

DIEGO MANREZA TOMAZ

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE PROCESSOS DE
MANUFATURA - APLICAÇÃO PARA UM PROCESSO DE
FURAÇÃO DE PRECISÃO**

Trabalho de Curso apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Automotiva (Mestrado Profissionalizante)

**CONSULTA
FMP-20**

São Paulo
2002

OK

DEDALUS - Acervo - EPBC



31200030351

FICHA CATALOGRÁFICA

Tomaz, Diego Manreza

Análise de confiabilidade de processos de manufatura:
Aplicação para um Processo de Furação de Precisão / Diego
Manreza Tomaz. -- São Paulo, 2002.

p. 134

Trabalho de curso (Mestrado Profissionalizante em
Engenharia Automotiva). Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo.

1.Manufatura 2.Confiabilidade 3.Furação 4.Usinagem
5.Capabilidade I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. II.t.

Dedicatória

À Felix Roberto Manreza Tomaz (*in memoriam*) e
Rosalba de Almeida Santos e Tomaz, meus pais,
pelo cuidado, amor e carinho dedicados a mim.

Agradecimentos

Pela orientação paciente, calma e precisa do Professor Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, a quem posso considerar um bom amigo.

À Liliane , minha namorada, pelo amor, carinho e paciência dedicados durante os momentos de minha ausência e cansaço perante a difícil tarefa de conclusão deste trabalho.

À minha irmã Graziela, pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis da jornada.

Aos grandes amigos da General Motors do Brasil que me incentivaram, estimularam, contribuíram com suas experiências e me ajudaram na execução dos trabalhos necessários para concluir este trabalho, em especial Paulo Becker Neto, Ricardo Toshimi Ota, Carlos Alberto Monteiro, Benedito Villela Alves Costa, Pedro Espinet Moncasi e Sandra Leal Brandão.

Aos amigos e colegas da Embraer que me receberam atenciosamente em um novo desafio de mudança de empresa, dedicaram atenção e tempo necessários para o fornecimento de muitas informações contidas neste trabalho; em especial Vilmar da Silva do Vale, Adilson Pastorelli, Gustavo Starling Loureiro Alves, Rodrigo Nascimento, Paulo Ferreira, Fabio de Oliveira Rocha, Anselmo Venegas, Jorge Valdir Oginski, Celso de Alencar Martins Ferreira, Guilherme Gomes Brondi, Luis Gustavo Pacheco, Frederico Cardoso Della Bidia, José Maria de Mello, Joaquim Gabriel Cortez, Andréia de Fátima Agrícola.

Aos amigos que suportaram a falta de tempo e paciência no dia-a-dia, com a correria e pedidos de ajuda para conseguir levar os trabalhos até a USP, imprimi-los, ou pegar livros e artigos emprestados, em especial André Vieira Figueredo e Maurício Ramos.

Aos colegas de sala de aula na GM e na USP que compartilharam os momentos de trabalhos em grupo, estudos, listas para provas, etc. Em especial à Geancarlo Rettori, companheiro nas viagens de São José dos Campos a São Paulo em dias cansativos depois do trabalho e com o trânsito infernal da capital paulista.

Resumo

A busca pela qualidade tem sido um constante objetivo das empresas atuantes nos setores industriais e de serviços. Dentre as empresas que atuam na fabricação de produtos, independentemente de sua complexidade, a busca pela qualidade tem gerado a necessidade da execução de um planejamento detalhado do processo de fabricação dos mesmos, visando a minimização da ocorrência de defeitos, que gerem re-trabalho interno ou reclamações futuras de consumidores do produto. A qualificação de um processo de manufatura, com a utilização de ensaios com corpos de prova que simulam a peça a ser fabricada, é uma das estratégias que podem ser empregadas para verificação da confiabilidade e qualidade do processo, ainda na sua fase de planejamento. Tendo em vista a importância desta etapa de qualificação de um processo, visando a melhoria da qualidade de um produto, o presente trabalho apresenta a avaliação da confiabilidade de um novo processo de furação de precisão utilizado para executar furos em elementos estruturais de aviões, nos quais serão alojados elementos de fixação, visando a união de um ou mais componentes. Ao longo do trabalho são apresentados os principais conceitos aplicados à análise de confiabilidade de processos de fabricação, bem como os detalhes técnicos dos processos de usinagem e furação de precisão estudados, incluindo a descrição das ferramentas utilizadas para sua execução. A preocupação do texto está centrada na aplicação de toda teoria apresentada em um caso prático de avaliação de um novo processo de manufatura que necessita ser testado antes de ser colocado em funcionamento na produção em série. O texto apresenta o método experimental utilizado neste estudo, bem como os resultados obtidos, incluindo a análise dos mesmos com o emprego dos conceitos de controle de qualidade e confiabilidade.

Abstract

The searching for quality had been a constant goal in the companies which act on industrial and services sectors. Among the companies who act in products fabrication, regardless of its complexity, the searching for quality have generated the necessity of a detailed fabrication process planning them, focusing the reduction of defects occurrence that generates internal reworks or future costumer complaints. The qualification of a manufacturing process using tests specimens which simulates parts to be fabricated is one of the strategies that can be used for reliability verification and quality processes, including during its planning phase. Having in view the importance of this qualification stage in the process, focusing on product quality improvement, this work presents a reliability evaluation of a new manufacturing process for drilling precision holes performed in aircrafts structures fabrication, in which are located fasteners for components unions. Along the work the main concepts applied to reliability analysis of manufacturing process are presented, as well as technical details on precision holes drilling processes and their cutting tools used for these holes execution. The main purpose of this work is focused on the application of presented theory for a practical case of new manufacturing process assessment that needs to be tested before the start up of its serial production. The work presents the experimental method used in this study, as well as results, including its analysis applying quality and reliability concepts.

Errata

Página	Linha	Onde se lê	Leia-se
83	23 ^a	Figura 4.5	Figura 5.1
85	2 ^a	Figura 4.6	Figura 5.2
87	6 ^a	Figura 5.1	Figura 5.3
88	8 ^a	Figura 5.1	Figura 6.1
91	18 ^a	Figura 5.4	Figura 6.5
91	19 ^a	de medição	de medição. Os parâmetros de rugosidade superficial, perpendicularidade e planicidade da superfície também são controlados, porém não foram abordados neste trabalho.

Observações excedentes

Página	Linha	Onde se lê	Leia-se
88	11 ^a	Figura 5.1	Figura 6.1
88	13 ^a	Tabela 5.2	Tabela 6.2
89	2 ^a	Figura 5.3	Figura 6.1
89	7 ^a	Tabela 5.3	Tabela 6.3
90	2 ^a	Figura 5.2	Figura 6.2
90	3 ^a	Figura 5.4	Figura 6.2
94	14 ^a	Tabela 5.4	Tabela 6.4
99	6 ^a	Tabela 5.5	Tabela 6.5
101	19 ^a	Tabela 5.6	Tabela 6.6
106	7 ^a	Tabela 5.7 (primeira etapa) e na Tabela 5.8	Tabela 6.7 (primeira etapa) e na Tabela 6.8
114	20 ^a	Tabela 5.9	Tabela 6.9
114	21 ^a	Tabela 5.10 (segunda etapa) e na Tabela 5.11	Tabela 6.10 (segunda etapa) e na Tabela 6.11
127	7 ^a	Tabela 5.12	Tabela 6.12

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

ABSTRACT

1 Introdução	
1.1 - Considerações iniciais	1
1.1 - Objetivos do trabalho	1
2 – Confiabilidade	5
2.1 Conceitos de análise de confiabilidade	5
2.2 -A Estatística e a Confiabilidade	9
2.2.1 - Classificação dos Dados para Análise de Confiabilidade	11
2.2.2 - Modelos de Vida	12
2.3 – Testes de confiabilidade	25
2.3.1 - Planejamento dos testes de confiabilidade	25
2.3.2 - Testes Acelerados de Vida	27
2.3.2.1 - Métodos de aceleração	28
2.3.2.2 - Modelos de Aceleração	29
2.3.2.3 - Planejamento de testes acelerados de vida	31
2.3.2.4 - Análise de dados de testes acelerados de vida	32
3 - Confiabilidade na manufatura	33
3.1 - Capacidade de Processo	34
3.1.1 Conceituação do Estudo de Capacidade	35
3.2 – Controle estatístico do processo – CEP	40
3.3 - Controle da Variação Humana	51
3.3.1 - Controle do operador	52
3.4 - Failure Mode and Effect Analysis – FMEA	53
3.4.1 - FMEA de processo	54
3.4.1.1 - Definição de Cliente	55
3.4.1.2 - Grupo de Trabalho	55
3.4.1.3 - Desenvolvimento de um FMEA de Processo	56
3.4.1.4 - Preenchimento da Tabela	57

4 - Processos de furação	67
4.1 - Geometria das brocas	71
4.2 - Geometria do Alargador	73
4.3- Influência do material	76
4.3.1 – Alumínio e suas ligas	76
4.3.2 - Titânio e suas ligas	77
4.4 - Características da formação do cavaco na furação	78
4.5 – Testes de Brocas	79
5 - Descrição do processo de manufatura estudado	83
5.1 - Máquinas e equipamentos	83
5.2 Mão-de-obra	85
5.3 – Método	85
5.4 – Material	86
5.5 - Meio ambiente	86
5.6 Medição	86
6 -. Ensaio de avaliação da confiabilidade do processo	86
6.1 Descrição e Metodologia do ensaio	88
6.1.2 - Coleta de dados	91
6.1.3 - Testes especiais	92
6.1.4 – Ferramentas	92
6.1.5 - Tamanho das amostras	93
6.2 - Análise dos dados	94
6.2.1 - CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de 12,787 ^{+0,000} _{+0,027}	94
6.2.2 - CDP de Alumínio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de 15,950 ^{+0,000} _{+0,027}	99
6.2.3 - CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de 14,362 ^{+0,000} _{+0,027}	101
6.2.4 - CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos furos de 14,362 ^{+0,000} _{+0,027}	106

6.2.5 - CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos furos de 15,950 ^{+0,000} _{+0,027}	114
6.2.6 - CDP de Titânio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de 19,124 ^{+0,000} _{+0,027}	127
7 – Conclusões e Recomendações	130
8 – Referências Bibliográficas	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Variável do custo total de um produto em função do grau de confiabilidade	9
Figura 2.2 – Representação de uma Função Distribuição Acumulada de Probabilidade	13
Figura 2.3 – Representação da Confiabilidade	14
Figura 2.4 – Representação de uma Função Densidade de Probabilidade	15
Figura 2.5 – Representação da Função taxa de Risco	15
Figura 2.6 – Curva da banheira	17
Figura 2.7 – Representação de Distribuição Exponencial	19
Figura 2.8 – Representação gráfica da distribuição de Weibull	22
Figura 2.9 – Representação da Distribuição Lognormal	24
Figura 3.1 – Quatro exemplos de capacidade de processos (Juran, J. M.1998)	37
Figura 3.2 – Relação entre Cp e Cpk (Montgomery, Douglas C – 1996)	38
Figura 3.3 – Fluxo de implantação do CEP	43
Figura 3.4 – Fluxograma de definição de cartas para variáveis e atributos	44
Figura 3.5 – Fluxograma de definição de cartas para variáveis e atributos	45
Figura 3.6: Carta de controle com pontos fora do limite de controle	47
Figura 3.7 – Carta de controle com tendência para cima e para baixo repetidamente	47
Figura 3.8 – Carta de controle com seqüência de pontos consecutivos	48
Figura 3.9 – Carta de controle com tendências	48
Figura 3.10 – Carta com aproximação dos limites de controle	49
Figura 3.11 – Carta com aproximação de linha média	49
Figura 3.12 – Carta X_{barra} e R (Variáveis)	50

Figura 3.13 - Carta X_{barra} e R (Variáveis)	50
Figura 3.14 – Carta c (atributos)	51
Figura 4.1 – Partes de uma broca	71
Figura 5.1 - Máquina de Furação Usada neste Estudo	84
Figura 5.2 - Ferramentas de corte deste estudo	85
Figura 5.3 - Wing Stub com sua distribuição de furos	89
Figura 5.4: Corpos de prova propostos	90
Figura 5.5 – Relógio Comparador Digital com Ogiva e movimentos de leitura de medição	92
Figura 6.1 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança do CDP de alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$	96
Figura 6.2 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança do CDP de alumínio, espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$ após a retirada do ponto nº 6	97
Figura 6.3 – Análise de capacidade do processo do CDP de alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$ após a retirada do ponto nº 6.	97
Figura 6.4 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Alumínio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$	100
Figura 6.5 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Alumínio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$	100
Figura 6.6 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$	104

- Figura 6.7 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$ 104
- Figura 6.8 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,2mm 108
- Figura 6.9 – Análise de capacidade do processo do para CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,2mm 109
- Figura 6.10 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,367mm H7. 111
- Figura 6.11 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,367mm H7 e retirada do furo nº9. 112
- Figura 6.12 – Análise de capacidade do processo do para CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,367mm H7 e retirada do furo nº9. 113

- Figura 6.13 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 12,600mm. 116
- Figura 6.14 - Análise de capacidade do processo do para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 12,600mm 117
- Figura 6.15 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,750mm 119
- Figura 6.16 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,750mm e retirada do furo nº1. 120
- Figura 6.17 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,750mm 121
- Figura 6.18 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,957 H7. 123

- Figura 6.19 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,957 H7. Foram retirados os pontos nº19, nº33 e nº39. 124
- Figura 6.20 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,957 H7. Foram retirados os pontos nº19, nº33 e nº39. 125
- Figura 6.21 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos final dos furos de $19,124^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com alargador de diâmetro 19,124mm H7. 128
- Figura 6.22 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Titânio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos final dos furos de $19,124^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com alargador de diâmetro 19,124mm H7. 129

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Exemplo de variáveis e atributos	41
Tabela 3.2 - Sugestões de frequência de amostragem	46
Tabela 3.2 – Tabela do FMEA de processo	57
Tabela 3.3 - Critério de Severidade - FMEA de Processo	60
Tabela 3.4 - Critério de Ocorrência - FMEA de Processo	63
Tabela 3.5 - Critério de Detecção - FMEA de Processo	65
Tabela 6.1 Quantidade e Diâmetro dos Furos e Prendedores, e Material onde estes são executados - “Wing Stub”	88
Tabela 6.2 Distribuição dos Diâmetros dos Furos no “Wing Stub”	89
Tabela 6.3: Características dos corpos de prova propostos	90
Tabela 6.4 – Dados do CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$	95
Tabela 6.5 – Dados do CDP de Alumínio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$	99
Tabela 6.6 – Dados do CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$	103
Tabela 6.7 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,2mm	107
Tabela 6.8 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com o alargador de diâmetro 14,367 H7	110
Tabela 6.9 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 12,600mm	115
Tabela 6.10 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,750mm	118

Tabela 6.11 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com alargador de diâmetro 15,957mm H7 122

Tabela 5.12 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos final dos furos de $19,124^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com alargador de diâmetro 19,124mm H7. 127

Siglas e abreviaturas

QFD	Quality Function Deployment
FMEA	Failure Mode Effect Analysis
CNC	Controle Numérico Computadorizado
Cp	Índice de capacidade (processos de manufatura)
Cpk	Índice de capacidade centralizado
Pp	Índice de desempenho do processo
Ppk	Índice de desempenho centralizado do processo
CR e PR	Coeficiente de variabilidade do processo de manufatura relativo às especificações.
LIC	Limite inferior de controle
LSC	Limite superior de controle
TQC	Total Quality Control
CDP	Corpo de prova
ERJ	Embraer Regional Jet
NPR	Número de Prioridade de Risco

Lista de Símbolos

σ	Desvio padrão da distribuição normal
μ	Média da distribuição normal
Φ_{nor}	Função densidade acumulada para a distribuição normal
β	Parâmetro de forma da distribuição de Weibul
η	Parâmetro de escala da distribuição de Weibul
θ	Parâmetro de escala da distribuição de Exponencial
S	Desvio padrão da amostra

1- Introdução

1.1 Considerações iniciais

Qualidade é uma palavra presente em quase todas as atividades das quais participamos hoje, seja ela relacionada a um produto, serviço, ou até mesmo à maneira em que vivemos. Mas o que realmente pode ser entendido como qualidade? Existem dois significados básicos para a palavra qualidade, abaixo reproduzidos:

‘1-“Qualidade” significa que as *características do produto* atendem às necessidades do consumidor e desta maneira proporcionam a sua satisfação. Neste ponto de vista, a qualidade está orientada para os lucros, pois através de uma alta qualidade, será proporcionada uma maior satisfação ao consumidor com o objetivo de aumentar os lucros. Porém este conceito requer investimentos que acarretam em aumento de custos. A partir deste ponto de vista, alta qualidade “custa mais caro” (Juran, J. M. 1998, p.2.1).

‘2- “Qualidade” significa significar *livre de defeitos*-o produto estaria livre de erros que requerem a execução de re-trabalhos, ou que resultariam em falhas de campo, reclamações e insatisfações dos consumidores, entre outros. A partir deste ponto de vista, a qualidade está orientada para custos; desta maneira alta qualidade geralmente “*custa menos*” (Juran, J. M. 1998, p.2.1).

Estes dois significados podem ser definidos simultaneamente pela expressão “ajustado ao uso”, mas somente essa expressão não seria suficiente para alcançar o significado necessário aos líderes de empresas e corporações que necessitam escolher o caminho a ser seguido.

É necessário entender as necessidades dos clientes, embora para muitas empresas qualidade é definida como sendo um produto que está de acordo com as especificações. A partir deste ponto de vista, entende-se como verdade que as especificações do produto atendem plenamente as necessidades dos clientes. No

entanto esta suposição pode estar inteiramente errada. As necessidades dos clientes envolvem muitas coisas que não são encontradas nas especificações dos produtos. Como exemplo pode-se citar explicações de utilização em uma linguagem simples, facilidade e baixo custo de manutenção, entre outras. Esta visão fez com que as empresas concluíssem que as necessidades dos consumidores não são parte das especificações do produto.

A satisfação dos consumidores tem origem nas características que induzem o consumidor a comprar este produto. Sua insatisfação tem origem em deficiências que são os motivos das reclamações. Os produtos que cumprem a função a que se propõe geram poucas ou nenhuma insatisfação. Esses produtos podem não ser vendáveis se algum produto competidor possuir características que proporcionam uma satisfação maior ao consumidor. Desta maneira, um produto que não apresenta defeitos, não será necessariamente aquele que possui as melhores vendas e sim aquele que proporcionar uma maior satisfação ao consumidor.

A qualidade de um produto depende da função a que se destina, e do mercado ao qual este produto está direcionando. Em muitos mercados, produtos com qualidades superiores são capazes de garantir um lucro maior para o fabricante, através da conquista de uma faixa maior de mercado ou de preços mais altos. Já os produtos que não competem em características com produtos de qualidade superior, geralmente devem ser vendidos em mercados de preços inferiores. Deficiências nos produtos podem afetar os lucros, pois o consumidor encontra um defeito toma uma atitude que está relacionada a custos: registra reclamações, devolve produtos, faz exigências, e pode até mesmo abrir um processo contra a empresa. Além disso, os consumidores podem tomar a decisão de parar de comprar de um fabricante que possua muitas reclamações ou processos na justiça. Atitudes como essas, se tomadas por um número grande de consumidores podem trazer sérios problemas financeiros para uma empresa.

Estes custos originados em função de uma qualidade pobre podem ser eliminados através da eliminação das deficiências dos produtos; eliminando se erros, re-

trabalhos, falhas de campo, etc. Desta maneira, é preciso que os produtos sejam confiáveis, não importando se forem um sistema, um veículo, uma máquina, ou um serviço.

Segundo Juran, J. M. (1998), enquanto os produtores certamente defendem a elevada qualidade em termos da diminuição de sucata ou re trabalhos, os consumidores estão preocupados com a funcionalidade, confiabilidade, e o comportamento dos produtos durante seu período de vida. Os consumidores possuem a expectativa de comprar um produto que excedam as suas expectativas de vida e segurança. Tecnicamente, a confiabilidade é definida como a probabilidade de um produto realizar a função para que foi feito, em condições de operação especificadas, por um período de tempo especificado. A melhoria da confiabilidade é uma parte importante de um objetivo global que é melhorar a qualidade do produto. Existe um consenso geral de que um produto não confiável não é um produto de alta qualidade.

O conceito de relacionamento entre fornecedores e clientes é largamente conhecido nos meios da engenharia, não somente quando são feitas citações a respeito de uma empresa que fornece produtos ou serviços a um consumidor, mas também quando considera-se a existência do relacionamento fornecedor-cliente entre as várias áreas que compõem uma empresa.

Desta maneira um processo de fabricação possui seus clientes e seus fornecedores. Uma engenharia de produção ou de processos atua como o fornecedor da área produtiva, que recebe destes um produto que é composto de equipamentos e métodos utilizados para produzir um determinado produto que por sua vez será fornecido ao cliente imediatamente a posterior da escala produtiva.

A área produtiva necessita que esse processo de fabricação seja capaz de fabricar o produto conforme as especificações necessárias. Em resumo, ela precisa de um processo de fabricação que seja confiável, pois os custos da ausência de confiabilidade neste processo podem prejudicar seriamente a lucratividade da empresa como um todo.

É preciso conhecer a real capacidade de um processo para fabricar um produto conforme suas especificações durante o período de tempo que esse produto estará disponível no mercado. Para isso aplicam-se as técnicas de confiabilidade, onde é preciso conhecer os modos de falha de um processo, qual seu comportamento ao longo do tempo, incluindo a influência de operadores treinados ou não para sua execução, quais os efeitos do desgaste de ferramentas utilizadas, quais os novos problemas que podem surgir mediante um aumento de cadência, entre outros.

1.2 - Objetivos do Trabalho

O desafio de engenheiros e projetistas vai além de avaliar a confiabilidade do seu processo de fabricação, primeiramente a tarefa a ser vencida é como esta avaliação deve ser feita. O trabalho proposto pretende avaliar a confiabilidade de um processo de furação de precisão utilizado para acomodar elementos de fixação na fabricação de aviões.

Uma das partes fundamentais da manufatura de aviões são os processos de furação de precisão para elementos de fixação, como por exemplo prendedores e rebites. Cada avião comercial possui centenas de milhares de furos, e a grande maioria desses furos acomoda elementos empregados na fixação de componentes estruturais de fundamental importância para o funcionamento e segurança do avião. A integridade da fixação como um todo, incluindo os elementos de fixação e as partes a serem unidas, depende da qualidade dos furos, os quais devem estar devidamente posicionados, ter um diâmetro circular na sua correta dimensão, e estar livre de defeitos de superfície. Os furos devem ser feitos com alta precisão; as especificações variam de acordo com o tipo de elemento de fixação, localização, e função. Há áreas críticas onde exige-se que esses furos tenham especificações de centésimos ou milésimos de milímetros.

Sendo assim, os processos utilizados para efetuar os furos necessitam ser confiáveis para atingir as especificações.. O processo de furação envolve uma mão-de-obra

devidamente capacitada e treinada, o método de trabalho adequado aos equipamentos e condições do processo, máquinas e ferramentas avançadas, que utilizam tecnologia moderna na sua concepção e fabricação, para que tornem possível a realização dos furos com a qualidade, velocidade e volume requeridos.

Componentes aeronáuticos em sua grande maioria possuem um custo bastante elevado. Em função deste custo desperdícios são proibitivos, tornando impraticável a utilização de peças reais para a avaliação de processos de fabricação. Além da utilização da grande maioria das ferramentas da qualidade conhecidas como QFD, FMEA, Diagrama de Ishikawa, é preciso encontrar testes que simulem as condições reais de processo a fim de testar os equipamentos, treinar a mão-de-obra, e medir sua confiabilidade.

O tempo de execução dos testes deve ser adequado a rapidez do desenvolvimento de novos produtos. Sendo assim, a avaliação de um processo de fabricação ou de seus equipamentos pode ser impraticável em função do tempo requerido para a coleta de dados que permitam a avaliação de sua confiabilidade. Para isso, pratica-se a simulação de fabricação de em diversos corpos de prova, e também utiliza-se as técnicas dos ensaios acelerados, que combinados com uma análise estatística adequada, proporcionam uma avaliação segura e confiável da confiabilidade do processo.

Neste trabalho aborda-se a aplicação de corpos de prova no processo de qualificação de um procedimento de execução dos furos de precisão em componentes de estruturas aeronáuticas, baseando-se na aplicação de técnicas de análise de confiabilidade.

2 - Confiabilidade

2.1 – Conceitos de análise de confiabilidade

De certa forma pode-se definir confiabilidade como a probabilidade de um item realizar sua função especificada, sem falhas através de condições determinadas,

em um período estabelecido de tempo, sendo esta provavelmente a definição mais usada para a confiabilidade nos meios de científicos. Mas o que é realmente confiabilidade? Geralmente ouve-se falar que os produtos são confiáveis através do emprego de frases como "Eu tenho um carro confiável", ou as pessoas citam que deve-se usar fontes de informações confiáveis. Porém, nesses dois casos o significado de confiável é o de "seguro" ou "digno de confiança". Mas em termos científicos, confiável não quer dizer simplesmente seguro, pois não seria uma definição e precisa o bastante. É preciso que o significado da palavra confiável também seja compreendido como aquilo que é válido, ou seja, um componente confiável deve ser entendido como o seguro e válido.

Em termos científicos, o termo confiabilidade significa "repetível" ou "consistente". Como exemplo, um processo de medida pode ser considerado confiável se ele nos indicar um mesmo resultado repetidas vezes (assumindo que o produto que está sendo medido não está mudando).

A qualidade dos produtos está intimamente ligada à sua confiabilidade; com a rapidez dos avanços tecnológicos, o desenvolvimento de produtos altamente sofisticados, a competição globalizada e intensa, e o aumento na expectativa dos consumidores, a exigência para que os fabricantes produzam produtos com alta qualidade tornou-se cada vez maior. Os consumidores estão preocupados em comprar um produto que atenda suas expectativas na compra e as exceda durante todo o seu período de vida.

Portanto, é necessário que os fabricantes conheçam o comportamento de seus produtos no decorrer de sua vida útil; quais os esforços a que serão submetidos; qual é a variabilidade dos materiais que são utilizados como matérias-primas, quais os fatores humanos relacionados à sua fabricação e utilização, o meio ambiente a que o produto estará sujeito, entre outros parâmetros.

Segundo O'Connor, Patrick D. T (1985), na visão do fabricante a confiabilidade de um produto é avaliada através da avaliação das especificações ou de alguns atributos

que, quando aprovados, permitem a entrega ao consumidor. Mas quantos desses atributos ou especificações ainda estarão aprovados após uma semana de uso? Ou após um mês, ou no fim de um período da garantia de um ano? É neste ponto que entram as definições de confiabilidade. A qualidade é um atributo instantâneo para o início da vida de um produto ou processo, e a confiabilidade é um retrato móvel de sua utilização e de seu dia-a-dia. Os defeitos em tempo zero são aqueles que conseguiram escapar dos métodos de garantia da qualidade na manufatura, e os que acontecem no tempo excedente são "problemas de confiabilidade" ou "falhas de confiabilidade".

É necessário implementar um programa de engenharia da confiabilidade?

Para muitos produtos, um sistema de garantia da qualidade na manufatura que seja eficiente é suficiente para garantir uma alta confiabilidade de seus produtos como, por exemplo, não deve-se pensar que uma fábrica de fósforos ou uma fábrica de palitos vão investir em um programa de garantia da confiabilidade de seus produtos. Porém, os fabricantes de produtos que envolvem algum tipo de risco ou aqueles em que o custo das falhas não são muito baixos, necessitam saber se seus produtos ou processos estão funcionando o satisfatoriamente.

A maioria dos fabricantes não sabe como seus produtos estão funcionando, isto porque não possuem um sistema viável para reportar suas falhas. É importante ter uma análise, uma interpretação, e um sistema de informação em todas as áreas da empresa que lidam com o produto, desde se o nascimento até sua morte.

Se os produtos de um fabricante funcionarem perfeitamente, sem nunca apresentarem falhas, é porque eles provavelmente foram projetados de maneira excessivamente robusta e não de uma maneira otimizada. A consequência disso é um custo adicional e desnecessário para o fabricante diminuindo seus lucros.

Os produtos têm tornando-se cada vez mais complexos, através da adição de mais componentes e novas tecnologias com o intuito de competir melhor com seus

concorrentes. Desta maneira, os produtos que precisam apresentar uma confiabilidade aceitável devem ser monitorados constantemente, pois este aumento de complexidade pode causar um decréscimo na confiabilidade total do produto.

