1.2 Distribuição Binomial

Seja X_b uma variável aleatória (VA) definida como o número de vezes que o evento A tenha ocorrido, então X_b é uma VA Binomial com parâmetro n_b e p_b , com $P(A) = p_b$ (constante) e n_b é o número de repetições.

Logo sendo X_b uma VA Binomial, baseada em n_b repetições com a sua função densidade dada pela Eq. (2.11), então temos a distribuição binomial, com $k_b=0,1,...,n$.

$$P(X_b = k_b) = \binom{n_b}{k_b} p_b^{k_b} (1 - p_b)^{n_b - k_b} \quad (2.11)$$

$$E[(X_b)] = n_b p_b \quad (2.12)$$

$$V[(X)] = n_b p_b (1 - p_b) \quad (2.13)$$

Onde:

$E[(X_b)]$ é a Esperança Matemática, expresso na Eq. (2.12).

$V(X)$ é a Variância, expresso na Eq. (2.13).

Aplicações:

- Amostragem com reposição
- Número de sucesso em n tentativas independentes.
- Número de itens defeituosos num conjunto de tamanho n.

2.3.1.3 Distribuição Geométrica

Sendo ξ um experimento, tem-se o interesse na ocorrência ou não-ocorrência de algum evento A_G ; repete-se o experimento até ocorrer A_G pela primeira vez, sendo as repetições independentes e que cada repetição tenha $P(A_G) = p_G$ e $P(\overline{A_G}) = 1 - p_G = q_G$ sempre os mesmos.

Sabe-se que X_G , o número de repetições necessárias para obter a primeira ocorrência de A_G , terá sua função densidade dada pela Eq. (2.14), regida pela distribuição geométrica, com $K_G = 1, 2, \dots$.

$$P(X_G = K_G) = q_G^{K_G - 1} p_G, \quad (2.14)$$

$$E[(X_G)] = \frac{1}{p_G} \quad (2.15)$$

$$V(X_G) = \frac{q_G}{p_G^2} \quad (2.16)$$

Onde:

$E[(X_G)]$ é a Esperança Matemática, expresso na Eq. (2.15).

$V(X_G)$ é a Variância, expresso na Eq. (2.16).

Aplicações:

- Número de insucessos antes do primeiro sucesso em n amostragens.
- Número de amostragens necessárias até obter um sucesso.
- Número de itens retirados até encontrar um defeituoso.

2.3.1.4 Distribuição Hipergeométrica

Suponha que existe um lote de N_H peças, com r_H peças defeituosas e $(N_H - r_H)$ não defeituosas. Se escolhermos ao acaso n_H peças deste lote sem reposição, e X_H o número de peças defeituosas encontradas, sua função de densidade é dada pela Eq. (2.17), com $K_H = 0, 1, 2, \dots$,

$$P(X_H = K_H) = \frac{\binom{r_H}{K_H} \binom{N_H - r_H}{N_H - K_H}}{\binom{N_H}{n_H}} \quad (2.17)$$

$$E[(X_H)] = n_H p_H \quad (2.18)$$

$$V(X_H) = n_H p_H q_H \frac{N_H - n_H}{N_H - 1} \quad (2.19)$$

Onde:

$E[(X_H)]$ é a Esperança Matemática, expresso na Eq. (2.18).

$V(X_H)$ é a Variância, expresso na Eq. (2.19).

$$p_H = r_H / N_H$$

$$q_H = 1 - p_H$$

Aplicações:

- Amostragem sem reposição
- Número de sucesso em n tentativas independentes.
- Número de itens defeituosos num conjunto de tamanho n.

2.3.2 Distribuições Aleatórias Contínuas

2.3.2.1 Distribuição Normal

Seja X_N variável aleatória, que tome os valores reais $-\infty < X_N < +\infty$, e sua função densidade de probabilidade dada pela Eq. (2.20), tem-se uma distribuição normal $N(\mu_N, \sigma_N^2)$.

$$f(X_N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \exp\left(-\frac{(X_N - \mu_N)^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (2.20)$$

$$E[(X_N)] = \mu_N \quad (2.21)$$

$$V(X_N) = \sigma_N^2 \quad (2.22)$$

Onde:

$E[(X_N)]$ é a Esperança Matemática, expresso na Eq. (2.21).

$V(X_N)$ é a Variância, expresso na Eq. (2.22).

Aplicações:

- Erros de diversos tipos, por exemplo, ruídos.
- Valores que são a soma de grande número de outros valores.
- Modela falha por fadiga ou desgaste.

2.3.2.2 Distribuição Exponencial

Seja x_E variável aleatória, que tome todos os valores não negativos, e sua função densidade de probabilidade dada pela Eq. (2.23), tendo uma distribuição exponencial, com parâmetro $\alpha_E > 0$ e $x_E \geq 0$.

$$f(x_E) = \alpha_E \exp(-\alpha_E x_E), \quad (2.23)$$

$$E[(x_E)] = 1/\alpha_E \quad (2.24)$$

$$V(x_E) = 1/\alpha_E^2 \quad (2.25)$$

Onde:

$E[(X_E)]$ é a Esperança Matemática, expresso na Eq. (2.24).

$V(X_E)$ é a Variância, expresso na Eq. (2.25).

Aplicações:

- É utilizada normalmente para representar a duração de um determinado serviço.
- Intervalo de tempo até a falha de uma peça de um equipamento.
- Modela o número de falhas durante o período de vida útil de componentes eletrônicos.

2.3.2.3 Distribuição Gama

Seja X_g VAC, que assume somente valores não negativos, com função densidade de probabilidade dada pela Eq. (2.26) e os parâmetros $r_g \geq 1$, $\alpha_g > 0$ e $x_g > 0$.

$$f(x_g) = \frac{\alpha_g}{\Gamma(r_g)} (\alpha_g x_g)^{r_g-1} e^{-\alpha_g x_g} \quad (2.26)$$

Sendo $\Gamma(r_g)$ a função Gama definida na Eq. (2.27), $p > 0$:

$$\Gamma(r_g) = \int_0^{\infty} x_g^{r_g-1} e^{-x_g} dx_g \quad (2.27)$$

Para $r_g = 1$ a função densidade de probabilidade da distribuição Gama fica idêntica à distribuição exponencial: $f(x_E) = \alpha_E \exp(-\alpha_E x_E)$

Para $r_g \in \mathbb{Z}_+$ a função densidade de probabilidade da distribuição Gama pode ser generalizada dada pela forma: $f(x_g) = \frac{\alpha_g}{(r_g-1)!} (\alpha_g x_g)^{r_g-1} e^{-\alpha_g x_g}$

A partir desta função pode-se usar a fd $F(x)=1-P(X>x)$ e mostrar que a função densidade da distribuição Gama é igual à fd da distribuição de Poisson:

$$E[(X_g)] = r_g / \alpha_g \quad (2.28)$$

$$V(X_g) = \frac{r_g}{\alpha_g^2} \quad (2.29)$$

Onde:

$E[(X_g)]$ é a Esperança Matemática, expresso na Eq. (2.28).

$V(X_g)$ é a Variância, expresso na Eq. (2.29).

Aplicações:

- Modela tempo de falhas em componentes com reparo ideal.

2.3.2.4 Distribuição Rayleigh

Seja x_R variável aleatória contínua, com $x_R > 0$, e sua função densidade de probabilidade dada pela Eq. (2.30), tem-se a distribuição de Rayleigh, onde a esperança é expressa pela Eq. (2.31) e a variância pela Eq. (2.32):

$$f(x_R) = \frac{x_R}{\alpha_R^2} \exp\left(-\frac{x_R^2}{2\alpha_R^2}\right) \quad (2.30)$$

$$E[(x_R)] = \alpha_R \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (2.31)$$

$$V(x_R) = (2 - \pi/2)\alpha_R^2 \quad (2.32)$$

Onde:

$E[(x_R)]$ é a Esperança Matemática.

$V(x_R)$ é a Variância.

Aplicações:

- Modela o número de falhas de partidas no período inicial da vida, e por desgaste.

2.3.2.5 Distribuição de Weibull

É muito utilizada para descrever o tempo de falha para produtos industrializados, pois é um tipo de distribuição com uma grande variabilidade de formas. A função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull é dada pela Eq. (2.33):

$$f(t) = \frac{\delta(t-t_o)^{\delta-1}}{(\alpha-t_o)^\delta} e^{-\left(\frac{t-t_o}{\alpha-t_o}\right)^\delta} \quad (2.33)$$

Para $t > t_o > 0$, $\alpha > 0$ (vida característica) e $\delta > 0$ (parâmetro de forma).

Aplicações:

- Sempre que o equipamento for composto de vários componentes e a falha tenha acontecido devido “à mais grave” irregularidade dentre muitas existentes no equipamento.

2.4 Leis de Falhas

2.4.1 Lei de Falhas Normal

A lei de falhas normal representa um modelo apropriado para componentes nos quais a falha seja devida a algum efeito de ‘desgaste’.

A sua função densidade de probabilidade será dada na Eq. (2.34), com $t_f \geq 0$.

$$f(t_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_f^2}} \exp\left(-\frac{(t_f - \mu_f)^2}{2\sigma_f^2}\right) \quad (2.34)$$

Onde: μ_f a média até falhar;

σ_f é o desvio padrão.

Considerar que uma função densidade de probabilidade seja normal é uma limitação à esquerda já que $t_o=0$, quando trabalha-se com o tempo pode-se dizer que a maioria dos componente em uso falharam em torno da duração média.

A função de confiabilidade para este caso pode ser expressa na Eq. (2.35):

$$R(t_f) = 1 - P(T \leq t_f) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_f^2}} \int_{-\infty}^{t_f} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t_f - \mu_f}{\sigma_f}\right)^2\right) dx \quad (2.35)$$

2.4.2 Lei de Falhas Exponencial

É a lei mais importante, pode ser caracterizada de muitas maneiras, mas a maneira mais simples é supor que a taxa de falhas seja constante, isto é, $Z(t_E) = \alpha_e$.

Esta hipótese pode significar que depois que a peça estiver em uso, sua probabilidade de falhar não se altera, ou seja, não existe o desgaste. Em consequência desta hipótese e aplicando-se a Eq. (2.1), a sua fdp fica expressa pela Eq. (2.36), com $t_E > 0$ e a confiabilidade na Eq. (2.37).

$$f(t_E) = \alpha_E \exp(-\alpha_E t_E) \quad (2.36)$$

$$R(t_E) = 1 - F(t_E) = \exp(-\alpha_E t_E) \quad (2.37)$$

Há muitas situações encontradas nos estudos de falhas, para as quais a hipótese básica que leva à distribuição exponencial não será satisfeita isto porque uma peça que não tenha falhado é tão boa quanto à peça nova. Então é necessário considerar t como o tempo de operação (até falhar), sem se importar com o histórico da peça. Por outro lado, os intervalos de confiança associados a uma análise não paramétrica são usualmente muito mais largos que aqueles associados a uma análise paramétrica (RELIASOFT, 2007).

Levando-se em consideração a particularidade da distribuição de Weibull ser uma família de distribuições, esta distribuição pode ser usada para monitorar o tempo de vida, e determinar o tempo médio de falha e a confiabilidade de um equipamento. Em que os tempos de desgaste dos componentes estejam correlacionados com os sinais de vibrações e os parâmetros de rugosidade.

2.5 Análise de Weibull

Em 1951, foi publicado por ASME no Jornal de Mecânica Aplicada um artigo intitulado "Uma Função Estatística de Larga Aplicação", de autoria do engenheiro sueco Ernest Hjalmar Waloddi Weibull, referente ao estudo desenvolvido por ele sobre resistência de aços em tração (elos) de correntes construídas com fórmulas "semi-empíricas". Estas expressões semi-empíricas foram desenvolvidas por Weibull, que em 1939 apresentou o modelo de planejamento estatístico sobre fadiga de material.

As equações mostraram-se adequadas para leis de falhas em equipamentos sempre que o sistema for composto de vários componentes e a falha seja essencialmente devida a

“mais grave” imperfeição, dentre um grande número de “imperfeições”, no qual a taxa de falha não precisa ser constante, desde então, foi eleita como uma das ferramentas para análise de confiabilidade. Esta análise é um método estatístico que correlaciona dados específicos de falha com uma distribuição em particular, podendo indicar se a falha é um evento prematuro (falha de partida), aleatório (vida útil) ou ocasionada por desgaste (final de vida).

Esta distribuição permite:

- representar falhas típicas de partida (mortalidade infantil), falhas aleatórias e falhas devido ao desgaste.
- obter parâmetros significativos da configuração das falhas.
- representação gráfica simples.

Para se trabalhar com esta análise existe uma condição fundamental: ter um bom histórico de manutenção.

2.5.1 Função de Weibull

Weibull procurava uma analogia entre os componentes cristalinos da estrutura do aço e os elos de uma corrente (PINTO, XAVIER 2001). A probabilidade de falha $F(x)$ de um determinado elo sob uma carga x dada pela Eq. (2.38) e está representada na Fig. 2.1:

$$F(x) = 1 - e^{-\Phi(x)} \quad (2.38)$$

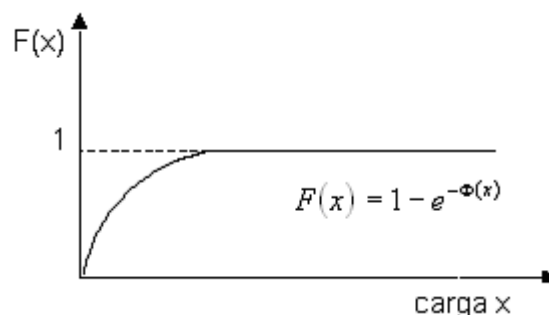


Figura. 2.1 - Probabilidade de falha $F(x)$ de um determinado elo sob uma carga x .

Sendo a probabilidade de falha $F(x)$, a probabilidade de sobrevivência $P(x)$ de um determinado elo sob uma carga x será dada pela Eq. (2.39):

$$P(x) = 1 - F(x) = e^{-\Phi(x)} \quad (2.39)$$

Logo, a probabilidade de sobrevivência de uma corrente com n elos é dado pela Eq. (2.40):

$$P_n(x) = \left(e^{-\Phi(x)} \right)^n = e^{-n\Phi(x)} \quad (2.40)$$

Weibull determinou $\Phi(x)$ Eq. (2.41) de forma que, $F(x)$ fosse sempre crescente com x e fosse ainda nula com uma carga inicial x_0 e adimensional por ser um expoente:

$$\Phi(x) = (x - x_0 / \eta)^\beta \quad (2.41)$$

Onde:

- x_0 - carga inicial
- η - carga característica
- β - fator forma

Para utilização na manutenção, a adequação da Eq. (2.38) passa pela substituição de x (carga) por t (tempo). Então a equação de Weibull para cálculos da probabilidade de falha é dada pela Eq. (2.42):

$$F(t) = 1 - e^{-(t-t_0/\eta)^\beta} \quad (2.42)$$

As principais expressões matemáticas de Weibull estão apresentadas pelas Eq. (2.43) à Eq. (2.49):

$$f(t) = \beta \eta^{-\beta} (t - t_0) \exp - \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \quad (2.43)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.44)$$

$$P(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.45)$$

$$Z(t) = \left(\frac{\beta}{\eta^\beta} \right) (t - t_0)^{\beta-1} \quad (2.46)$$

$$TMEF = t_0 + \eta \Gamma(1 + \beta^{-1}) \quad (2.47)$$

$$\sigma = \eta \left[\left(1 + 2\beta^{-1} \right)^{\frac{1}{\beta}} - \Gamma^2 \left(1 + \beta^{-1} \right) \right]^{\frac{\beta}{\beta-1}} \quad (2.48)$$

$$E(t) = \frac{1}{\eta} \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right) \quad (2.49)$$

Onde:

$f(t)$ é a probabilidade de um item falhar num intervalo t .

$R(t)$ é a confiabilidade.

$Z(t)$ é a taxa de falha.

$TMEF$ é o tempo médio entre falhas.

σ é o desvio padrão.

$E(t)$ é a esperança matemática.

$t_0 \Rightarrow$ Vida mínima: intervalo de tempo que o equipamento não apresenta falhas.

$\eta \Rightarrow$ Vida característica: intervalo de tempo entre t_0 e t no qual ocorrem 63,2% das falhas.

$\beta \Rightarrow$ Fator de forma: indica a forma da curva e a características das falhas. Quando:

$\beta < 1$, falha de partida

$\beta = 1$, falhas aleatórias

$\beta > 1$, falhas por desgaste

Monchy (1987) indica que, para valores de β entre 1,5 e 2,5, tem-se falhas por fadiga; entre 3 e 4 falhas por desgaste, corrosão ou porque o material ultrapassou o patamar de deformação plástica. Quando β tende a infinito, todas as falhas ocorrerão num intervalo de tempo que tende a zero, ou seja, num dado instante teremos todos os equipamentos funcionando e no instante seguinte todos poderão falhar.

Na Fig. 2.2 é mostrado o diagrama de decisão com base no fator forma de Weibull, indicando como proceder a partir de um valor encontrado.

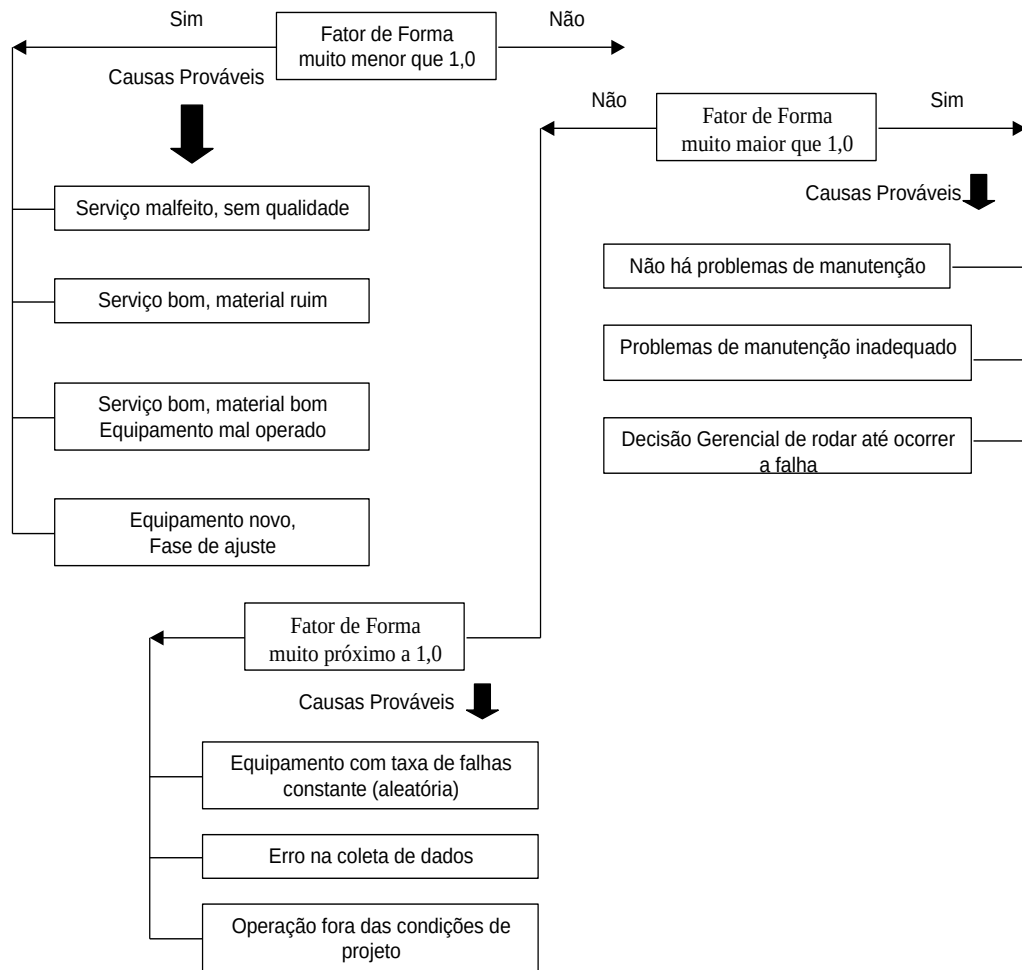


Figura 2.2 – Diagrama de decisão da distribuição de Weibull em relação ao fator forma

Uma das particularidades mais interessantes decorre do fato de que alterando o valor de β , a função densidade de probabilidade de Weibull toma formas de outras distribuições. Dependendo do valor de β , a distribuição de Weibull pode ser igual ou se aproximar de várias outras distribuições, ver, por exemplo, a Fig. 2.3.

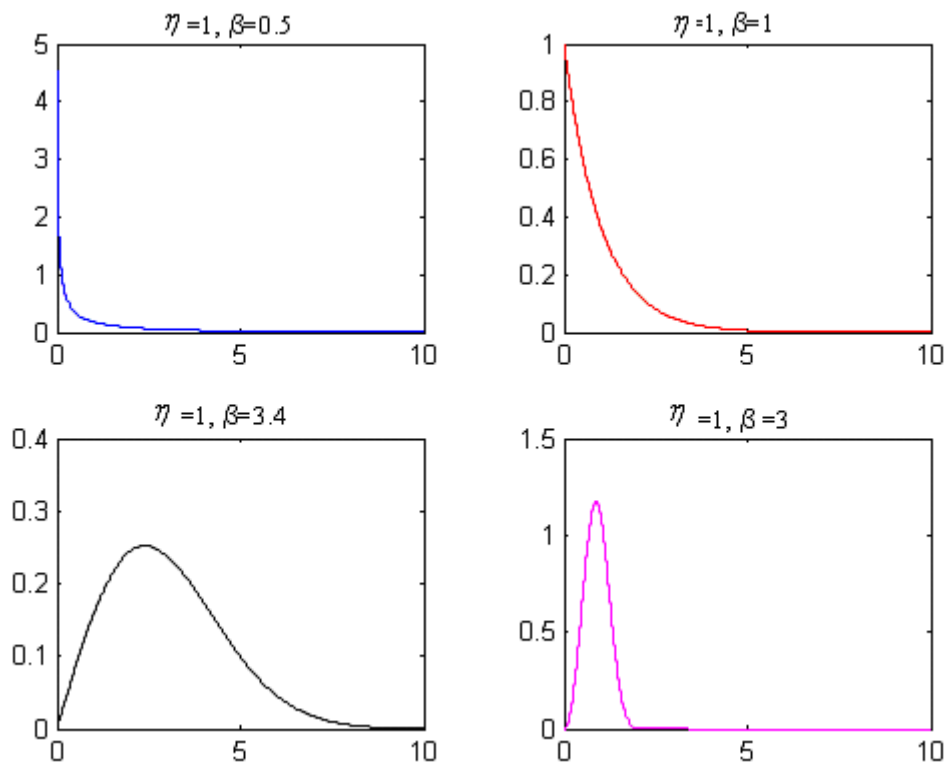


Figura 2.3 – Exemplo da variação do fator forma

Segundo Ross (1987) quando:

$\eta = 1$ e $\beta = 0.5$ Weibull se aproxima da distribuição exponencial

$\eta = 1$ e $\beta = 1$ Weibull é idêntica à distribuição exponencial

$\eta = 1$ e $\beta = 3.4$ Weibull se aproxima da distribuição normal

$\eta = 1$ e $\beta = 3$ Weibull se aproxima da distribuição Rayleigh

2.5.2 Distribuição de Weibull na Manutenção Preditiva

De acordo com Cempel (1989), observando-se os sintomas das vibrações para um grupo de máquinas e aplicar aos resultados o processo de Weibull, pode-se calcular a curva da vida dos sintomas, o valor de alarme e de pane. No monitoramento das condições das vibrações, têm-se duas questões fundamentais: encontrar o sintoma S da vibração, que mostra como descobrir a falha da máquina, e estimar o valor limite S_L para o sintoma e fazer a estimação dos valores limites S_L , onde temos S_a o valor de alerta e S_b o valor de pane, sendo:

S_a é descoberto por meios de passos da fase da vida da máquina em uso e S_b é determinado com a paralisação da máquina.

Estes valores são muito importantes para o controle contínuo da máquina, mas a sua determinação não é simples. A observação dos sintomas S no controle contínuo da máquina é realizada através de um processo aleatório de operação da máquina que depende do tempo de vida θ , e de diferentes parâmetros ϖ_i até então desconhecidos. Então a curva dos sintomas da vida da máquina $[S = S(\theta, \varpi_1, \dots)]$ fica completa quando encontrar estes valores, ou tem-se um método natural dando somente um nível de incerteza para os valores S_a e S_b .

Para uma grande amostra de máquina, os valores observados dos sintomas S e as propriedades de θ e dos parâmetros ϖ_i são eficientes, obtendo-se assim os resultados dos sintomas para um experimento. Combinando os termos da função de densidade de Weibull com a técnica de Neyman-Pearson é possível determinar com precisão os valores limites e uma boa média de $S(\theta)$ (curva do tempo de vida). A vantagem deste método é que pode usar cada ensaio e adaptar os resultados para ensaios operacionais e condições de manutenção particulares.

Ordenando as diferenças entre alguns tipos de controle da qualidade de um experimento, dados pelos seguintes parâmetros:

ϖ_1 - desvio na fabricação

ϖ_2 - nível de interação dinâmica (instalação)

ϖ_3 - diferença entre a carga da máquina em operação

ϖ_4 - qualidade da manutenção

Então, encontra-se a curva dos sintomas (Eq. 2.50) na realização de um processo estatístico de controle:

$$S = S(\theta, \varpi_1, \varpi_2, \varpi_3, \varpi_4) \quad (2.50)$$

Para N novas máquinas em operação tem-se ϖ_4 constante. Logo, o experimento fica idêntico à teoria da confiabilidade. Para uma máquina com um número suficiente de ciclos na operação-renovável, ϖ_1 e ϖ_2 são constantes e escolhem N_y leituras diferentes dos indícios dos sintomas (ou seja, $\neq \theta_n$). Para o caso do diagnóstico do experimento passivo todos os parâmetros podem ser diferentes. Tem-se um procedimento para a média dos sintomas representando pela Eq. (2.51):

$$\langle S(\theta) \rangle = E_W[S(\theta, \varpi_1, \varpi_2, \varpi_3, \varpi_4)] \quad (2.51)$$

Onde $E_W[S(\theta, \varpi_1, \varpi_2, \varpi_3, \varpi_4)]$ é a média dos desvios operacionais dos parâmetros ϖ_i possíveis no ensaio.

Fazendo uma notação discreta dos seguintes valores: $S_{ni} = S_n(\theta_i)$ com $\Delta\theta_i = \frac{\theta_{bn}}{20} = \frac{\lambda}{20}$, onde θ_{bn} é o tempo de pane de N máquinas. Como θ_{bn} não é exatamente conhecido, substituindo $\theta_{bn} = \lambda$, com λ sendo a média do tempo de pane do grupo de máquinas. Pode-se ordenar os resultados do nosso experimento com a média da curva dos sintomas com diferentes densidades de probabilidades:

$p(S)$ a densidade de probabilidade dos sintomas em controle.

$p(\theta_b)$ a densidade de probabilidade do tempo de pane.

$p(S_b) = p[\theta_b(S_b)]$ a densidade de probabilidade do valor do sintoma de pane.

Assumir que $p(S)$ e $p(S_b)$ têm a forma da distribuição de Weibull, e assumindo os 3 parâmetros da distribuição de Weibull, obtém-se as Eq. (2.52) e a Eq. (2.53):

$$p(\theta_b) = \frac{k}{\lambda - \theta_g} \left(\frac{\theta_b - \theta_g}{\lambda - \theta_g} \right)^{k-1} \exp - \left(\frac{\theta_b - \theta_g}{\lambda - \theta_g} \right)^k ; k > 0 \text{ e } \theta_b \geq \theta_g \quad (2.52)$$

$$p(S) = \frac{k}{S_0 - S_n} \left(\frac{S - S_n}{S_0 - S_n} \right)^{k-1} \exp - \left(\frac{S - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k ; k > 0 \text{ e } S \geq S_n \quad (2.53)$$

Onde:

k - fator forma

λ - média do tempo de pane

θ_g - garante a vida da máquina

S_n - determina o valor mínimo do sintoma (qualidade da manutenção)

S_0 - valor característico do sintoma.

Pode-se usar a fórmula transformada da densidade de probabilidade Eq. (2.54), para obter $p(S)$ e $p(\theta_b)$ por meio de ajuste da amostra com a média da curva dos sintomas $\langle S(\theta) \rangle = S$:

$$p(S)dS = p(\theta) \left| \frac{dS}{d\theta} \right|^{-1} \quad (2.54)$$

onde $p(\theta)$ é a função densidade de probabilidade de $S(\theta)$ da amostra.

Assumindo a uniformidade da função de densidade para o tempo médio para a pane λ em um grupo de máquinas observado, e que os incrementos sejam positivos ($ds, d\theta > 0$, isto é, a curva da vida é monótona) obtém-se o domínio da equação diferencial Eq. (2.55):

$$p(S)dS = \frac{d\theta}{\lambda} \quad p(\theta) = \frac{1}{\lambda} \quad (2.55)$$

Substituindo a Eq. (2.53) na Eq. (2.54) obtém:

$$\frac{kdS}{S_0 - S_n} \left(\frac{S - S_n}{S_0 - S_n} \right)^{k-1} \exp - \left(\frac{S - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k = \frac{d\theta}{\lambda} \quad (2.56)$$

Fazendo a integração por substituição:

$$S = S_n + (S_0 - S_n)^k \sqrt{-\ln \left| c - \frac{\theta}{\lambda} \right|} \quad (2.57)$$

Quando se exige uma condição inicial $\theta = 0$ e um ponto abaixo de S_n na Fig. 2.4, e a constante de integração $c=1$, encontra-se o resultado para o experimento e a curva para a média dos sintomas dada pela Eq. (2.58):

$$S = S_n + (S_0 - S_n)^k \sqrt{-\ln \left| 1 - \frac{\theta}{\lambda} \right|} \quad (2.58)$$

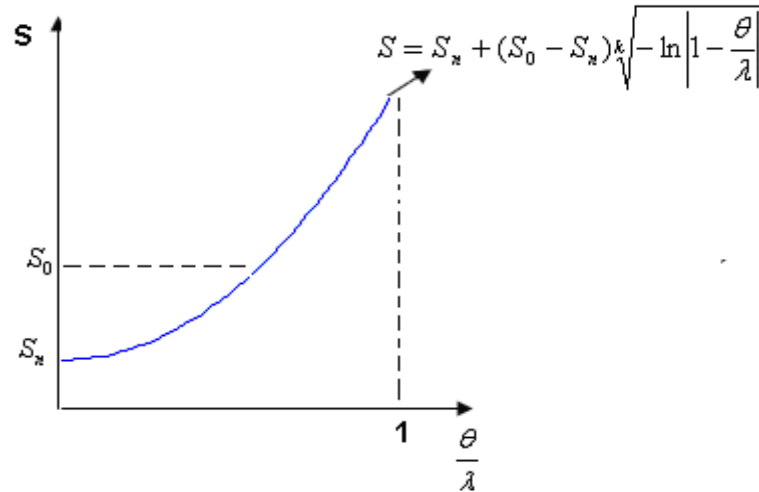


Figura 2.4 – Curva da vida dos sintomas

2.5.3 Teoria da Decisão de Neymann-Pearson

Segundo Monchy (1982), a Teoria da Decisão de Neymann-Pearson é o teste de hipótese, onde H_0 a hipótese nula e H_1 a hipótese alternativa, dado pela Eq. (2.59).

Onde P_{FA} é a probabilidade ocorrer o erro tipo I.

Procedimento Geral:

Pelo contexto do problema identificar o parâmetro de interesse.

Especificar a hipótese nula.

Escolher um nível de significância. (0.05 e 0.01)

Decidir sobre a rejeição ou não de H_0 .

Erro tipo I: Rejeitar H_0 quando H_0 for verdadeira

Erro tipo II: Aceitar H_0 quando H_0 for falsa

$$\alpha_{NP} = P_{FA} = \int_V f_l \mathbb{I}(H_0) dl \quad (2.59)$$

Para estimar os valores S_a e S_b , faz o uso da Teoria da decisão de Neymann-Pearson, com isso minimizam-se os números de panes e percebem-se os reparos desnecessários A_w dado pela Eq. (2.60) e P_g está definido na Eq. (2.61), uma vez que pode-se escrever um valor apropriado para S_b .

$$A_w = P_g \int_{S_b}^{\infty} p(S) dS \quad (2.60)$$

$$\text{Com } P_g = \left(\frac{t_e}{t_e - t_r} \right) \cong \left(\frac{N_e}{N_e - N_r} \right) \quad (2.61)$$

Onde:

P_g é a eficiência dos índices para um grupo de máquinas

t_e é o tempo total de controle

t_r é o tempo total de reparo

N_e, N_r é o número apropriado de máquinas.

Assumindo a densidade de probabilidade de Weibull para $p(S)$ na Eq. (2.53) e Neymann-Pearson na Eq. (2.60), encontra β_p a razão de pane através da Eq. (2.62), então a razão de pane fica definida pela Eq. (2.63):

$$\frac{A_w}{P_g} = \int_{S_b}^{\infty} p(S) ds = \exp - \left(\frac{S_b - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k \quad (2.62)$$

$$\beta_p = \frac{S_b - S_n}{S_0 - S_n} = \sqrt[k]{-\ln \frac{A_w}{P_g}} \quad (2.63)$$

Para encontrar S_a , emprega-se o mesmo raciocínio que foi desenvolvido para estimar S_b . Então muda-se os limites de integração na Eq. (2.60), chega à razão de alerta α_a :

$$A_w = P_g \int_{S_a}^{S_b} p(S) dS \quad (2.64)$$

$$\frac{A_w}{P_g} = \int_{S_a}^{S_b} p(S) ds = \exp \left[- \left(\frac{S_a - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{S_b - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k \right] \quad (2.65)$$

$$\Rightarrow \frac{A_w}{P_g} = \exp \left[- \left(\frac{S_a - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k \right] - \frac{A_w}{P_g} \Rightarrow \ln \frac{2A_w}{P_g} = - \left(\frac{S_a - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k \quad (2.66)$$

Dividindo por $\ln \frac{A_w}{P_g} = -\left(\frac{S_b - S_n}{S_0 - S_n}\right)^k$, encontra-se α_a :

$$\alpha_a \equiv \frac{S_a - S_n}{S_b - S_n} = \sqrt[k]{\frac{\ln \frac{2A_w}{P_g}}{\ln \frac{A_w}{P_g}}} \leq 1 \quad (2.67)$$

A distribuição de Weibull apresenta uma interessante relação do coeficiente k com o coeficiente de variação:

$$\frac{\sigma_s}{\bar{S} - S_n} = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1} \cong \frac{1}{k} \Rightarrow k = \frac{\bar{S} - S_n}{\sigma_s} \quad (2.68)$$

Então o valor característico S_0 pode ser determinado por:

$$S_0 = S_n + (\bar{S} - S_n) \Gamma^{-1}(1 + 1/k) \quad (2.69)$$

Deste modo S_n , S_0 e k podem ser calculados; conseqüentemente β_p , α_a e a curva da vida dos sintomas podem ser encontrados.

Tendo os valores limites S_a e S_b , qual a relação destes com a curva da vida dos sintomas?

Para responder a esta pergunta utiliza a Eq. (2.57) substituindo-se $S = S_b$ e $\theta = \theta_b$:

$$S = S_n + (S_0 - S_n) \sqrt[k]{-\ln \left| 1 - \frac{\theta}{\lambda} \right|} \Rightarrow \frac{S - S_n}{S_0 - S_n} = \sqrt[k]{-\ln \left| 1 - \frac{\theta}{\lambda} \right|} \quad (2.70)$$

$$\frac{S_b - S_n}{S_0 - S_n} = \sqrt[k]{-\ln \left| 1 - \frac{\theta_b}{\lambda} \right|} \Rightarrow \exp - \left(\frac{S_b - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k = \left| 1 - \frac{\theta_b}{\lambda} \right| \quad (2.71)$$

Pela Eq. (2.60) pode-se escrever a Eq. (2.72):

$$\frac{A_w}{P_g} = 1 - \frac{\theta_b}{\lambda} \Rightarrow \frac{\theta_b}{\lambda} = 1 - \frac{A_w}{P_g} \quad (2.72)$$

Empregando o mesmo raciocínio para $S = S_a$ e $\theta = \theta_a$, obtém:

$$\frac{\theta_a}{\lambda} = 1 - \frac{2A_w}{P_g} \quad (2.73)$$

Conclui-se que o tempo de pane $\frac{\theta_b}{\lambda}$ e o tempo de alerta $\frac{\theta_a}{\lambda}$ não dependem dos parâmetros da distribuição de Weibull, o mesmo acontece com a curva dos sintomas da vida da máquina. Portanto, estes dependem somente da eficiência dos índices P_g e da manutenção apropriada A_w . Assim o fator de decisão para o modelo é o fator forma k e a correta manutenção dada pela razão $\frac{A_w}{P_g}$.

2.6 Coeficiente de Correlação

Determinação da força da relação entre duas variáveis o procedimento mais usado é a correlação expressa por um coeficiente. Análise estatística mais usada, para obtenção da correlação entre variáveis é o coeficiente de Pearson (r), definido pela Eq. (2.74)

$$r = \frac{N \sum xy - \sum y \sum x}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (2.74)$$

Este é zero quando duas variáveis são absolutamente independentes entre si, ou seja, não existe nenhuma relação entre elas. Pode assumir um valor máximo de + 1,00, quando a associação for positiva e o mais “forte” possível. Pode-se também assumir um valor máximo de -1,00, quando a associação for negativa e o menos forte possível.

2.7 Monitoramento da Operação de Torneamento

Segundo Ferraresi (1970), o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes é ilustrado na Fig. 2.5.

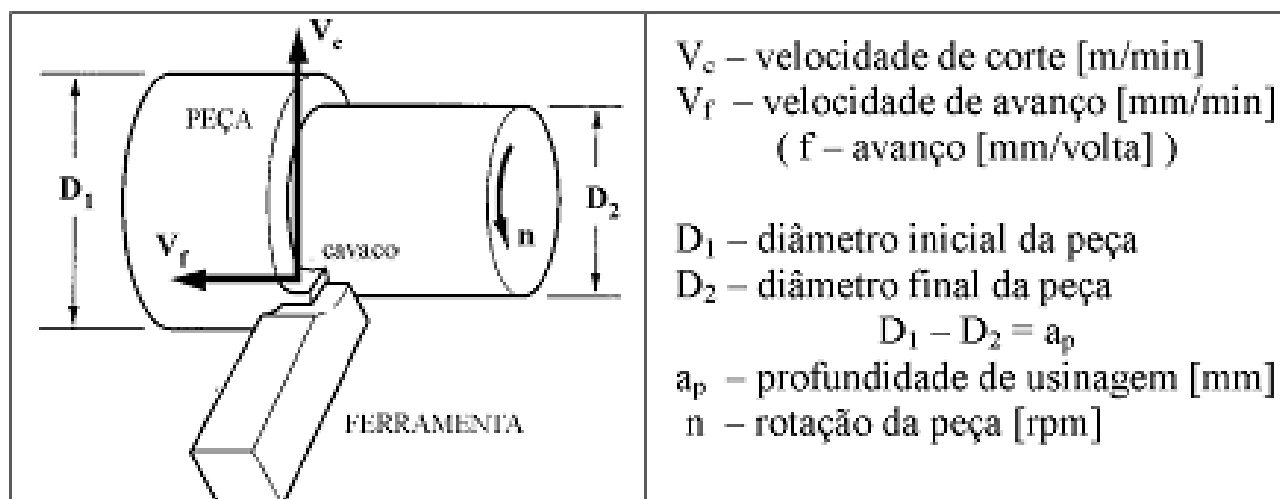


Figura 2.5 – Diagrama da operação de torneamento

A operação de torneamento é executada com a combinação de dois movimentos: avanço da ferramenta e rotação da peça. O avanço da ferramenta pode ser ao longo do eixo da peça, o que significa que seu comprimento será reduzido, ou no sentido do centro da peça, diminuindo seu diâmetro. Em alguns casos, o avanço da ferramenta pode ser a combinação dessas duas direções, resultando em superfícies cônicas.