Se um fabricante aumenta a confiabilidade de seu o produto, ele vai aumentar os custos de projeto e ou de produção. No entanto, baixos custos de produção e de projeto não significam baixo custo total do produto. O custo total do produto não deve ser calculado baseado simplesmente no custo de quando o produto deixa a fábrica, mas sim como o custo do produto em toda a sua vida. Isto inclui os custos de garantia, os custos de troca de unidades defeituosas, custos decorrentes da perda de consumidores em função destas unidades defeituosas, etc.

Através do aumento da confiabilidade de um produto, pode ocorrer um aumento dos seus custos iniciais, mas conseqüentemente ocorrerá uma diminuição nos custos de suporte do produto. Um custo total mínimo considerado ótimo pode ser determinado e implementado pelo cálculo da confiabilidade ótima para este produto.

Segundo O'Connor, Patrick D. T (1985), a figura 2.1 descreve esta situação. O custo total do produto é a soma dos custos de produção e de projeto assim como outros custos gerados após sua liberação. Pode-se observar que em um nível de confiabilidade ótimo, o custo total do produto está no mínimo. O custo de confiabilidade ótimo é tal que coincide com o custo mínimo total ao longo de toda a vida do produto.

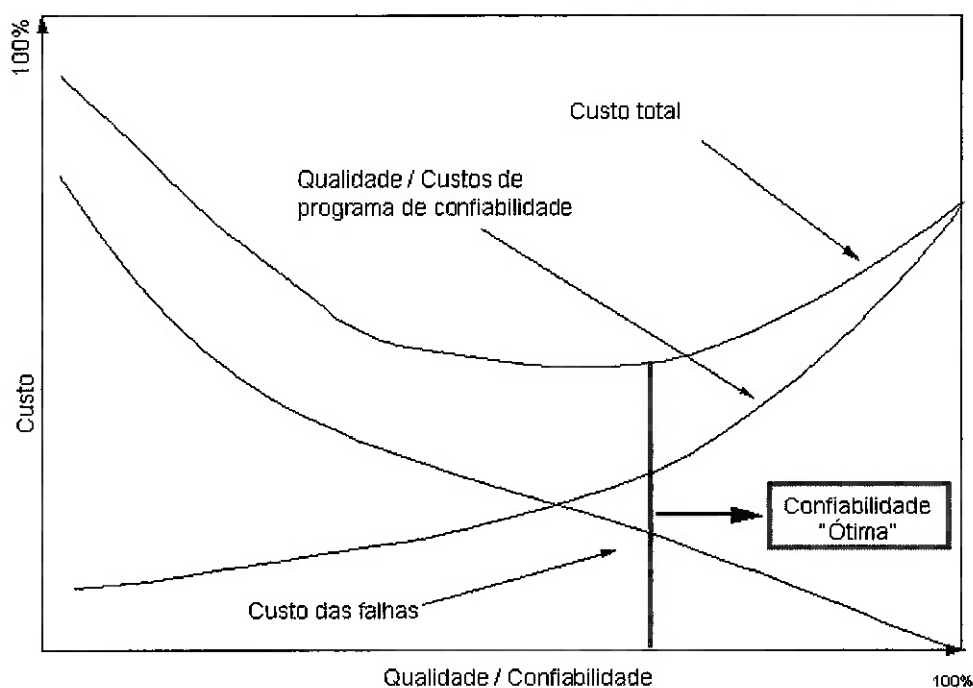


Figura 2.1 – Variável do custo total de um produto em função do grau de confiabilidade

O único problema que a figura acima apresenta é que não é fácil quantificar os efeitos das atividades de um certo programa de confiabilidade, tais como uma certa quantidade de testes, em uma confiabilidade alcançada.

2.2 -A Estatística e a Confiabilidade

O conceito de confiabilidade como sendo uma probabilidade a qual alguém tenta quantificar, envolve o uso imprescindível de métodos estatísticos. Para que haja um bom progresso em um trabalho de confiabilidade é necessário portanto que haja um conhecimento básico deles. É importante lembrar que a análise da confiabilidade depende de uma série de dados que devem ser tratados estatisticamente; o problema surge no momento em que é necessário quantificar as grandezas que serão tratados estatisticamente para a determinação da confiabilidade de um produto ou sistema. Esses dados trazem consigo uma dose de incerteza, isto porque a confiabilidade geralmente extrai tais informações daquelas pessoas que usam o produto, e também

em função da grande variedade de ambientes nos quais os produtos estão sujeitos a operar.

De acordo com Juran, J. M. (1998), modernos programas adotados para melhoria da confiabilidade em produtos existentes e também para garantia de uma alta confiabilidade continuada para a próxima geração de produtos, geram a necessidade de métodos quantitativos que sejam capazes de fornecer uma previsão e avaliação da confiabilidade dos produtos, assim como o fornecimento de sinais antecipados e informações das chamadas "causas raízes" da falhas existentes. Na maioria dos casos este processo envolve uma coleta e análise de dados originários de estudos, tais como testes de laboratório de materiais, dispositivos, corpos de prova, testes antecipados em unidades protótipo, acompanhamento monitorado das primeiras unidades de produção em sua utilização no campo, a análise de dados de garantia, e um acompanhamento sistemático contínuo do produto no campo. Estas ações também envolvem um planejamento cuidadoso de tais programas para garantir que as informações mais significativas serão obtidas. As avaliações de confiabilidade geralmente representam um desafio à além daquele encontrado nas avaliações de qualidade porque existe um período de tempo decorrido do momento quando o produto é construído e de quando a informação da confiabilidade retorna.

Como exemplos de algum dos principais objetivos da obtenção de dados de confiabilidade pode-se citar:

- 1- A obtenção de uma identificação antecipada de modos de falha e o entendimento e remoção de suas causas raízes - melhorando assim sua confiabilidade;
- 2- A obtenção de informações de campo para ajudar e melhorar o projeto do produto de futuras gerações ou novos modelos;
- 3- A determinação que o quanto tempo cada unidade deve funcionar antes de seu envio para o consumidor, e em que condições, a fim de evitar falhas prematura de campo. Este procedimento é geralmente chamado de "burn in";

4- A quantificação da confiabilidade a fim de determinar se o produto está pronto para ser lançado, ou seja, se o produto já alcançou o seu nível especificado de confiabilidade;

5- A variação e previsão de custos de garantia;

6- A decisão da necessidade de um “recall” para produto no campo;

7- A avaliação da capacidade de um processo de fabricação para produzir o produto dentro das especificações de projeto.

Os dados de confiabilidade são levantados e em diversas situações diferentes, como por exemplo:

- Testes de laboratório e para avaliar a durabilidade, desgaste, propriedades relativas ao tempo de vida de materiais em particular, componentes, ou subsistemas;
- Testes de vida operacional em sistemas completos ou subsistema, feitos antes do produto ser lançado para os consumidores;
- De utilização no campo pelos consumidores.

2.2.1 - Classificação dos Dados para Análise de Confiabilidade

A qualidade dos dados é de fundamental importância para a exatidão da predição que se pretende alcançar. Dados confiáveis juntamente com uma escolha correta de um modelo resultam de análise em excelentes resultados nas predições de confiabilidade.

Os dados podem ser classificados como:

- A) Dados completos: significa que cada valor da característica em estudo de cada unidade observada é conhecido. As informações a respeito da amostra são completas.
- B) Dados censurados: Dados de confiabilidade geralmente são censurados, isto porque algumas unidades não apresentam falhas, e ainda melhor, somente seus tempos de vida, mas não seus tempos de falha são conhecidos. Um motivo comum para censurar dados é a necessidade de analisá-los antes que as

unidades falhem. A análise de dados censurados é mais difícil quando os tempos censurados das unidades que não falham é diferente. Isto pode acontecer quando diferentes unidades do produto são colocadas em teste, ou entram em serviço no campo em momentos diferentes, o que é comum no caso de análise de dados de falha de unidades no campo. Este caso também pode acontecer quando unidades têm diferentes graus de exposição através do tempo ou quando as falhas estão sendo analisadas devido à um modo de falha em particular (em tais casos as falhas de outros modos independentes são tratadas como observações censuradas dentro da análise de dados). Uma suposição importante necessária para uma análise padrão de dados censurados é que o tempo censurado para uma unidade é independente daquele tempo quando esta unidade deveria falhar. Geralmente os testes censurados são chamados de tipo 1 (o teste termina após um determinado tempo de ensaio, pré-determinado), e tipo 2 (o teste termina após um determinado número de falhas, pré-determinado).

2.2.2 - Modelos de Vida

Juran, J. M. (1998) apresentou, os modelos de vida que buscam definir a confiabilidade de um produto ou sistema, representando a probabilidade deste permanecer operando até um certo instante de tempo. Os mesmos são caracterizados por distribuições de probabilidade, sendo algumas de suas características apresentadas na seqüência deste texto.

- Modelos “Tempo até a Falha” (time-to-failure):

A distribuição do tempo até a falha T de um produto pode ser caracterizada pela função de distribuição acumulada, a função densidade de probabilidade, a função de sobrevivência, ou a função de risco. A escolha de qual função ou funções a serem usadas depende da prática específica para onde o problema está sendo direcionado.

A função distribuição acumulada para T , tal como indicado na figura 2.2:

$$F(t) = \Pr(T \leq t),$$

Função Distribuição Acumulada

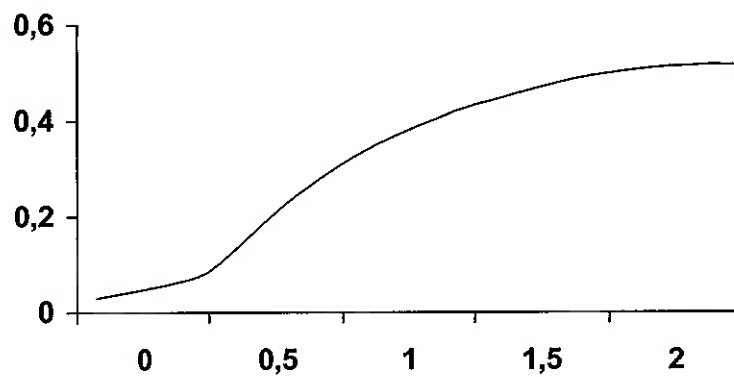


Figura 2.2 – Representação de uma Função Distribuição Acumulada de Probabilidade

Fornece a probabilidade de que uma unidade, selecionada aleatoriamente em uma população ou processo irá falhar antes de um tempo t . De maneira alternativa $F(t)$ pode ser interpretada como a proporção de unidades na população (ou de algum processo estacionaram) que vai falhar antes de um tempo t .

A função de sobrevivência (também conhecida como função confiabilidade) é o complemento da função distribuição acumulada, fornece a probabilidade de um item sobreviver até um tempo t , sendo indicada na figura 2.3.

$$1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x) dx \quad (2.1)$$

Função de Sobrevivência (Confiabilidade)

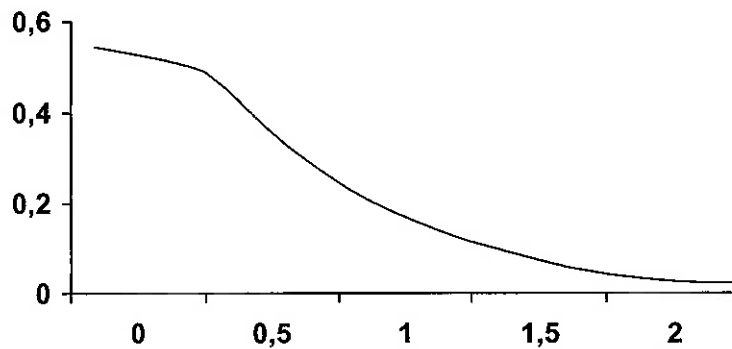


Figura 2.3 – Representação da Confiabilidade

A função densidade de probabilidade para uma variável aleatória contínua T é definida como a derivada $F(t)$ em relação a t :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Assim, para uma variável aleatória positiva, $F(t) = \int_0^t f(x)dx$. A função densidade de probabilidade pode ser usada para representar a frequência relativa de tempos de falhas em função do tempo e pode ser tomada como uma o histograma aproximado de um grande número de tempos de falha observados, tal como indicados na figura 2.4.

Função Densidade de Probabilidade

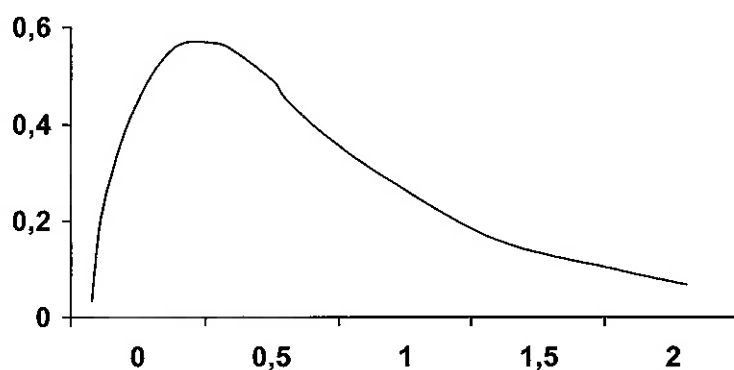


Figura 2.4 – Representação de uma Função Densidade de Probabilidade

Segundo O'Connor, Patrick D. T. (1985), a função risco, também conhecida como função de taxa de risco, função de taxa de falha instantânea, entre vários outros nomes é definida por:

$$h(t) \times \Delta t = \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t)} \quad (2.3)$$

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \times \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t)}$$

Função de taxa risco

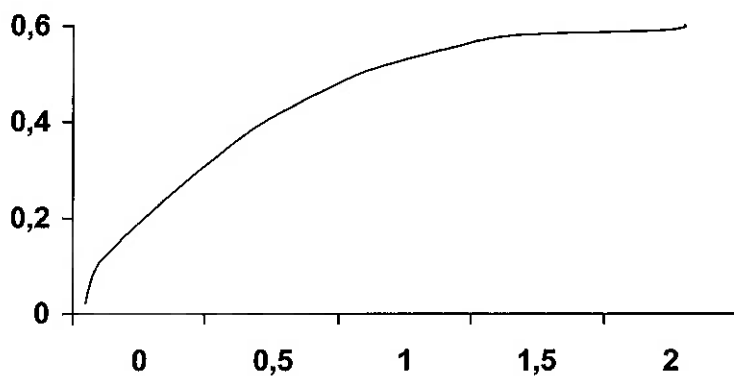


Figura 2.5 – Representação da Função taxa de Risco

A função taxa de risco, tal como indicada na figura 2.5, expressa a tendência de falhas no próximo pequeno intervalo de tempo, dado um tempo de sobrevivência t . A função de taxa de risco pode ser interpretada como a taxa de falha no seguinte senso: Se existe um grande número de itens [digamos $n(t)$] em operação a um tempo t então $n(t) \times h(t)$ é aproximadamente igual ao número de falhas por unidade no tempo [ou $h(t)$ é aproximadamente igual ao número de falhas por unidade de no tempo por unidade no risco].

Segundo Juran, J. M. (1998), a "Curva da banheira", indicada na Figura 2.6, descreve um modelo conceitual bastante útil para a análise de falha da população de alguns produtos. A primeira parte da curva mostra que devem acontecer falhas prematuras de unidades com defeitos relacionados à qualidade do produto (mortalidade infantil). A segunda parte da curva mostra que durante a maior parte do tempo de vida do produto, o risco de falha permanece aproximadamente constante devido à falhas que são causadas por ações externas que ocorrem aleatoriamente. A terceira parte mostra as falhas de fim de vida que ocorrem devido ao desgaste excessivo. A curva representada na figura 2.6 é uma representação genérica, sendo que dependendo da natureza do comportamento ou sistema avaliado, a mesma pode apresentar, de forma mais pronunciada, um determinado trecho da curva genérica acima descrita.

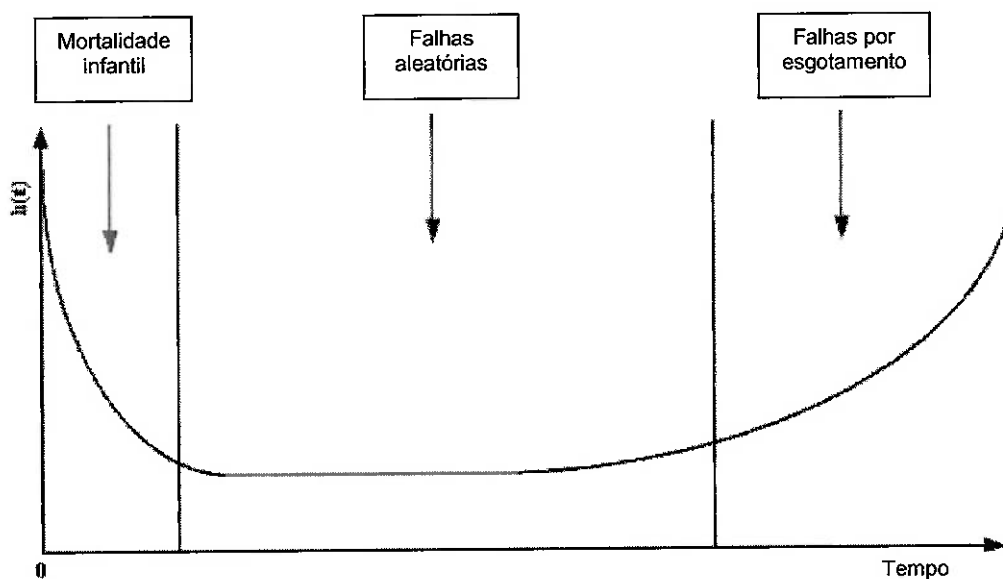


Figura 2.6 – Curva da banheira

Existem outras grandezas de interesse na análise da confiabilidade. A "Expectativa" ou "Primeiro momento" de uma distribuição de probabilidade de uma variável positiva aleatória T é a medida da tendência central ou tempo "Médio", e é definido por:

$$E(T) = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)]dt \quad (2.4)$$

Quando a função densidade de probabilidade $f(t)$ for altamente assimétrica, tendo uma cauda da direita longa (como é comum em muitas aplicações de dados de vida), o tempo médio até a falha pode ser bem diferente em relação a outras medidas de tendência central como a mediana, que indica a estimativa temporal em que ocorre a falha de 50% da população.

Os parâmetros tradicionais de um modelo estatísticos (média e desvio padrão) geralmente não são o interesse primário nos estudos de confiabilidade. Ao invés disso, os engenheiros de projeto, o engenheiro de confiabilidade, gerentes, e consumidores estão interessados em medidas específicas da confiabilidade do produto em ou características particulares da distribuição de falha no tempo, a

distribuição quantil. Em particular, o quantil t_p é o tempo em que uma proporção p da população a falhar. Alternativamente, geralmente deseja-se conhecer $F(t)$, a probabilidade de falha associada a um número particular de horas, dias, semanas, meses, ou anos de uso, e qual a probabilidade de um produto falhar (ou não falhar) durante um período pré-definido de uso no campo.

Segundo Juran, J. M. (1998), a confiabilidade de um componente é portanto expressa por distribuições de probabilidade. Algumas destas distribuições são mais empregadas em estudos de confiabilidade, sendo descritas na seqüência deste texto:

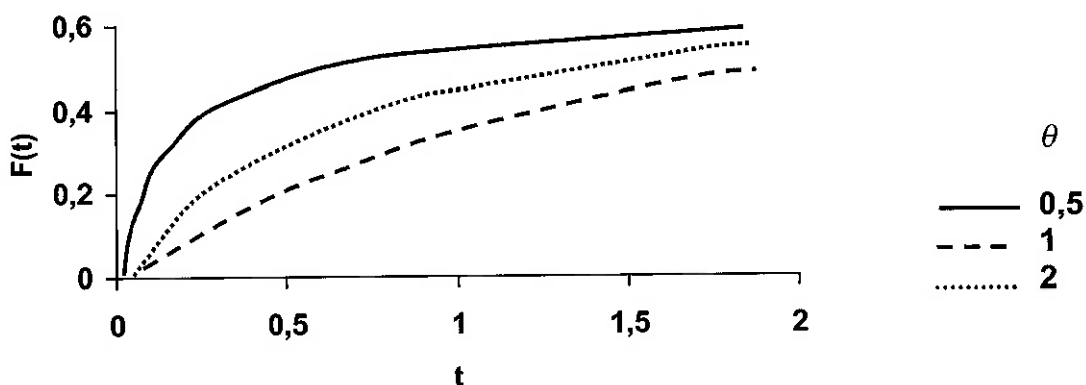
a) Distribuição exponencial:

A função distribuição acumulada para uma distribuição exponencial é:

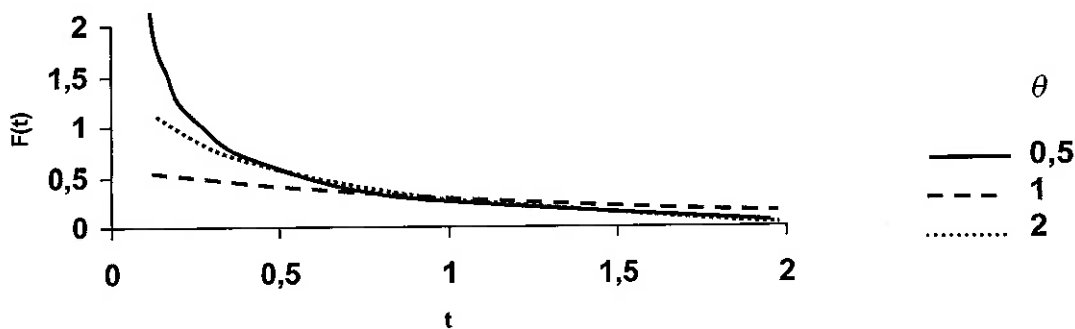
$$F(T;\theta) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad t > 0 \quad (2.5)$$

Onde o parâmetro simples da distribuição $\theta > 0$ é um parâmetro de escalar. A função distribuição acumulada, função densidade de probabilidade, e função taxa de risco são mostradas na Figuras 2.7:

a - Função Distribuição Acumulada



b- Função densidade de probabilidade



c- Função Taxa de Risco

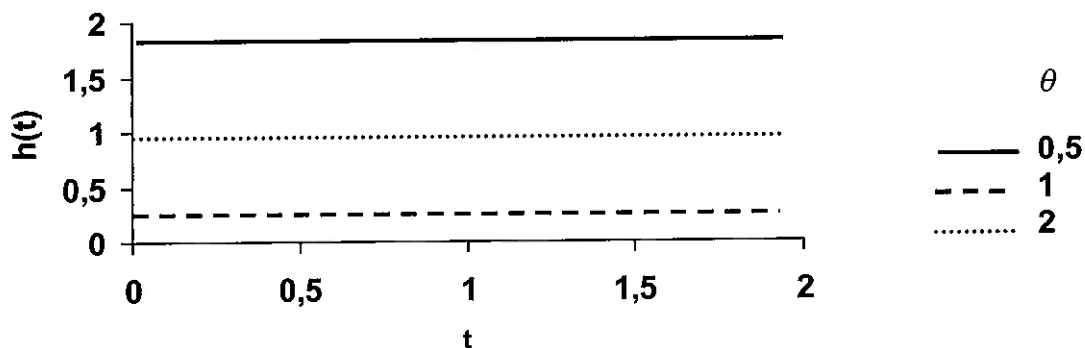


Figura 2.7 – Representação de Distribuição Exponencial

O quantil p da distribuição exponencial é $t_p = -\theta \log(1-p)$. A distribuição exponencial tem uma característica importante em sua função de risco $h(t) = \frac{1}{\theta}$, que é constante (independente do tempo). Uma taxa de risco constante implica que para uma unidade que não falha, a probabilidade de falha no próximo intervalo de tempo é independente da idade desta unidade. Uma taxa de risco constante implica que as unidades da população não estão sujeitas a um modo de falha que corresponda a uma mortalidade infantil e também não estão sujeitas a falhas por esgotamento quer dizer, não estão envelhecendo de alguma outra maneira. Sendo assim, este modelo pode ser aproximado quando falhas são induzidas por um fenômeno externo que é independente da vida do produto e da sua história passada. Esta função não seria apropriada para o modelamento da vida de componentes mecânicos, que apresentam uma combinação de fadiga, corrosão, ou desgaste.

A distribuição exponencial é indicada para casos enquadrados na parte central da “curva da banheira”, onde as falhas adiantadas ou por desgaste não são o interesse.

b) Distribuição de Weibull

A função distribuição acumulada para a distribuição de Weibull é:

$$F(t; \eta, \beta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad t > 0 \quad (2.6)$$

onde $\beta > 0$ é o parâmetro de forma e $\eta > 0$ é um parâmetro de escala. O quantil p

da distribuição de Weibull é $t_p = \eta[-\log(1-p)]^{\frac{1}{\beta}}$. Por exemplo, a mediana da

distribuição de Weibull é $t_{.50} = \eta[-\log(1-.5)]^{\frac{1}{\beta}}$. A função de risco é

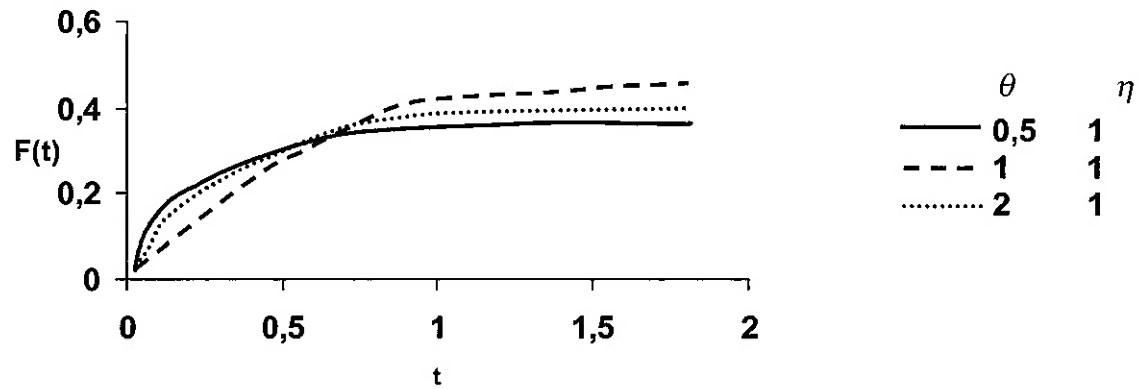
$h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$. A função distribuição exponencial é um caso especial da

distribuição de Weibull onde $\beta = 1$. A importância prática da distribuição de Weibull origina-se da habilidade para descrever distribuições de falhas que geralmente

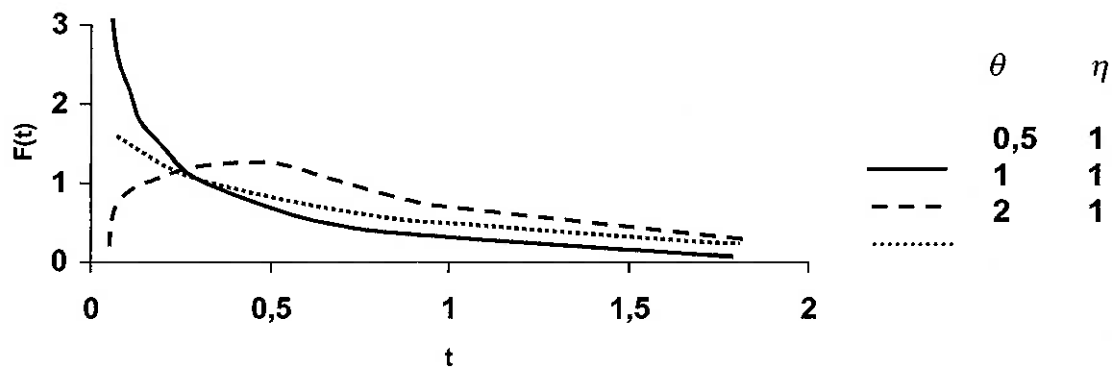
possuem diversas formas diferentes. Conforme ilustrado nas figuras abaixo, com $0 < \beta < 1$, a função de risco da distribuição de Weibul é decrescente, e com $\beta > 1$ a função de risco da distribuição de Weibul é crescente. Sendo assim, a distribuição pode ser usada para descrever também os riscos decrescentes causados pela mortalidade infantil ou riscos crescentes devido a falhas por esgotamento, mas não para ambos. A distribuição de Weibul é geralmente usada como um modelo de vida para isolantes, falhas de capacitores, rolamentos de esferas, e muitos outros produtos, assim como um modelo para resistência de materiais. Para muitas aplicações existe uma justificativa teórica para seu uso.

As representações das funções distribuição acumulada, densidade de probabilidade e taxa de risco para distribuição de Weibull são mostradas na figura 2.8.

a - Função Distribuição Acumulada



b- Função Densidade de Probabilidade



c - Função Taxa de Risco

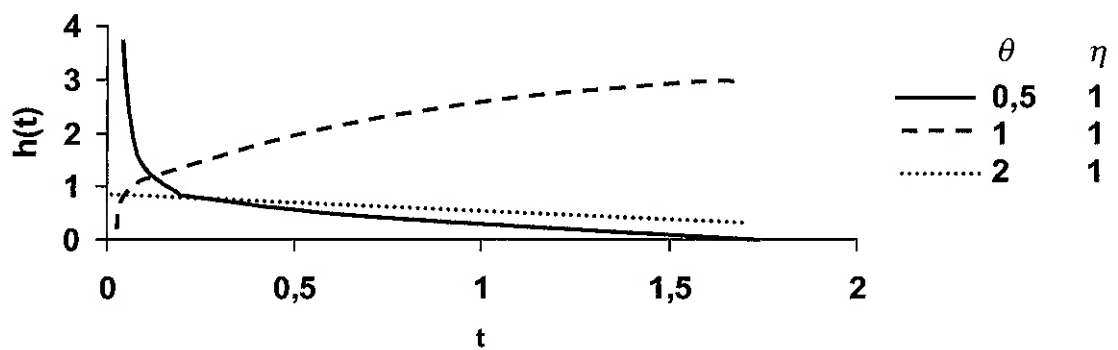


Figura 2.8 – Representação gráfica da distribuição de Weibull

c) Distribuição Lognormal:

A distribuição lognormal é empregada para descrever o processo de falha onde a dispersão nos tempos até a falha é crescente em função do aumento de tempo.

A função distribuição acumulada da lognormal é:

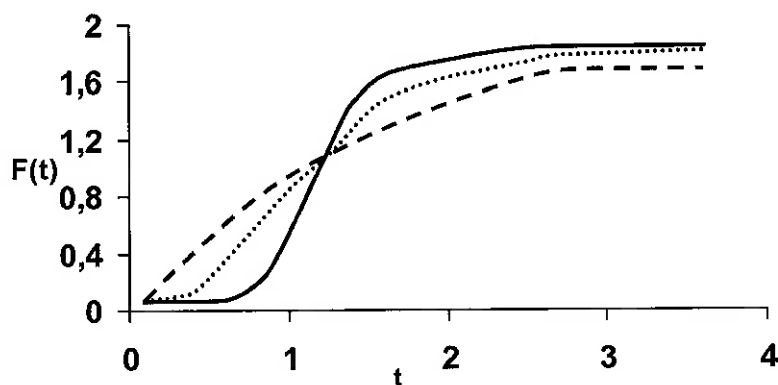
$$F(t; \mu, \sigma) = \Phi_{nor} \left[\frac{\log(t) - \mu}{\sigma} \right] \quad t > 0 \quad (2.7)$$

onde Φ_{nor} é a função densidade acumulada para a distribuição normal. O parâmetro $\exp(\mu)$ é o parâmetro de escala e a mediana da distribuição, $\sigma > 0$ é o parâmetro de forma. O p quantil da distribuição lognormal é $t_p = \exp[\mu + \Phi_{nor}^{-1}(p)\sigma]$, onde Φ_{nor}^{-1} é o inverso da distribuição normal padrão.

A distribuição lognormal é normalmente usada como um modelo para a distribuição de tempos de falha. Conforme mostrado na Figuras 2.9, a função de risco da distribuição lognormal geralmente começa em 0, aumenta até o máximo, então retorna a zero para um alto t.

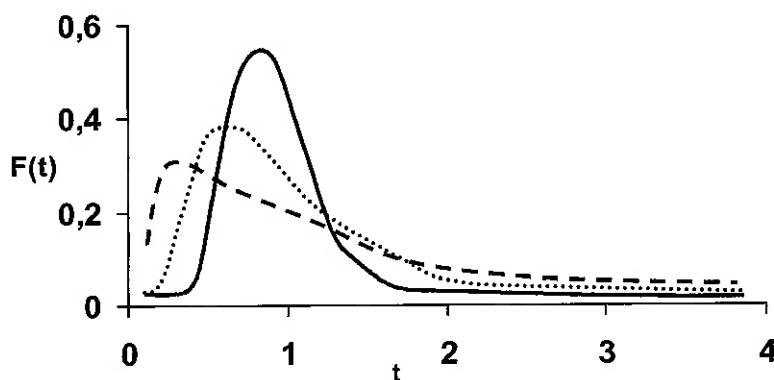
A aplicação da distribuição lognormal pode ser indicada para uma variável aleatória que surge do produto de um número de efeitos aleatórios positivos e independentes identicamente distribuídos. Por exemplo, foi sugerido que a lognormal é um modelo apropriado para o tempo até a falha causado pelo processo de degradação com a combinações de taxas constantes aleatórias que combinam multiplicativamente. De maneira correspondente, a distribuição lonormal é largamente usada para descrever tempos de falha devido a processos de degradação comuns aos mecanismos de falha de eletrônicos (semicondutores), tais como corrosão, difusão, migração, crescimento de trincas, eletromigração e, em geral, falhas resultantes de reações ou processos químicos.

Função Densidade de Probabilidade



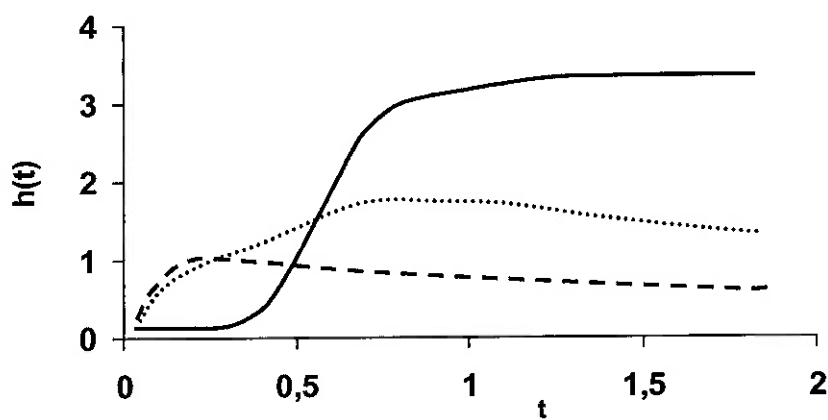
	σ	μ
—	0,3	0
⋯	0,5	0
- - -	0,8	0

Função Distribuição Acumulada



	σ	μ
—	0,3	0
⋯	0,5	0
- - -	0,8	0

Função Taxa de Risco



	σ	μ
—	0,3	0
⋯	0,5	0
- - -	0,8	0

Figura 2.9 – Representação da Distribuição Lognormal

2.3 - Testes de confiabilidade

Os testes são uma parte essencial de um programa de desenvolvimento de engenharia, isto porque dificilmente os projetistas são capazes de conceber um produto em que seja possível prever ou analisar todos os modos de falhas que ocorrem durante o serviço. Entre os vários testes podemos destacar:

- a) Testes funcionais a fim de confirmar que o projeto o processo são capazes de atingir seu desempenho e necessidades básicas;
- b) Testes de ambiente, a fim de garantir que o projeto o processo é capaz de operar sobre uma determinada gama de ambientes;
- c) Testes de confiabilidade, para garantir que o produto ou processo vão operar sem falhas durante a sua vida projetada;
- D) Testes de segurança, quando necessários.

Todos os testes fornecerão informação a respeito do desempenho e da confiabilidade, principalmente para aqueles produtos ou processos que envolvem exigências particulares definidos por leis, requisitos de segurança ou funcionais entre outros. Em muitos casos, o projeto e desenvolvimento de um produto ou processo devem prever um programa de testes, a fim de verificar se todos os requisitos de seu projeto foram atendidos.

2.3.1 - Planejamento dos testes de confiabilidade

O planejamento dos testes de avaliação da confiabilidade gera uma série de perguntas, relativas a pontos que devem obrigatoriamente constar da especificação de ensaios:

- Quanto tempo deve durar o teste?
- Quantas unidades devem ser testadas?
- Quais tipos de testes devem ser realizados?

As respectivas respostas para essas perguntas dependem de:

- Quais modelos estão sendo assumidos para representar a distribuição do tempo até a falha dos componentes;
- Quais decisões ou conclusões devem ser tomadas depois da realização do teste e da análise de dados;
- Quais os riscos envolvidos caso sejam tomadas decisões ou conclusões erradas;

Nem sempre é possível ou mesmo prático responder completamente a todas essas questões e para cada modelo que se deseja usar. A experiência adquirida em produtos similares ou programas de desenvolvimento anteriores é de fundamental importância nesta fase de planejamento de testes, pois permite ganhos de tempo, mão-de-obra, recursos experimentais e conseqüentemente dinheiro. Por estas razões é importante que exista um sistema que garanta o armazenamento e o acesso às informações relativas aos desenvolvimentos anteriores.

Inevitavelmente um programa de testes trará a tona modos de falhas e efeitos que não foram considerados durante as fases de desenvolvimento do projeto, sendo um fato já esperado, pois, se isto não ocorresse, os motivos para realização de ensaios seriam bastante limitados. É importante que um programa de testes cubra toda a gama de condições de uso, incluindo armazenamento, transporte, testes, reparos e outros aspectos que podem afetar a confiabilidade.

A variabilidade do processo de fabricação do produto é um item de fundamental importância a ser considerado na realização dos testes. Para garantir que os efeitos da variabilidade serão cobertos o tanto quanto possível, é muito importante realizar os testes de confiabilidade em várias unidades. O número de testes ou de unidades a serem testadas deve ser determinado considerando-se principalmente quais as variáveis chave que devem ser controladas, quão críticas são as falhas associadas com estas variáveis, qual é o custo dos equipamentos de teste ou do teste como um todo.

Um programa de testes de confiabilidade possui em várias ocasiões o tempo como limitado principal de suas ações. É necessário que os modos de falha apareçam diante das condições reais de utilização do produto ou processo. Se a duração prevista dos testes não for suficiente, for impraticável, ou inadequada para demonstrar tais modos, testes devem ser acelerados. O termo aceleração significa reduzir o tempo de ensaio para induzir a ocorrência de um dado modo de falha do produto. Para tanto executa-se um ensaio com as condições de utilização mais severas que as normais de uso, e os resultados são empregadas para estimas a confiabilidade nas ditas condições de projeto ou de uso. Face sua grande utilização no desenvolvimento de produtos, na seqüência do texto avalia-se em detalhes os ensaios acelerados.

2.3.2 - Testes Acelerados de Vida

Segundo Nelson, W (1998), estimar a distribuição de tempo até a falha ou o desempenho a longo prazo de componentes de produtos que alta confiabilidade é particularmente difícil. A maioria dos produtos modernos são projetados para operar sem falhas por anos, assim, é de se esperar o que poucas unidades falhem num teste com duração prática em condições normais de uso.

Para aqueles produtos onde o tempo disponível para o a realização dos testes é muito curto em relação ao tempo de vida útil para que este produto foi projetado, os testes acelerados de vida são largamente utilizados. São particularmente usados para obter informações da confiabilidade de componentes simples de produtos mais complexos, e proporcionando a possibilidade de uma identificação e remoção antecipada dos modos de falha, melhorando assim a confiabilidade. Neste ponto existem dificuldades práticas e questões estatísticas envolvidas na aceleração de vida, especialmente para produtos mais complexos que podem falhar de diferentes maneiras.

Geralmente, informações obtidas com a execução de testes com altos níveis de esforços (taxa de uso, temperatura, ou pressão) devem ser extrapoladas através de um

modelo físico para obter estimativas de vida ou desempenho em longo prazo sob níveis de esforços de menor magnitude, considerados normais de uso. Os resultados destes testes acelerados de vida são usados no processo do projeto de confiabilidade para avaliar o demonstrar a confiabilidade de componentes e/ou subsistemas para certificar componentes, detectar modos de falha e comparar a qualidade de diferentes fabricantes de um mesmo produto, da maneira mais rápida possível. Os testes acelerados de vida tem tornado-se mais importantes em função da rapidez das mudanças tecnológicas, produtos mais complexos com mais componentes, pressões por rápida introdução de novos produtos, e em alta expectativa dos consumidores para uma melhor confiabilidade.

2.3.2.1 - Métodos de aceleração

Juran, J. M. (1998) sugeriu que os três métodos de aceleração empregados na execução de testes acelerados de vida são:

- Aumento da taxa de uso (ou taxa de ciclos) do produto. Como exemplo um produto que foi projetado para ser utilizado duas vezes ao dia é submetido a um teste onde sua utilização ocorre mais de 300 vezes ao dia. Isto pode reduzir o tempo médio de vida desse produto que poderia ser de vários anos alguns dias ou semanas. Vale lembrar que devido a isto, não é necessário que todas as unidades falhem num teste de vida, e as informações usuais de confiabilidade devem ser obtidas em questão de dias ao invés de meses. Esta forma de aceleração é considerada como sendo a de utilização mais simples. O ponto chave é que uma taxa de uso aumentada não deve introduzir novos modos de falhas ou mudar os danos por taxa de ciclo para modos de falha já existentes;
- Aumentar a taxa de envelhecimento do produto, tal como o aumento da temperatura ou umidade que podem acelerar um processo químico tal como degradação química de um adesivo para colagem mecânica.
- Aumentar o nível de esforços sob quais as unidades operam. Uma unidade vai falhar quando sua resistência for inferior ao esforço aplicado. Sendo assim, uma unidade com a resistência degradada devido a um alto nível de

esforços vai geralmente falhar mais rapidamente do que ela iria falhar a níveis mais baixos de esforços. Esta análise é válida para mecanismos de falha que envolvem um processo de dano acumulado, como por exemplo o mecanismo da fadiga.

Combinações desses métodos de aceleração também podem ser aplicados. Um fator como a tensão elétrica irá, para alguns modos de falha, tanto aumentar a taxa de reação eletro químicas quanto aumentar o esforço ao qual o componente é submetido. Em tais situações, quando o efeito do esforço é complexo pode não haver um modelo físico ou empírico adequado à relação da taxa de aceleração.

2.3.2.2 - Modelos de Aceleração

De acordo com Juran, J. M. (1998), a análise testes acelerados de vida, além daqueles testes em que somente acontece em um aumento da taxa de utilização, deve ser um modelo físico razoável relacionando a algumas variáveis de aceleração como temperatura, voltagem, pressão, tempo até a falha, entre outros. Posteriormente este modelo deve ajustar-se para descrever o efeito real que esses fatores acelerados têm nas falhas, ou seja, deve-se trazer (extrapolar) o modelo acelerado para a condição real, demonstrando o que deveria acontecer no produto real.

a) Modelos de aceleração física

Para um bom entendimento dos modos de falha, pode ser possível usar um modelo baseado na teoria física/química que seja capaz não somente de descrever o processo causador da falha em um intervalo de dados, mas permitir uma extrapolação para condições de uso baseado no teste acelerado. Geralmente as relações entre as variáveis de aceleração e os mecanismos de falha são extremamente complexos. Muitas vezes, no entanto, é possível encontrar uma simplificação física que vai capturar e descrever adequadamente os aspectos dominantes do processo. Um dos modelos clássicos para a descrição de processos de falha associados com a ação da temperatura é o Modelo de Arrhenius.

b) Modelos empíricos de aceleração

Quando existe um pequeno conhecimento dos processos químicos ou físicos responsáveis pela falha, pode não ser possível desenvolver um modelo baseado na teoria física ou química. Um modelo empírico pode ser a única alternativa para a obtenção de relações entre dados de ensaio acelerados, permitindo a sua extrapolação. No entanto, tais modelos podem fornecer uma excelente adequação para dados disponíveis, mas podem ocasionar erros excessivos quando estes são extrapolados para as condições reais de interesse. Em algumas situações é desejável uma extensa experiência com modelos empíricos, o que pode fornecer a base necessária para a extrapolação para condições de uso.

Algumas orientações para o uso de modelos de aceleração incluem:

- usar a teoria física tanto quanto possível, e escolher as variáveis de aceleração que correspondam aos fatores causadores das falhas reais;
- Investigar tentativas anteriores para acelerar modos de falha similares àqueles de interesse;
- Projetar testes acelerados para minimizar, tanto quanto possível, o grau de extrapolação necessário. Testes acelerados com alto grau de aceleração podem causar modos de falha que não iriam ocorrer em condições de uso. Se falhas estranhas não são reconhecidas, elas podem levar a conclusões seriamente incorretas;
- A maioria dos testes acelerados são usados para obter informações de modos de falha simples ou relativamente simples (ou correspondentes medidas de degradação). Se existe mais do que um modo de falha, é normal que diferentes modos de falha sejam acelerados a diferentes taxa e, a menos que isto seja explicável no modelamento, interferências resultantes entre diferentes acelerações podem levar a interpretações incorretas dos resultados dos ensaios;

- Na prática, relações de aceleração são difíceis de serem verificadas em sua totalidade. Os dados de vida acelerada deveriam ser usados para procurar novas maneiras de atuação em um modelo de aceleração assumido, funcionando como uma re-alimentação para ajuste do modelo de aceleração;
- Modelos simples têm provado serem mais práticos nas extrapolações para condições de uso que modelos elaborados multi-paramétricos, tendo em vista a dificuldade da avaliação de todos os parâmetros que o influenciam;
- É interessante incluir algumas unidades de testes em condições que nenhuma falha seria esperada durante a duração do teste. Se falhas ocorrerem nessas condições, levantaria sérias preocupações a respeito da confiabilidade (isto sugere que o modelo assumido não é adequado).
- Programa de testes acelerados de vida devem ser planejados e conduzidos por times que incluam pessoas com conhecimentos do produto e seu ambiente de uso, com conhecimento de aspectos físicos/ químicos/ mecânicos dos modos de falha, os aspectos estatísticos do projeto e análise de experimentos de confiabilidade.

2.3.2.3 - Planejamento de testes acelerados de vida

Geralmente testes acelerados de vida precisam ser concluídos dentro de custos rigorosos e tempos restritos. Planejar cuidadosamente é essencial. Os recursos necessitam ser usados eficientemente, e o grau de extrapolação minimizado, para o melhor grau possível. Durante a fase de planejamento dos testes de um estudo, os executores devem tentar explorar o tipo de resultados que eles deveriam obter como função do modelo assumido do plano proposto de teste. Métodos de simulação, de acordo com os descritos nas orientações anteriores para a escolha do tamanho da amostra, também fornecem entradas importantes nesse processo.

2.3.2.4 - Análise de dados de testes acelerados de vida

A idéia básica para análise dos dados de ensaios acelerados de vida é começar pela análise dos dados de cada condição de testes separadamente, e então ajustar um modelo que explica o comportamento dos dados experimentais obtidos nas diferentes condições de aceleração. Resumidamente, a estratégia seria:

- 1- Traçar, em gráficos de probabilidade, os dados obtidos em cada condição de teste (nível do fator de aceleração) separadamente, para sugerir e explorar a adequação de possíveis modelos de distribuição probabilística para representar a confiabilidade do produto;
- 2- A cada condição de teste, modelos ajustados, conforme sugerido a no passo anterior, individualmente aos dados, usando o método da máxima probabilidade. Traçar as linhas da máxima probabilidade de em um gráfico de múltipla probabilidade para cada uma destas condições. Usar os pontos traçados e ajustar as linhas para a avaliar se o que foi assumido é razoável (tal como uma constante em de desvio padrão a cada condição de teste);
- 3- Ajustar o modelo para a relação assumida entre a vida e a variável de aceleração. Traçar o modelo ajustado em um gráfico de probabilidade, junto com os dados traçados;
- 4- Realizar uma análise residual e outro diagnóstico de verificação das suposições feitas para o modelo (como em uma análise de regressão padrão);
- 5- O obter as estimativas desejadas e os intervalo de confiança, e avaliar se são razoáveis;
- 6- Estimar a vida e a probabilidade de falha na condição de uso.

3 - Confiabilidade na manufatura

Sabe-se que um produto cujo projeto tenha sido criterioso pode não ser confiável em serviço devido a uma qualidade pobre na sua produção. A qualidade na produção é portanto uma necessidade indispensável em um esforço efetivo de confiabilidade.

Isto envolve o controle minimização da variabilidade das dimensões, das características dos materiais, dos erros de montagem, além da identificação e resolução de problemas.

Operações realizadas por seres humanos, particularmente as repetitivas, tarefas que não proporcionam prazer ou são enfadonhas podem constituir fontes de variabilidade. A automação de tais tarefas enfadonhas, geralmente leva a melhorias na qualidade. Exemplos típicos são operações de soldagem robotizadas, sprays utilizados em seções de pinturas, centros de usinagem CNC, solda de componentes eletrônicos a placas, entre tantos.

A variabilidade nunca pode ser completamente eliminada, uma vez que sempre existirão algumas operações humanas e mesmo os processos automáticos apresentam alguma forma de variação. Um projeto confiável deveria atender a uma variação de produção esperada, assim os projetistas devem estar cientes da variabilidade inerente aos processos de manufatura que serão utilizados.

O time de qualidade na produção deve usar as informações fornecidas por análises de projeto, FMEAs (do inglês Failure Modes and Effects Analysis ou Análise dos Modos e Efeitos de Falhas), e também testes de confiabilidade. Um processo de manufatura confiável será barato para produzir, em termos de redução de custos provenientes da geração de descartes e de retrabalhos.

O Controle Estatístico de Processo (conhecido pela sigla CEP) é o termo usado para a medição e controle da variabilidade da produção. Neste controle estatístico, as pessoas responsáveis pela qualidade na produção confiam pesadamente na distribuição s-normal. Geralmente é apropriado, por causa da tendência de limitação central para a s-normalidade de muitas fontes de variabilidade nos processos de produção. As pessoas envolvidas no controle da qualidade estão primeiramente preocupadas com o comportamento das variáveis em relação à tendência central, e conseqüentemente o controle é ajustado ± 2 a ± 3 vezes o desvio padrão do parâmetro medido.

3.1 - Capacidade de Processo

Refere-se à habilidade de um processo produtivo, dentro de sua variabilidade intrínseca, de atender às especificações de tolerâncias sobre ele impostas por especificações de projeto. Geralmente, referencia-se a uma distribuição Normal de resultados. O intervalo de tolerância é confrontado com a variabilidade do processo compreendendo 99,73% de todos os seus resultados possíveis quando se visa intercabiabilidade total. Conhecendo-se a capacidade do processo é possível prever o quanto o processo assegura as tolerâncias especificadas, selecionar ou modifica-los, monitorar processos (ex.: plano amostral), especificar requisitos de desempenho para novos equipamentos, auxiliar na seleção de fornecedores e no planejamento da qualidade da produção quando da identificação de interações entre a variabilidade do processo com as tolerâncias impostas.

Tradicionalmente, é avaliado por índices. Os índices que são frequentemente utilizados para expressar a situação de um processo de manufatura são:

⇒ **C_p** e **P_p** - Índices de variabilidade do processo de manufatura relativo às especificações constantes no desenho do produto;

⇒ **C_{pu}**, **C_{pl}**, **C_{pk}** e **P_{pk}** - Índices de variabilidade do processo de manufatura centralizado com relação às especificações;

⇒ **CR** e **PR** - Coeficiente de variabilidade do processo de manufatura relativo às especificações.

Um estudo de capacidade é realizado seguindo as etapas enumeradas abaixo:

- Definição sobre qual ou quais parâmetros de resposta o processo será analisado;
- Definição de qual ou quais equipamentos do processo farão parte do estudo;
- Definição das condições operacionais do processo;
- Definição de qual ou quais operadores tomarão parte no estudo;
- Monitoramento dos resultados (ex.: 100 observações);

- Obter μ e σ do processo;
- Calcular Pp ou Ppk;
- Análise dos valores obtidos e tomada de ações no sentido de manter bons resultados ou de monitorar e melhorar processo onde os índices foram baixos.

3.1.1 Conceituação do Estudo de Capacidade

Para melhor compreensão acerca do estudo da capacidade dos processos, esta seção apresenta definições sobre a terminologia utilizada.

Tamanho do Subgrupo

O primeiro passo chave para o controle de características variáveis é a determinação de subgrupos racionais - estes irão determinar a eficácia do gráfico de controle.

Os subgrupos devem ser escolhidos de forma que as oportunidades de variação dentro deste sejam pequenas. Se a variação de dentro de um subgrupo representa a variabilidade peça-a-peça em um curto intervalo de tempo, então qualquer variação incomum entre os subgrupos irá refletir mudanças no processo que devem ser investigadas para o direcionamento de ações apropriadas.

Para um estudo de lote inicial do processo, os subgrupos poderiam, em geral, ser (para \bar{X} - R e Med - R) compostos de cinco peças consecutivas produzidas representando uma única ferramenta, cavidade, molde ou qualquer insumo. Isto significa que as peças de cada subgrupo foram produzidas sob condições de produção muito similares em um curto intervalo de tempo; portanto, se estiver sob controle, a variação dentro de cada subgrupo irá refletir apenas causas comuns.

Número de Subgrupos

O número de subgrupos para um estudo inicial deve obedecer a dois critérios. Do ponto de vista do processo, um quantidade suficiente de subgrupos deve ser medida para assegurar que as maiores fontes de variação tiveram oportunidade de se manifestarem. Do ponto de vista estatístico, 25 ou mais subgrupos contendo cerca de 100 ou mais leituras individuais, proporcionam um bom ensaio para estabilidade e, se estável, uma boa estimativa da localização e da dispersão “spread” do processo.

Limite Superior de Especificação

O maior valor aceitável de um dimensão ou medição do produto especificado em um documento de engenharia.

Limite Inferior de Especificação

O menor valor aceitável de um dimensão ou medição do produto especificado em um documento de engenharia.

Operação

Operação da manufatura na qual a especificação de engenharia é originada.

Tabela do Estudo de Capacidade

A tabela do estudo de capacidade deve ser preenchida com as medidas encontradas. Cada linha representa um subgrupo e o tamanho do subgrupo é representado pelo número de colunas da tabela.

Lote Inicial

Conhecido como Estudo de Curto Prazo ou Lote Piloto, envolve a variação peça-a-peça. Normalmente, de 25 a 100 medidas são realizadas em peças de produção de maneira consecutiva. Durante este período, as condições do processo são mantidas tão constantes quanto possível. Esta técnica é freqüentemente usada para aprovação de set up, avaliação da condição da máquina, etc.

O processo deve se mostrar capaz em um estudo de curto prazo para que, no futuro, o processo seja capaz numa corrida efetiva de produção.

Lote de Produção

Conhecido como estudo de longo prazo, realizado em lotes de produção, considera a variação durante um longo período de tempo onde fontes de variação tais como operadores diferentes, variações de lotes de material, deterioração do equipamento, mudanças climáticas ou variações dos sistemas de medição tiveram possibilidade de ocorrer.

Índice de Capacidade (Cp)

O índice de capacidade de um processo é definido como a razão entre o campo de tolerância dimensional especificado para a peça e o valor do desvio padrão do processo multiplicado por seis. Este índice não leva em consideração a localização da média do processo em relação ao valor médio da dimensão especificada para o componente. O mesmo busca representar a relação entre a variação do processo e as especificações de tolerância definidas no projeto.



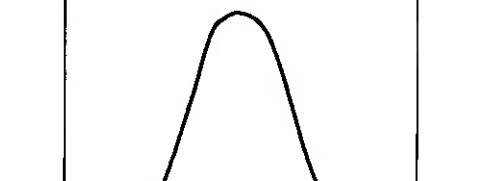
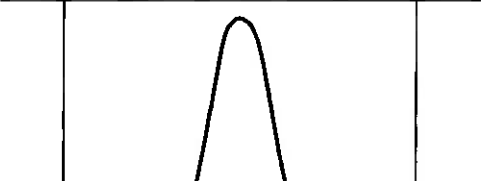
Processo		Cp	Quantidade total fora dos limites	Ações típicas a serem tomadas
		<1,0	≥ 5%	Alto controle do processo, segregação, retrabalho, etc
		1,0	0,3%	Alto controle do processo, inspeção
		1,33	64ppm	Inspeção reduzida, uso selecionado de gráficos de controle
		1,63	1ppm	Checagem pontual, uso selecionado de gráficos de controle
LIC	LSC			

Figura 3.1 – Quatro exemplos de capacidade de processos (Juran, J. M.1998, p22.17)

Índice de Capacidade Centralizado (Cpk)

O Cpk relaciona a distância entre a média do processo e o limite de especificação mais próximo com a metade da dispersão total do processo. A relação entre Cp e Cpk está exemplificada na figura 3.4.