A ação de corte durante a usinagem provoca mudanças na geometria das ferramentas. Essas mudanças podem ser avarias e/ ou desgastes.

O estudo do acabamento de peças usinadas se justifica devido à influência deste nas condições de funcionamento e na confiabilidade dos componentes mecânicos, sendo assim um dos principais itens analisados no estudo da integridade superficial de componentes usinados. A condição de uma superfície usinada é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas (DA SILVA; MACHADO, 2000). Assim o acabamento é a combinação de alguns fatores que podem ser definidos como ondulações, falhas e rugosidade.

O bom acabamento é fundamental onde houver desgaste, atrito, corrosão, aparência, resistência à fadiga, transmissão de calor, propriedades óticas, escoamento de fluidos e

superfícies de medição (blocos-padrão, micrômetros, paquímetros, etc.). O acabamento é medido através da rugosidade superficial, a qual é expressa em micrômetro (μm). No Brasil, os conceitos de rugosidade superficial são definidos pela norma ABNT NBR 6405-1985.

Os parâmetros de rugosidade existentes são valores numéricos resultantes de integração ou de operações matemáticas simples dos perfis amostrais de superfícies. Portanto são representações sujeitas a diversos erros de medição e interpretação. Para minimizar estes erros não faremos análise de apenas um parâmetro.

O processo de desgaste da ferramenta geralmente ocorre em combinação com o modo predominante de desgaste, sendo dependente das condições de usinagem, material da peça e geometria da ferramenta (DIMILA, LISTER, 2000; DEVILLEZ et al., 2003).

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta e é causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. É o tipo de desgaste mais comum. Este tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo inclusive sair de sua faixa de tolerância (DINIZ et al., 2000; FERRARESI, 1970).

O desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta é chamado desgaste de cratera, e é causado pelo contato entre a ferramenta e o cavaco. O cavaco desliza na superfície de saída da ferramenta se atritando com a mesma, provocando nesta superfície desgaste em baixo relevo. Sempre ocorre desgaste por crateramento em processos de torneamento, uma vez que é consequência do tipo de material usinado, geometria do cavaco, tipo de ferramenta, parâmetros de corte, entre outros. O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal. (TRENT, 1984; DINIZ et al., 2000).

Tanto as falhas de natureza regular (dependentes do tempo de uso) quanto as aleatórias (independentes do tempo), podem conduzir a ferramenta a um colapso total, resultando em sua quebra. A vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido este tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída (FERRARESI, 1970).

A literatura discute vários critérios para o fim de vida da ferramenta os quais dependem de várias considerações. Basicamente, estes critérios podem ser definidos com base na falha da ferramenta (incluindo a fratura, trinca e desgaste acelerado), tolerância dimensional da peça, rugosidade da peça e considerações econômicas. Em operações de torneamento de acabamento, em que o desgaste da ferramenta não chega a atingir valores em que se receia a quebra, e o crescimento da força de usinagem também não chega a

comprometer o funcionamento da máquina, o que determina o fim de vida da ferramenta é a precisão e/ou a rugosidade da peça (BONIFÁCIO, 1993).

Assim, monitorar a rugosidade da peça é uma boa alternativa para se estabelecer com exatidão o fim de vida da ferramenta.

2.7.1 Quantificação de um Sinal Harmônico

A amplitude de vibração é a característica que descreve a severidade da mesma, podendo ser quantificada de diversas maneiras (DUARTE, 1999). Na Fig. 2.6, é indicada a relação entre os níveis pico a pico, o nível pico, o nível médio e o nível rms de um sinal harmônico.

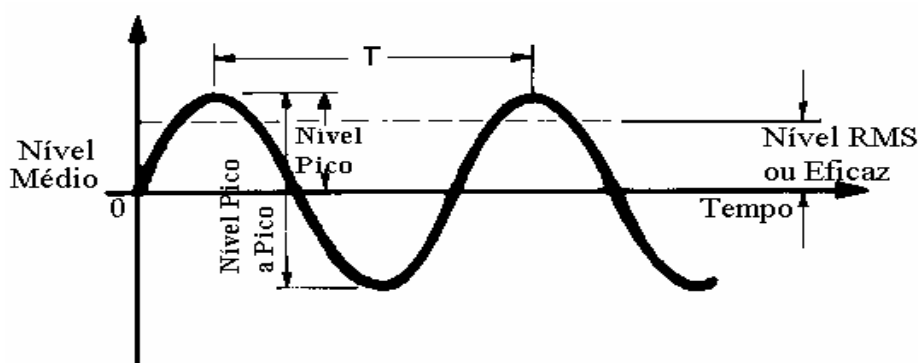


Figura 2.6 - Quantificação de um sinal harmônico

O valor pico a pico é muito útil, pois indica a excursão máxima da onda, uma quantidade importante para definir quando uma peça de uma máquina atinge valores críticos.

O valor de pico é usado para indicar níveis máximos de sinais transientes (de curta duração) em choques. Porém os valores de pico só indicam o nível máximo que ocorreu, sem contar a cronologia da onda.

O valor médio indica o quanto o sinal está deslocado em relação à referência Eq. (2.75) (nível zero, por exemplo) tendo pouca, ou nenhuma, utilidade no monitoramento de vibrações.

$$Nivel\ Médio = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.75)$$

O valor eficaz (rms) é uma das medidas mais importante de amplitude, porque leva em conta tanto a cronologia da onda, quanto o valor de amplitude, o qual está diretamente

ligado à energia (grandeza física ao quadrado) contida na onda, e, por conseguinte, indica o poder destrutivo da vibração.

O nível RMS Eq. (2.78) de um sinal harmônico é igual ao nível de pico dividido pela raiz quadrada de 2 ($\cong 1,4142$). Como a amplitude do espectro, em uma determinada frequência f , é igual ao nível médio quadrático desta que compõe o sinal, pode-se concluir que a soma das amplitudes do espectro de frequência está diretamente relacionada com a energia do sinal em função da frequência (Teorema de Parseval).

$$Nivel\ rms = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.78)$$

O fator de crista (F_c), definido pela Eq. (2.79), é um indicador de ocorrências fora da normalidade.

$$F_c = 10 \log_{10} \frac{Valor\ Pico}{Valor\ rms} \quad (2.79)$$

Curtose é um parâmetro que descreve a forma de uma distribuição aleatória da probabilidade de uma variável expresso pela Eq. (2.80). É definido como:

$$K(X) = \frac{E[(X - \mu)^4]}{\sigma^4} \quad (2.80)$$

Onde:

X é uma variável aleatória

μ é a média

σ é o desvio padrão

Com o crescimento do número de falhas o valor da curtose tende a diminuir e o valor rms a aumentar.

Assimetria é uma medida de simetria de dados da distribuição de probabilidade de uma variável, dada pela Eq. (2.81). Uma curva normal apresenta simetria igual à zero, daí a utilidade desta medida para comparar outras distribuições com uma gaussiana ou normal.

$$Assimetria = \frac{3(\bar{X} - mediana)}{\sigma} \quad (2.81)$$

Uma medida negativa indica que a cauda negativa da distribuição é mais longa e uma medida positiva indica que a cauda positiva da distribuição é mais longa. Valores negativos indicam dados deslocados para a direita (cauda negativa longa) e valores positivos indicam dados deslocados para a esquerda (cauda positiva longa).

2.7.2 Rugosidade

Rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas através de aparelhos eletrônicos.

De acordo com a norma ISO 468 a rugosidade é um critério de fim de vida de ferramenta em operações de acabamento, pois a qualidade do acabamento superficial no processo de usinagem é fortemente influenciada pelo estado da ferramenta e da velocidade de corte.

A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar suas causas que entre outras são: imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta; vibrações nos sistemas ou desgaste das ferramentas. O perfil de rugosidade é obtido a partir do perfil efetivo, por um instrumento de avaliação, após filtragem. Tomando-se uma pequena porção da superfície, observam-se certos elementos que a compõem. A altura ou profundidade médias das irregularidades é medida em um pequeno comprimento chamado de *cut-off* (comprimento da amostra).

2.7.3 Parâmetros de Rugosidade

As superfícies de peças apresentam irregularidades quando observadas em detalhes, estas irregularidades são provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça. A superfície das peças apresenta perfis bastante diferentes entre si. As saliências e reentrâncias, os parâmetros usados são procedimentos para avaliar o acabamento superficial de uma peça ou componente.

Tem-se a definição dos oito parâmetros que foram utilizados neste trabalho para especificações do acabamento superficial, as normas utilizadas foram a ISO 4287-1997 para Ra, Rq, Rp, Rt, Rc, AMSE B46.1-1995 para Rz, R3z e Rrms de acordo com o site www.predev.com/smg/parameters.htm.

Parâmetro Ra: é a média aritmética de um perfil. É o parâmetro mais usado para expressar o acabamento superficial, ou seja, a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas

dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso L ilustrado na Fig. 2.7. Ra pode ser calculada pela Eq (2.82).

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |r(x)| dx \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |r_n| \quad (2.82)$$

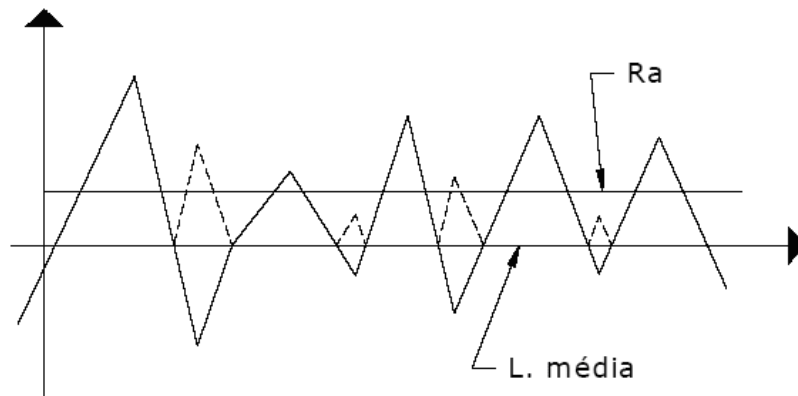


Figura 2.7 – Parâmetro de Rugosidade Ra

Parâmetro Rp: é o valor do pico mais alto em relação à linha de centro, como ilustra a Fig. 2.8.

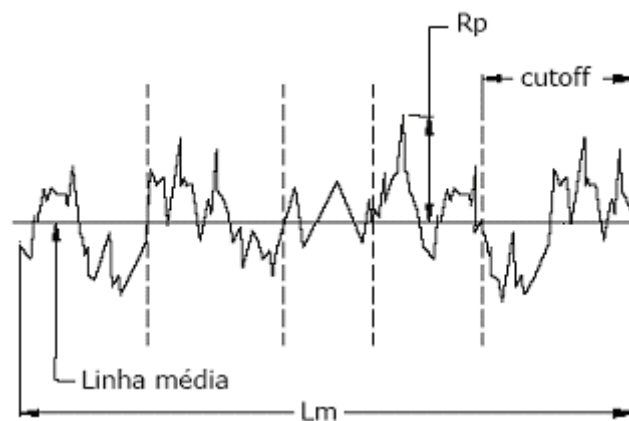


Figura 2.8 – Parâmetro de Rugosidade Rp

Parâmetro Rq: é a rugosidade média quadrática Eq. (2.83). É o desvio médio quadrático, ilustrado na Fig. 2.9.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} y^2 dx} \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}} \quad (2.83)$$

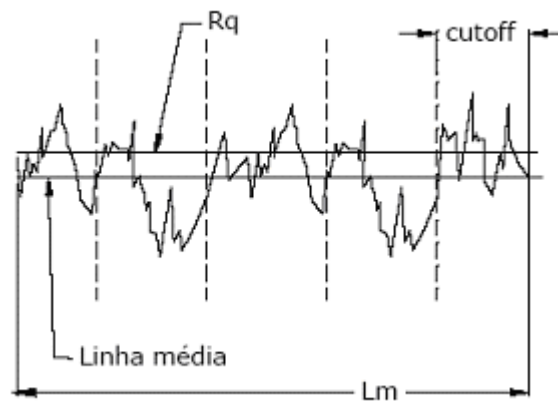


Figura 2.9 – Parâmetro de Rugosidade Rq

Parâmetro Rt: é a rugosidade total. É dada pela diferença entre o pico mais alto e a depressão mais baixa do perfil, como é mostrado na Fig. 2.10.

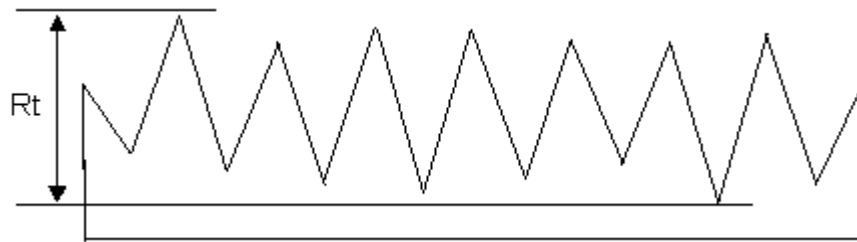


Figura 2.10 – Parâmetro de Rugosidade Rt

Parâmetro Rz: é a distância média entre pico e vale, isto é, a média aritmética dos cinco valores parciais Zi. A rugosidade Zi é definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maiores afastamentos (acima e abaixo da linha média) existentes dentro de um comprimento Le. Graficamente é ilustrado na Fig. 2.11, este valor representa a altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dado pela Eq. (2.84).

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (2.84)$$

Onde:

Lm: comprimento total. $L_m = 5 \cdot L_e$

Le: comprimento de amostragem (cut off)

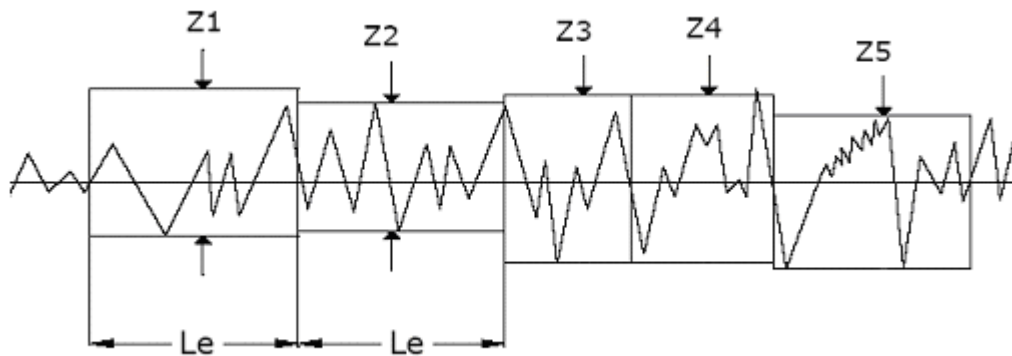


Figura 2.11 – Parâmetro de Rugosidade Rz

Parâmetro R3z: R_{3zi} é a altura vertical entre o terceiro pico mais elevado ao terceiro vale mais profundo dentro de um comprimento de medição unitário l_e . **R3z** é o valor médio da rugosidade unitária R_{3zi} em cinco comprimentos de medição unitários l_e , como é indicado na Fig. 2.12 e na Eq. (2.85).

$$R_{3z} = \frac{1}{5} R_{3z1} + R_{3z2} + \dots + R_{3z5} \quad (2.85)$$

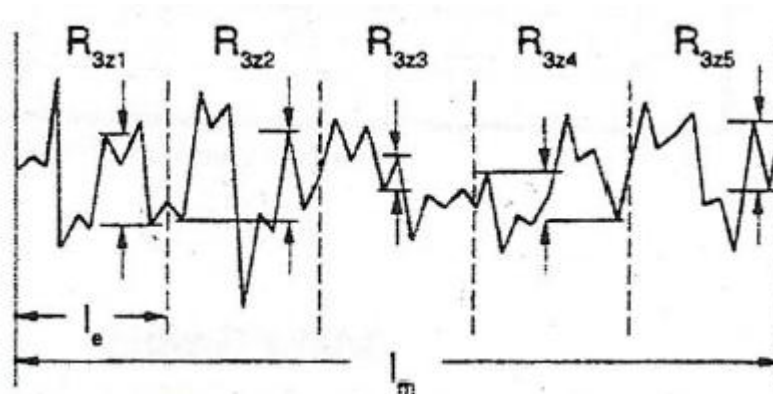


Figura 2.12 – Parâmetro de Rugosidade R3z

Onde:

l_e : comprimento de amostragem

Parâmetro Rc: é o valor médio aritmético das amplitudes de todos os picos e vales, dado pela Eq. (2.86) e ilustrado na Fig. 2.13.

$$R_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{pi} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{vi} \quad (2.86)$$

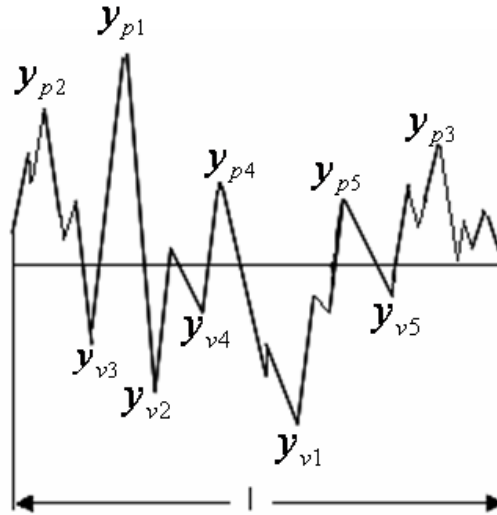


Figura 2.13 – Parâmetro de Rugosidade R_c

Onde

y_{vi} são as medidas dos vales

y_{pi} são as medidas dos picos

Rrms: é o valor médio eficaz da rugosidade, que representa a média dos desvios médios quadráticos das alturas médias. É o desvio padrão da distribuição estatística das alturas, ou seja, a raiz quadrada da variância, dado pela Eq. (2.87). Ressalta-se que o parâmetro Rrms tem a mesma definição de Rq, isto de acordo com as normas consultadas para este trabalho.

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \int_0^L (y(x))^2 dx} \quad (2.87)$$

CAPÍTULO III

METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo descrever a metodologia e os procedimentos experimentais utilizados para o monitoramento da vida da ferramenta, na operação de torneamento cilíndrico externo a seco, a partir da aquisição dos dados de vibrações em situações reais. Os materiais e equipamentos utilizados foram disponibilizados, respectivamente pelo LEPU e LVA (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem e Laboratório de Vibração e Acústica) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

3.1 Metodologia

Na realização deste trabalho foi utilizado um torno mecânico com variação contínua de velocidade, para o processo de torneamento a seco de aço inox, sem variar as condições de corte mantendo constante a velocidade de corte e o avanço, sendo avaliado o desgaste de cinco ferramentas de corte, no qual foi utilizado como critério de fim de vida a quebra da ferramenta.