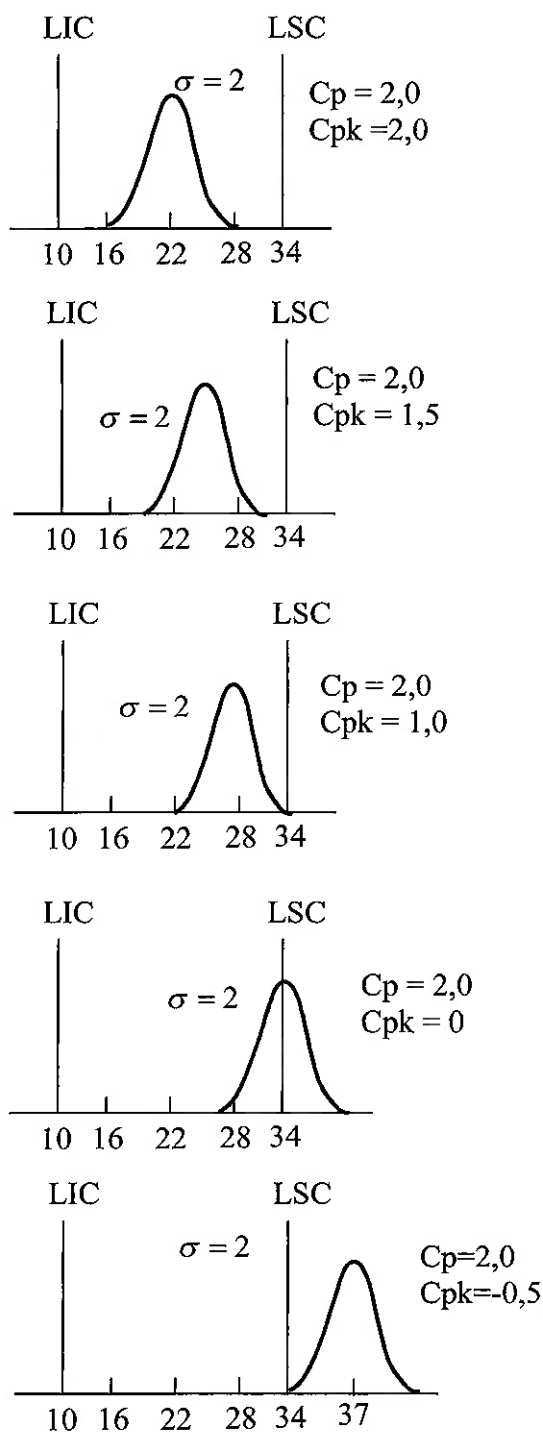


Figura 3.2 – Relação entre Cp e Cpk (Montgomery, Douglas C – 1996, p. 442)

Índice de Desempenho (Pp)

Aplicado a lotes iniciais, o índice de desempenho do processo é definido como a amplitude dos limites de especificação dividida pelo Desempenho do Processo, como calculado pela equação 3.1.

$$P_p = \frac{(LSC - LIC)}{6S} \quad (3.1)$$

(Juran, J. M., 1998, p. 22.18)

Índice de Desempenho Centralizado (Ppk)

O índice de desempenho do processo leva em consideração a centralização do processo em relação à sua média e é definido como o mínimo entre a capacidade superior e a inferior dividida por 3 vezes o desvio padrão da população, como definido nas equações 3.2 e 3.3.

$$P_{pLIC} = P_{pLSC} = \left(\frac{LSC - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIC}{3\sigma} \right) \quad (3.2)$$

$$P_{pk} = \min \{ P_{pLIC}, P_{pLSC} \} \quad (3.3)$$

(Juran, J. M. 1998, p22.17)

Capacidade do Processo

A capacidade do processo é a amplitude de 6 desvios padrão da variabilidade inerente do processo. Os requisitos de valores para os diversos índices de capacidade (Pp, Ppk, Cp e Cpk) devem ser definidos pelas respectivas áreas executantes dos estudos de acordo com a importância da característica estudada. Esse requisitos devem estar claros para os usuários da informação obtida.

3.2 – Controle estatístico do processo - CEP

O CEP é uma ferramenta que visa monitorar e avaliar um processo ao longo do tempo, auxiliando na detecção das causas de variabilidade, permitindo a tomada de decisões com base em fatos, e emprego de técnicas estatísticas para a avaliação dos processos.

As seguintes definições são aplicáveis ao controle estatístico do Processo:

Processo

Conjuntos de recursos e atividades inter relacionados que transformam insumos (entradas) em produtos (saídas).

No âmbito deste procedimento, os recursos são agrupados em 6 (seis) categorias: Meio Ambiente, Método, Mão de obra, Material, Máquina e Medição – os 6M's do processo.

Característica

Qualquer dimensão, tolerância, acabamento, material, parâmetro de processo ou outra característica especificada em desenhos de Engenharia e/ou Manufatura.

Estas características podem ser classificadas em: Variáveis ou Atributos.

⇒ **Variáveis (mensuráveis)** – são dados medidos em uma escala contínua.

⇒ **Atributos (dados discretos)** – são dados resultantes quando o número de ocorrências de uma característica particular de interesse é contado ou classificado. Estes são classificados em atributos por contagem e classificação. A tabela 3.1 traz exemplos de variáveis por atributos.

Tabela 3.1 – Exemplo de variáveis e atributos (Ramos Alberto W, 1998. p. 34).

Característica	Variável	Atributo
1 – Peso de um avião	X	
2 - Número de defeitos em 100 peças		X (Classificação)
3 – Número de acidentes por 1000 homens-hora trabalhados		X (Contagem)
4 – Número de páginas com erro em um relatório		X (Classificação)
5 – Diâmetro de um furo	X	
6 - Diâmetro de um rebite	X	
7 – Vida em serviço de uma aeronave	X	

Itens de controle

São características mensuráveis por meio das quais um processo é gerenciado.

Itens de verificação ou parâmetros-chave de processos

São características / parâmetros mensuráveis e passíveis de controle. São as principais causas que afetam um determinado item de controle de um processo.

Causas de variabilidade

A variabilidade está presente em todos os processos. No entanto, quando se tem uma variação previsível, chamamos estas de causas comuns. Quando há uma variação devido a uma situação particular de processo que faz com que este se comporte de forma diferente do usual, o que pode resultar em problemas de difícil diagnóstico e solução, denominamos esta variação como sendo causas especiais de processo

Cartas de controle

São ferramentas cujo objetivos de: controlar a variabilidade do processo e sua centralização em relação aos limites de especificação.

Tamanho da amostra (n)

Subconjunto de elementos extraídos de uma população.

População

É a totalidade dos elementos de um universo sobre o qual desejamos estabelecer conclusões ou exercer ações.

Limites de Controle

Limites que permitem avaliar se o processo está sob controle estatístico, ou seja a maioria dos valores de uma característica (pontos) estará contida no intervalo.

$$\mu \pm 3\sigma \quad (3.4)$$

Onde:

μ - média da população;

σ - desvio-padrão da população,

O termo maioria, indica genericamente a porcentagem de dados que devem estar contidos no intervalo em referência. Para intercambiabilidade total, esta porcentagem é de 99,73%.

Normalmente, utilizam-se a média e o desvio-padrão amostral, pois a fórmula acima só é válida se feita medição 100% da população de determinada característica.

Sistema de implantação

A figura 3.1 mostra o sistema (fluxo) de implementação de um controle estatístico de processo (CEP) para itens de controle ou parâmetros-chave de um processo padronizado.

FLUXO DE IMPLANTAÇÃO DO CEP

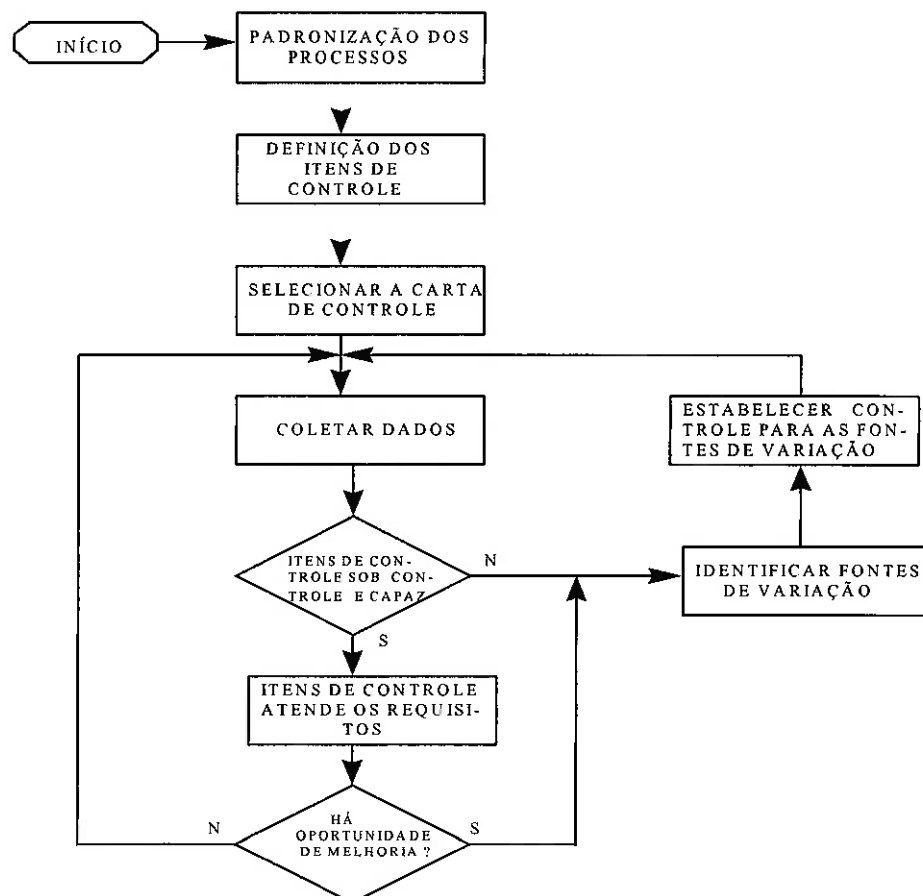


Figura 3.3 – Fluxo de implantação do CEP (Werkema, 1995, p. 210)

Definição do tamanho da amostra (n)

Por variáveis:

O tamanho da amostra (n) recomendado poderá variar de 3 a 6 elementos por amostra. Porém quando se tratar de cartas de controle \bar{x} e R_m , o tamanho da amostra é $n=1$.

Por atributos:

As cartas de controle para atributos necessitam de tamanhos de amostras maiores do que as cartas para variáveis. Tamanhos de amostra insuficientes trazem problema

para a construção do gráfico. Para que o tamanho da amostra seja suficiente, temos que observar as seguintes restrições:

$$\Rightarrow \text{para cartas de controle do tipo p ou np : } n \times p_{\text{barra}} \geq 5$$

$$\Rightarrow \text{para cartas de controle do tipo c ou u : } c_{\text{barra}} \geq 5$$

Onde:

p_{barra} = fração defeituosa média

c_{barra} = número médio de defeitos

Número (quantidade) de amostra (k)

O número de amostra (k) poderá variar de 30 a 50 pontos. Ex: n=3, serão coletados de 30 a 50 pontos onde cada ponto corresponde a 3 dados coletados, este ponto então é plotado na(s) carta(s).

Seleção das cartas de controle

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram fluxogramas de definição de cartas para variáveis e atributos

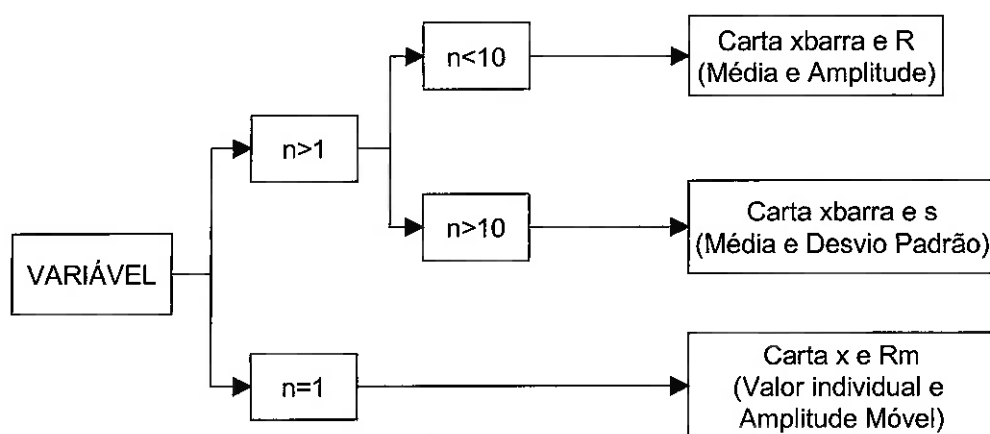


Figura 3.4 – Fluxograma de definição de cartas para variáveis e atributos (Ramos, Alberto W 1998. p. 50).

Variáveis:

Cartas p e R – A carta x_{barra} é utilizada com o objetivo de controlar a média do processo.

Cartas x_{barra} e S – A carta x_{barra} é utilizada com o objetivo de controlar a média do processo, enquanto a S é empregada para o controle da variabilidade do processo a ser empregado. A carta S é recomendada quando o tamanho da amostra é $n > 10$ pois, neste caso, a carta R perde eficiência ao estimar σ .

Cartas x e R_m – Utilizadas principalmente em situações onde a taxa de produção é baixa e em processos onde toda a unidade fabricada deve ser avaliada.

Cartas x_{alvo} e R – Há casos em que as medidas nominais de especificação de engenharia não é o melhor valor para a característica em estudo. O mesmo ocorre quando a especificação é unilateral, onde somente existe um valor máximo ou mínimo, e nenhuma medida nominal.

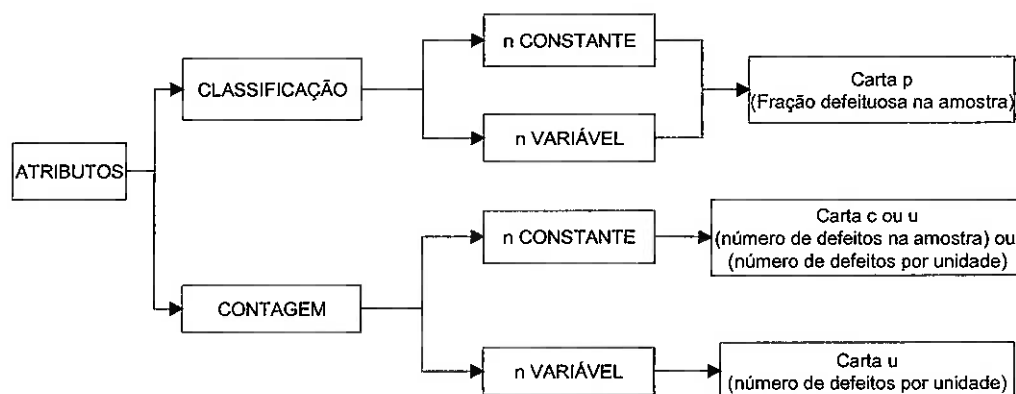


Figura 3.5 - fluxogramas de definição de cartas para variáveis e atributos: (Ramos Alberto W, 1998. p. 67).

Atributos:

Carta p – É utilizada quando a característica de interesse é representada pela proporção de itens defeituosos produzidos pelo processo considerado.

Carta c – É utilizada nas situações onde é necessário controlar o número total de defeitos em uma unidade do produto.

Carta u – É utilizada nas situações onde é necessário controlar o número total de defeitos por unidade produzida.

Frequência para a coleta dos dados

O ideal é que tratando-se de produção “em série”, a frequência de amostragem seja definida por unidade de tempo. (Ex. de 15 em 15 minutos coletar amostra de tamanho “n”).

A frequência “sugerida” de coleta dos dados (amostra “n”) é apresentada na tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Sugestões de frequência de amostragem (Alberto W. Ramos, 1998. p. 70).

TAXA DE PRODUÇÃO	Cpk	FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM SUGERIDA
Qualquer	menor que 1,0	Cada unidade
1 a 2 por turno	qualquer	Cada unidade
3 a 4 por turno	1,00 a 1,33	Cada unidade
3 a 4 por turno	1,34 a 2,00	2 por turno
3 a 4 por turno	acima de 2,00	1 por turno
5 a 8 por turno	1,00 a 1,33	4 por turno
5 a 8 por turno	1,34 a 2,00	2 por turno
5 a 8 por turno	acima de 2,00	1 por turno
9 a 32 por turno	1,00 a 1,33	cada segunda unidade
9 a 32 por turno	1,34 a 2,00	cada quarta unidade
9 a 32 por turno	acima de 2,00	cada oitava unidade
33 por turno ou mais	1,00 a 1,33	4 por turno
33 por turno ou mais	1,34 a 2,00	2 por turno
33 por turno ou mais	acima 2,00	1 por turno

Nota: Deve-se entender unidade como sendo a característica / parâmetro a ser monitorado por meio de CEP. Estas características poderão ser “chave” (key characteristic). Ex. Se em um processo de furação temos furos de diâmetro 12,7mm. que são característica chave, e o estudo inicial de capacidade apresentou Ppk ou $Cpk=1,10$; a frequência de coleta das amostras deverá ser de, a cada dois furos produzidos, medir um.

Crítérios da falta de controle de um processo (causas especiais)

As figuras 3.4 a 3.9 mostram os possíveis arranjos para pontos fora do controle.

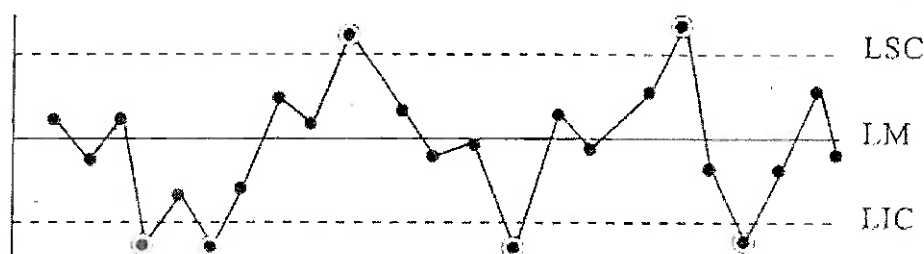


Figura 3.5: Carta de controle com pontos fora do limite de controle, (Werkema, 1995, p. 218)

Periodicidade – está presente quando a curva traçada na carta de controle apresenta repetidamente uma tendência para cima e para baixo, em intervalos de tempo que tem aproximadamente a mesma amplitude.

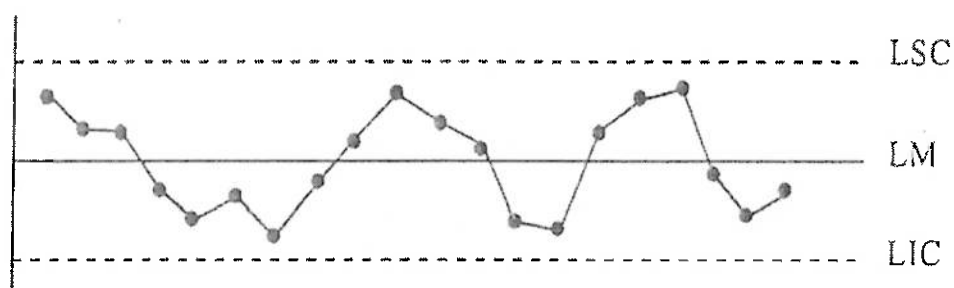


Figura 3.6 – Carta de controle com tendência para cima e para baixo repetidamente, (Werkema, 1995, p. 219)

Seqüência – é uma configuração em que vários pontos consecutivos da carta aparecem em apenas um dos lados da linha média. Abaixo, algumas seqüências consideradas anormais:

- uma seqüência de 07 ou mais pontos;
- uma seqüência como menos de 07 pontos, em que:
 - o pelo menos 10 de 11 pontos consecutivos aparecem em um mesmo lado da linha média;
 - o pelo menos 12 de 14 pontos consecutivos aparecem em um mesmo lado da linha média;
 - o pelo menos 16 de 20 pontos consecutivos aparecem em um mesmo lado da linha média.

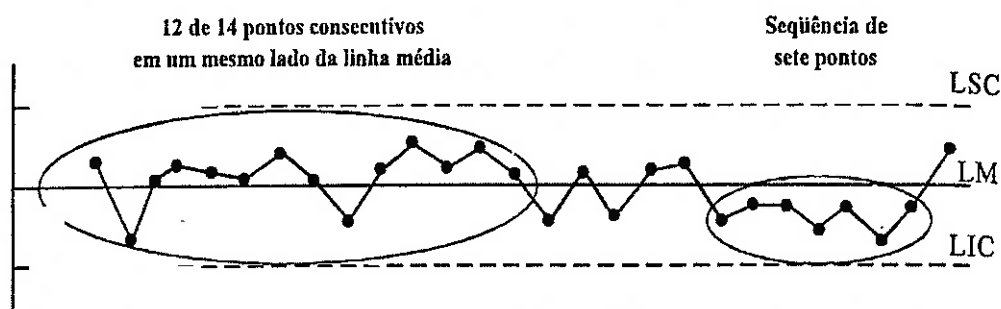


Figura 3.7 – Carta de controle com seqüência de pontos consecutivos(Werkema, 1995, p. 220)

Tendência – consiste em um movimento contínuo dos pontos da carta em uma direção.

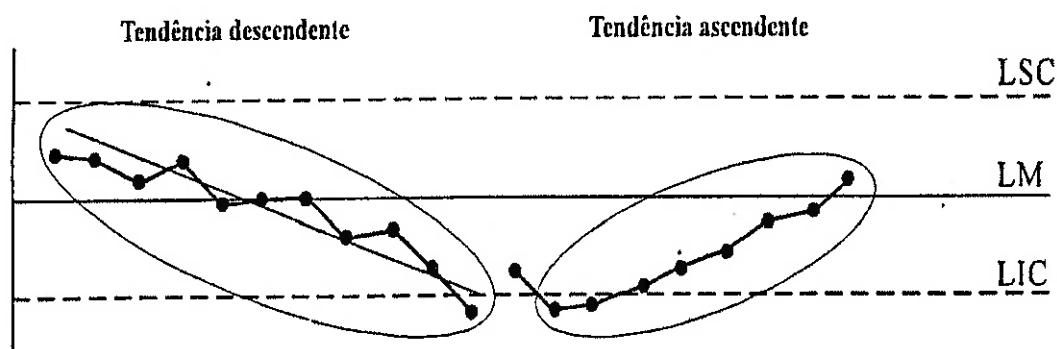


Figura 3.8 – Carta de controle com tendências (Werkema, 1995, p. 220)

Aproximação dos limites de controle – é a ocorrência de dois de três pontos consecutivos fora dos limites 2σ apesar destes pontos ainda estarem dentro dos limites de controle 3σ

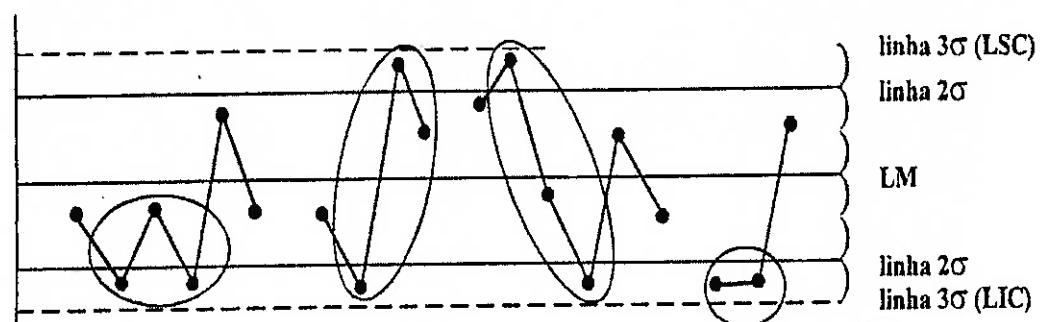


Figura 3.9 – Carta com aproximação dos limites de controle (Werkema, 1995, p. 221)

Aproximação da linha média – ocorre quando a maioria dos pontos plotados estão distribuídos muito próximo a linha média e dentro das linhas centrais de $1,5\sigma$

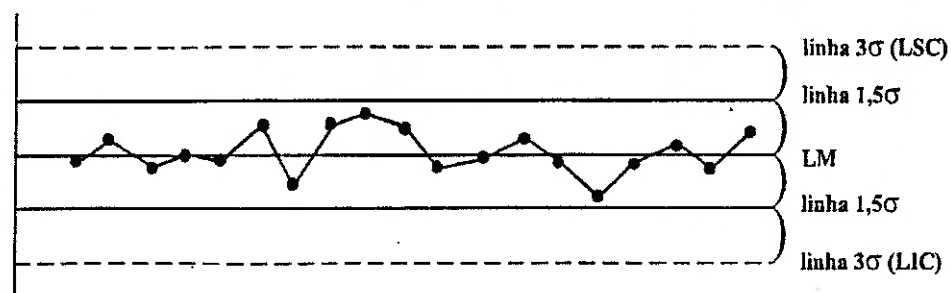


Figura 3.10 – Carta com aproximação de linha média (Werkema, 1995, p. 222)

Exemplos de aplicação de cartas de controle

- X_{barra} e R (Variáveis), mostradas na figura 3.10 e 3.11 respectivamente

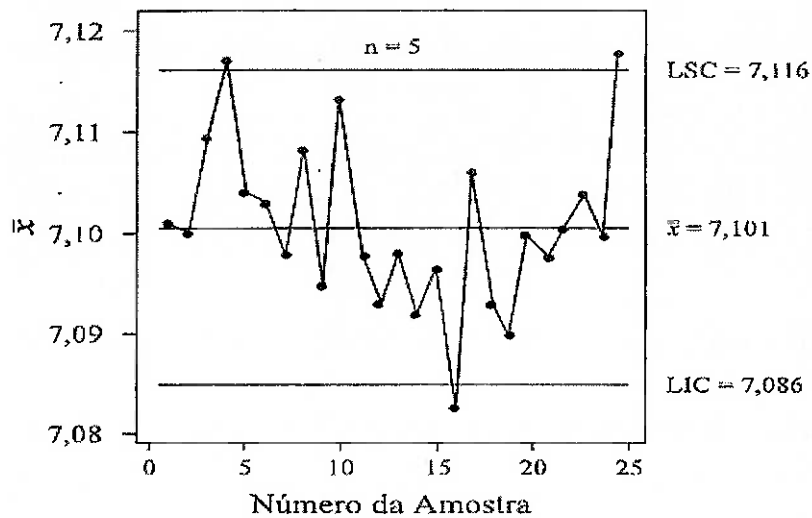


Figura 3.11 – Carta X_{barra} e R (Variáveis) (Werkema, 1995, p. 216)

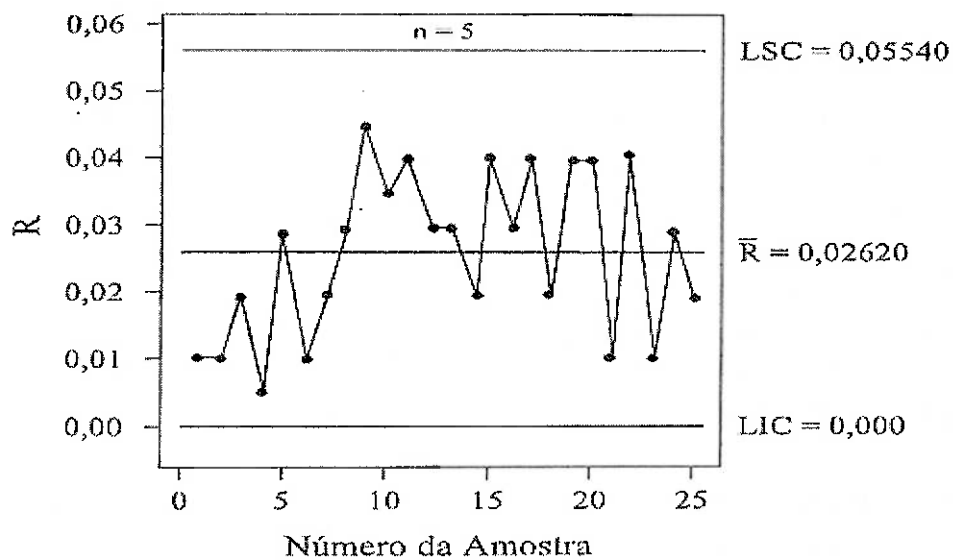


Figura 3.12 - Carta X_{barra} e R (Variáveis) (Werkema, 1995, p. 216)

- c (Atributos)

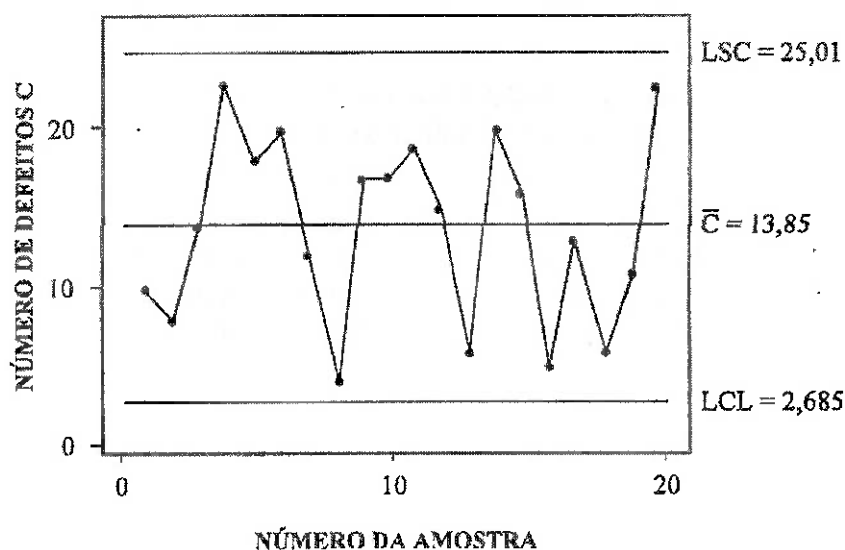


Figura 3.13 – Carta c (atributos) (Werkema, 1995, p. 217)

3.3 - Controle da Variação Humana

De acordo O'Connor, Patrick D. T (1985), vários métodos têm sido desenvolvidos para controlar a variabilidade inerente em operações humanas na manufatura. Abordagens psicológicas, tais como melhoria da motivação com melhores condições de organização do trabalho (housekeeping por exemplo), treinamento, incentivos à criatividade, têm sido usados desde início da industrialização. Tudo isto foi suportado pelo desenvolvimento dos métodos estatísticos já citados.