Foram coletados sinais de vibração ao longo de cada passada, sendo a aquisição iniciada no instante em que a ferramenta tocava a peça, através de dois acelerômetros posicionados no porta-ferramentas, um na horizontal e o outro na vertical utilizando um sistema de aquisição. Os sinais de vibração medidos foram armazenados em disco rígido, para que fossem analisados posteriormente.

A textura da superfície foi determinada pelos parâmetros de rugosidade medidos ao final de cada passada, após uma passada inicial, para diminuir o erro de excentricidade na

peça usinada. Foram realizadas duas medidas da rugosidade superficial, uma no início e outra no fim da peça a partir do contra-ponta. Para estas medições foi utilizado um rugosímetro da Taylor-Hobson Surtronic +3, o qual fornece 32 parâmetros ajustado com comprimento de amostragem de 8 mm. O parâmetro Ra normalmente utilizado tem como desvantagem não esclarecer ou caracterizar a variabilidade dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado, por isso, a necessidade de se analisar outros parâmetros. As alterações dos parâmetros de rugosidade foram analisados em relação ao tempo (s) de cada passada, buscando qual apresentasse uma curva semelhante à curva dos sintomas aplicada a Weibull na manutenção preditiva.

Ao chegar a falha cada ferramenta, foi levada ao estéreo microscópio com ampliações de 45 vezes para verificar o tipo de desgaste.

Para encontrar os parâmetros da distribuição de Weibull no domínio do tempo, primeiramente calcula-se t_0 (vida mínima) usando o tempo de usinagem de cada ferramenta. Este é determinado via otimização, no MATLAB, o qual utiliza a frequência acumulada observada e o tempo de vida das ferramentas, como dados de entrada.

Tendo encontrado t_0 calcula-se os parâmetros de Weibull η e β , através da transformação linear da função de probabilidade de Weibull $F(t)$, dada pela Eq. (3.1).

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.1)$$

O processo de linearização de $F(t)$ está desenvolvido passo a passo nas Eq. (3.2) à (3.7):

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.2)$$

$$F(t) - 1 = - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.3)$$

$$\ln(F(t) - 1) = \ln \left[- \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \right] \quad (3.4)$$

$$\ln(F(t) - 1) = -\left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^\beta \quad (3.5)$$

$$\ln(\ln(F(t) - 1)) = \beta \ln(t - t_0) - \beta \ln(\eta) \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow Y = a.X + b \quad (3.7)$$

Na Eq. (3.6), $Y = \ln(\ln(F(t) - 1))$, que é um valor conhecido, $X = \ln(t - t_0)$ também conhecido, $a = \beta$ e $b = \beta \ln(\eta)$, os quais podem ser encontrados através da regressão linear dados pela Eq. (3.8) e Eq. (3.9) respectivamente.

Onde:

$$a = \frac{n * \sum(X * Y) - \sum(X) * \sum(Y)}{n * \sum(X^2) - (\sum X)^2} \quad (3.8)$$

$$b = \frac{\sum Y}{n} - a * \frac{\sum X}{n} \quad (3.9)$$

A Fig. 3.1 tem-se o esquema do procedimento para minimizar o erro e encontrar e os parâmetros da função de Weibull.

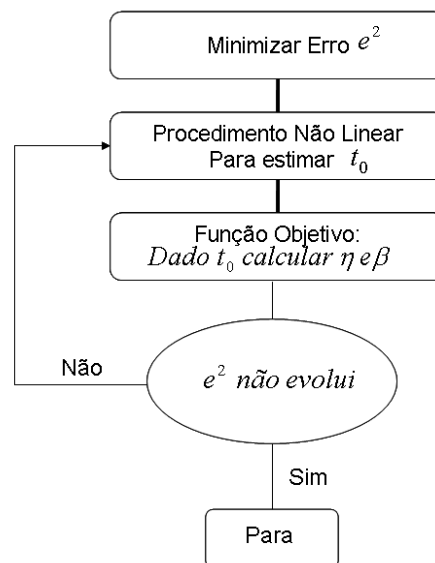


Figura 3.1 – Esquema para minimizar o erro

Conhecendo estes resultados os parâmetros da distribuição de Weibull ficam definidos e pode-se fazer a análise estatística e consequentemente encontrar a confiabilidade, a média, o desvio padrão, o tempo médio entre falhas e pode-se através do valor de β indicar se a falha é de partida, aleatória ou por desgaste.

Para a utilização dos dados coletados é necessário que haja um pré-processamento, utilizando técnicas de redução de dados, cuja finalidade é gerar um conjunto de dados que contenha as principais informações do sinal. Os sintomas vibratórios estudados foram constituídos pelos níveis de potência de aceleração em 26 bandas de frequências de 1/3 de oitava centradas entre 10 e 3160 Hz e cinco sintomas estatísticos no domínio do tempo. As bandas de frequências analisadas foram centradas em 10, 12.5, 16, 20, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 316, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 e 3160. Os sintomas estatísticos estudados são: nível médio quadrático global (rms), valor máximo de pico (p), fator de crista (Fc), curtose (C) e Assimetria (As).

A partir dos dados adquiridos e estimados, calcula-se o coeficiente de correlação de Pearson entre as bandas de frequências e os oito parâmetros de rugosidade escolhidos. Calcula-se também o coeficiente de correlação entre os sintomas estatísticos e os parâmetros de rugosidade, selecionando então o maior coeficiente de correlação dentre estes. Nesta etapa tem-se a escolha das frequências ou parâmetros estatísticos que serão utilizados no procedimento aplicado a manutenção preditiva que visa calcular os valores limites de vibrações, este processo é desenvolvido para o canal 1 e para o canal 2. Ajustando este resultado à distribuição de Weibull, podem-se encontrar os seus parâmetros e assim definir o tipo de falha da ferramenta e o momento ideal de troca da mesma.

Assumindo a função densidade de probabilidade de Weibull para $p(S)$ na Eq. (3.10) e Neymann-Pearson na Eq. (3.11), encontra β_p a razão de pane e de forma análoga a razão de alerta α_a :

$$p(S) = \frac{k}{S_0 - S_n} \left(\frac{S - S_n}{S_0 - S_n} \right)^{k-1} \exp - \left(\frac{S - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k \quad (3.10)$$

$$A_w = P_g \int_{S_b}^{\infty} p(S) dS \quad (3.11)$$

Para fazer a estimação dos valores limites de vibrações, considere $\frac{A}{P_g} = 5\%$, e

$P_g = 95\%$, e usando a Eq. (3.12) calcula-se o fator forma através dos dados coletados, e empregando os sintomas de vibração nas frequências escolhidas via procedimento descrito anteriormente, encontra-se uma aproximação para k onde:

$$k = \frac{\bar{S} - S_n}{\sigma_s} \quad (3.12)$$

Onde:

$\bar{S}$ é a média dos sintomas

S_n o valor mínimo do sintoma

σ_s é o desvio padrão dos sintomas

Em segundo momento faz-se a estimação dos valores limites S_L , aplicando estes resultados a Eq. (3.13) obtém o valor característico S_0 .

$$S_0 = S_n + (\bar{S} - S_n) \Gamma^{-1}(1 + 1/k) \quad (3.13)$$

Utilizando as Eqs. (3.14) e (3.15), encontram-se os valores de alerta S_a e S_b de pane, ajusta-se Weibull pelos sinais de vibrações, utilizando os resultados já obtidos.

$$\frac{A_w}{P_g} = \int_{S_b}^{\infty} p(S) ds = \exp - \left(\frac{S_b - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k \quad (3.14)$$

$$\frac{A_w}{P_g} = \int_{S_a}^{S_b} p(S) ds = \exp \left[- \left(\frac{S_a - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{S_b - S_n}{S_0 - S_n} \right)^k \right] \quad (3.15)$$

3.2 Equipamentos utilizados e montagem do sistema de medição

Para a realização dos experimentos foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Ferramenta de corte de metal duro revestida SNMG 120404 MF, classe M.
- Suporte PSSNR 2020K12
- Duas barras de aço inoxidável astermitico 316 de comprimento inicial de 500 mm e diâmetro de 100 mm
- Torno com variação contínua de velocidade Revolution RV-220, da Deb`Maq, com 7,5 CV de potência e rotação máxima de rpm.
- Dois acelerômetros piezoelétricos da Bruel & Kjaer tipo 4371
- Condicionador e amplificador de sinais da Bruel & Kjaer, modelo NEXUS.
- Placa da aquisição da Hi-Speed USB Carrier – N1USB – 9162
- Software para aquisição de dados LabView, da National Instruments,
- Calibrador Bruel & Kjaer tipo 4294 com ganho de $10mV / ms^{-2}$
- Rugosímetro portátil da Taylor-Hobson Surtronic +3 com *Cut-off* de 0,8 mm
- Microscópio Olympus SZ61, com software Image – Pro Express.

Foram realizados 35 ensaios, mantendo-se a velocidade de corte em 200 m/min ($V_c = 200$ m/min), o avanço de 0.15 mm/volta ($f = 0.15$ mm/v) e profundidade de corte de 1.0 mm ($a_p = 1.0$ mm), variando a rotação e a velocidade de avanço a cada passada da ferramenta, para garantir que as condições de corte permanecessem as mesmas a cada ensaio. As condições de corte do processo foram baseadas na experiência dos profissionais especializados. Os sinais de vibração foram adquiridos com uma frequência de 8192 Hz.

O esquema de monitoramento utilizado no experimento é apresentado na Fig. 3.2.

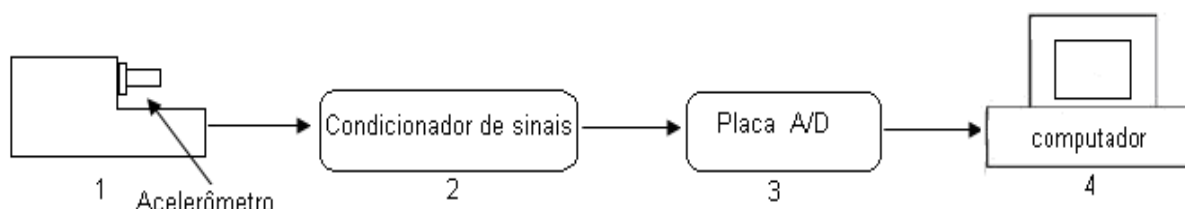


Figura 3.2 – Representação do esquema de monitoramento

A foto do sistema de monitoramento é mostrada na Fig. 3.3.



Figura 3.3 - Foto da montagem do sistema de monitoramento

Os acelerômetros foram acoplados em posições estratégicas para que a captura do sinal fosse a mais eficiente possível, um na horizontal e o outro na vertical, e os sinais foram adquiridos ao longo de cada passada, sendo a aquisição iniciada no instante em que a ferramenta tocava a peça.

Na Fig. 3.4 é mostrado o posicionamento dos acelerômetros, um na torre e outro no porta-ferramenta, o acelerômetro na horizontal foi chamado de canal 1 e o da vertical de canal 2.

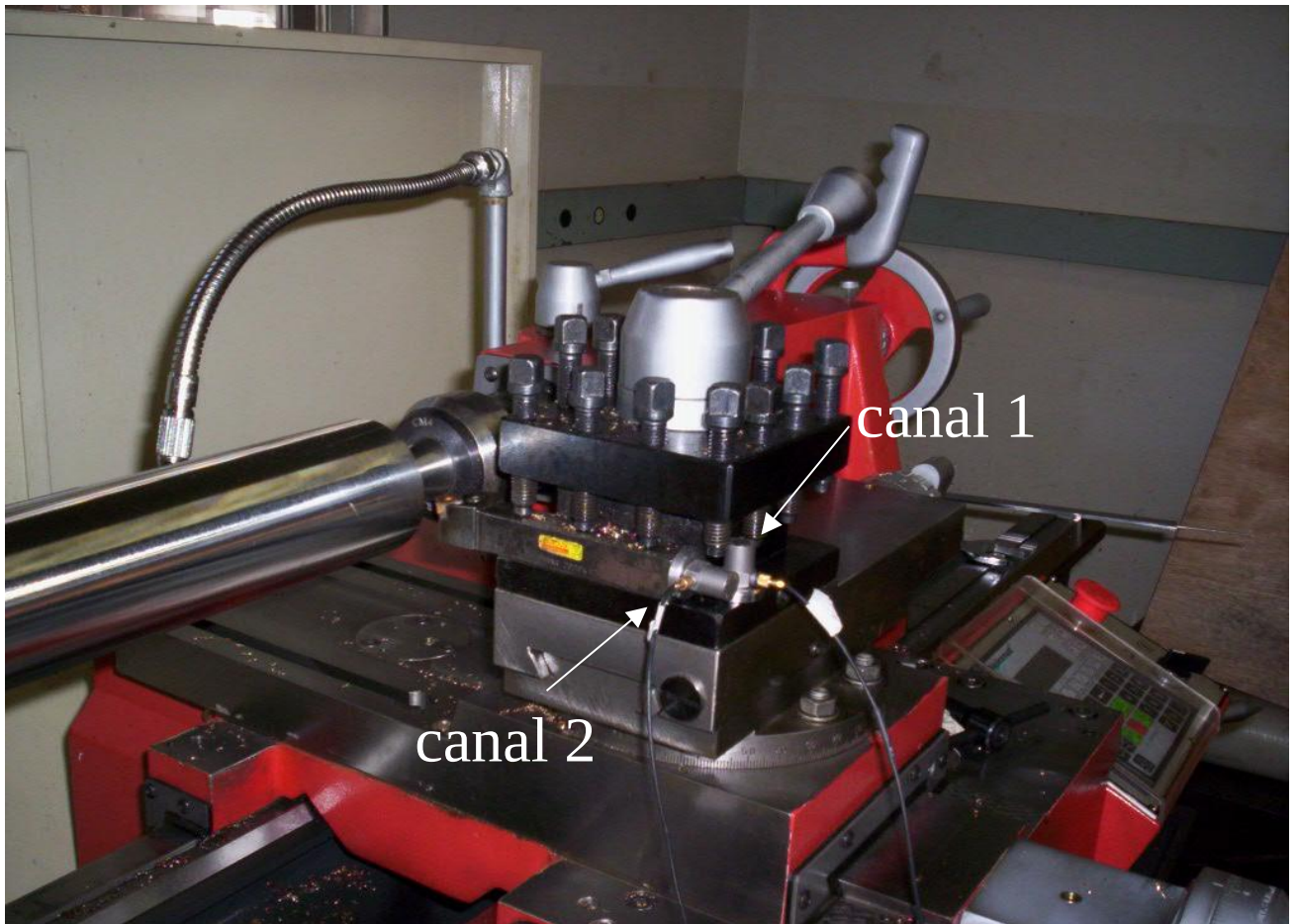


Figura 3.4 - Posicionamento dos acelerômetros

As fórmulas usadas para calcular as variáveis utilizadas nos ensaios estão expressas pelas Eqs. de (3.16) à (3.18):

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n_r}{1000} \quad (3.16)$$

$$V_f = n * f \quad (3.17)$$

$$t = \frac{Z}{V_f} \quad (3.18)$$

Onde:

V_c é a velocidade de corte (m/min)

V_f é a velocidade de avanço (mm/volta)

n_r é número de rotações (rpm)

d é o diâmetro da peça (mm)

f é o avanço (mm/volta)

Z é o comprimento da peça (mm)

t é o tempo de cada passada (s)

No procedimento experimental foram utilizadas cinco ferramentas novas, e duas barras novas, sendo uma colocada no início do ensaio com a ferramenta 1 e a outra no ensaio da ferramenta 4.

As condições de usinagem para cada ferramenta estão especificadas nas Tabs. 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 e 3.5. Para todas as condições foi utilizado uma profundidade de usinagem (ap) de 1 mm, uma velocidade de corte (V_c) de 200 m/min e de avanço (f) de 0.15 mm/volta, variando a rotação e a velocidade de avanço (V_f) mm/min.

Tabela 3.1 - Parâmetros de torneamento para ferramenta 1

Teste	Diâmetro $\varnothing$ (mm)	Velocidade de avanço V_f (mm/min)	Rotação (n) (rpm)
1	86	111	740
2	84	114	758
3	82	116	776
4	78	122	816
5	76	126	838
6	74	129	860
7	72	133	884
8	70	136	909

Tabela 3.2 - Parâmetros de torneamento para ferramenta 2

Teste	Diâmetro Ø (mm)	Velocidade de avanço Vf (mm/min)	Rotação (n) (rpm)
1	68	140	936
2	66	145	964
3	64	149	995
4*	62	154	1027
5	62	154	770
6	60	159	796
7	58	165	823
8	56	171	853
9	54	177	884
10	52	184	918
11	50	191	955

*Descartou o ensaio 4, pois neste, a rotação atingiu um nível tão alto que resultou em esforços que travou o torno. Para continuar o experimento, diminuiu-se a velocidade de corte para 150 m/min, que a princípio estava de 200 m/min.

Tabela 3.3 - Parâmetros de torneamento para ferramenta 3

Teste	Diâmetro Ø (mm)	Velocidade de avanço Vf (mm/min)	Rotação (n) (rpm)
1	100	95	637
2	98	98	650
3	96	99	663
4	94	102	677
5	92	104	692
6	90	106	707
7	88	108	733
8	86	111	740

Tabela 3.4 - Parâmetros de torneamento para ferramenta 4

Teste	Diâmetro $\varnothing$ (mm)	Velocidade de avanço V_f (mm/min)	Rotação (n) (rpm)
1	84	114	758
2	82	116	776
3	80	119	796
4	78	122	816
5	76	126	837

Tabela 3.5 - Parâmetros de torneamento para ferramenta 5

Teste	Diâmetro $\varnothing$ (mm)	Velocidade de avanço V_f (mm/min)	Rotação (n) (rpm)
1	93	102	685
2	91	105	700
3	89	107	716

Para as ferramentas 1 e 2 manteve-se as condições iniciais de corte durante todos os ensaios. Na ferramenta 2, quando a rotação chegou a 1027 rpm o torno travou. Para continuar diminuiu-se a velocidade de corte para 150 m/min. Na ferramenta 4 e 5 os testes foram realizados sem problemas com a velocidade de 200 m/min.

A ferramenta 5 foi analisada separadamente, visto que ela é usada para validação dos resultados encontrados e a partir de agora será chamada de ferramenta validação.

Para o acompanhamento do desgaste da ferramenta a cada passo foi medida a rugosidade no início e no fim da peça a partir do contra-ponta utilizando um rugosímetro portátil da Taylor-Hobson Surtronic +3. A Fig. 3.5 ilustra o posicionamento do rugosímetro na peça. Os níveis dos sinais de vibração também foram monitorados visando estabelecer correlações entre o desgaste da ferramenta com o aumento dos níveis dos sinais de vibração, dados estes que serão utilizados para encontrar os parâmetros de Weibull e posteriormente estimar o tempo de vida da ferramenta, via monitoramento de sintomas vibratórios. Para as medições de vibrações foi utilizado um analisador desenvolvido no LVA.



Figura 3.5 – Medição da rugosidade utilizando um rugosímetro digital

Os dados obtidos foram analisados e utilizados no processo para validação da metodologia proposta, visando verificar o comportamento e evolução do desgaste da ferramenta, bem como na identificação do momento adequado para substituição da mesma.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de torneamento e sua análise. Pretende-se identificar o momento ideal de troca da ferramenta de corte, através da análise de vibração e da rugosidade superficial da peça usinada.

4.1 Resultados

Esta pesquisa visa relacionar os sinais de vibração com o tempo de vida da ferramenta de corte, através de sensores colocados na torre e no porta ferramenta, e a partir daí relacionar o aumento de desgaste com os parâmetros de rugosidade da peça usinada.