Inspeção – Uma maneira de controlar e monitorar o desempenho humana é através de inspeção independente. Esta foi a abordagem padrão do controle de qualidade desde os anos 50, e ainda é extensamente usada. Um inspetor pode atuar independentemente da produção com autoridade para rejeitar, solicitar correções e determinar descartes. No entanto a inspeção está sujeita a três grandes inconvenientes:

- 1- Os inspetores não são perfeitos; eles podem falhar durante a detecção de defeitos. e algumas tarefas, tais como a inspeção de um grande número de junções soldadas ou pequenas montagens, a inspeção pode representar um

quadro bastante deficiente, com a perda de detecção de 10 a 50% dos defeitos . O desempenho e subjetividade do inspetor também é variável tal como qualquer outro processo humano.;

- 2- A inspeção independente pode reduzir a motivação do pessoal de produção em fazer trabalhos com uma melhor qualidade na primeira vez. Pode levar as pessoas da área produtiva a se concentrarem somente na quantidade a ser produzida, legando a responsabilidade da detecção de defeitos para a inspeção;
- 3- A inspeção é muito cara. É uma operação essencialmente não produtiva, os recursos utilizados geralmente são mais caros que aqueles utilizados na produção (mão-de-obra inclusive).

Esses inconvenientes, particularmente o último, tem levado a um aumento da introdução do controle da qualidade pelo operador e da conhecida "Qualidade Assegurada". Sistemas de inspeção automáticos também têm sido largamente desenvolvidos utilizando tecnologias computadorizadas, como a metrologia óptica, entre outras.

3.3.1 - Controle do operador

De acordo com Falconi (1994), quando a produção é controlada pelo operador, o trabalhador da produção é responsável pelo monitoramento e pelo controle de seu próprio desempenho. Por exemplo, em uma operação de usinagem, o operador deverá medir a peça terminada, registrar os resultados e monitorar o desempenho em gráficos de controle da produção. A inspeção torna-se parte da operação de produção e a motivação do trabalhador é aumentada. Para isso, os trabalhadores da produção devem necessariamente ser treinados em técnicas de inspeção, medição e CEP. O controle do operador torna-se ainda mais relevante com o uso de máquinas que possuem recursos de medição, tais como computadores auto-monitorados ou máquinas de controle numérico computadorizado (CNC). Esta abordagem é um dos pilares do TQC (do inglês Total Quality Control – Controle Total da Qualidade).

3.4 - Failure Mode and Effect Analysis – FMEA

Segundo Chrysler, Ford & GMC (1995), O FMEA - Análise dos Modos e Efeitos das Falhas (do inglês “Failure Mode and Effects Analysis”) - é um método de análise de projetos (de produtos ou processos, industriais e/ou administrativos) usado para identificar os possíveis modos potenciais de falha e determinar o efeito de cada uma sobre o desempenho do sistema (produto ou processo), mediante raciocínio basicamente dedutivo, do tipo de “baixo para cima” (botton-up), buscando-se determinar modos de falha dos componentes mais simples, as suas causas e de que maneira eles afetam os níveis superiores do sistema. É, portanto um método analítico padronizado para detectar e eliminar problemas potenciais de forma sistemática e completa, dispensando cálculos mais sofisticados. Seu desenvolvimento é formalmente documentado, permitindo:

- Padronizar procedimentos;
- Fazer um registro histórico de análise de falhas, que poderá posteriormente ser usado em outras revisões de produtos ou processos, e no encaminhamento de ações corretivas em produtos similares.
- Selecionar e priorizar Projetos de Melhoria visando a confiabilidade (modificações no projeto/processo) que deverão ser conduzidos.

Neste raciocínio dedutivo, devem ser respondidas algumas perguntas básicas para uma análise via FMEA:

- 1- Que tipo de falhas é observado?
- 2- Que partes do sistema são afetadas?
- 3- Quais são os efeitos da falha sobre o sistema?
- 4- Qual é a importância da falha?
- 5- Como preveni-la?

Deve ser observado se, no início da análise, trata-se do FMEA de produto ou processo. Se for um FMEA de projeto de produto, as causas das falhas serão aquelas pertinentes a problemas no projeto, como mau dimensionamento, interferência,

desconhecimento do estado de tensões sobre a peça, especificação errônea do material, etc. Por outro lado, não serão consideradas as causas de falha decorrentes de uma inadequação do processo de fabricação, como por exemplo formação de vazios durante a fundição, mesmo que dessa inadequação decorra a fratura, com a conseqüente perda de função primária do item. Portanto, a importância em determinar se o FMEA é de projeto ou processo reside no fato de que, ainda que a falha e a conseqüência sejam as mesmas, o tipo de causa é distinto: a primeira diz respeito ao projeto; a segunda é decorrente do processo de fabricação, e a falha poderá ocorrer mesmo que o projeto seja perfeito.

3.4.1 - FMEA de processo

Chrysler, Ford & GMC (1995), citou que um FMEA do processo é uma técnica analítica utilizada pelo Grupo/Responsável pelo processo com a finalidade de assegurar que, na extensão possível, os modos de falha potenciais e suas causas/mecanismos foram avaliados; é um resumo dos pensamentos do grupo durante o desenvolvimento de um processo e inclui a análise de itens que podem falhar baseados na experiência e analogia com os problemas passados. Esta abordagem sistemática acompanha, formaliza e documenta a linha de pensamento que é normalmente percorrida durante o desenvolvimento de um processo.

O FMEA de processo:

- Identifica os modos de falhas potenciais do processo relacionadas ao produto.
- Avalia os efeitos potenciais da falha no cliente;
- Identifica as causas potenciais de falhas do processo e as variáveis que deverão ser controladas para redução da ocorrência ou melhoria da eficácia da detecção das falhas;
- Classifica modos de falha potenciais, estabelecendo assim um sistema de priorização para a tomada das medidas preventivas;
- - Documenta os resultados do processo.

3.4.1.1 - Definição de Cliente

A definição de cliente para o FMEA de processo pode ser citada como o usuário final do produto, uma operação subsequente do processo de manufatura, uma operação de montagem, ou uma operação de assistência técnica. Um programa de FMEA totalmente implementado requer um FMEA de processo para todas os processos novos, modificados e existentes que serão utilizados em novas aplicações ou ambientes. É iniciada pelo responsável pelo processo ou pelo coordenador técnico, o qual pode ser um fornecedor interno/externo.

A definição do “Cliente” para um FMEA de processo pode ser compreendida como o usuário final do produto, uma operação subsequente do processo de manufatura, uma operação de montagem, ou uma operação de assistência técnica. Um programa de FMEA totalmente implementado, requer um FMEA de processo para todas peças/processos novos, modificados e existentes que serão utilizados em novas aplicações ou ambientes. É iniciado pelo responsável do processo, que pode ser um fornecedor interno/externo.

3.4.1.2 - Grupo de Trabalho

No início do desenvolvimento do FMEA de processo o responsável deve envolver direta e ativamente representantes de todas as áreas envolvidas, tais como: montagem, manufatura, materiais, qualidade, assistência técnica e fornecedores, assim como a área responsável pelas operações subsequentes. O FMEA deve ser um catalisador para estimular a troca de idéias entre os departamentos envolvidos, promovendo desta forma uma abordagem de grupo.

O FMEA de processo é um documento dinâmico que deve ser iniciado antes ou durante o estágio de protótipos, antes do desenvolvimento das ferramentas para a produção, leva em consideração todas as operações do processo (desde a matéria prima até o produto final). É fundamental que as revisões e análises sejam realizadas

nos estágios iniciais de planejamento do processo, a fim de prever, eliminar e monitorar modos de falhas potenciais do processo em novos desenvolvimentos.

Assume-se que o produto, da forma como foi projetado, irá atender ao objetivo do projeto. Falhas potenciais que podem ocorrer devido a deficiências do projeto não devem ser consideradas no FMEA de processo, pois estas devem ser estudadas no FMEA de Projeto. O planejamento do processo leva em consideração as características do produto de forma a assegurar que, na extensão possível, o produto resultante atenda às necessidades e expectativas do cliente. O FMEA de processo não deve contar com modificações de projeto para atenuar deficiências do processo, mesmo porque estas últimas podem ser independentes do projeto.

3.4.1.3 - Desenvolvimento de um FMEA de Processo

Um FMEA de processo deve começar com um diagrama de fluxo/ avaliação do risco do processo global. Este diagrama deve identificar as características do produto/processo associadas a cada operação. deve ser incluída, se disponível, a identificação de efeitos no produto do FMEA de projeto correspondente. Cópias do diagrama de fluxo/avaliação de risco utilizados na execução do FMEA devem acompanhar a mesma.

Segundo Chrysler, Ford & GMC (1995), uma abordagem recomendada para a análise de processos críticos é o FMEA Estruturado, onde o processo é descrito na forma de uma estrutura onde são representados suas etapas. Cada etapa do processo é dividida em seus constituintes elementares: operador, máquinas/dispositivos, materiais e meio ambiente. A cada elemento constituinte são atribuídas funções; a cada função, suas respectivas falhas potenciais. Desta forma, garante-se uma análise completa e detalhada do processo. As falhas potenciais são encadeadas formando uma árvore de falhas. Três níveis consecutivos da árvore de falha são Efeito Potencial da Falha, Modo de Falha Potencial e Mecanismo / Causa Potencial de Falha, nessa ordem.

3.4.1.4 - Preenchimento da Tabela

Neste item do texto discute-se o preenchimento de uma tabela de análise do tipo FMEA, tal como a indicada na Tabela 3.2

Tabela 3.2 – Tabela do FMEA de processo, (Chrysler, Ford & GMC, 1995, p. 57,), (Helman, 1995, p. 133,134)

FMEA DE PROCESSO												
Número da Peça (Cliente)		Rev./Data do Desenho		Nome da Peça			Número da FMEA			Página 1 de 1		
Preparado Por				Responsável pelo Processo			Cliente					
Fornecedor				Identificação do Produto			Número/Rev. Peça (Fornecedor)					
Equipe						Aprovado Por			Data			
Observações						Data Início		Data Rev.		Data Chave		
Função & Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial da Falha	S C I L I V E S R A	Causa / Mecanismo Potencial da Falha	O C O R R	Controles Atuais do Processo	D E T E R	Ações Recomendadas	Responsável / Prazo	Resultado das Ações		
										Ações Tomadas	S C I L I V E S R A	D E T E R

Requisitos/Funções do Processo

Descrição simplificada do processo ou operação em análise (ex.: torneamento, furação, fresamento, soldagem, rosqueamento, montagem, etc.). Indica de forma concisa o propósito do processo ou operação, onde o processo envolve uma série de operações, (ex.: montagem) com diferentes modos de falhas potenciais, é aconselhável listar cada uma das operações como processos separados.

Modo de Falha Potencial (Processo)

O Modo de Falha Potencial é definido como a maneira pela qual o processo potencialmente falharia em atender aos requisitos do processo/projeto. É a descrição

de uma não-conformidade nesta operação específica, que pode ser associada com o modo potencial de falha de uma operação posterior (*output* da operação) ou ao efeito associado a uma falha potencial de uma operação anterior (*input* da operação) – retrata as interfaces do processo. Uma outra abordagem na execução do FMEA é assumir que os materiais/ peças oriundos de operações anteriores estão corretos.

Lista-se para cada operação do processo os modos de falha potenciais. Assume-se que a falha pode acontecer, mas não necessariamente vai ocorrer. O grupo/responsável pelo processo deve ser capaz de responder às seguintes questões:

- “Como o processo/peça poderia falhar em atender as especificações?”
- “Além das especificações de engenharia, o que um cliente (usuário final, operações posteriores, ou assistência técnica) considera como falha?”

De acordo com Segundo Chrysler, Ford & GMC (1995), um ponto de partida recomendado é a comparação com um processo similar e uma revisão das reclamações dos clientes (usuário final, operações posteriores, etc.). O conhecimento do objetivo do projeto também é necessário. Modos de falhas potenciais podem ser: *Dobrado, Sujo, Furado, Preparação imprópria, Com rebarba, Aterrado, Danificado no Manuseio, em Curto-Circuito, Rachado, Circuito Aberto, Deformado, Ferramenta Desgastada*, além do não atendido às especificações dimensionais, fenômeno que não afeta a qualidade do processo.

Severidade (Processo)

Severidade é uma avaliação da gravidade do efeito do modo de falha potencial (listado na coluna anterior) para o cliente. **A severidade se aplica somente ao efeito** segundo Chrysler, Ford & GMC (1995). Na avaliação da severidade o cliente (vide definição do cliente) deve ser consultado. O Critério de Avaliação sugerido para a ponderação da Severidade do Efeito é apresentado na Tabela 3.3.

Classificação (Processo)

Esta coluna pode ser usada para classificar (ex.: crítica, maior, chave, significativa) qualquer característica de um componente, subsistema ou sistema que podem requerer controles adicionais do processo. Se uma classificação for identificada no FMEA de processo, deve-se notificar o engenheiro responsável pelo desenho, pois esta pode afetar documentos de engenharia quanto a identificação do item de controle.

Tabela 3.3 - Critério de Severidade - FMEA de Processo (Chrysler, Ford & GMC, 1995, p37), (Helman, 1995, p. 133,134)

Critério para classificar a severidade do efeito	Classificação
Cliente interno / externo não perceberão o efeito adverso ou o mesmo é insignificante.	1
Necessidade de retrabalho sem interrupção da linha de produção e/ou o cliente externo não ficará aborrecido (retrabalho não reduzirá o desempenho do produto).	2
Necessidade de retrabalho com pequeno atraso da linha de produção ou alguns componentes são sucateados e/ou o cliente externo não ficará aborrecido (o retrabalho não reduzirá o desempenho do produto).	3
Necessidade de retrabalho com pequeno atraso da linha de produção, ou alguns componentes são sucateados e/ou a maioria dos clientes externos perceberão o defeito (o retrabalho implicará em uma pequena redução do desempenho).	4
Necessidade de retrabalho com moderado atraso da linha de produção ou alguns componentes são sucateados, atraso afetará o ciclo dos próximos produtos a serem fabricados e/ou cliente externo ficará moderadamente insatisfeito (o retrabalho reduzirá o desempenho de alguns dos componentes).	5
Necessidade de retrabalho com moderado atraso da linha de produção ou uma quantidade significativa de componentes são sucateados, atraso afetará o ciclo dos próximos produtos a serem fabricados e/ou cliente externo ficará parcialmente insatisfeito (retrabalho reduzirá o desempenho em algum dos componentes).	6
Necessidade de retrabalho com atraso de grande relevância da linha de produção ou uma grande quantidade de componentes são sucateados. Atraso afetará o ciclo dos próximos produtos a serem fabricados e/ou cliente insatisfeito (retrabalho reduzirá o desempenho em algum dos componentes, são aplicáveis defeitos relacionados a aparência, aspecto visual).	7
Cliente interno e/ou externo muito insatisfeito ou perda parcial das funções primárias de alguns componentes. A imagem da empresa no mercado pode ser prejudicada.	8
Afeta severamente o uso do produto final ou transgride a legislação governamental. A falha ocorrerá com aviso prévio. A segurança do operador de produção é afetada.	9
Afeta severamente o uso do produto final ou transgride a legislação governamental. A falha ocorrerá sem aviso prévio. A segurança do operador de produção e ou do cliente externo é afetada.	10

Efeitos Potenciais da Falha (Processo)

Efeito Potencial da falha é definido como o efeito do modo de falha percebida pelo cliente. Neste contexto, o cliente pode ser a próxima operação, operações posteriores, o revendedor e/ou o usuário final. Cada cliente deve ser considerado na avaliação do efeito potencial de uma falha. Descrever os efeitos da falha e termos do que seria observado pelo cliente. Para o usuário final os efeitos devem ser formulados em termos de desempenho do sistema ou produto, como:

Barulho, Aspereza, Operação, prejudicada, Inoperância, Aparência, degradada, Odor, desagradável, Instabilidade.

Se o cliente for a próxima operação, ou operações posteriores, os efeitos devem ser formulados em termos do desempenho desta operação/processo, como:

Não “dá aperto”, Não encaixa, Não fura/rosqueia, Não conecta, Não monta, Não encosta, Põe o operador em risco, Não veda.

Mecanismo(s)/Causa(s) Potenciais de Falha (Processo)

Causa Potencial da Falha é definida como a forma pela qual a falha pode ocorrer, descrita de forma específica e objetiva. Lista-se, da forma mais completa possível, todos os mecanismos/causas de falha concebíveis para cada modo de falha.

Se uma causa é exclusiva de um modo de falha, isto é, se a correção ou controle desta causa tem influência direta no modo de falha, então esta parte do FMEA está completa. Entretanto, muitas causas não são mutuamente exclusivas e, para corrigir ou controlar estas causas, devem ser determinados quais são os principais fatores e quais destes fatores podem ser mais facilmente controlados. As causas devem ser descritas de forma que as medidas preventivas sejam relacionadas às causas pertinentes. Causas de falhas típicas podem ser: Torque indevido - alto, baixo, Falta de acuracidade de sistemas de medição, Solda incorreta - tipo, tempo, pressão, Tratamento térmico incorreto - tempo, temperatura, Lubrificação inadequada, Peça faltante / montada incorretamente

“Devem ser listadas apenas falhas específicas (ex.: operador falha ao instalar uma junta de vedação). Frases ambíguas e genéricas (ex.: erro do operador, mal funcionamento da máquina) devem ser evitadas” (Chrysler, Ford & GMC, 1995, p35)

Ocorrência (Processo)

Ocorrência é a probabilidade de um mecanismo/causa específico (listado na coluna anterior) vir a ocorrer. A ponderação da ocorrência tem um significado mais importante que apenas seu valor. Estima-se a probabilidade de ocorrência em uma escala de “1” a “10” (Chrysler, Ford & GMC, 1995, p35)

Apenas a ocorrência referente ao modo de falha deve ser considerada nesta ponderação e não devem ser consideradas as falhas dos controles atuais do processo. Deve ser utilizado um sistema de ponderação que assegure consistência. As taxas de falhas prováveis são baseadas na frequência de falhas previstas para o processo. Se dados estatísticos de processos similares estão disponíveis, os mesmos devem ser utilizados para ponderar a ocorrência. Caso contrário, pode ser realizada uma avaliação subjetiva, utilizando as definições da coluna esquerda da Tabela 3.4 (Chrysler, Ford & GMC, 1995, p35), junto com quaisquer dados históricos de processos similares disponíveis. Para uma descrição detalhada da análise de desempenho do processo, consulte publicações específicas. Um critério de avaliação sugerido para a ponderação da probabilidade de ocorrência é apresentado pela Tabela 3.4. (O grupo deve concordar com um critério de ponderação que deve ser consistente, mesmo se modificado para análise individual de um processo)

Tabela 3.4 - Critério de Ocorrência - FMEA de Processo (Chrysler, Ford & GMC, 1995, p35), (Helman, 1995, p. 133,134)

Critério para classificar a ocorrência da causa	Classificação	Probabilidade da ocorrência
Remota probabilidade de ocorrência	1	1/10.000 = 0,01%
Baixa probabilidade de ocorrência com documento de apoio	2	1/5.000 = 0,02%
Baixa probabilidade de ocorrência sem documento de apoio	3	1/2.000 = 0,05%
Falhas ocasionais, processo sobre controle estatístico	4	1/1.000 = 0,1%
Moderada probabilidade de ocorrência com documento de apoio	5	1/400 = 0,25%
Moderada probabilidade de ocorrência sem documento de apoio	6	1/200 = 0,5%
Probabilidade de ocorrência relativamente alta com documento de apoio	7	1/100 = 1%
Probabilidade de ocorrência relativamente alta sem documento de apoio	8	1/50 = 2%
Ocorrência quase certa baseada em indicadores existentes, referências relacionadas a processos similares não é válida	9	1/20 = 5%
Ocorrência certa baseada em indicadores existentes, referências relacionadas a processos similares não é válida	10	1/10 = 10%

Nota 1: indicadores de processos similares são válidos para as classificações de 1 a 8.

Nota 2: exemplo de documento de apoio = check-list, folhas de operação, planos de controle.

Controles Atuais do Processo

Controles atuais do processo são descrições dos controles que podem detectar a ocorrência do modo de falha. Estes controles podem ser monitoramentos executados em pontos considerados chave do processo, como o Controle Estatístico do Processo (CEP), ou podem ser verificações após o processo. A avaliação pode ocorrer na própria operação, ou em operações posteriores que possam detectar o modo de falha desta operação.

Detecção

A detecção é uma avaliação da probabilidade dos controles de processo identificarem o modo de falha durante o processo. Uma escala de ponderação de “1” a “10” é utilizada. Deve-se assumir que a falha ocorreu e, então, avaliar a eficácia dos “Controles Atuais do Processo” em prevenir a saída de peças com este modo de falha ou defeito. Deve-se avaliar a “habilidade” dos meios de controle do processo detectarem os modos de falha com baixas frequências, ou evitarem que estes sigam adiante no processo. Não deve ser assumido automaticamente que a ponderação é baixa devido à baixa ocorrência (ex.: quando cartas de controle são utilizadas). Verificações aleatórias não são eficazes para a detecção de um defeito isolado e não devem influenciar na ponderação. Amostragens estatísticas são válidas como controle de detecção. O critério de Ponderação Sugerido para a Probabilidade de Detecção é apresentado pela tabela 3.5 (O grupo deve concordar com um critério de ponderação que deve ser consistente, mesmo se modificado para análise individual de um processo)

Número de Prioridade de Risco

O Número de Prioridade de Risco é o produto dos índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D).

‘É uma medida de risco do processo. Este número deveria ser utilizado para priorizar as deficiências do processo (ex.: Diagrama de Pareto). O NPR varia entre “1” e “1000”. Para NPRs altos a equipe deve concentrar esforços a fim de reduzir o risco calculado através de ações corretivas. De modo geral, deveria ser dada atenção especial quando a severidade é alta, independente do NPR resultante.’ (Chrysler, Ford & GMC, 1995, p. 41).

Tabela 3.5 - Critério de Detecção - FMEA de Processo(Chrysler, Ford & GMC, 1995, p39), (Helman, 1995, p. 136)

Critério para classificar a detecção dos modos de falha (problema)	Classificação	Probabilidade da detecção
É praticamente certo que o método de controle detectará o problema antes de atingir o próximo cliente	1	1/10.000 = 0,01%
Probabilidade muito alta do método de controle detectar o problema antes de atingir o próximo cliente	2	1/5.000 = 0,02%
Alta probabilidade do método de controle detectar o problema antes de atingir o próximo cliente	3	1/2.000 = 0,05%
Probabilidade consideravelmente alta do método de controle detectar o problema antes de atingir o próximo cliente	4	1/1.000 = 0,1%
Probabilidade moderada do método de controle detectar o problema antes de atingir o próximo cliente	5	1/500 = 0,2%
Baixa probabilidade do método de controle detectar o problema antes de atingir o próximo cliente	6	1/200 = 0,5%
Probabilidade baixa do método de controle detectar o problema antes de atingir o próximo cliente	7	1/100 = 1%
Probabilidade muito baixa do método de controle detectar o problema antes de atingir o próximo cliente	8	1/50 = 2%
Os métodos de controle atuais provavelmente não irão detectar o problema antes de atingir o cliente externo	9	1/20 = 5%
Os métodos de controle atuais com certeza não irão detectar o problema antes de atingir o cliente externo ou não são conhecidos métodos de controle para detectar o problema	10	1/10 = 10%

Ações Recomendadas (Processo)

Quando os modos de falha estiverem classificados pelo NPR, devem ser propostas medidas preventivas para os itens críticos/ com ponderação alta. O objetivo das ações recomendadas é reduzir a ponderação da ocorrência, ou da severidade, ou da

detecção. Se, por exemplo, mecanismos/causas de falha múltiplos ou interativos estão presentes. Se nenhuma ação for recomendada para uma causa específica, indicar isto colocando “Nenhuma” nesta coluna.

Em todos os casos em que o efeito de um modo de falha potencial representar perigo para o operador, medidas preventivas devem ser tomadas para evitar este modo de falha através do controle ou eliminação das causas, ou deve ser especificada proteção adequada para o operador. Um FMEA de processo completo e bem desenvolvido requer medidas preventivas específicas, factíveis e eficazes.

As seguintes ações podem ser consideradas:

- “A única forma de se conseguir uma redução na ponderação da severidade é alterando o projeto” (Chrysler, Ford & GMC, 1995, p. 41). Para reduzir a probabilidade de ocorrência, são recomendadas revisões do projeto/processo. Podem ser realizados estudos estatísticos para a obtenção de informações importantes para a prevenção de defeitos e melhoria contínua do processo.
- Para aumentar a probabilidade de detecção devem ser implementadas modificações no sistema de controle atual. Entretanto, a ênfase deve ser dada a ações de prevenção do defeito (reduzindo a ocorrência) e não apenas no aumento da detecção do mesmo, pois geralmente, a melhoria dos meios de controle somente agrega custos ao produto e é ineficaz na melhoria da qualidade do processo. O aumento de frequências de inspeção só deve ser utilizado como uma ação temporária. São necessárias ações permanentes. Por exemplo, uma modificação no projeto de uma peça específica pode auxiliar na detecção (ex.: soluções à prova de falhas). Outro exemplo ilustrativo seria o uso do Controle Estatístico do Processo e/ou a melhoria contínua do processo ao invés de inspeções ou auditorias da qualidade.

4. Processos de furação

De acordo com Ferraresi (1990), pode-se entender operações de usinagem como aquelas que destinam-se a conferir formas, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação desses três itens, através da retirada controlada de material produzindo por consequência o cavaco.

Dentre e as diversas operações de usinagem, o processo de furação é um dos mais utilizados na indústria manufatureira; a grande maioria das peças de qualquer tipo possuem pelo menos um furo, e somente uma parte muito pequena dessas peças, já vem com furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc). Este fato ocorre principalmente na indústria aeronáutica em função da característica de seus elementos de fixação e união, que na grande maioria, dependem de furos.