4.1.1 Tipos de Desgaste

Ao chegar ao fim de vida, as ferramentas de corte foram levadas ao estéreo microscópio para verificar o tipo de desgaste, empregando uma ampliação de 45 vezes. A ferramenta 1 quebrou na terceira passada, a ferramenta 2 quebrou na oitava passada, a 3 na décima primeira, a 4 na oitava e a 5 na quinta passada. Nas figuras seguintes apresentam-se os tipos de desgaste ocorrido em cada uma das ferramentas.

Na Fig. 4.1 (a) observa-se o lascamento da superfície de folga, e na Fig. 4.1 (b) tem-se o desgaste de cratera ocorrido na superfície de saída, ambas da ferramenta 1.

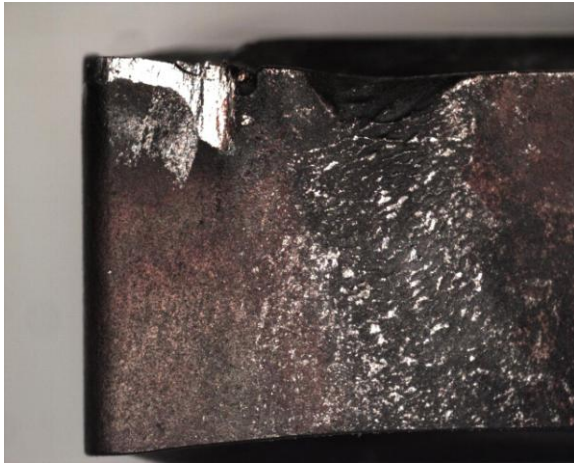
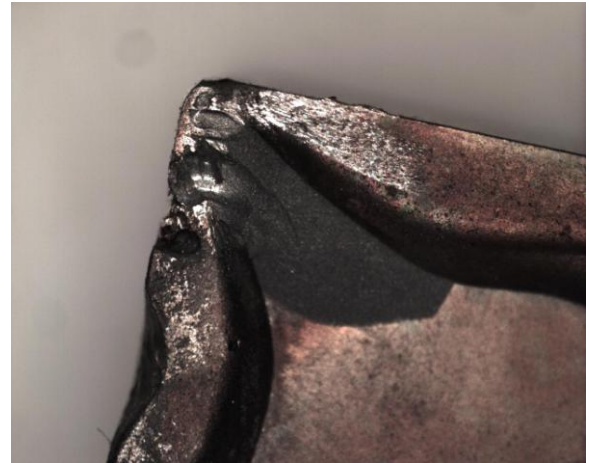


Figura 4.1 - Ferramenta 1 (a)



(b)

A falha ocorrida na ferramenta 2 foi o lascamento, como é mostrado na Fig. 4.2 (a), a superfície de folga, e na Fig. 4.2 (b) tem-se a superfície de saída.



Figura 4.2 - Ferramenta 2 (a)

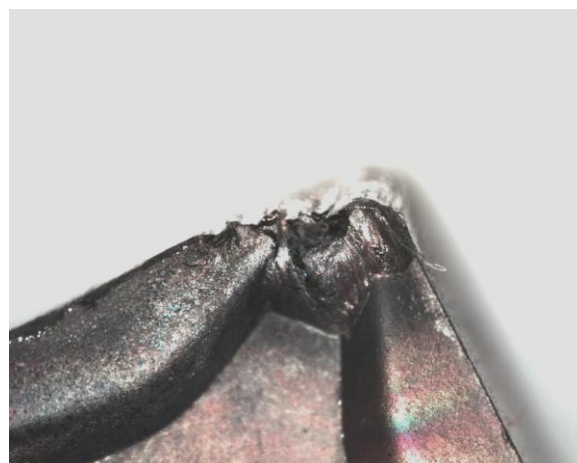


(b)

Na Fig. 4.3 (a) é mostrado o desgaste de flanco da superfície de folga da ferramenta 3, e na Fig. 4.3 (b) tem-se o desgaste de cratera ocorrido na superfície de saída.



Figura 4.3 - Ferramenta 3 (a)

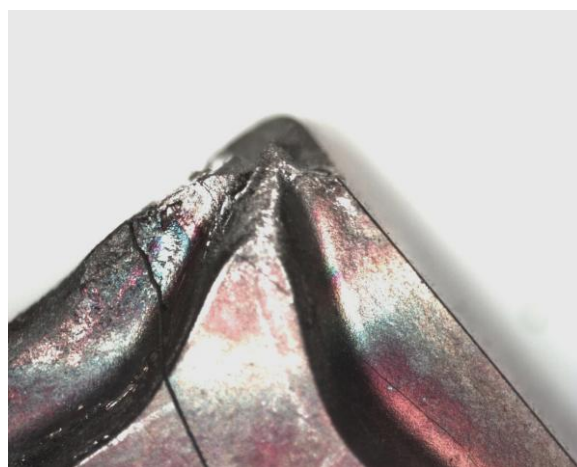


(b)

Na Fig. 4.4 (a) é ilustrado o lascamento com trincamento da superfície de folga, e na Fig. 4.4 (b) observa-se o lascamento e a quebra ocorrido na superfície de saída, ambas da ferramenta 4.



Figura 4.4 - Ferramenta 4 (a)



(b)

Observa-se que todas as ferramentas chegaram à trinca e/ou lascamento nas superfícies. As ferramentas 2 e 4 alcançaram a quebra com ruptura. As trincas e os lascamentos já eram esperados, pois o critério de parada foi à quebra das ferramentas.

4.1.2 Escolha do Parâmetro de Rugosidade

Para a escolha dos parâmetros de rugosidade que evoluem com o desgaste da ferramenta e identificar os sintomas vibratórios correlacionadas com a rugosidade, foram

analisados os dados dos experimentos realizados no laboratório da Universidade Federal de Uberlândia, através da análise descritiva dos gráficos resultante.

A escolha dos parâmetros de rugosidade baseou-se em primeiro momento na análise gráfica, na qual foi analisada a evolução da rugosidade superficial em relação ao tempo, buscando qual destes mais se aproximasse da curva dos sintomas de Weibull. Na Fig. 4.5 tem-se um exemplo de um dos parâmetros (μm) que foram descartados. Nota-se que o parâmetro Rsk teve um crescimento inconsistente em relação ao tempo.

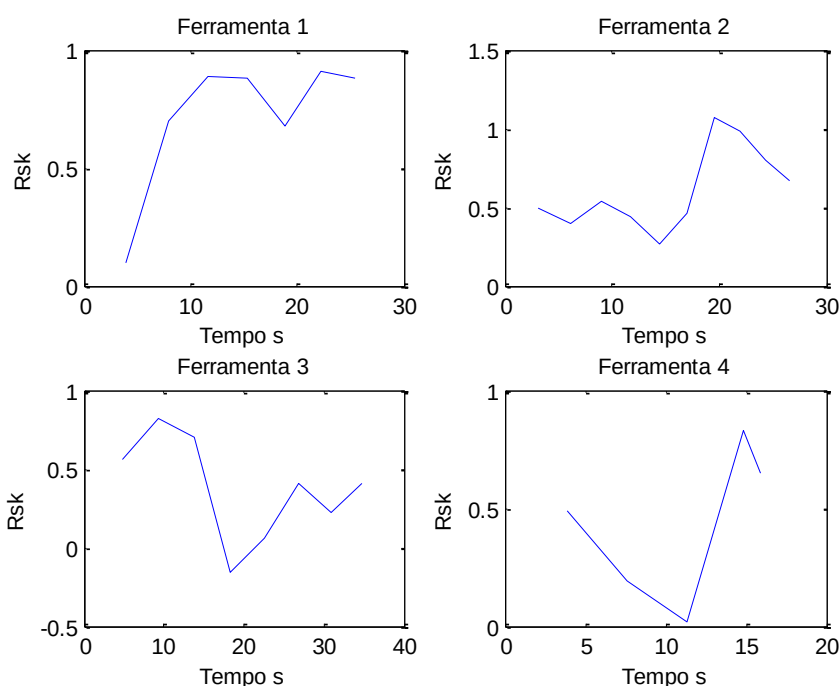


Figura 4.5 - Parâmetro Rsk para as quatro ferramentas na parte inicial da barra

Os resultados obtidos apontaram que a posição da medida da rugosidade na barra teve influência nos valores observados, sendo assim os valores de rugosidade da parte inicial foram descartados, pois todos os parâmetros evoluíram de maneira inconsistente, ou seja, não seguiram uma mesma evolução com o tempo total do processo. Como exemplo tem-se o resultado do parâmetro Ra, mostrados na Fig. 4.6:

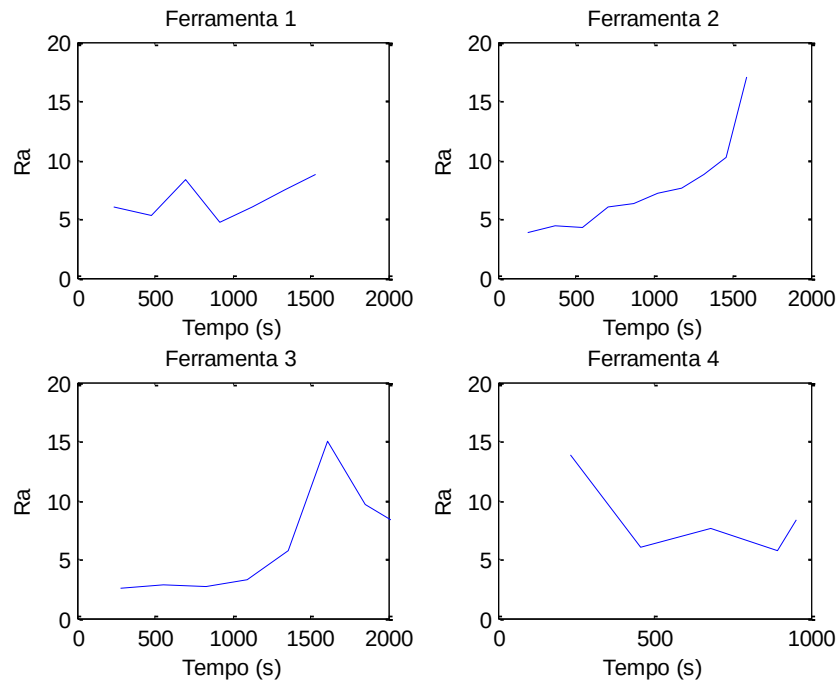


Figura 4.6 - Parâmetro Ra para as quatro ferramentas na parte inicial da barra

Diante do aumento dos parâmetros em relação ao tempo para as quatro ferramentas conforme pode ser observado nas figuras de 4.7 a 4.14 foi feita a escolha dos parâmetros de rugosidade e da opção de analisar os valores de rugosidade da parte final da peça usinada.

Nas Fig. 4.7, 4.8, 4.9, 4.12, 4.13 e 4.14 observa-se que os parâmetros Ra, Rp, Rq, R3z, Rc e Rrms, respectivamente, das ferramentas aumentaram de forma esperada em relação ao tempo. Enquanto que na Fig. 4.10 e 4.11 observa-se que os parâmetros Rt e Rz tiveram um pequeno decréscimo na ferramenta 3 no final do ensaio.