A furação é definida como sendo um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo cilíndrico numa peça, com o auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para que isto ocorra, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. Este processo pode ser subdividido nas seguintes operações:

- 1- Furação em cheio - processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça, removendo todo o material compreendido no volume do furo final, na forma de cavaco;
- 2- Escareamento - processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça pré-furada;
- 3- Furação escalonada - processo de furação destinado à obtenção de um furo com dois ou mais diâmetros;
- 4- Furação de centros - processo de furação destinado à obtenção de furos de centro, visando uma operação posterior na peça;

- 5- Trepanação - processo de furação em que apenas uma parte de material compreendido no volume do furo final é reduzida a cavaco, permanecendo um núcleo maciço.

Em geral, as peças têm que ser furadas em cheio ou terem seus furos aumentados através do processo de furação. Tendo em vista a quantidade de furos que devem ser executados em componentes estruturais de aeronaves, justifica-se a realização de estudos que visem a otimização deste processo, quer seja sob o ponto de vista de redução de custos ou com o objetivo de maximizar a qualidade obtida no processo.

Diniz (2000), citou que apesar de sua importância, tal processo recebeu poucos avanços até alguns anos atrás. As ferramentas de outros tipos de processo de usinagem, como do torneamento e fresamento progrediram rapidamente com a introdução de novos materiais para ferramentas, como metal duro, cerâmico, nitreto de boro cúbico e diamante. Atualmente, uma furação altamente eficiente é o resultado de projetos inovadores de ferramentas, os quais são constantemente testados em departamentos de engenharia, laboratórios e departamentos de furação em indústrias manufatureiras, construtores de ferramentas e usuários.

Tal atraso tem diversas razões, mas o principal é o diâmetro dos furos. Uma broca de 10 mm de diâmetro (que é bastante comum) para ser utilizada com velocidades compatíveis ao metal duro precisaria de uma rotação da ordem de 6400 RPM, bastante alta para as máquinas furadeiras convencionais.

Nos últimos anos, tem crescido utilização de centros de usinagem a comando numérico, CNC, e de máquinas de alta rotação, na casa de 15000 RPM, para execução do processo de furação. Com isto vários desenvolvimentos têm ocorrido com os materiais das ferramentas de furação. Alguns desenvolvimentos nessa área são:

- Broca de aço rápido revestida com nitreto de titânio - possibilitou um substancial aumento da velocidade de corte e/ou da vida ferramenta em relação à broca de aço rápido sem revestimento;

- Broca inteiriça de metal duro - quando o furo é pequeno (menor que 20 mm) e a máquina possui rotação, rigidez e potência suficientes, esta broca é uma boa alternativa;
- Broca com pastilhas intercambiáveis de metal duro - brocas desse tipo são inviáveis quando seu diâmetro é pequeno, devido à dificuldade de fixação dos insertos. Porém, para brocas de diâmetros médios, esta é uma boa opção, desde que a máquina permita sua utilização;
- Brocas especiais - quando o furo de diâmetro muito grande e/ou um comprimento muito grande em relação ao diâmetro (relação L/D grande) estes tipos de broca podem ser utilizadas.

Porém mais da metade das operações de furação ainda são realizadas com brocas helicoidais de aço rápido com ou sem camada de revestimento, o que torna o processo de furação bastante lento.

Outra desvantagem da furação com brocas helicoidais é a sua imprecisão. A tolerância dimensional normal de superfícies furadas é da ordem de IT11. Em termos de tolerância geométrica este processo e também é sofrível fazendo com que o comprimento do furo não possa ser muito grande, sob o risco de ocorrência de excentricidade.

Desta maneira, para furos de precisão, normalmente é empregada uma broca helicoidal e depois o furo passa por operações de acabamento, tais como alargamento, brochamento, madrilamento, torneamento interno, ou retificação interna. Além disso, muitas vezes, para se abrir um furo com broca helicoidal necessita-se primeiro fazer um furo de centro, para que a broca não realize um corte excêntrico já a partir do início do furo.

Devido a reduzida rigidez e potência das furadeiras, muitas vezes, para execução de um furo de diâmetro médio (na faixa de 12 mm de diâmetro), é necessário primeiramente usinar um pré-furo de diâmetro menor.

Já a utilização de brocas de metal duro em conjunto com máquinas modernas, possibilita alta rotação e rigidez, permitindo a obtenção de furos mais precisos muitas vezes sem a utilização de furos de centro e/ou pré-furos.

Várias dessas brocas possuem geometria com efeito auto-centralizador, significa que a geometria da broca evita ou minimiza a realização de furos excêntricos, mesmo sem a utilização de furos de centro ou buchas guia.

De acordo com o aumento da profundidade do furo, torna-se mais difícil a remoção do cavaco, tornando necessário que o processo seja constantemente interrompido devido a retirada da broca de dentro do furo para que o cavaco seja removido, principalmente nos casos em que o material está sendo furado forma cavacos longos. Furos profundos também apresentam problemas relacionados à lubrificação e a refrigeração da região de corte. Em alguns casos utiliza-se de brocas com canais de lubrificação interna que possibilitam a introdução de óleo de corte sob pressão através de seu interior, com um objetivo de atingir a região de corte diretamente.

4.1 Geometria das brocas

As partes de uma broca estão ilustradas na Figura 4.1, as quais são:

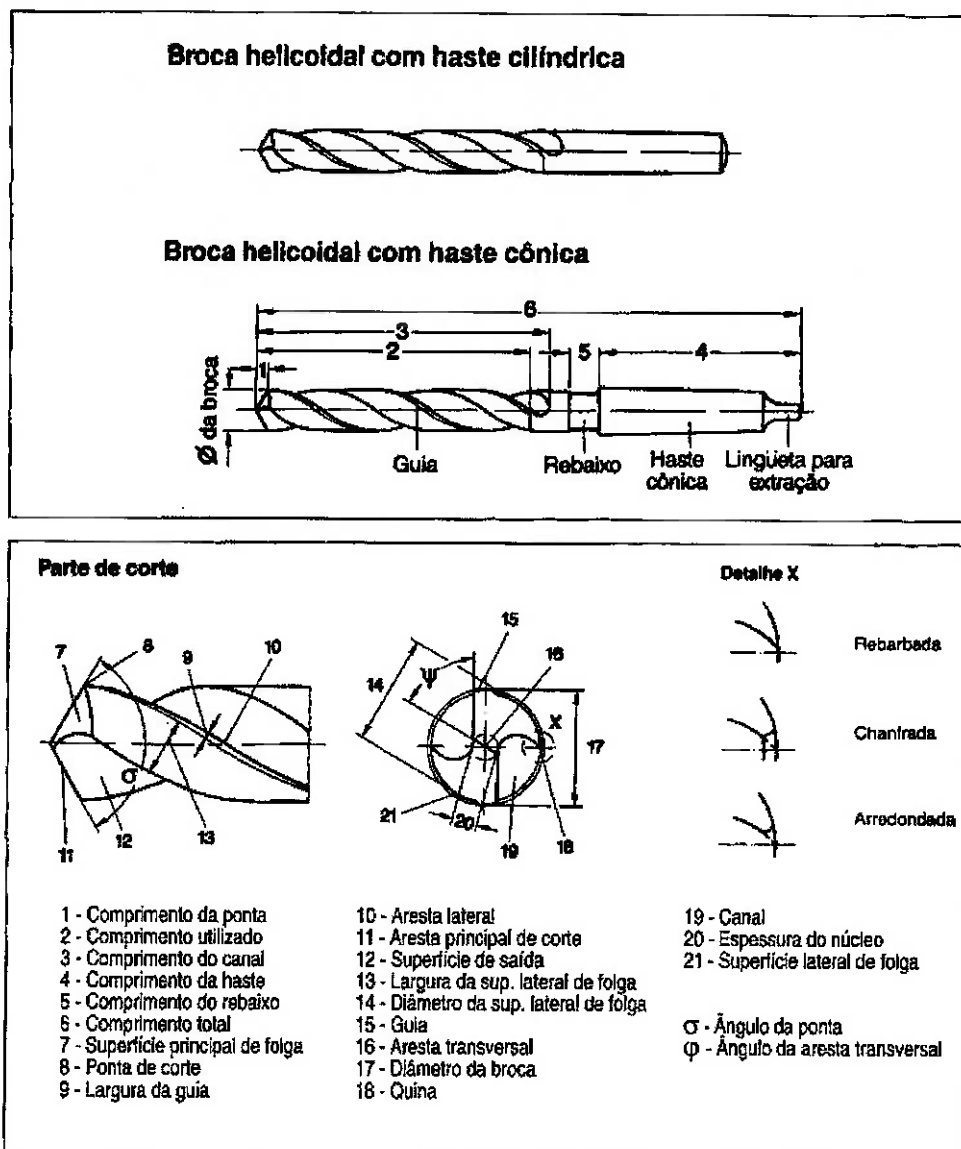


Figura 4.1 – Partes de uma broca (Diniz, Anselmo Eduardo, 2000, p. 179)

- 1- Haste - destina-se a fixação da broca na máquina. Em brocas de diâmetro pequeno (até 15 mm) usualmente usa-se brocas de haste cilíndrica e a fixação à máquina se dá por intermédio de mandris. Em brocas de diâmetros maiores, utiliza-se fixação com um cone morsa preso a máquina, o que possibilita uma maior força de fixação.
- 2- Diâmetro (D) - é medido entre as duas guias da broca.
- 3- Núcleo - parte interior da broca de diâmetro igual a $0,16D$. Confere rigidez a broca;
- 4- Guias - a superfície externa de uma broca helicoidal apresenta duas regiões (uma em cada aresta de corte) que têm diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca, são denominadas guias. Tem duas funções básicas - a primeira, como o próprio nome diz, é de guiar a broca dentro do furo; a segunda é a de evitar que toda a parede externa da broca esteja em contato com as paredes do furo, diminuindo assim os esforços necessários para a furação;
- 5- Canais helicoidais - são superfícies de saída da ferramenta. O ângulo de hélice de brocas normais, que na periferia da broca coincide com o ângulo de saída, pode ter diferentes ângulos determinados em função da aplicação da broca ou dos materiais em que será utilizada. O comprimento do canal helicoidal também pode variar dependendo do diâmetro da broca e do comprimento do furo que se deseja usinar;
- 6- Arestas de corte - em uma broca helicoidal as duas arestas principais de corte não se encontram um em um ponto, mas existe uma terceira aresta ligando-as. Esta terceira aresta é chamada de aresta transversal de corte. O ângulo formado entre as duas arestas principais, é chamado de ângulo de ponta (σ).

As brocas helicoidais são o tipo de ferramenta mais largamente utilizado nas operações de furação, especialmente para diâmetros pequenos, menores que 12 mm. Além delas existem uma infinidade de outras brocas destinadas a diferentes operações com máquinas de capacidade variada, podendo ser empregadas na furação de diferentes materiais

Em especial destacamos as já citadas brocas com lubrificação interna (também chamadas de brocas refrigeradas), que através de um sistema pneumático fornecem através do interior da broca o fluido lubrificante/refrigerante diretamente para a região de corte, onde melhora a lubrificação e refrigeração, e ainda ajuda na expulsão do cavaco do furo. Devidamente utilizadas, estas brocas podem ser úteis na furação de materiais de difícil usinagem e também podem melhorar as taxas de produção em materiais comuns.

As brocas de diâmetros múltiplos possibilitam usinar furos de dois ou mais diâmetros com uma única broca. Estas brocas são, de fato, extensivamente utilizadas em produção em massa e produzem uma grande economia de tempo de processo. Vários tipos de furos podem ser produzidos em uma única operação através de brocas de diâmetros múltiplos.

4.2 Geometria do Alargador

De acordo com Ferraresi (1990) o alargamento é o processo mecânico de usinagem destinado ao desbaste ou acabamento de furos cilíndricos ou cônicos, com auxílio de ferramenta geralmente multicortante. Para isto, a ferramenta ou a peça giram e a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo de rotação da ferramenta. O alargamento pode ser:

- a- Alargamento de desbaste - processo de alargamento destinado ao desbaste de um furo cilíndrico ou cônico;
- b- Alargamento de acabamento - processo de alargamento destinado ao acabamento da parede de um furo cilíndrico o cônico.

Para execução deste processo emprega-se o largador, que é uma ferramenta rotacional de corte com um ou mais elementos de corte, usada para alargar até o tamanho ou contornar um furo previamente o usinado.

Metal Cutting Tool Institute (1989) afirmou que as especificações da engenharia moderna geralmente envolvem a produção em massa de furos que possuem

superfícies lisas, precisão de localização, ou tamanho uniforme. Quase sempre, furos produzidos somente por brocas não satisfazem na integralmente estas especificações; para satisfazer a essas necessidades o alargador foi desenvolvido. O alargador é uma das ferramentas mais importantes usadas na manufatura de peças intercambiáveis para a produção em massa. Eles fornecem o método mais econômico e seguro para atingir a precisão e a intercambiabilidade desejada para as peças.

Avanços contínuos nas formas dos alargadores e nos materiais resultaram em precisão, alta produção, e maior vida das ferramentas.

As condições em que os alargadores são usados e os resultados que são desejados variam enormemente, tornando impossível fazer um guia que cubra todas as combinações possíveis. Algumas variáveis que afetam as operações de corte dos alargadores são:

- 1- Velocidade de corte (rotação do alargador);
- 2- Avanço;
- 3- Uso de buchas;
- 4- Material;
- 5- Condições da máquina;
- 6- Quantidade de matéria-prima a ser removida;
- 7- Acabamento necessário;
- 8- Tolerância do furo.

Assim como as brocas, existem diversos tipos de alargadores utilizados em função das especificações e das particularidades que cada furo e processo de fabricação requerem. As novas tecnologias de construção e de materiais possibilitaram excelentes avanços nestas ferramentas de maneira a facilitar a produção dos furos a um baixo custo, de acordo com as especificações cada vez mais rígidas da indústria moderna.

Os fatores que podem influenciar na seleção de alargadores para um determinado trabalho podem ser enumerados como:

- 1- Material a ser alargado;
- 2- Diâmetro do futuro;

- 3- Quantidade de matéria-prima a ser removida;
- 4- Precisão e acabamento desejados;
- 5- Custo;
- 6- Custos de manutenção;

O material a ser alargado influencia muito na seleção do melhor tipo de alargador. É evidente que se o material é de fácil usinagem, alargadores de construção simples podem ser usados para produzir os furos com qualidade satisfatória. Mas, se o material é duro, tenaz, resistente, ou rugoso na sua textura, previsões adequadas devem ser feitas para atender a estas condições.

A quantidade de matéria prima a ser removida tem influência direta na força necessária para girar o alargador e torna a resistência e rigidez dos alargadores muito importante.

Precisão e acabamento devem caminhar juntos. Precisão, neste caso, refere-se à tolerância no diâmetro, retilineidade, e ausência de uma “boca-de-sino” na extremidade do furo, enquanto que acabamento está relacionado com a rugosidade superficial do furo.

É bastante comum a utilização de processos onde os furos necessitam ser usinados com brocas e posteriormente alargados, e as duas operações podem ser feitas com uma única ferramenta, eliminando um segundo o manuseio de uma peça a ser usinada. Esta ferramenta é conhecida como broca combinada com alargador. A parte da broca deve estar inteiramente atravessada no material de trabalho antes que a seção do alargador comece a cortar, esse tipo de ferramenta geralmente é usada em furos rasos. O mais importante, que deve constar nas especificações da ferramenta, é o diâmetro da broca que deve geralmente ser maior que a profundidade do furo a ser usinado.

4.3 - Influência do material

Como dito nos itens anteriores deste capítulo, as características mecânicas dos materiais exercem influência na seleção das variáveis de controle de um processo de furação. Neste item é feita uma análise desta influência, considerando dois materiais usualmente empregados em componentes estruturais de aeronaves, os quais são alumínio e suas ligas e titânio e suas ligas.

4.3.1 Alumínio e ligas de alumínio

De acordo com Metal Cutting Tool Institute (1989), as operações de furação desses materiais tornaram-se bastante comuns e poucas dificuldades são encontradas. Algumas das novas ligas de alumínio com alta quantidade de silício ainda apresentam alguns problemas.

Para chapas de todos os tipos, brocas de uso geral ou brocas desenvolvidas para a indústria aeronáutica podem ser usadas. Para furos profundos, brocas de alta variação de hélice devem geralmente ser usadas.

Um problema comum na furação profunda é a quebra da broca. A maioria das quebras é resultado do acúmulo de cavaco causado pelo uso inadequado da broca, fluido de corte impróprio, troca de ferramenta inadequada, ou pelo uso do tipo errado de broca. Geralmente em furos profundos, são usinados com brocas de grande hélice, enquanto alguns materiais macios ou elásticos irão necessitar de uma broca de pequena hélice.

Na furação de alumínio, altas taxas de penetração (avanço) podem ser usadas; neste caso a capacidade de remoção do cavaco é muito importante. Para permitir essas altas taxas de penetração e ainda a remoção dos cavacos, as brocas devem possuir uma área livre para reduzir a geração de calor e um grande canal de saída para a passagem do cavaco.

4.3.2 - Titânio e suas ligas

Conforme Metal Cutting Tool Institute (1989), o aumento do uso desses materiais tem ampliado o conhecimento de como trabalhar com eles. Nem todas as ligas apresentam dificuldades na furação, a não ser devido às condições de trabalho que são de bastante incomuns.

O titânio e suas ligas apresentam características mecânicas e químicas bastante incomuns, que quando entendidas, eliminam os potenciais de problemas. O baixo calor específico e a baixa condutividade térmica aumentam a probabilidade de aquecimento no ponto de corte, e a dificuldade de refrigeração devido ao calor que não flui facilmente através de todo o material. Quando estão quentes, os cavacos de titânio são plásticos e tendem a quebrar e a atolar nos canais de saída da broca. O titânio quente é bastante abrasivo e suscetível a desgastar as superfícies de corte. Ele também é muito abrasivo em sua ação nas ferramentas de corte. Os cavacos de titânio são muito finos movendo-se rapidamente através das faces de corte em altas velocidades, bem maiores que as utilizadas para os outros materiais. Eles também se curvam rapidamente, assim área de desgaste é menor e concentrada adjacente à aresta de corte.

Os problemas técnicos são melhor combatidos através da redução da taxa de geração de calor. Isto pode ser feito através da redução tanto da velocidade quanto do avanço. Felizmente, esses materiais não se endurecem significativamente, assim um avanço mais baixo pode ser usado com sucesso. Reduções adicionais na geração de calor durante a furação podem ser obtidas através de uma menor espessura do núcleo da broca de maneira a aumentar a saída da aresta cortante. Devido à grande tendência que titânio e suas ligas possuem de soldar e gastar os pontos e as margens das brocas em temperaturas elevadas, uma grande quantidade de refrigerante deve ser usado sempre que possível.

4.4 - Características da formação do cavaco na furação

Diniz (2000) citou que um dos problemas do processo de furação é a evacuação dos cavacos dentro de um furo. Se os cavacos não foram formados de maneira tal que propiciem sua fácil retirada do interior do furo, eles podem causar o entupimento do mesmo, um aumento do momento torsor necessário para a furação e a conseqüentemente quebra da ferramenta.

A quebra de uma broca helicoidal dentro de um furo é um problema grave, pois além da perda da ferramenta, a retirada da broca do interior do furo é, em geral, uma tarefa cara e demorada e que, muitas vezes, leva à rejeição da peça. Desta maneira, é fundamental que os cavacos gerados tenham uma forma tal que sejam de fácil remoção do furo. Se um cavaco formado for grande, será muito difícil extraí-lo do furo. Os cavacos helicoidais ou em lascas são os que mais facilmente podem ser removidos do furo.

A remoção do cavaco pode ainda ser auxiliada pela utilização de um ciclo de furação que retire freqüentemente a própria broca de dentro do furo durante o processo de corte (o que gera tempos passivos extras) e/ou pelo insuflamento de fluido de corte sob pressão diretamente no fundo do furo, através de canais internos da broca.

O aumento do avanço facilita a quebra do cavaco e, conseqüentemente, a sua remoção de dentro do furo. A velocidade de corte diminui a medida que se caminha da periferia para o centro da broca, já que ela depende do diâmetro. Assim, quando materiais dúcteis são furados em cheio (sem perfuração), a formação de aresta postiça de corte na vizinhança do centro da broca é inevitável. O ângulo de saída das brocas helicoidais diminui no sentido da periferia para o centro da broca, sendo que os ângulos próximos ao centro serão bastante negativos. Este fato, somado aos baixos valores de velocidade de corte, de ângulo efetivo de folga, e a presença da aresta transversal de corte, faz com que as condições de corte nesta região sejam bem desfavoráveis.

Por este motivo, a força de avanço (força de penetração da broca) resultante é alta, gerando deformação (flexão e flambagem) da broca (principalmente para brocas de diâmetro pequeno) e do eixo-árvore (principalmente para máquinas pouco rígidas) e, conseqüentemente, desvio de forma e posição do furo (ovalização e excentricidade). Uma outra conseqüência dessa dificuldade de realização do corte no centro dos furos é a de formação plástica do material no fundo do fundo, causando encruamento em materiais dúcteis, o que aumenta ainda mais a força de avanço necessária.

Um outro problema comum na furação é a falta de retilineidade da linha de centro, principalmente em furos longos. Em geral, a melhor retilineidade é conseguida quando tanto a peça quanto a ferramenta giram. Se isto não é possível, a melhor opção é gerar somente a peça. A pior condição com respeito ao desvio da linha de centro, se obtém quando a ferramenta é dotada de rotação e a peça permanece parada (que ocorre na grande maioria das furadeiras e centros de usinagem).

4.5 Testes de brocas

Segundo Metal Cutting Tool Institute (1989), testes de desempenho de furação são feitos para uma variedade de razões mas o tema compreendido nas entrelinhas de todas estas razões é econômico - a produção de furos usinados ao mais baixo custo possível. Os testes atuais são feitos para determinar a melhor a técnica de furação, para comparar diferentes tipos de ferramentas e seus respectivos materiais ou checar a qualidade de novas ferramentas.

Os testes de furação devem ser feitos cuidadosamente controlados em condições de laboratórios ou em máquinas atuais de produção existentes no chão de fábrica. Os testes de laboratório geralmente são aplicados para desenvolver técnicas básicas de furação e também para desenvolver e avaliar novas formas de brocas ou materiais para ferramentas. Neste caso, um esforço considerável é feito para medir o desempenho de uma única da broca, e eliminar o efeito da máquina e das fixações onde a broca é usada. Isto requer atenção especial para as condições que cercam o teste, especialmente na rigidez da máquina e um fluxo adequado e contínuo de força

aplicado à broca. Os testes de produção, de outra maneira, são apontados para assegurar o melhor desempenho possível da broca em combinação com as máquinas de furação e as fixações existentes.

Uma variação considerável no desempenho das operações de furação será encontrada entre brocas individualmente e entre sucessivas reafiações de qualquer broca em particular. Uma pequena parte desta variação pode ser devido a variações de tolerância na fabricação das brocas em particular, a maioria destas variações é devido à falta de uniformidade na matéria-prima, condições da máquina, afiação da ferramenta e dificuldade em estabelecer um critério de falhas que indique o final de vida útil de uma ferramenta, envolvendo o fato que a broca é uma forma complexa helicoidal que possui um comprimento elevado em relação ao seu diâmetro, estando também sujeita a uma vibração torsional e flexão longitudinal, implicando em possíveis variações no modo de falha da ferramenta.

O fator mais importante para o sucesso dos testes de furação é a manutenção de condições uniformes de operação durante todo o teste. Os fatores que devem ser controlados incluem:

- 1- Máquina de furação e condições de fixação;
- 2- Velocidades e avanços;
- 3- Fluidos de corte;
- 4- Matéria-prima;
- 5- Afiação das ferramentas;
- 6- Critério de falhas na usinagem.

Uma perda de controle da uniformidade de algum dos fatores pode levar a resultados pobres implicando em um teste que não possa ser aproveitado. É necessário dizer que antes que anteriormente ao início do teste é prudente examinar cada um dos fatores acima para garantir que as melhores condições possíveis prevaleçam.

Devido às já mencionadas e inevitáveis variações encontradas, é necessário que um grupo suficientemente grande de brocas seja usado nos testes. Procedimentos simples

de análise estatísticas são viáveis e indicarão qualquer pequena diferença no desempenho observado em diferentes grupos.

Em testes de chão de fábrica geralmente é possível controlar todas as variações das máquinas e das peças em trabalho. Testes sobre tais condições são possíveis mas implicam na necessidade de um grande grupo de brocas e um considerável período de tempo. Estas brocas devem ser sistematicamente escalonadas entre as várias máquinas e grupos de peças para minimizar o efeito das variações específicas de cada máquina ou peça em particular.

É muito importante que registros precisos do desempenho de cada broca sejam mantidos. Qualquer condição não usual de máquinas, mudanças nas peças de trabalho, quebras acidentais, e outros incidentes, devem ser marcadas nos registros. Tais anotações são uma ótima assistência na análise dos resultados.

A determinação do final da vida útil de uma broca pode ser muito difícil. Alguns critérios utilizados incluem:

- 1- Ruído na broca;
- 2- Desenvolvimento de áreas de desgaste;
- 3- Dificuldade de corte da broca;
- 4- Falha total e destrutiva da brocas;
- 5- Tamanho do furo;
- 6- Acabamento do furo ou desenvolvimento de rebarbas;
- 7- Desgaste marginal da broca;
- 8- Quebra da broca (especialmente em brocas pequenas);
- 9- Aumentos predeterminados do torque ou potência.

Falhas destrutivas da broca podem ser um critério muito bom para brocas que geralmente são reafiadas. O material das peças em trabalho, fluido de corte, e outras condições de operação influenciam no tipo de falhas que surgirão. Uma certa quantidade de testes preliminares geralmente é necessária para determinar os

indicadores mais razoáveis e representativos da vida da broca, e todos os operadores participantes do teste devem concordar e utilizar o mesmo critério.

Não deve haver apenas um número suficiente de brocas, mas as brocas devem ser reafiadas em números suficientes de vezes que representem verdadeiramente a prática da fábrica. A reafiação deve incluir o corte da parte da broca em que houve arrancamento de metal principalmente nas margens, devendo buscar que as brocas afiadas sejam reconduzidas à condição de “novas”.

Na maioria dos trabalhos de teste a média aritmética da vida de várias utilizações é usada como o índice de desempenho. Com brocas, ocasionalmente ocorrem valores extremamente altos ou extremamente baixos de duração. A menos que o grupo de teste seja muito grande, a inclusão destes valores extremos pode influenciar excessivamente na média de vida. Um índice considerado muito melhor de medida de desempenho é a mediana da vida da broca. É a vida que deve ser excedida pela metade as brocas em cada grupo de teste.

5 - Descrição do processo de manufatura estudado

O processo a ser estudado diz respeito à execução dos furos da raiz da asa do avião Embraer 170, também conhecida como “Wing Stub”. Estes furos são responsáveis pela fixação da asa na fuselagem do avião. A importância desses furos na estrutura do avião dispensa comentários, uma vez que a asa é o elemento estrutural responsável pela sustentação do avião.

O “Wing Stub” é uma peça usinada composta de ligas de alumínio e titânio. Além de ser responsável pela fixação da asa na fuselagem do avião, também faz parte do sistema de tanques de combustível do avião.

A proposta de um estudo de confiabilidade do processo de manufatura destes furos ocorre em função da necessidade de emprego de um processo de furação automatizado, com a finalidade de atender a uma cadência elevada de produção e a severos requisitos de qualidade e precisão.

As principais finalidades da automatização do processo foram minimizar a influência da variabilidade humana e produzir os furos com o menor número de passos possível.

Na sequência deste item é feita uma análise baseada nos 6M's do processo (máquinas e equipamentos, mão-de-obra, meio ambiente, medição, método, material)

5.1 - Máquinas e equipamentos

As máquinas que foram compradas para a execução deste processo automatizado foram escolhidas após diversas avaliações de fabricantes e modelos disponíveis no mercado. A escolha final pelas máquinas semi-automáticas Quackenbush 230 indicada na Figura 4.5 ocorreu em função das características e vantagens listadas abaixo:

- Máquina pneumática de avanço positivo com potência de 2 HP sistema de fixação ao gabarito por “Taper Lock”;
- Potência 2 HP- Capacidade para furar grandes diâmetros em somente um passe;
- Avanço Positivo - avanço por rotação constante;
- Refrigeração interna - líquido refrigerante passa por dentro do furo da máquina e ferramenta de corte;
- Avanço rápido – para evitar perdas de tempo na aproximação da ferramenta á peça;
- Operação simples;
- Set up aproximado de 5min;
- Controle de rotação;
- Governador – pode aumentar ou diminuir a rotação dentro do range.