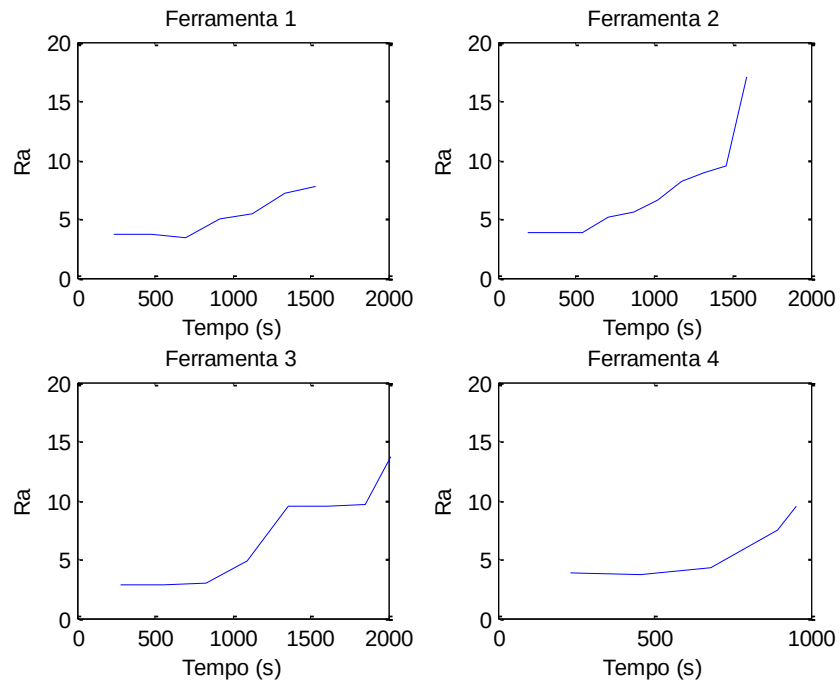


Figura 4.7 - Parâmetro Ra para as quatro ferramentas na parte final da barra

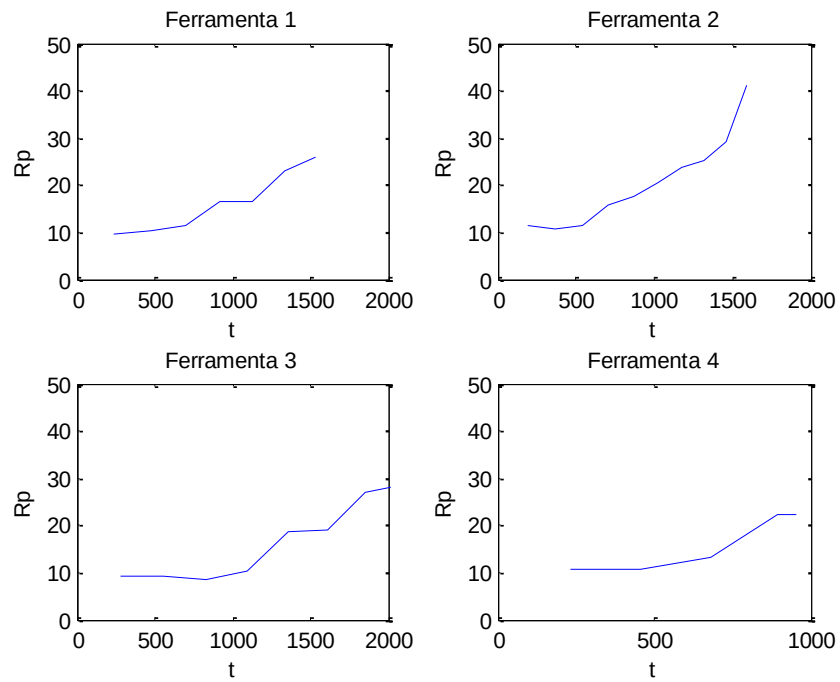


Figura 4.8 - Parâmetro Rp para as quatro ferramentas na parte final da barra

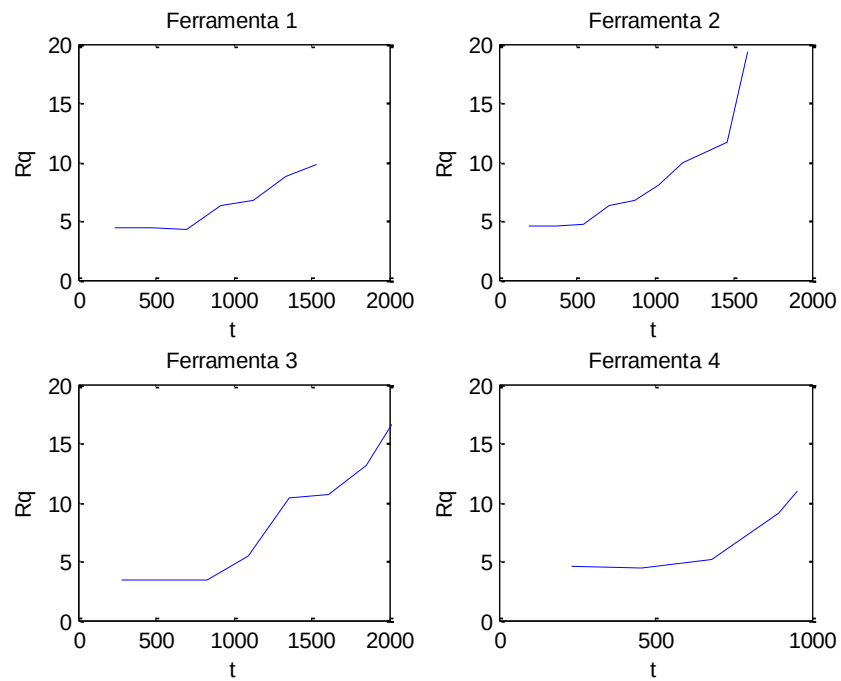


Figura 4.9 - Parâmetro Rq para as quatro ferramentas na parte final da barra

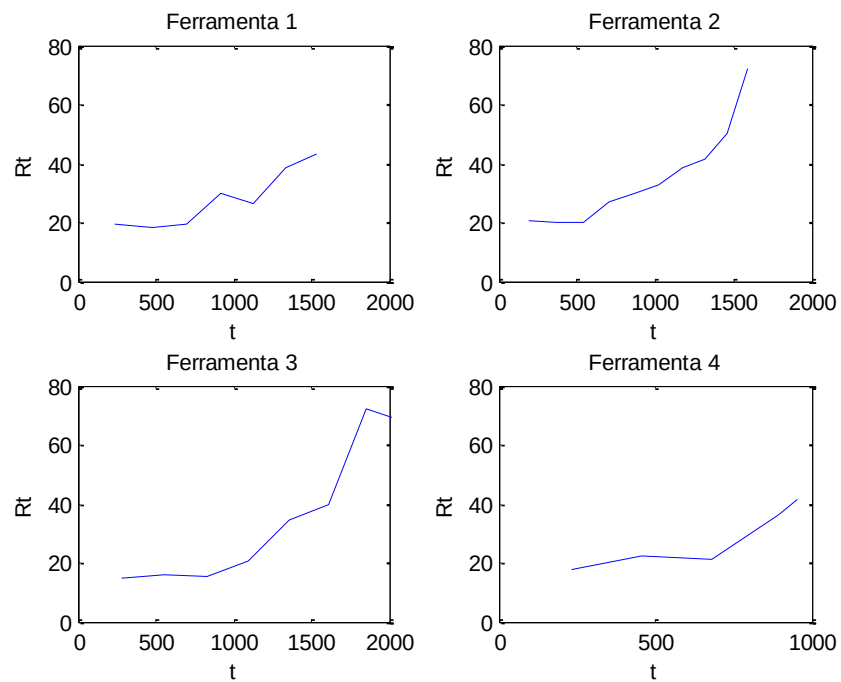


Figura 4.10 - Parâmetro Rt para as quatro ferramentas na parte final da barra

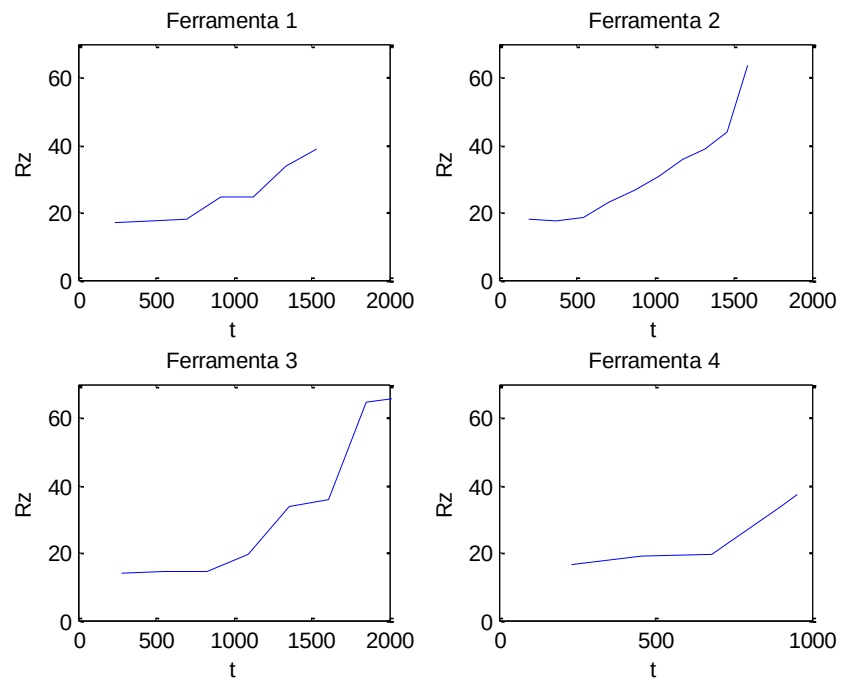


Figura 4.11 - Parâmetro Rz para as quatro ferramentas na parte final da barra

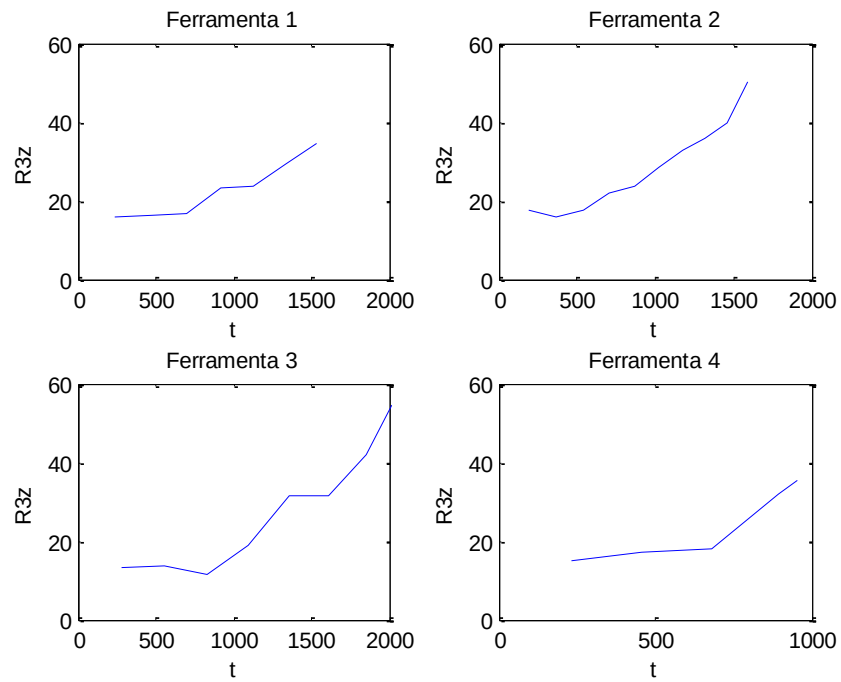


Figura 4.12 - Parâmetro R3z para as quatro ferramentas na parte final da barra

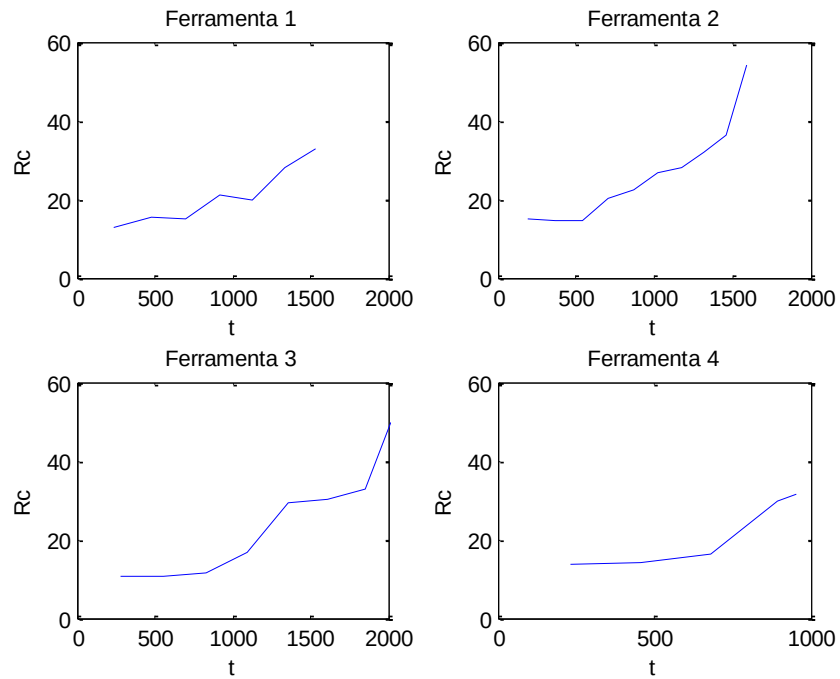


Figura 4.13 - Parâmetro R_c para as quatro ferramentas na parte final da barra

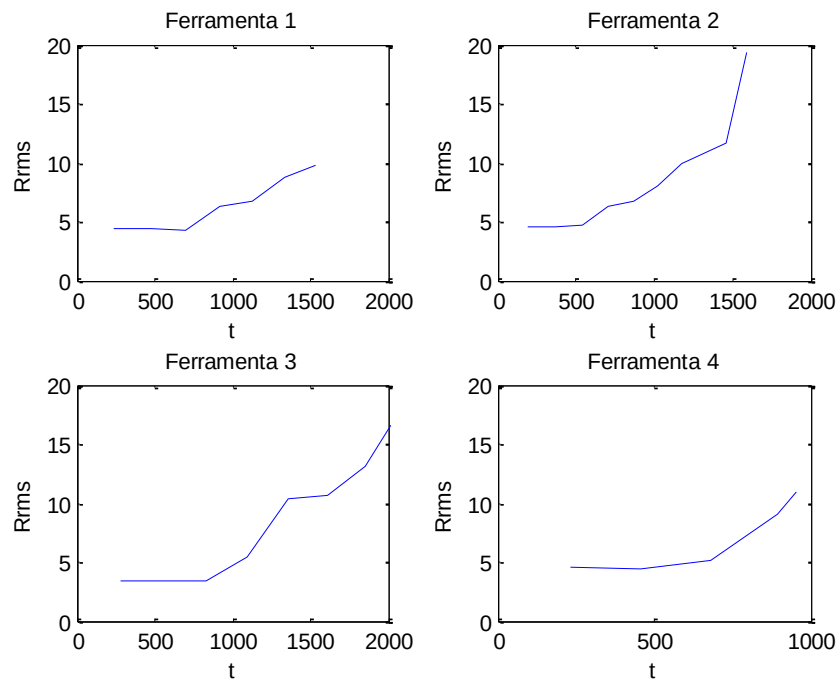


Figura 4.14 - Parâmetro R_{rms} para as quatro ferramentas na parte final da barra

Observa-se nestes parâmetros escolhidos que estes aumentam segundo um padrão comum com o tempo total do processo para as quatro ferramentas de corte. O próximo

passo será correlacionar os sinais de vibração com os parâmetros de acabamento superficial.

4.1.3 Determinação do Sintoma Vibratório

Os parâmetros estatísticos e as primeiras bandas de frequência, não apresentaram um aumento significativo e coerente em relação ao tempo de usinagem, tanto para o Canal 1 como para o canal 2. As Figs. 4.15 e 4.16 apresentam os gráficos do canal 1 e do Canal 2, respectivamente, do valor rms para as ferramentas 1, 2, 3 e 4 em função do tempo.

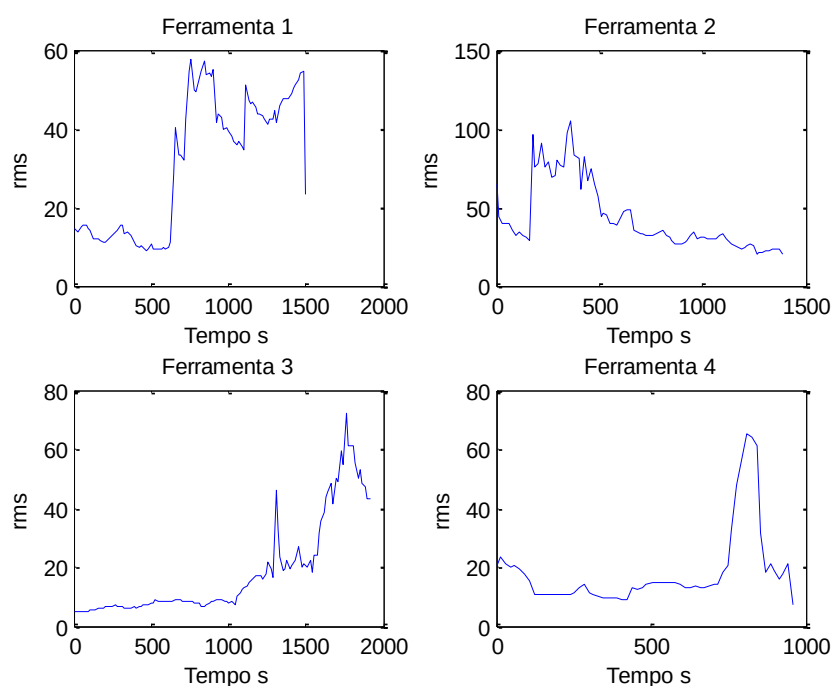


Figura 4.15 – Evolução do rms com o tempo para o Canal 1

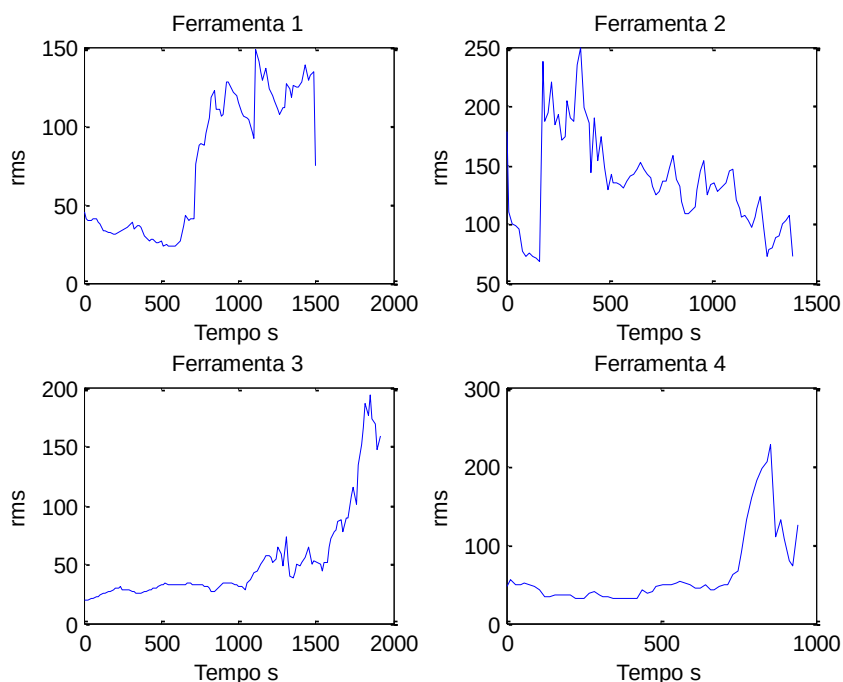


Figura 4.16 – Evolução do rms com o tempo para o Canal 2

O procedimento utilizado para determinar quais os sintomas vibratórios serão usados no procedimento de manutenção preditiva, baseia-se no coeficiente de correlação entre estes com os parâmetros de rugosidade escolhidos. Esta análise foi feita para o canal 1 e 2, para as quatro ferramentas.

Na Tab. 4.1 tem-se os de coeficiente de correlação dos parâmetros estatísticos e os parâmetros de rugosidades, para o canal 1.

Tabela 4.1 – Coeficiente de correlação entre parâmetros de rugosidade e parâmetros estatísticos (Canal 1)

Parâmetros	Ra	Rp	Rq	Rt	Rz	R3z	Rc	Rrms
Rms	0,2521	0,3890	0,3006	0,3857	0,3653	0,3345	0,3203	0,3006
Pico	0,4108	0,5069	0,4599	0,5570	0,5303	0,4715	0,4445	0,4599
Fc	-0,0575	-0,2617	-0,0987	-0,1384	-0,1327	-0,1619	-0,1661	-0,0987
As	-0,3789	-0,5500	-0,3884	-0,3410	-0,3440	-0,4197	-0,4278	-0,3884
c	0,0569	-0,1468	0,0212	-0,0090	-0,0055	-0,0513	-0,0684	0,0212

Com relação aos parâmetros estatísticos notam-se coeficientes de correlação baixos, sendo o melhor dentre eles o $r = 0.5570$ correspondente ao pico e R_t .

A Tab. 4.2 traz os coeficientes de correlação entre parâmetros de rugosidade e níveis de potência vibratória em bandas de 1/3 de oitava do Canal 1.

Tabela 4.2 – Coeficiente de correlação entre parâmetros de rugosidade e níveis de potência vibratória em bandas de 1/3 de oitava (Canal 1)

Frequências	Ra	Rp	Rq	Rt	Rz	R3z	Rc	Rrms
10	0,3104	0,4375	0,3255	0,3375	0,3206	0,3159	0,3187	0,3255
12.5	0,1885	0,4313	0,2296	0,2976	0,2664	0,2536	0,2483	0,2296
16	0,2688	0,4589	0,3016	0,3329	0,3160	0,3335	0,3195	0,3016
20	0,2820	0,4913	0,3151	0,3449	0,3278	0,3468	0,3388	0,3151
25	0,2560	0,4763	0,2877	0,3266	0,3005	0,3068	0,2999	0,2877
31.5	0,2959	0,5405	0,3250	0,3498	0,3217	0,3461	0,3381	0,3250
40	0,3469	0,5595	0,3648	0,3570	0,3309	0,3790	0,3688	0,3648
50	0,3309	0,5115	0,3496	0,3479	0,3200	0,3609	0,3413	0,3496
63	0,2048	0,3774	0,2280	0,2646	0,2258	0,2428	0,2200	0,2280
80	0,3996	0,5478	0,4272	0,4667	0,4320	0,4351	0,3954	0,4272
100	0,4762	0,5682	0,4957	0,4978	0,4797	0,5110	0,4922	0,4957
125	0,4446	0,6389	0,4895	0,5607	0,5267	0,4909	0,4615	0,4895
160	0,3941	0,6337	0,4380	0,5005	0,4647	0,4591	0,4435	0,4380
200	0,2928	0,4882	0,3082	0,2944	0,2850	0,3260	0,3248	0,3082
250	0,4210	0,6412	0,4407	0,4282	0,4083	0,4630	0,4540	0,4407
316	0,3340	0,6012	0,3623	0,3699	0,3405	0,3994	0,4093	0,3623
400	0,1832	0,3690	0,2002	0,2067	0,1775	0,2162	0,2152	0,2002
500	0,0078	0,1204	0,0338	0,0900	0,0613	0,0453	0,0308	0,0338
630	0,1484	0,3363	0,1974	0,3010	0,2642	0,2169	0,1885	0,1974
800	0,4714	0,6627	0,5141	0,5752	0,5451	0,5261	0,4918	0,5141
1000	0,4398	0,6673	0,4858	0,5572	0,5212	0,5033	0,4737	0,4858
1250	0,5365	0,7489	0,5776	0,6260	0,5968	0,5898	0,5638	0,5776
1600	0,5020	0,7537	0,5308	0,5307	0,5081	0,5579	0,5519	0,5308
2000	0,4442	0,6902	0,4621	0,4354	0,4165	0,4925	0,4906	0,4621
2500	0,6574	0,7991	0,6727	0,6343	0,6240	0,6938	0,6834	0,6727
3160	0,6381	0,7753	0,6773	0,7021	0,6885	0,7129	0,7109	0,6773

Observa-se que o maior coeficiente de correlação é aproximadamente 0,7991 e correlaciona a frequência central de 2500 Hz com o correspondente parâmetro de rugosidade superficial Rp.

Na Tab. 4.3 são mostrados os valores dos coeficientes de correlação entre parâmetros de rugosidade e parâmetros estatísticos, para o Canal 2.

Tabela 4.3 – Coeficiente de correlação entre parâmetros de rugosidade e parâmetros estatísticos (Canal 2)

Parâmetros	Ra	Rp	Rq	Rt	Rz	R3z	Rc	Rrms
Rms	0,3446	0,4506	0,3753	0,3958	0,3970	0,4573	0,4304	0,3753
Pico	0,4950	0,6213	0,5337	0,5763	0,5684	0,5977	0,5625	0,5337
Fc	0,0061	-0,0848	-0,0142	-0,0148	-0,0285	-0,1153	-0,0990	-0,0142
As	0,3066	0,3282	0,2461	0,0630	0,0554	0,1732	0,2860	0,2461
c	0,2486	0,1633	0,2472	0,2902	0,2739	0,1388	0,1333	0,2472

Os coeficientes de correlação alcançaram valores significativos, sendo o melhor dentre eles o $r = 0,621$ correspondente ao pico e Rp.

Na Tab. 4.4 são apresentados os coeficientes de correlação entre parâmetros de rugosidade e níveis de potência vibratória em bandas de 1/3 de oitava do Canal 2.

Tabela 4.4 – Coeficiente de correlação entre parâmetros de rugosidade e níveis de potência vibratória em bandas de 1/3 de oitava (Canal 2)

Frequências	Ra	Rp	Rq	Rt	Rz	R3z	Rc	Rrms
10	0,2623	0,1531	0,2288	0,1397	0,1696	0,1996	0,2015	0,2288
12,5	0,2209	0,1350	0,1908	0,1204	0,1437	0,1688	0,1646	0,1908
16	0,0432	-0,0710	0,0075	-0,0856	-0,0616	-0,0076	0,0011	0,0075
20	0,0656	0,0491	0,0626	0,0297	0,0562	0,0952	0,0889	0,0626
25	-0,0510	-0,1908	-0,0875	-0,1537	-0,1280	-0,1173	-0,1178	-0,0875
31,5	0,2056	0,2851	0,2189	0,2310	0,2436	0,2327	0,2302	0,2189
40	0,5772	0,6842	0,5868	0,5542	0,5456	0,6120	0,6074	0,5868
50	0,3829	0,5153	0,4036	0,4098	0,3913	0,4245	0,4067	0,4036
63	0,0466	0,1538	0,0609	0,0811	0,0617	0,0606	0,0611	0,0609
80	0,4945	0,6128	0,5239	0,5649	0,5418	0,5453	0,5021	0,5239
100	0,6349	0,6916	0,6656	0,6885	0,6840	0,7053	0,6700	0,6656
125	0,4173	0,6093	0,4596	0,5198	0,4983	0,4968	0,4680	0,4596
160	0,3078	0,5301	0,3512	0,4165	0,3928	0,4065	0,3766	0,3512
200	0,2396	0,4090	0,2591	0,2579	0,2547	0,3025	0,2810	0,2591
250	0,4690	0,6460	0,4887	0,4857	0,4704	0,5009	0,4937	0,4887
316	0,6349	0,6764	0,6186	0,5656	0,5363	0,4888	0,5767	0,6186
400	0,6690	0,7307	0,6545	0,5971	0,5685	0,5395	0,6203	0,6545
500	0,6528	0,7899	0,6631	0,6420	0,6149	0,6348	0,6608	0,6631
630	0,6931	0,8314	0,7061	0,6955	0,6650	0,6696	0,6992	0,7061
800	0,7371	0,8614	0,7443	0,7206	0,6912	0,6872	0,7268	0,7443
1000	0,7286	0,8538	0,7528	0,7782	0,7460	0,7166	0,7333	0,7528
1250	0,6928	0,8463	0,7262	0,7579	0,7360	0,7356	0,7313	0,7262
1600	0,6173	0,7960	0,6455	0,6596	0,6396	0,6615	0,6606	0,6455
2000	0,5670	0,7563	0,5860	0,5701	0,5527	0,6148	0,6200	0,5860
2500	0,5236	0,6468	0,5415	0,5192	0,5144	0,6022	0,5817	0,5415
3160	0,5235	0,6480	0,5587	0,5730	0,5774	0,6512	0,6205	0,5587

Observa-se que o melhor coeficiente de correlação está na banda de frequência centrada em 800 Hz sendo que o parâmetro de rugosidade correspondente é o Rp, para o Canal 2.

Tem-se nas Figs. 4.17 e 4.18 os gráficos dos coeficientes de correlação versos os parâmetros estatísticos e os níveis de potência vibratória em bandas de 1/3 de oitava do Canal 1 e do Canal 2, respectivamente.

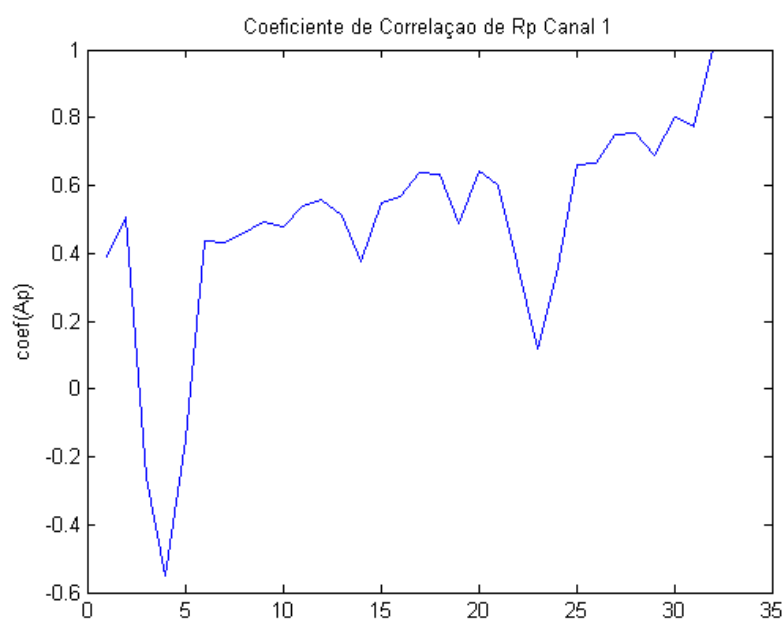


Figura 4.17 – Coeficiente de Correlação Rp do Canal 1

Analisando a Fig. 4.17 percebe-se que o coeficiente de correlação de Rp tem pico no parâmetro 30 para o canal 1, que corresponde na banda centrada na frequência de 2500 Hz.

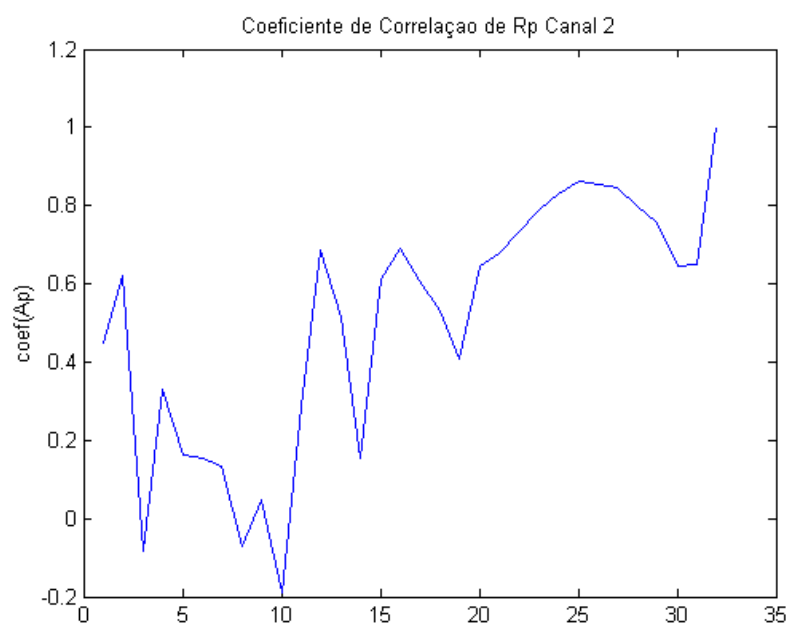


Figura 4.18 - Coeficiente de Correlação Rp Canal 2

A análise da Fig. 4.18 evidencia que o coeficiente de correlação de Rp tem pico no parâmetro 25 para o canal 2 corresponde à frequência de 800 Hz.

Comparando os resultados gráficos das Fig. 4.17 e 4.18, nota-se que o parâmetro de rugosidade R_p teve um maior coeficiente de correlação, sendo este então o parâmetro selecionado para posterior análise dos valores limites de vibrações. Para o canal 1 obteve-se um valor de 0,7991 na frequência de 2500 Hz e para o canal 2 um valor de 0,8614 na frequência de 800 Hz.

4.1.4 Identificação da Vida da Ferramenta Utilizando a Distribuição de Weibull

4.1.4.1 Estimativa do Tempo de Vida da Ferramenta Através da Distribuição de Weibull

Devido à ampla aplicabilidade desta distribuição e à possibilidade de extrair conclusões significativas com relação ao comportamento temporal das taxas de falha, buscou-se ajustar a distribuição de Weibull aos diferentes conjuntos de dados existentes das ferramentas analisadas. Em princípio, trabalhou-se em relação ao tempo de funcionamento de cada ferramenta. Os tempos, em segundos, de vida de cada ferramenta estão especificados na Tab. 4.5.

Tabela 4.5 – Tempo de vida das ferramentas

Ferramenta	Tempo (s)
Validação	480
1	600
2	720
3	840
4	960

Para utilizar a distribuição de Weibull, primeiramente precisam-se encontrar os três parâmetros de Weibull, t_0 , η e β . Para isso utiliza-se a Eq. (2.44), que é a probabilidade de falhas de um item, num dado intervalo de tempo t de operação.

Para determinar t_0 , tempo de operação o qual o equipamento passa a apresentar falhas, foi estimado através de programa de otimização, que minimiza o erro. No qual utilizou a probabilidade acumulativa e o tempo de vida das ferramentas, como dados de entrada. Os tempos de ocorrência de falhas, as frequências observadas e acumuladas de cada ferramenta estão apresentadas na Tab. 4.6.

Tabela 4.6 – Tempo de falhas e frequências observadas

Tempo de Falha (s)	Frequência Observada	Frequência Simples	Frequência Acumulada
360 => 480	1	0,2	0,2
480 => 600	2	0,4	0,6
600 => 720	0	0,0	0,6
720 => 840	1	0,2	0,8
840 => 960	0	0,0	0,8
960=> 1080	1	0,2	1,0
Total:	5	1,0	

O valor encontrado para a vida mínima foi $t_0 = 472(s)$ o qual minimiza o erro de ajuste do tempo de falha com as frequências observadas, este erro obtido foi de 0,0812.

Através deste valor de t_0 , pode-se fazer a transformação linear da probabilidade acumulativa da distribuição de Weibull e assim estimar a vida característica η e o fator de forma β , o qual indica o tipo provável da falha. Na Tab. 4.7 têm-se os resultados obtidos na linearização de $F(t)$:

Tabela 4.7 – Valores da regressão linear

t	F(t)	$Y = \ln\{-\ln[1-F(t)]\}$	$X = \ln(t-t_0)$, $t_0=472$ s
480	0,2	-1,4999	6,1399
600	0,6	-0,0874	6,1356
720	0,6	-0,0874	6,1312
840	0,8	0,4759	6,1269
960	0,8	0,4759	6,1225
1080	1,0	-----	-----

Tomando $\ln(\ln(F(t)-1)) = \beta \ln(t-t_0) - \beta \ln(\eta)$ correspondente a $Y = a.X + b$, Y e X são valores conhecidos, Adotando $a = \beta$ e $b = \beta \ln(\eta)$, estes são encontrados através da regressão linear, através das Eqs. (3.6) e (3.7), Como a é igual a β , e $n=5$, para encontrar η , basta usar a expressão $\eta = \exp(b/\beta)$,

Através deste processo encontra-se $\beta = 0.5$ e $\eta = 183$ s (segundos), tendo estabelecidos os parâmetros de Weibull, pode-se calcular confiabilidade, o tempo médio

entre falhas, o desvio padrão, a média e assim fazer toda a análise estatística necessária. A esperança matemática encontrada foi 0,0118, o desvio padrão de 5,706 e o tempo médio entre falhas é 868,9754 (s).

A análise no tempo indica que o tipo de falha é falha prematura, pois o fator de forma resultou num valor de 0,5, logo a distribuição de Weibull se aproxima da distribuição exponencial, O valor encontrado de η foi de 183 s, que indica o intervalo de tempo entre t_0 e t no qual ocorrem 63,2% das falhas.

A confiabilidade das quatro ferramentas está representada pela Fig. 4.19, como a probabilidade de falha no intervalo de tempo t , é a complementar da confiabilidade esta tem o comportamento inverso da confiabilidade, mas análogo.

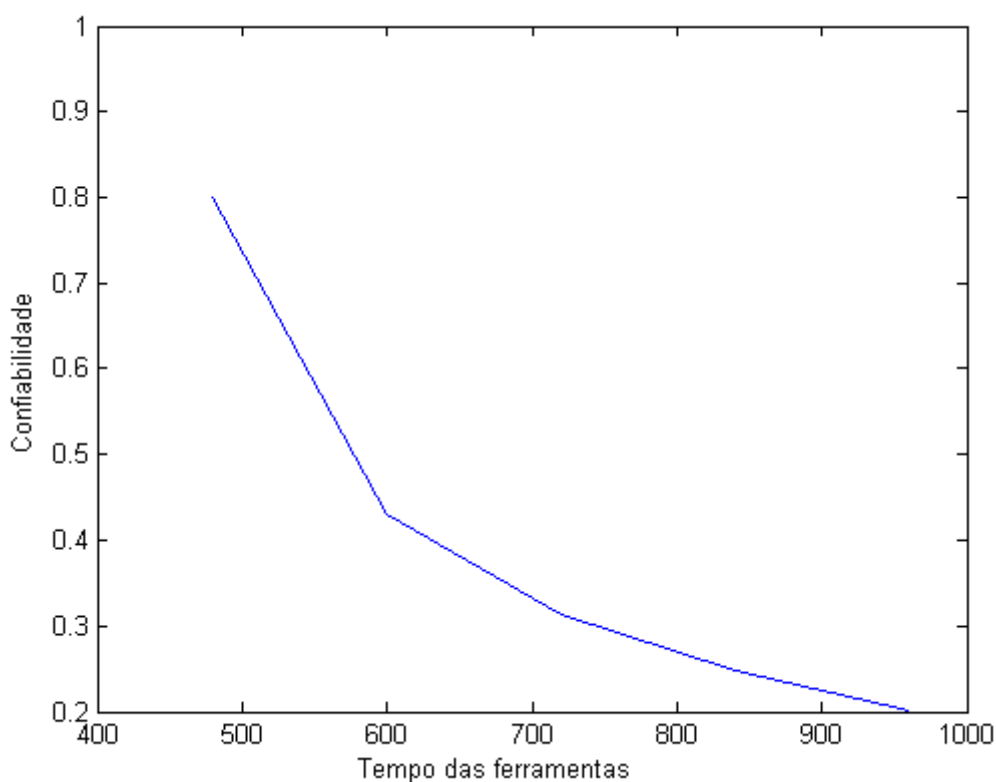


Figura 4.19 – Confiabilidade das quatro ferramentas

Como era esperado, a confiabilidade é decrescente e contínua ao longo do processo. De modo análogo a probabilidade de falhar aumenta na mesma proporção.

4.1.4.2 Estimativa da Vida da Ferramenta Através do Procedimento de Manutenção Preditiva via Distribuição de Weibull

Os sinais de vibração medidos nos testes experimentais inicialmente foram processados e posteriormente reduzidos em um número limitado de dados. De posse destes sinais pode-se ajustar a distribuição de Weibull e definir quais os valores de limites de vibração, conforme exposto no item 2.5 do capítulo 2.

O sintoma vibratório que obteve valores maiores de correlação com o parâmetro R_p foi à frequência de 2500 Hz para o canal 1 e a frequência de 800 Hz para o canal 2, como ilustrado nas Tab. 4.2 e Tab. 4.4 respectivamente.

Considerando $\frac{A_w}{P_g} = 5\%$, e $P_g = 95\%$, valores estes mais utilizados em manutenção preditiva, e estimar os valores de k , λ , S_n , S_0 e então fazer uma previsão do tipo de falha e qual o valor limite de pane e de alerta dos sintomas.

A Eq. (2.68) traz que $k = \frac{\bar{S} - S_n}{\sigma_s}$ então usando os sintomas de vibração nas frequências que mais correlacionaram com o parâmetro de rugosidade R_p , encontra-se uma aproximação para k , que é o fator forma de Weibull e indicada o tipo de falha da ferramenta de corte.

Para o canal 1 o valor encontrado para S_n , que determina o valor mínimo do sintoma foi 1,4618, e o fator forma k foi 2.26 que indica falha por desgaste. Para o canal 2 o valor de S_n , foi 1,2491, e o fator forma k foi 1,6520 que também indica falha por desgaste.

Aplicando estes resultados à equação $S_0 = S_n + (\bar{S} - S_n)\Gamma^{-1}(1+1/k)$ obtém o valor característico S_0 . Na próxima etapa foram utilizadas as Eqs. (2.62) e (2.66), as quais forneceram os valores de alerta e de pane S_a e S_b .

Na Tab. 4.8 são apresentados os resultados para o canal 1 e 2, das quatro ferramentas utilizadas nos ensaios.

Tabela 4.8 – Valores calculados dos sintomas vibratórios

Canal 1		Canal 2	
S_0	6,1053	S_0	2,9459
S_a	8,1774	S_a	4,0603
S_b	9,0065	S_b	4,5457

Os valores encontrados para os valores limites de vibração serão comparados com valores de vibração do último ensaio da ferramenta teste, para validação dos resultados. O procedimento manutenção preditiva usando o método estatístico de Weibull mostrou-se adequado para calcular os valores limites de vibrações para monitorar a vida da ferramenta de corte no processo de torneamento.

4.2 Validação dos Resultados

Para validação dos resultados foram realizados testes com uma ferramenta, sob as mesmas condições das ferramentas anteriores. Para a ferramenta de validação, assim como nas outras, o critério de fim de vida foi à quebra da mesma. A ferramenta de validação quebrou na terceira passada. A Tab. 4.9 apresenta as condições de usinagem desta ferramenta.

Tabela 4.9 - Parâmetros de torneamento para ferramenta de validação

Validação	Diâmetro $\varnothing$ (mm)	Velocidade de avanço V_f (mm/min)	Rotação (n) (rpm)
1	93	102	685
2	91	105	700
3	89	107	716

Na Fig. 4.20 (a), tem-se o desgaste de flanco ocorrido na superfície de folga da ferramenta de validação, e na Fig. 4.20 (b) tem-se o desgaste de cratera ocorrido na superfície de saída.

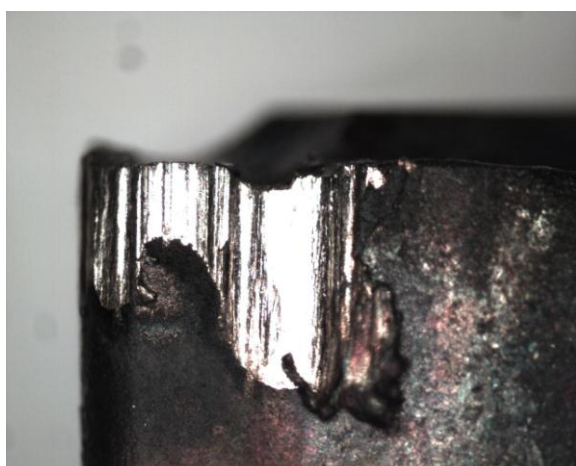


Figura 4.20 Ferramenta de Validação (a)

(b)

As arestas de corte da ferramenta de validação atingiram um nível alto de desgaste assim como as outras ferramentas utilizadas no experimento.

Dos 32 parâmetros de rugosidade superficial estudados escolheram-se oito para analisar, os quais apresentaram maior coerência em relação ao tempo e uma melhor aproximação à curva dos sintomas de Weibull. A posição da medida também apresentou influência nos valores adquiridos, então se optou em analisar a rugosidade da parte final da peça usinada.

A Fig. 4.21 ilustra os parâmetros de rugosidade R_a , R_p , R_q e R_t em função do tempo da peça usinada pela ferramenta de validação.

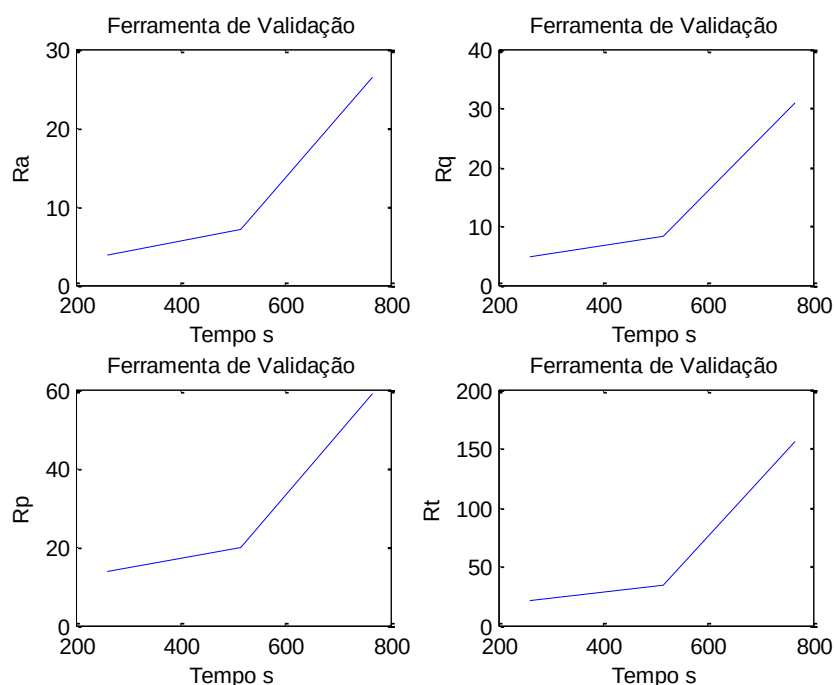


Figura 4.21 - Parâmetro R_a , R_p , R_q e R_t , da ferramenta de validação

Na Fig. 4.22 são mostrados os parâmetros R_z , R_{3z} , R_c e R_{rms} da parte final da peça usinada.