Figura 5.1 - Máquina de Furação Usada neste Estudo

Os dispositivos de fabricação responsáveis pelo posicionamento e fixação das máquinas, foram fabricados com a finalidade de promover um processo onde, durante a execução dos furos, não houvesse influência humana, ou seja, após fixar a máquina no dispositivo o operador seria responsável somente por ligar a máquina e o sistema de lubrificação/refrigeração da ferramenta. As variáveis de avanço e velocidade são automáticas, não variam durante execução da furação.

As ferramentas de corte utilizadas possuem desenho avançado a fim de produzir os furos com precisão e qualidade necessários no menor tempo possível. Basicamente são usadas duas ferramentas; uma broca combinada com alargador com características auto centralizadoras, a fim de evitar furos excêntricos; um alargador

com a finalidade fornecer acabamento e precisão final ao furo, tal como indicado na Figura 4.6.



Broca escalonada



Alargador

Figura 5.2 - Ferramentas de corte deste estudo

5.2 Mão-de-obra

Os operadores responsáveis pela execução do processo possuem larga experiência em processos de produção de furos, com uma boa base de cursos e treinamentos voltados para a montagem estrutural de aeronaves, permitindo além de sua execução uma boa avaliação do resultado do processo.

Os operadores também foram treinados pelo fabricante da máquina com objetivo de familiarizá-los com a sua operação e recursos.

Também tiveram treinamentos enfatizando os fundamentos da produção voltada para a qualidade, manuseio e avaliação das ferramentas de corte, importância da correta utilização do fluido refrigerante/lubrificante na operação de furação.

5.3 - Método

O método de trabalho segue a seqüência abaixo:

1. Posicionar máscara de furação através dos “tooling holes”;
2. Fixar máscara através de 16 pinos trava;

3. Ajustar e verificar os parâmetros de pressão, de ar e fluido refrigerante/lubrificante;
4. Conectar máquina a entrada de ar;
5. Fixar a máquina na máscara e direcionar o fluxo de fluido refrigerante/lubrificante na direção da ferramenta;
6. Acionar máquina para iniciar furação;
7. Re-posicionar na máquina para execução do próximo furo.

5.4 – Material

A raiz da asa é uma peça usinada composta por ligas de alumínio e titânio, as propriedades e procedimentos necessários já foram citados anteriormente.

5.5 - Meio ambiente

O meio ambiente não exerce função significativa no processo, as variações de temperatura existentes não atingem patamares que possam influenciar significativamente a dilatação da matéria-prima.

A ventilação, limpeza, e fornecimento de utilidades são adequados.

5.6 Medição

O setor produtivo possui instrumentos adequados para a medição dos diâmetros (calibrador tampão - ogiva). Foi realizado um estudo de GaugeR destes instrumentos a fim de verificar a sua repetibilidade, reprodutibilidade, estabilidade e calibração; o que demonstrou serem perfeitamente adequados para este uso.

6 -. Ensaios de avaliação da confiabilidade do processo

O processo de furação automático proposto possui um grau de inovação bastante elevado, com novas máquinas, ferramentas, método de trabalho, e finalmente o produto em si.

Conforme citado no início deste trabalho, os produtos da indústria aeronáutica em geral possuem um enorme valor agregado. A ocorrência de re-trabalhos e principalmente sucateamento de peças é proibitiva, principalmente neste caso do “Wing Stub”, de além de seu custo elevado possuem altíssima importância estrutural na aeronave.

Os furos realizados no “Wing Stub” em estudo, tal como indicado na Figura 5.1, alojam prendedores com tamanhos padronizados, no caso de algum erro durante o processo de furação, um reparo pode resultar em um furo com diâmetro maior que o especificado. Isto vai fazer com que seja necessária a utilização de um prendedor “over size”, que tem como consequência principal a falta de padronização, ou seja, não é um produto de prateleira. Durante a operação desta aeronave, caso exista a necessidade de manutenção ou substituição deste prendedor o custo desta operação com certeza será bem mais alto. Isto gera uma insatisfação e um descrédito da empresa perante seus clientes.

Esses são apenas alguns exemplos de itens que geram a necessidade de se ter uma avaliação prévia da confiabilidade do processo de fabricação desta peça. Vários itens que compõem o processo (máquinas, ferramentas, dispositivos de fabricação, fluido refrigerante/lubrificante, etc) foram exaustivamente e testados de maneira isolada, a fim de garantir o seu correto funcionamento e aplicação no processo.

Vários “try-outs” do processo também foram realizados, o que gerou uma grande quantidade de informações que foram utilizadas na melhoria e aperfeiçoamento do processo que seria entregue à produção. Porém, a verdadeira confiabilidade do processo em produzir diversos furos dentro dos requisitos necessários, em função do tempo de ensaio, antes não havia sido avaliada, e desta maneira foi proposto um ensaio com o objetivo de avaliar esta confiabilidade do processo final.

6.1 Descrição e Metodologia do ensaio

O ensaio proposto deve simular com maior fidelidade possível o processo de fabricação real; sendo assim, o único componente que não pode fazer parte deste ensaio, em função de seu custo proibitivo, é uma peça real do “Wing Stub”. Os outros componentes do processo foram todos utilizados com pequenas adaptações para que pudessem simular fielmente a situação real.

A furação da peça real é composta de 100 furos, havendo variação de diâmetro dos mesmos de acordo com a distribuição apresentada na Tabela 5.1. Verifica-se que os furos são executados em diferentes materiais, mais especificamente o titânio e o alumínio.

Tabela 6.1 Quantidade e Diâmetro dos Furos e Prendedores, e Material onde estes são executados - “Wing Stub”

Diâmetro do prendedor	Diâmetro nominal do furos	Quantidade de furos	
		Alumínio	Titânio
Ø1/2”	Ø12,787 ^{+0,000} _{+0,027}	39	0
Ø9/16”	Ø14,362 ^{+0,000} _{+0,027}	44	2
Ø5/8”	Ø15,950 ^{+0,000} _{+0,027}	11	1
Ø3/4”	Ø19,124 ^{+0,000} _{+0,027}	2	1
Total		100	

Tendo em vista a denominação dos furos apresentada na Figura 5.1, na Tabela 5.2 indica-se os conjuntos de furos que possuem uma dada dimensão, sendo que a maioria dos mesmos é preparada para alojar um prendedor de diâmetro $\frac{9}{16}$ ”. Embora a polegada não seja a unidade de dimensão linear recomendada pelo Sistema Internacional (SI), ela é empregada neste texto para referenciar a dimensão de componentes típicos de aeronaves, que tradicionalmente tem as dimensões lineares definidas no Sistema Inglês de unidades.

Tabela 6.2 Distribuição dos Diâmetros dos Furos no “Wing Stub”

Tabela 6.2 Distribuição dos Diâmetros dos Furos no “Wing Stub”

Diâmetro nominal	Pontos
$\text{Ø}12,787^{+0,000}_{+0,027}$	A4 a A32 / A89 a A98
$\text{Ø}14,362^{+0,000}_{+0,027}$	A1 a A3 / A33 a A50 / A66 a A88
$\text{Ø}15,950^{+0,000}_{+0,027}$	A51, A52 / A56 a A65
$\text{Ø}19,124^{+0,000}_{+0,027}$	A53 a A55

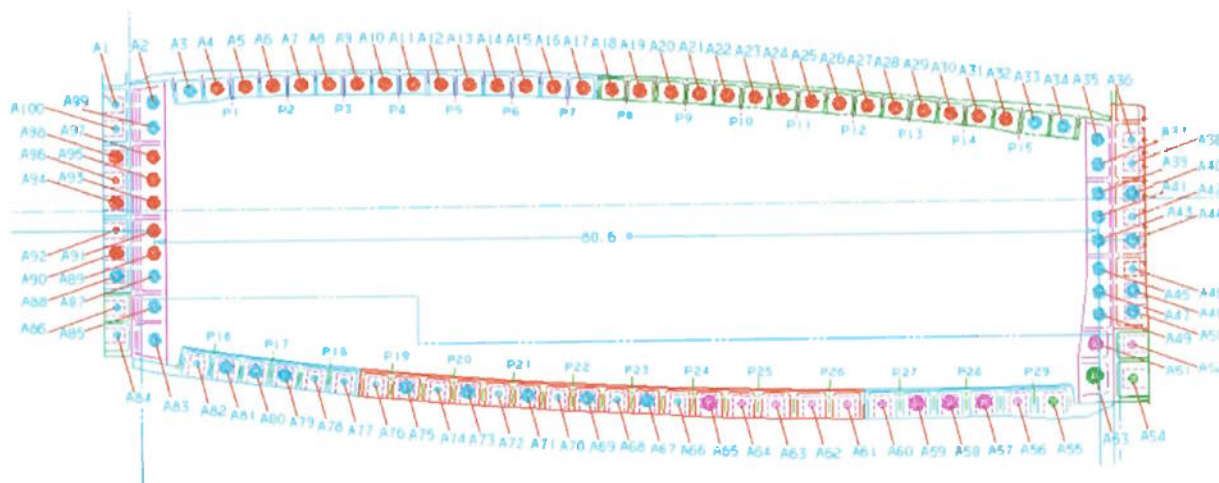


Figura 5.3 - Wing Stub com sua distribuição de furos

.Para simular a peça do “Wing Stub” foram propostos corpos de prova do mesmo material e espessura da peça real, e sua fixação no dispositivo de fabricação é feita de forma pensada, de maneira a simular a rigidez e estabilidade do elemento estrutural durante o processo de furação.

Na Tabela 5.3 apresenta-se o material e a espessura dos corpos de prova utilizados na qualificação da operação de furação. Cada corpo de prova, denominado simplesmente de CDP na sequência deste texto, é uma chapa com 1200 mm de comprimento e 400 mm de largura.

Tabela 6.3: Características dos corpos de prova propostos

Ø 1/2"	Ø12,787 ^{+0,000} _{+0,027}	7,93	Alumínio
Ø 9/16"	Ø14,362 ^{+0,000} _{+0,027}	7,93	Alumínio
Ø 5/8"	Ø15,950 ^{+0,000} _{+0,027}	19,20	Alumínio
Ø 9/16"	Ø14,362 ^{+0,000} _{+0,027}	8,57	Titânio
Ø 5/8"	Ø15,950 ^{+0,000} _{+0,027}	13,73	Titânio
Ø 3/4"	Ø19,124 ^{+0,000} _{+0,027}	19,20	Titânio

Em cada um destes corpos de prova é possível a execução de pelo menos 30 furos, tal como indicado na Figura 5.2.

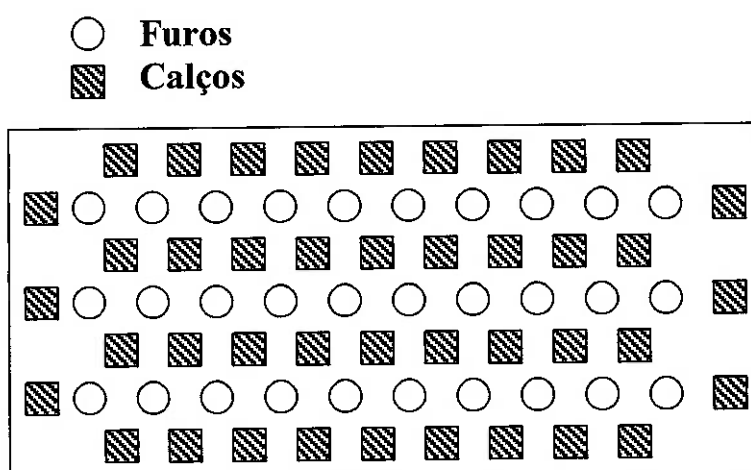


Figura 5.4: Corpos de prova propostos:

Para fixação dos CDP's foram utilizados grampos e calços para simular a rigidez da peças real, e o posicionamento da ferramenta foi feito de maneira similar ao processo real, ou seja, posicionar máscara de furação através dos "tooling holes", fixar máscara através de 16 pinos trava; ajustar e verificar os parâmetros de pressão, de ar e fluido refrigerante/lubrificante, Conectar máquina a entrada de ar; fixar a máquina na máscara e direcionar o fluxo de fluido refrigerante/lubrificante na direção da ferramenta; acionar máquina para iniciar furação; re-posicionar na máquina para execução do próximo furo.

Na furação do “Wing Stub” todos os furos possuem um furo guia inicial pré fabricado na peça primária usinada, com 8 mm de diâmetro. Estes furos também foram feitos nos CDP’s atendendo aos mesmos requisitos da peça real, com um controle rígido em seu posicionamento dimensional.

6.1.2 - Coleta de dados

A coleta das dimensões dos furos foi feita após a conclusão da primeira fase do processo onde é utilizada uma broca escalonada, posteriormente os corpos de prova foram posicionados utilizando os “tooling holes” dos dispositivos para que não houvesse descentralização entre e a primeira e a segunda fase. Os instrumentos utilizados foram os mesmos que serão utilizados nas operações normais de produção.

A medição dos furos é feita com Relógios Comparadores Digitais com Ogiva, que realizam a medição dos diâmetros do corpo cilíndrico do furo através de movimentos radiais e longitudinais a fim de colher os diâmetros ao longo de todo o corpo cilíndrico. O movimento durante a medição é realizado de forma a percorrer o máximo de área do furo. São registrados no relógio os valores mínimo e máximo obtidos. A figura 5.4 apresenta o Relógio Comparador Digital com Ogiva e os movimentos de leitura de medição.

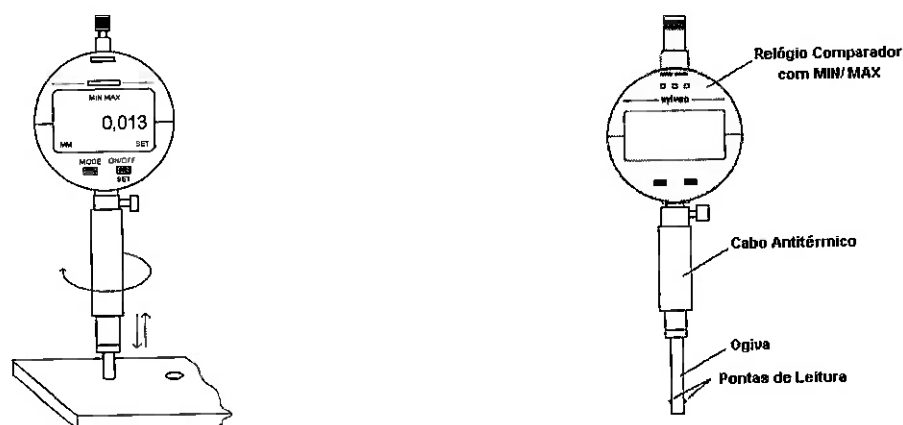


Figura 5.5 – Relógio Comparador Digital com Ogiva e movimentos de leitura de medição.

6.1.3 - Testes especiais

Foram feitos alguns testes simulando falhas durante o processo a fim de analisar conseqüências e modos de falha prováveis. Como exemplo podemos citar o posicionamento errado do fluxo de fluido lubrificante/refrigerante, descentralização dos furos entre a fase 1 e a fase 2, descentralização do furo guia entre outros.

6.1.4 - Ferramentas

Todos os testes foram realizados com ferramentas novas a fim de eliminar a influência do processo de reafiação. Existe e a intenção da realização de testes específicos para a medição do desgaste e vida das ferramentas, assim como uma análise detalhada do processo de afiação e suas influências. Durante a execução de cada furo verificou-se as condições de desgaste das ferramentas, após o final do ensaio as ferramentas eram analisadas para verificações de condições de desgaste. As ferramentas não foram utilizadas até que ocorresse sua quebra ou mesmo reafiadas pois o objetivo do trabalho era o de qualificar o processo.

6.1.5 - Tamanho das amostras

O desvio padrão de nossa população não era conhecido por tratar-se de um processo novo, com máquinas automáticas e pouca influência dos operadores (fatores de grande melhoria no processo).

Tomando por base a distribuição da média amostral, obtida através do estudo de amostras compostas por n elementos da variável aleatória x , a expressão do intervalo de confiança da média da população é

$$\bar{X} - z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

Quando o desvio padrão da população, σ , é desconhecido, pode-se substituí-lo por sua estimativa S (desvio padrão da amostra), quando a amostra tiver mais do que 30 elementos, e a expressão 5.1 toma a forma

$$\bar{X} - z \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + z \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5.2)$$

Se a amostra for menor do que 30 elementos e σ for desconhecido, esta teoria não se aplica.

O desvio padrão calculado do processo de furação do Wing Stub da aeronave ERJ 145 é conhecido a partir do CEP feito durante a produção que já supera 600 unidades, sendo que seus valores que variam entre 0,0001 mm e 0,0003 mm. A tendência do novo processo é de que seja mais confiável que o utilizado no ERJ 145 que não é automatizado. Os valores deste desvio padrão do ERJ 145 é muito pequeno, resultando em um intervalo de confiança bem menor que o intervalo de tolerância especificada em desenho que é de 0,027 mm, desta maneira uma amostra com um pequeno número de elementos já é bastante representativa. Desta maneira,

decidiu-se adotar um número mínimo de 30 elementos por amostra para o processo em estudo.

6.2 - Análise dos dados

Neste item do texto são apresentados os resultados dos ensaios de qualificação do processo, conforme metodologia apresentada no item 6.1.

Para CDP empregado, caracterizado por um material e uma espessura, são listados os diâmetros obtidos para cada furo, em termos de valores máximos, mínimos e médios, em conformidade com o processo de medição apresentado no item 5.1.

6.2.1 - CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$ mm

Neste item avaliam-se os resultados obtidos experimentalmente para o processo de furação do CDP de alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$ mm. Foram executados 45 furos, sendo os diâmetros dos mesmos apresentados na Tabela 5.4. No final de cada ensaio as brocas e os alargadores foram analisados para verificação de sinais de desgaste, marcas ou deficiências de corte.

Testes especiais:

- Nos furos 31 a 35 foi simulada deficiência na lubrificação / refrigeração na broca escalonada de furação inicial com diminuição da vazão do fluido lubrificante / refrigerante;
- Nos furos 36 a 40 foi simulada deficiência na lubrificação / refrigeração no alargador final com diminuição da vazão do fluido lubrificante / refrigerante;
- Nos furos 40 a 45 foi simulada deficiência na lubrificação / refrigeração na broca escalonada de furação inicial e no alargador final com diminuição da vazão do fluido lubrificante / refrigerante;

Tabela 6.4 – Dados do CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
1	12,801	12,804	12,803
2	12,800	12,804	12,802
3	12,800	12,803	12,802
4	12,800	12,804	12,802
5	12,800	12,803	12,802
6	12,800	13,012	12,906
7	12,800	12,804	12,802
8	12,799	12,804	12,802
9	12,800	12,804	12,802
10	12,800	12,803	12,802
11	12,801	12,805	12,803
12	12,801	12,804	12,803
13	12,801	12,804	12,803
14	12,801	12,805	12,803
15	12,801	12,805	12,803
16	12,801	12,805	12,803
17	12,801	12,804	12,803
18	12,802	12,805	12,804
19	12,802	12,804	12,803
20	12,801	12,803	12,802
21	12,802	12,805	12,804
22	12,801	12,804	12,803
23	12,802	12,804	12,803
24	12,802	12,804	12,803
25	12,802	12,805	12,804
26	12,801	12,804	12,803
27	12,801	12,804	12,803
28	12,801	12,804	12,803
29	12,801	12,806	12,804
30	12,802	12,808	12,805
31	12,802	12,805	12,804
32	12,802	12,805	12,804
33	12,802	12,805	12,804
34	12,803	12,806	12,805
35	12,803	12,808	12,806
36	12,802	12,805	12,804
37	12,801	12,804	12,803
38	12,801	12,804	12,803
39	12,801	12,805	12,803
40	12,801	12,805	12,803
41	12,800	12,803	12,802
42	12,801	12,804	12,803
43	12,800	12,804	12,802
44	12,803	12,809	12,806
45	12,800	12,804	12,802

Na sequência da análise executa-se o histograma da distribuição do diâmetro dos furos, analisando a aderência do mesmo à distribuição normal. Adicionalmente são calculados os diversos índices que caracterizam a “qualidade” do processo, já descritos no item 3 deste texto.

Alumínio 12,787

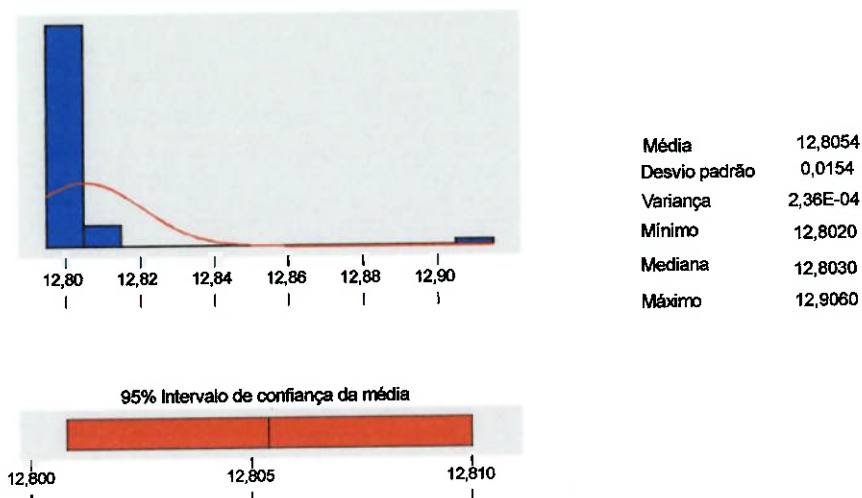


Figura 6.1 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança do CDP de alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$

O ponto n°6 com valor de 12,906 é o único que apresentou a média fora do limite máximo especificado que é de 12,814, caracterizando algum tipo de causa especial durante sua execução. Decidiu-se por retirá-lo da distribuição a fim de verificar o comportamento do restante da distribuição.

Alumínio 12,787 sem o ponto nº 6

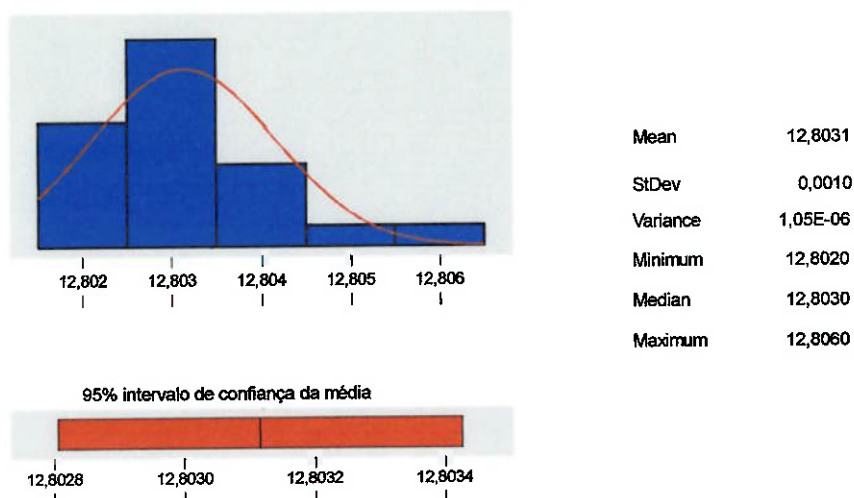


Figura 6.2 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança do CDP de alumínio, espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$ após a retirada do ponto nº 6.

Análise de capacidade do processo Alumínio 12,787

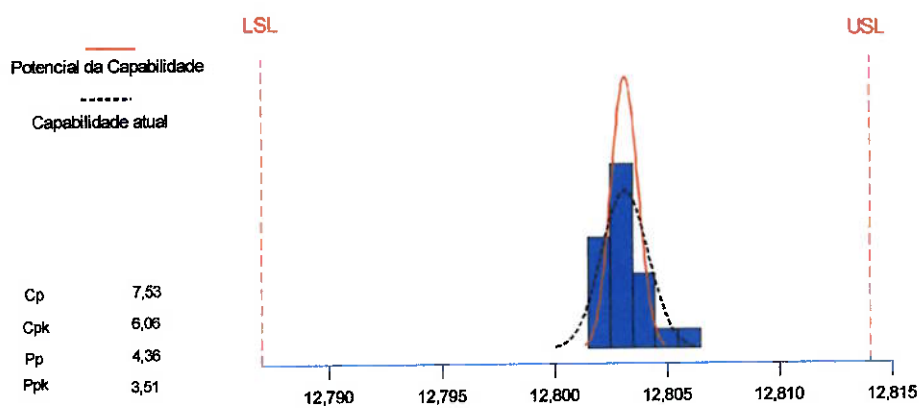


Figura 6.3 – Análise de capacidade do processo do CDP de alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $12,787^{+0,000}_{+0,027}$ após a retirada do ponto nº 6.

Comentários

- Após a retirada do ponto nº 6 notou-se uma melhoria na aderência da distribuição a uma curva normal, os valores dos índices de capacidade foram bem altos, demonstrando que o processo possui uma boa capacidade e estabilidade;
- Estes valores também demonstraram uma tendência da distribuição para os limites superiores do intervalo de tolerâncias, fato comum quando existe o uso de ferramentas novas, com o passar do tempo elas desgastam-se e a distribuição tende para o centro e para os limites inferiores;
- A deficiência de lubrificação simulada nos pontos 31 a 45 não demonstrou valores que pudessem ser conclusivos em relação ao resultado final dos furos, pode ser explicado pelo número pequeno de furos ou pelo fato de que a diminuição na vazão foi bem pequena;
- Os resultados indicam que o processo pode ser aplicado para o início da produção em série, com acompanhamento através de CEP.

6.2.2 - CDP de Alumínio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$

Neste item avaliam-se os resultados obtidos experimentalmente para o processo de furação do CDP de alumínio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$ mm. Foram executados 43 furos, sendo os diâmetros dos mesmos apresentados na Tabela 5.5. No final de cada ensaio as brocas e os alargadores foram analisados para verificação de sinais de desgaste, marcas ou deficiências de corte.