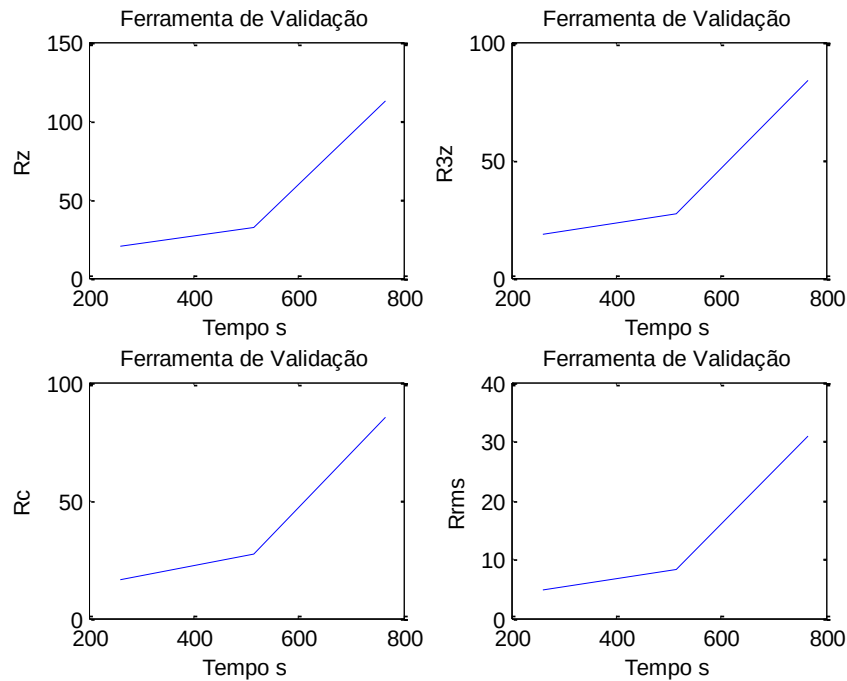


Figura 4.22 - Parâmetro R_z, R_{3z}, R_c e R_{rms}, da ferramenta de validação

As Figs. 4.21 e 4.22 mostram que os parâmetros também aumentam com o tempo e suas curvas aproximam da forma da curva dos sintomas aplicada a Weibull na manutenção preditiva. Dentre os parâmetros de rugosidade superficial analisados, o parâmetro R_p, assim como nos experimentos das quatro ferramentas, foi o que melhor correlacionou com os sintomas de vibração na frequência de 2500 Hz para o canal 1 e 800 Hz para o Canal 2.

De acordo com Cempel (2001) pode-se calcular os valores limites de vibração de um conjunto de máquinas através de seu histórico, usando como referência os resultados obtidos para os parâmetros da distribuição de Weibull, no item 4.1.4.2, pode-se então calcular os valores limites da ferramenta de validação.

A Tab. 4.10 apresenta os valores calculados através de rotinas no Matlab, utilizando os valores citados e os sintomas de vibração na frequência de 2500 Hz para o canal 1 e 800 Hz para o Canal 2.

Tabela 4.10 – Valores calculados dos sintomas vibratórios da ferramenta de validação

Canal 1		Canal 2	
S_0	4,8148	S_0	3,6043
S_a	6,3111	S_a	4,7871
S_b	6,9098	S_b	5,3980

Encontrando os resultados para S_0 , S_a e S_b , o método de Weibull proposto aplicado a sintomas vibratórios, mostrou-se adequado a este experimento. Como estes valores foram calculados com embasados em apenas quatro ferramentas, ficam valendo somente para validação do método teórico de Weibull aplicado à manutenção preditiva.

Na Tab. 4.11 têm-se os sintomas vibratórios coletados no último ensaio da ferramenta de validação para o Canal 1 e para o Canal 2, com base nestes valores faz-se comparações com os valores limites encontrados para os ensaios utilizando as quatro ferramentas.

Tabela 4.11 – Valores dos sintomas vibratórios da ferramenta de validação

Canal 1	Canal 2
4,8044	2,7862
5,4381	2,8083
5,8931	2,9728
7,1896	3,1528
8,3684	3,4288
7,9427	3,2263
6,51	3,2543
4,821	3,6576
6,1242	4,7695

Comparando os resultados dos valores limites da Tab. 4.8 com os valores do último ensaio da ferramenta de validação da Tab. 4.11, através da Fig. 4.25, nota-se que os valores limite calculados para S_a e para S_b , tiveram uma aproximação consistente dos valores reais do experimento.

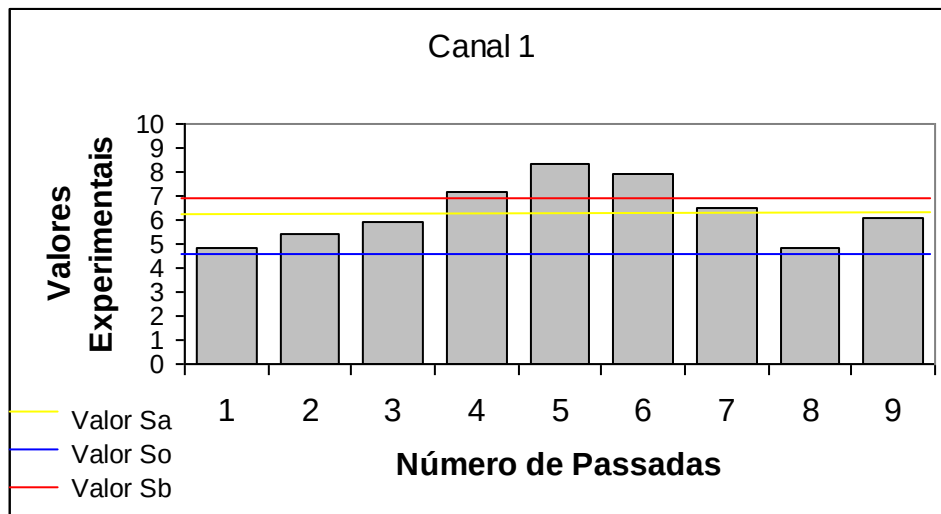


Figura 4.23 Comparação dos valores calculados versus experimentais para o Canal 1

No canal 2 o valor de alerta S_a calculado foi de 4,0603 e o de pane S_b foi de 4,5457, nota-se que os resultados alcançaram o valor de alerta e o valor de pane durante o experimento como ilustra a Fig. 4.26.

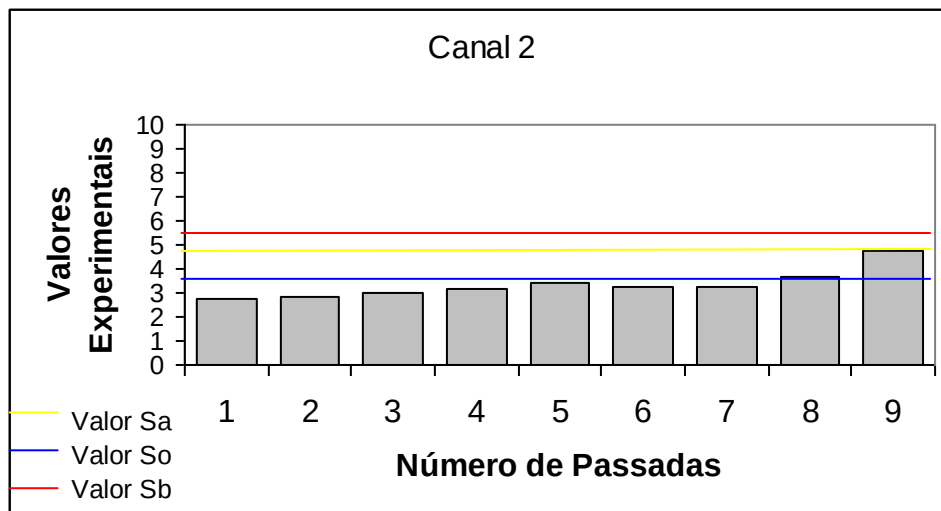


Figura 4.24 Comparação dos valores calculados versus experimentais para o Canal 2

O Canal 1 também atingiu o valor de alerta S_a , mas pode-se analisar que no canal 2 os valores calculados estão mais próximos dos valores dos sintomas medidos.

O Canal 2 que está posicionado na vertical do porta-ferramenta, atingiu resultados melhores também em relação ao coeficiente de correlação com o parâmetro de rugosidade R_p , o coeficiente de correlação alcançou 0,8614 na frequência de 800 Hz.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais conclusões tiradas deste trabalho foram:

- O procedimento de manutenção preditiva que visa calcular os valores limites de vibrações através do método estatístico de Weibull usado mostrou-se adequado para monitorar a vida da ferramenta de corte no processo de torneamento, via sinais de vibrações e análise da rugosidade superficial.
- Em média a rugosidade superficial aumentou com o tempo de usinagem. Porém dos 32 parâmetros de rugosidade analisados apenas oito, R_a , R_p , R_q , R_z , R_{3z} , R_t , R_c e R_{rms} , apresentaram uma maior aproximação da curva dos sintomas de Weibull em relação ao tempo de usinagem.
- Os cinco parâmetros estatísticos, nível rms, valor máximo de pico, fator de crista, Curtose e assimetria calculados, não apresentaram correlação significativa em relação aos parâmetros de rugosidades escolhidos para medição de desgaste.
- Observou-se que os níveis de potência vibratória em bandas de 1/3 de oitava centrada em 2500 Hz para o Canal 1 e 800 Hz para o Canal 2, obtiveram maior coeficiente de correlação com o parâmetro de rugosidade R_p .
- Foi possível fazer o ajuste linear da distribuição de Weibull através do tempo de usinagem de cada ferramenta e então calcular parâmetros desta distribuição. Para o

fator de forma encontrou-se 0,5. Este valor indica falha prematura das ferramentas. Conclui-se ainda que Weibull se aproxime da distribuição exponencial.

- Utilizou-se os sintomas vibratórios nas frequências centradas em 2500 Hz e 800 Hz, que mais correlacionaram o parâmetro R_p , para calcular os parâmetros de Weibull em função dos sinais de vibrações. O fator forma k foi igual 2.26 para o Canal 1, e k igual a 1.6520 para o Canal 2, nos dois casos caracteriza falha por desgaste. De acordo, com o diagrama de decisão de Weibull quando o fator forma é maior que 1 uma das causas prováveis das falhas é a decisão de deixar a máquina rodar até ocorrer à falha, este foi o critério de parada do experimento em questão.
- Aplicando os parâmetros de Weibull calculados é possível calcular os valores limites de vibração, o valor de alerta e o valor de pane das quatro ferramentas, e portanto prever o momento ideal de troca da ferramenta.
- Comparando-se os resultados obtidos com os testes experimentais na fase de validação, nota-se que os valores de limites de vibração calculados foram atingidos no último ensaio da ferramenta de validação.
- Observou-se que o Canal 2, acelerômetro da vertical no porta-ferramenta, apresentou maior coeficiente de correlação com o parâmetro R_p e a frequência de 800 Hz e também foi mais sensível quanto à identificação dos valores limites de vibração.

5.1 Trabalhos Futuros

Propõe-se para trabalhos futuros a montagem de um controle estatístico sobre o histórico de manutenção que trará informações úteis para a tomada de decisão e para eventuais modificações do plano mestre de manutenção.

Propõe-se fazer uma análise mais detalhada dos sintomas vibratórios e dos parâmetros de rugosidade procurando estabelecer quais mais que se correlacionam.

Propõe-se trabalhar com um conjunto de dados maior e aplicar os temas desenvolvidos neste trabalho, em máquinas e equipamentos em geral de uma linha de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. 1995. **Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)**. ASME B46.1-1995. ASME New York. United Engineering Center, 345 East 47th Street, New York, NY 10017.

ALMEIDA, M.T. **Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade**. Instituto de Vibração MTA - Engenharia de Vibrações Ltda. Itajubá, Disponível em: <www.mtaev.com.br>. Acesso em: 2 jan. de 2006.

BARRETO, R. A. **Definição de Parâmetros de Vibração e Ruído Para Aceitação de Câmbios Automotivos em Linhas de Montagem**. 2003. 116f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E.. **Como Fazer Experimentos. Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. 2 ed. Unicamp, SP: Campinas, 2003. 401p.

BONIFÁCIO, M. E. R. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração**, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BOTTON, G. et al, Vibration Signature Analysis as a Fault Detection Method for SI Engines, **Processo of SAE Technical Paper Series**, 980115, 1998.

CEMPEL, C. Passive Diagnostic and Reliability Experiment: Application in Machine Condition Monitoring, **Journal Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability Design**, V.11, pp 82-87, Jan. 1989.

CEMPEL C., NATKE H.G. The Symptom Observation Matrix for Monitoring and Diagnostics. **Journal of Sound and Vibration**. Volume 248, Number 4, 6 December 2001 , pp. 597-620(24), Ed. Elsevier .

CEMPEL, C.; NATKE, H. G.; TABASZEWSKI, M. A Passive Diagnostic Experiment with Ergodic Properties. **Mechanical Systems and Signal Processing**. Academic Press Limited, v. 11, nº 1, 107 – 117. Ago. 1997.

CEMPEL, C.; ZIOLKOWSK. A New Method of Symptom Based Processing for Machinery Condition Recognition and Forecasting. **Mechanical Systems and Signal Processing. Academic Press Limited**, v. 9, nº 2, 129 – 137. Ago. 1995.

DA SILVA, M. B. ; SOUTO, ULISSES BORGES ; SILVA, R. H. L. ; REIS, A. M. **Avaliação do Perfil de Rugosidade Através do Sinal de Emissão Acústica**. In: 14 POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2004, Uberlândia. Anais do 14 Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2004.

DEVILLEZ, A.; LESKO, S.; MOZER, W. **Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry**. Wear, Article in Press, 2003.

DIAS, A. **Confiabilidade na manutenção industrial**, Disponível em: <www.icapdelrei.com.br/arquivos/artigos/confiabilidade_na_manutencao_industrial>. Acesso em: Jan. de 2006.

DIMILA, D. E. SNR; LISTER, P. M. On-Line Metal Cutting Tool Condition Monitoring. **I: force and vibration analyses. International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 40, p.739-768, 2000.

DINIZ, A. E., PIGARI, A. **Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica**, RBCMJ of Brazilian Societies Mechanical Sciences Vol. XVIII, 1994.

DIRIKOLU, M. H.; AKTAS, A.; BIRGOREN, B. **Statistical Analysis of Fracture Strength of Composite Materials Using Weibull Distribution**. Eng. Env. Science. Tubilak, vol. 26, 45 – 48. Jul. 2002.

DOS SANTOS, A.L.B. , **"Metodologia Via Redes Neurais para a Estimativa da Rugosidade e do Desgaste de Ferramentas de Corte no Processo de Fresamento Frontal"**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 205 pgs. 2001.

DUARTE, M. A. V. "**Manutenção Preditiva via Análise de Vibração**", Apostila da UFU, pp 65. 1997.

DUARTE, M. A. V., SOUSA, M. M, SANTOS, A. L. B. Estudo do Comportamento da Rugosidade Ra de uma Superfície Fresada Utilizando Sinais de Vibração Em Bandas de Frequência de 1/3 de Oitava In: III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2004, Belém **Anais III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.**

DUARTE, M. A. V.; BACCI, M. DA S.; MEOLA, T. Modelagem do Acabamento Superficial do Processo de Torneamento Via Monitoramento de Vibrações. In: CONEM 2002, João Pessoa: **CONEM 2002.**

DUARTE, M. A. V.; et all. Análise Qualitativa da Influência da Vibração do Desgaste da Ferramenta de Corte e um Processo de Fresamento Frontal. In: CONNEM 2000, Natal - RN **CONEM 2000.**

DU, R, et all , Automated Monitoring of Manufacturing Process Part 1, Monitoring Methods. **Journal of Engineering for Industry**, vol. 117, pp121-131. 1995

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** Ed. Edgard Blucher, 1ª ed. SP. Pp 751, 1990.

ISO 468: 1982/1985. Surface roughness - Parameters, their values and general rules for specifying requirements *Withdrawal*. Disponível em: <www.predev.com/parameters.html> . Acesso em: 15 jul. de 2007.

MACHADO A. R., DA SILVA M. B., 2000. "**Usinagem dos Metais**", Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Universidade Federal de Uberlândia.

MARCHI, I. N., PEREIRA J. E. A, PINTO R. A. **Influência da Rotação na Rugosidade da Peça no Torneamento.** Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP agosto 33.

MATSUMOTO, H., DINIZ, A. E. Torneamento de Aço Endurecido Monitorado por Emissão Acústica e Corrente do Motor, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (14º COBEM), Bauru, SP, Brasil. **Nærheim**, 1998.

MEOLA, T.; et all. Monitoramento do Processo de Furação em uma Fresadora CNC Utilizando Sinais de Vibrações Mecânicas In: COBEF, 2003, Uberlândia. **Anais do II COBEF.**

MEOLA, T.; DUARTE, M. A. V.; SANTOS, S. C.; SOUSA, M. M., Modelagem do acabamento superficial do Processo de Torneamento Via monitoração de vibração, II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2002, **CONEM 2002.**

MEOLA, T.; et all. Técnica de Monitoramento Para Auxiliar a Troca Preventiva das Brocas de Aço Rápido com Revestimento no Processo de Furação. In: CONEM 2002, João Pessoa: **CONEM 2002.** V. CD-ROM.

MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística.** 1º Ed., Rio de Janeiro, 1989.

MONCHY, F., **La Fonction Maintenance**, publicado por Masson S.A., Paris, 1987, 452 pg.
Weibull, Waloddi, A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, 1951.

MONTEIRO, A. L. A. **Um Sistema Para o Cálculo da Resistência Mecânica de Matérias Frágeis Pelo Uso do Método Estatístico de Weibull.** 2001, 64p. Monografia de Especialização_ Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

NEPOMUCENO, L.X. **Técnicas de Manutenção Preditiva**, Editora Edgard Blücher Ltda, Vol. 1 São Paulo. 1989

NORMA BRASILEIRA: Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Título: **NBR 6405/1988** - Rugosidade das superfícies.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. **Manutenção Função Estratégica.** 1ª Ed. Rio de Janeiro. Qualitymark, 2001. 340p

RELIASOFT. **Life Data Analysis Reference.** Reliasoft Corporation. Disponível em: www.weibull.com/lifedatawebcontents.htm. Acesso em: jun. 2007.

ROSS, S. M. **Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists.** Cap. 10. Quinn Woodbine, 1987, 492p.

SICK, B. On-Line and indirect wear Monitoring in Turning with Artificial Neural Networks: A Review of More than a Decade of Research. **Mechanical Systems and Signal Processing**, V.16, N.4, P.487-546, 2002.

SOUTO, U. B. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta na Operação de Fresamento Utilizando Emissão Acústica**. .2005. CIMM. www.cimm.com.br.

SOUZA, A. J. **Desenvolvimento e Implementação de Funções de Automação Inteligentes num Torno CNC Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica**. São Carlos. 1999, 82p.. Dissertação (Mestrado) – EESC, USP.

SOUZA, G. F. M. Marciano, J. P. P.; Patino, C. E. R. Análise da Probabilidade do Desgaste de Brocas Helicodais. In: Cobef, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 3, 2005, Joinville, Santa Catarina. **Anais do III Cobef** . p. 178-193.

SOUZA, M. M. **Utilizando a Vibração Mecânica para Monitorar o Desgaste das Ferramentas de Corte e o Acabamento Superficial no Processo de Fresamento**. 1998. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia.

SPIEGEL, M. R. **Estatística** / Tradução de Pedro Consentino – Coleção Schaum. Edição nº 2, 1993.

TRENT, E.M. **Metal Cutting**, 2^o edition, London, Butterworths, 254 p, 1984.

WEIBULL, WALODDI. **Estimation of Distribution Parameters by a Combination of Best Linear Order Statistic Method and Maximum Likelihood**, USSAF AFML-TR-67-105, april, 1967.

WEINGAERTNER, W.L. **Monitoramento do Estado da Broca no Processo de Furação**. SIMAP, 2005.

WORMIT, M. **Detection Neyman-Pearson Theory** – Disponível em: <www.klimt.iwr.uni-heidelberg.de/mip/adaptive_filters>. Acesso: Jul. 2006.

Y, DING, et al; – Distributed Sensing for Quality and Productivity Improvity Improvements. **Ieee Transactions on Automation Science and Engineering**, vol. 3, nº. 4. Out. 2006.

YA'CUBSOHN, R. V. **Diagnostico de fallas por análisis vibratorio**, São Paulo, Die Techik Ltda, 1983.