Tabela 6.5 – Dados do CDP de Alumínio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
1	15,963	15,966	15,965
2	15,963	15,967	15,965
3	15,962	15,968	15,965
4	15,963	15,967	15,965
5	15,963	15,967	15,965
6	15,964	15,967	15,966
7	15,963	15,968	15,966
8	15,962	15,967	15,965
9	15,962	15,966	15,964
10	15,963	15,968	15,966
11	15,965	15,968	15,967
12	15,964	15,969	15,967
13	15,962	15,968	15,965
14	15,963	15,968	15,966
15	15,965	15,968	15,967
16	15,962	15,966	15,964
17	15,962	15,966	15,964
18	15,962	15,965	15,964
19	15,962	15,966	15,964
20	15,962	15,965	15,964
21	15,962	15,964	15,963
22	15,962	15,966	15,964

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
23	15,963	15,966	15,965
24	15,962	15,966	15,964
25	15,962	15,966	15,964
26	15,964	15,969	15,967
27	15,964	15,968	15,966
28	15,965	15,968	15,967
29	15,965	15,968	15,967
30	15,965	15,969	15,967
31	15,966	15,969	15,968
32	15,965	15,970	15,968
33	15,960	15,967	15,964
34	15,962	15,968	15,965
35	15,960	15,967	15,964
36	15,962	15,968	15,965
37	15,962	15,968	15,965
38	15,963	15,967	15,965
39	15,962	15,968	15,965
40	15,963	15,968	15,966
41	15,962	15,969	15,966
42	15,964	15,967	15,966
43	15,964	15,968	15,966

Alumínio 15,950

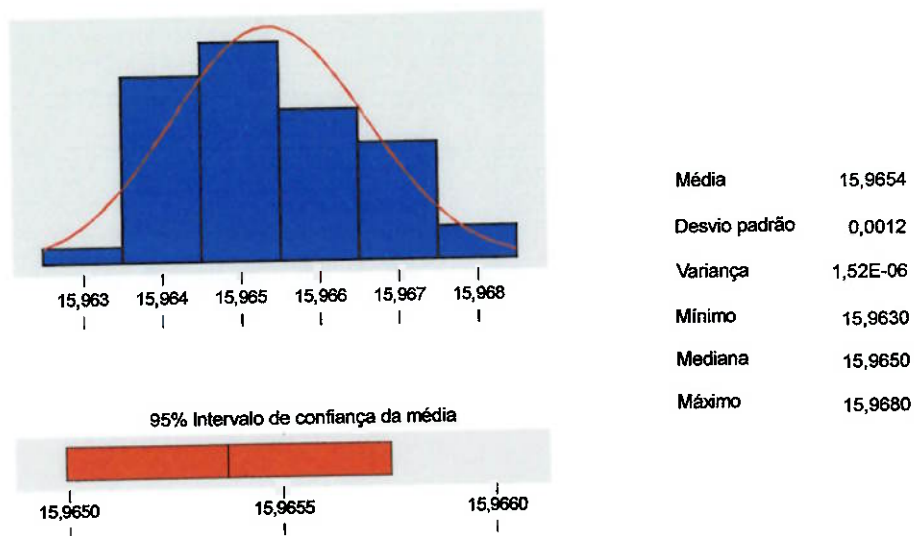


Figura 6.4 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Alumínio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$

Análise de Capabilidade do processo Alumínio 15,950

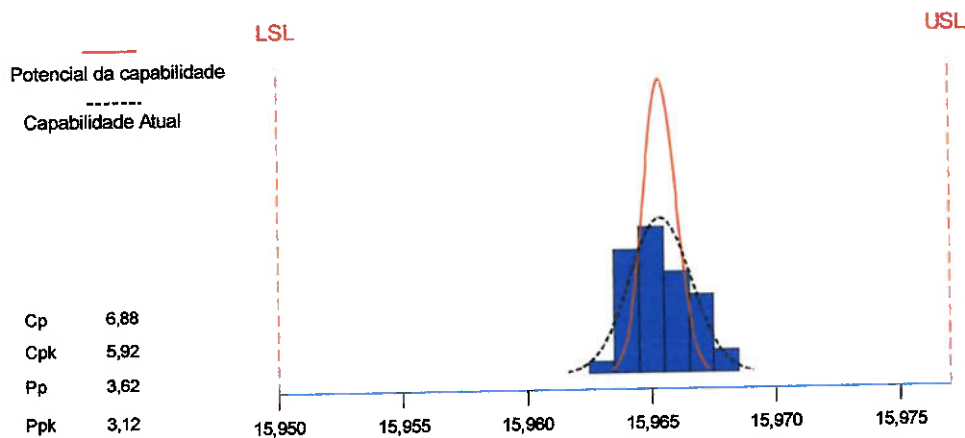


Figura 6.5 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Alumínio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$

Comentários:

- A distribuição mostrou estar com excelente aderência a curva normal, não foram observados pontos com a média fora do intervalo de tolerância;
- A distribuição apresentou uma tendência para os limites superiores do intervalo de tolerâncias, como visto no CDP de Alumínio de diâmetro $12,787^{+0,000}_{+0,027}$, fato comum quando existe o uso de ferramentas novas, com o passar do tempo elas desgastam-se e a distribuição tende para o centro e para os limites inferiores;
- Não foram feitos testes especiais neste CDP;
- Os valores dos índices de capacidade também foram altos, demonstrando que o processo possui uma boa capacidade e estabilidade;
- Os resultados indicam que o processo pode ser aplicado para o início da produção em série, com acompanhamento através de CEP.

6.2.3 - CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$

Neste item avaliam-se os resultados obtidos experimentalmente para o processo de furação do CDP de alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$ mm. Foram executados 45 furos, sendo os diâmetros dos mesmos apresentados na Tabela 5.6. No final de cada ensaio as brocas e os alargadores foram analisados para verificação de sinais de desgaste, marcas ou deficiências de corte.

Testes especiais:

- Nos furos 1 a 15 foi simulada deficiência na lubrificação / refrigeração na broca escalonada de furação inicial com diminuição da vazão do fluido lubrificante / refrigerante;
- Nos furos 16 a 30 foi simulada deficiência na lubrificação / refrigeração no alargador final com diminuição da vazão do fluido lubrificante / refrigerante;

- Nos furos 31 a 45 foi simulada deficiência na lubrificação / refrigeração na broca escalonada de furação inicial e no alargador final com diminuição da vazão do fluido lubrificante / refrigerante
- Este CDP teve como principal objetivo avaliar o resultado da deficiência da refrigeração / lubrificação. O número de furos onde estes testes especiais foram feitos no CDP de alumínio de diâmetro $12,787^{+0,000}_{+0,027}$ foi considerado pequeno, além disso, os resultados dos dois CDP's em Alumínio que precederam este último forneceram informações de uma boa capacidade para a furação em Alumínio, permitindo um re-direcionamento neste último CDP em Alumínio a fim de verificar as consequências de um modo de falha específico.

Tabela 6.6 – Dados do CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
1	14,375	14,382	14,379
2	14,375	14,380	14,378
3	14,375	14,380	14,378
4	14,375	14,381	14,378
5	14,377	14,382	14,380
6	14,376	14,380	14,378
7	14,376	14,381	14,379
8	14,367	14,392	14,380
9	14,376	14,382	14,379
10	14,376	14,381	14,379
11	14,376	14,381	14,379
12	14,377	14,419	14,398
13	14,377	14,437	14,407
14	14,377	14,381	14,379
15	14,377	14,382	14,380
16	14,371	14,384	14,378
17	14,376	14,380	14,378
18	14,376	14,381	14,379
19	14,375	14,380	14,378
20	14,374	14,381	14,378
21	14,377	14,383	14,380
22	14,377	14,415	14,396
23	14,372	14,384	14,378

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
24	14,377	14,405	14,391
25	14,377	14,379	14,378
26	14,377	14,380	14,379
27	14,376	14,380	14,378
28	14,376	14,379	14,378
29	14,376	14,379	14,378
30	14,376	14,380	14,378
31	14,377	14,379	14,378
32	14,375	14,378	14,377
33	14,374	14,390	14,382
34	14,379	14,402	14,391
35	14,376	14,376	14,376
36	14,376	14,379	14,378
37	14,377	14,379	14,378
38	14,372	14,386	14,379
39	14,376	14,380	14,378
40	14,376	14,380	14,378
41	14,375	14,380	14,378
42	14,375	14,380	14,378
43	14,376	14,379	14,378
44	14,375	14,380	14,378
45	14,375	14,381	14,378

Alumínio 14,362

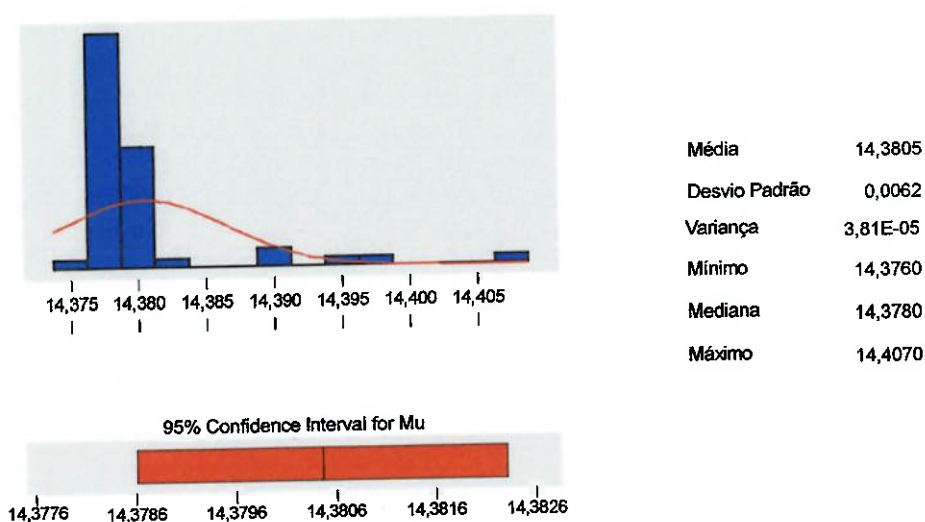


Figura 6.6 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$

Análise de Capabilidade do processo Alumínio 14,362

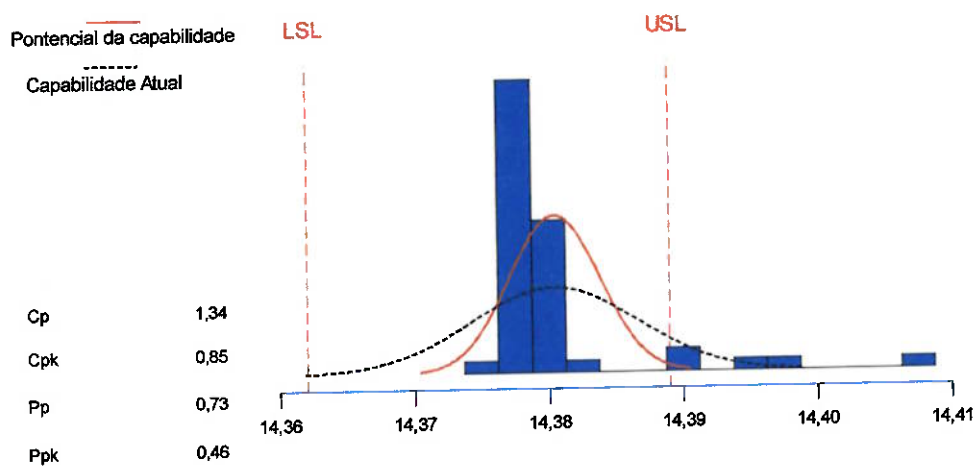


Figura 6.7 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Alumínio com espessura de 7,93mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$

Comentários:

- A distribuição não mostrou estar com boa aderência a curva normal, foram observado pontos com a média acima do limite máximo especificado;
- A distribuição apresentou uma tendência para os limites superiores do intervalo de tolerâncias, como visto no CDP de Alumínio de diâmetro $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, fato comum quando existe o uso de ferramentas novas, com o passar do tempo elas desgastam-se e a distribuição tende para o centro e para os limites inferiores;
- Ao contrário dos dois outros CDP's em Alumínio os valores dos índices de capacidade não foram altos, demonstrando que o processo não possui uma boa capacidade e estabilidade, isto demonstra que a deficiência de lubrificação / refrigeração da ferramenta de corte é um modo de falha com grande influência no processo;
- Os resultados indicam que o processo pode não ser aplicado para o início da produção em série se apresentasse tais deficiências na lubrificação / refrigeração da ferramenta de corte;
- Algumas ações serão tomadas para ressaltar a atenção necessária com este modo de falha, tais como inclusão de observações e checagens obrigatórias no roteiro de fabricação, instruções visuais na área de trabalho, checagem periódica dos índices de desempenho do fluido, entre outros.

6.2.4 - CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$

A furação do CDP de Titânio de espessura de 8,57mm, diâmetro dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$ é feita em duas etapas, a primeira broca escalonada tem diâmetro de 14,2mm, o alargador final tem diâmetro de 14,367mm H7. Foram executados 48 furos, com dados coletados nas duas etapas a fim de verificar a influência do furo da primeira etapa no resultado final; os diâmetros dos mesmos são apresentados na Tabela 5.7 (primeira etapa) e na tabela 5.8 Segunda etapa. No final de cada ensaio as brocas e os alargadores foram analisados para verificação de sinais de desgaste, marcas ou deficiências de corte.

Tabela 6.7 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,2mm

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio	Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
1	14,131	14,197	14,164	25	14,169	14,197	14,183
2	14,165	14,202	14,184	26	14,161	14,196	14,179
3	14,164	14,203	14,184	27	14,161	14,211	14,186
4	14,147	14,202	14,175	28	14,163	14,197	14,180
5	14,165	14,226	14,196	29	14,165	14,203	14,184
6	14,147	14,212	14,180	30	14,167	14,199	14,183
7	14,164	14,202	14,183	31	14,151	14,198	14,175
8	14,175	14,205	14,190	32	14,170	14,208	14,189
9	14,137	14,221	14,179	33	14,145	14,200	14,173
10	14,168	14,202	14,185	34	14,162	14,200	14,181
11	14,127	14,201	14,164	35	14,155	14,199	14,177
12	14,164	14,199	14,182	36	14,162	14,199	14,181
13	14,171	14,204	14,188	37	14,170	14,207	14,189
14	14,183	14,204	14,194	38	14,170	14,209	14,190
15	14,179	14,204	14,192	39	14,162	14,197	14,180
16	14,180	14,203	14,192	40	14,160	14,203	14,182
17	14,135	14,199	14,167	41	14,122	14,203	14,163
18	14,155	14,200	14,178	42	14,141	14,194	14,168
19	14,164	14,197	14,181	43	14,155	14,213	14,184
20	14,161	14,201	14,181	44	14,165	14,210	14,188
21	14,150	14,198	14,174	45	14,160	14,210	14,185
22	14,170	14,204	14,187	46	14,170	14,215	14,193
23	14,142	14,202	14,172	47	14,168	14,202	14,185
24	14,159	14,206	14,183	48	14,159	14,197	14,178

Titânio 14,362 - 1ª etapa

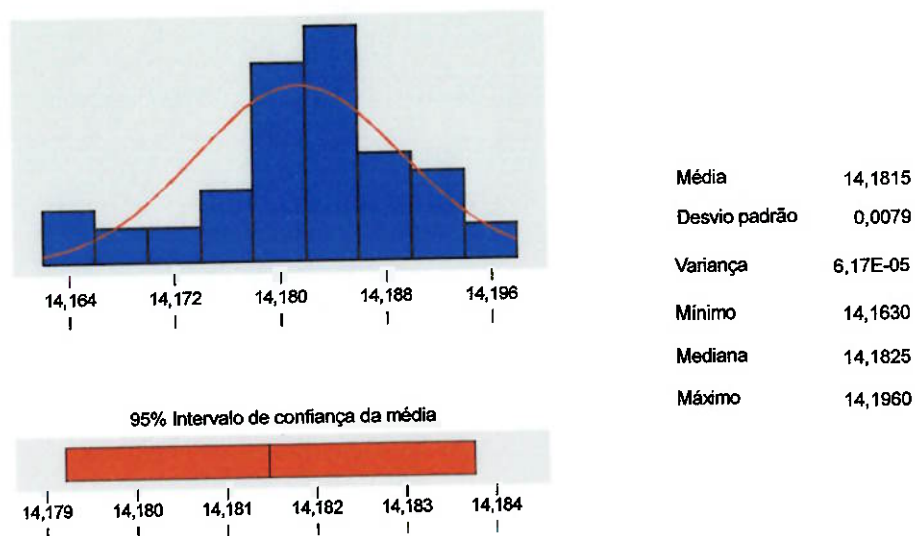


Figura 6.8 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,2mm

Capabilidade do processo Titânio 14,362 - 1ª etapa

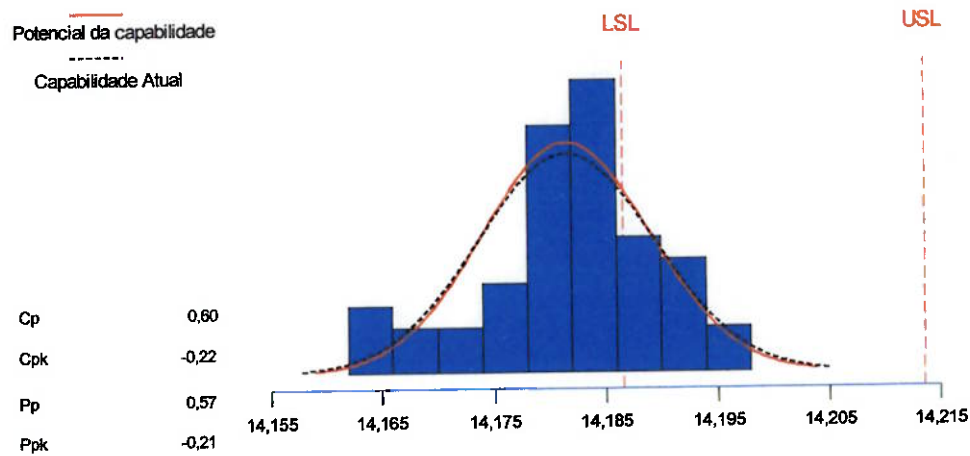


Figura 6.9 – Análise de capacidade do processo do para CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,2mm

O intervalo de tolerância utilizado foi o de 0,027mm de acordo com o diâmetro final do furo, porém para o primeiro furo foi calculado como:

- Limite inferior: $14,2 - 0,0135 = 14,1865$;
- Limite superior: $14,2 + 0,0135 = 14,2135$

Tabela 6.8 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com o alargador de diâmetro 14,367 H7

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio	Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
1	14,383	14,388	14,386	25	14,384	14,409	14,397
2	14,385	14,393	14,389	26	14,383	14,396	14,390
3	14,382	14,393	14,388	27	14,382	14,395	14,389
4	14,384	14,392	14,388	28	14,376	14,393	14,385
5	14,381	14,399	14,390	29	14,381	14,389	14,385
6	14,384	14,396	14,390	30	14,380	14,388	14,384
7	14,384	14,389	14,387	31	14,380	14,389	14,385
8	14,382	14,390	14,386	32	14,381	14,393	14,387
9	14,386	14,453	14,420	33	14,382	14,393	14,388
10	14,386	14,398	14,392	34	14,378	14,391	14,385
11	14,384	14,394	14,389	35	14,378	14,390	14,384
12	14,384	14,398	14,391	36	14,383	14,388	14,386
13	14,383	14,400	14,392	37	14,383	14,390	14,387
14	14,384	14,395	14,390	38	14,381	14,389	14,385
15	14,384	14,392	14,388	39	14,378	14,393	14,386
16	14,385	14,396	14,391	40	14,383	14,388	14,386
17	14,382	14,409	14,396	41	14,376	14,398	14,387
18	14,382	14,398	14,390	42	14,380	14,411	14,396
19	14,385	14,396	14,391	43	14,382	14,402	14,392
20	14,384	14,399	14,392	44	14,382	14,396	14,389
21	14,380	14,400	14,390	45	14,384	14,394	14,389
22	14,380	14,401	14,391	46	14,384	14,396	14,390
23	14,383	14,400	14,392	47	14,383	14,400	14,392
24	14,384	14,405	14,395	48	14,385	14,404	14,395

Titânio 14,362 - 2ª etapa

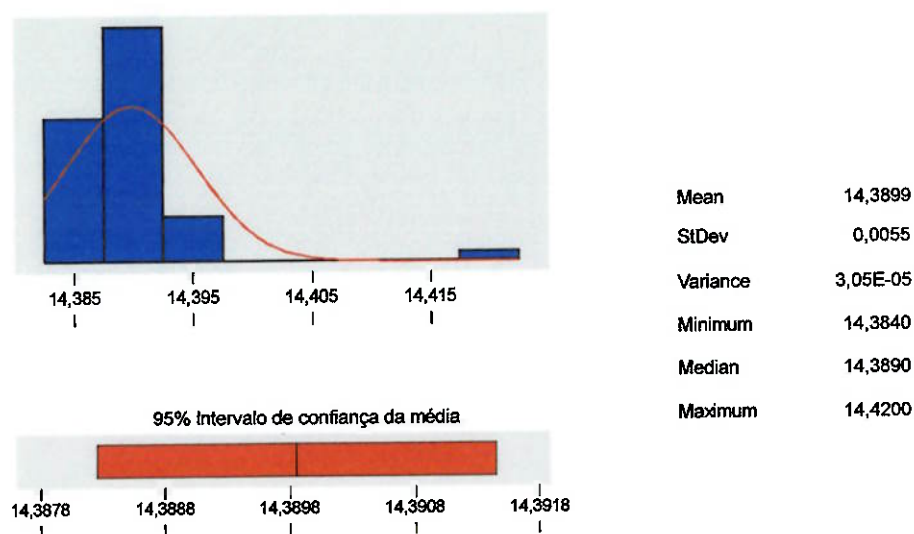


Figura 6.10 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,367mm H7.

Nota-se claramente um ponto bastante isolado dos demais, trata-se do ponto nº 9 quando a ferramenta apresentou uma quebra em uma das arestas de corte, necessitando ser substituída. Desta maneira decidiu-se por retirar este furo da distribuição a fim de analisar o comportamento dos furos restantes.

Titânio 14,362 - 2ª etapa após retirada do furo nº 9

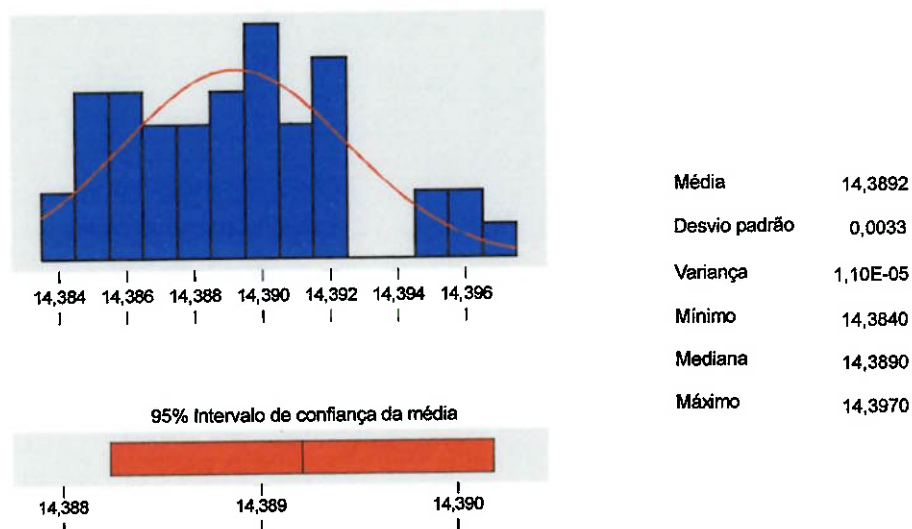


Figura 6.11 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,367mm H7 e retirada do furo nº9.

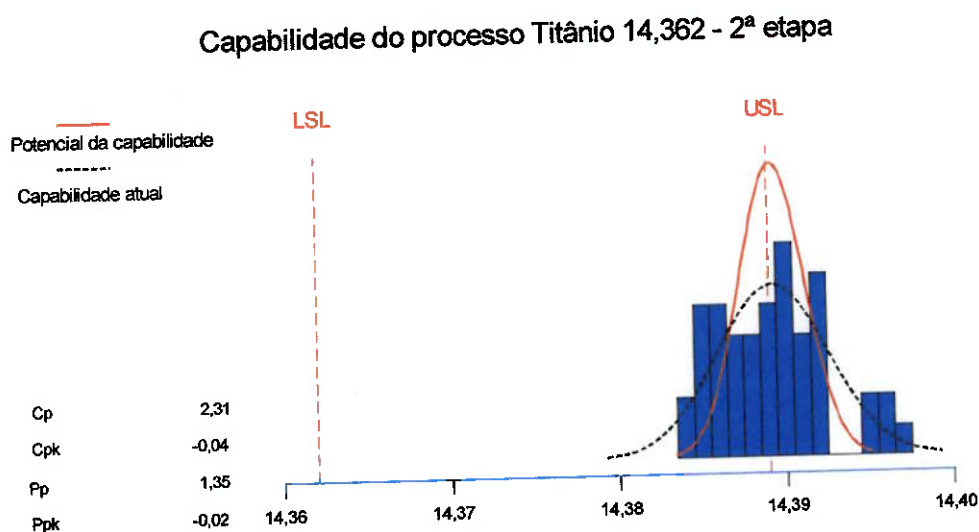


Figura 6.12 – Análise de capacidade do processo do para CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos final dos furos de $14,362^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 14,367mm H7 e retirada do furo nº9.

Comentários:

- A distribuição dos furos finais mostrou estar com boa aderência a curva normal, foram observados muitos pontos com a média acima do limite máximo especificado;
- O centro da distribuição está localizado muito próximo limites superiores do intervalo de tolerâncias, com muitos valores excedendo este máximo;
- Ao contrário dos casos dos CDP's em Alumínio os valores dos índices de capacidade foram baixos indicando capacidade e estabilidade deficiente do processo, com variação elevada e valores fora do especificado;
- O intervalo de confiança da média calculado indicou que para uma especificação de 95% muitos pontos estariam com valores acima do limite superior de tolerâncias;

- Os resultados indicam que o processo pode não ser aplicado para o início da produção em série, com desgaste excessivo das ferramentas de corte, com um desgaste bem maior que o dos CDP's de Alumínio;
- Os responsáveis pelas especificações dos parâmetros de processo e das ferramentas estão buscando alternativas para melhoria nas condições de usinagem dos furos e modificação do material utilizado nas ferramentas de corte a fim de minimizar o desgaste;
- É necessário um estudo detalhado da vida útil das ferramentas para que seja possível prever o momento de sua substituição ou re-afiação;
- Não foi encontrada uma correlação conclusiva indicando influência da retirada de mais ou menos material na primeira etapa pode ajudar ou prejudicar a segunda etapa.

6.2.5 - CDP de Titânio com espessura de 8,57mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$

A furação do CDP de Titânio de espessura de 13,73mm, diâmetro dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$ é feita em três etapas, a primeira broca escalonada tem diâmetro de 12,6mm, a segunda broca escalonada de 15,750 mm e o alargador final tem diâmetro de 15,957 mm H7. Foram executados 39 furos, com dados coletados nas três etapas a fim de verificar a influência dos furos da primeira e da segunda etapa no resultado final; os diâmetros dos mesmos são apresentados na Tabela 5.9 (primeira etapa), na tabela 5.10 (segunda etapa) e na tabela 5.11 (terceira etapa). No final de cada ensaio as brocas e os alargadores foram analisados para verificação de sinais de desgaste, marcas ou deficiências de corte.

Tabela 6.9 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 12,600mm

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio	Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
1	12,597	12,623	12,610	21	12,593	12,623	12,608
2	12,592	12,624	12,608	22	12,595	12,621	12,608
3	12,595	12,629	12,612	23	12,596	12,632	12,614
4	12,590	12,630	12,610	24	12,595	12,622	12,609
5	12,577	12,617	12,597	25	12,592	12,615	12,604
6	12,594	12,621	12,608	26	12,593	12,628	12,611
7	12,593	12,640	12,617	27	12,589	12,631	12,610
8	12,604	12,623	12,614	28	12,569	12,628	12,599
9	12,599	12,625	12,612	29	12,571	12,617	12,594
10	12,600	12,631	12,616	30	12,593	12,623	12,608
11	12,584	12,646	12,615	31	12,596	12,623	12,610
12	12,605	12,643	12,624	32	12,591	12,622	12,607
13	12,605	12,632	12,619	33	12,592	12,614	12,603
14	12,597	12,622	12,610	34	12,596	12,624	12,610
15	12,597	12,622	12,610	35	12,599	12,621	12,610
16	12,597	12,620	12,609	36	12,599	12,615	12,607
17	12,591	12,638	12,615	37	12,603	12,622	12,613
18	12,602	12,619	12,611	38	12,596	12,619	12,608
19	12,599	12,628	12,614	39	12,599	12,622	12,611
20	12,596	12,608	12,602				

Titânio 15,950 - 1ª etapa

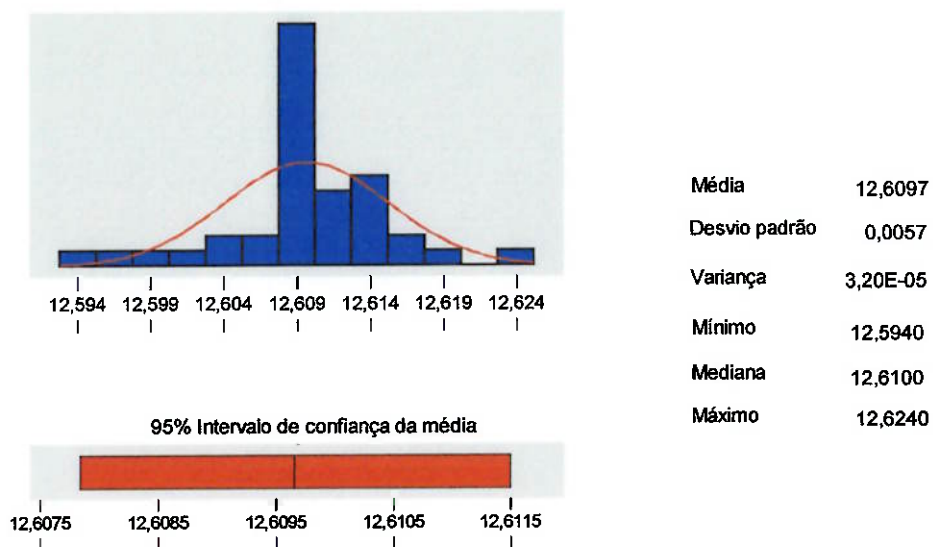


Figura 6.13 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 12,600mm.

Capabilidade do processo Titânio 15,950 - 1ª etapa

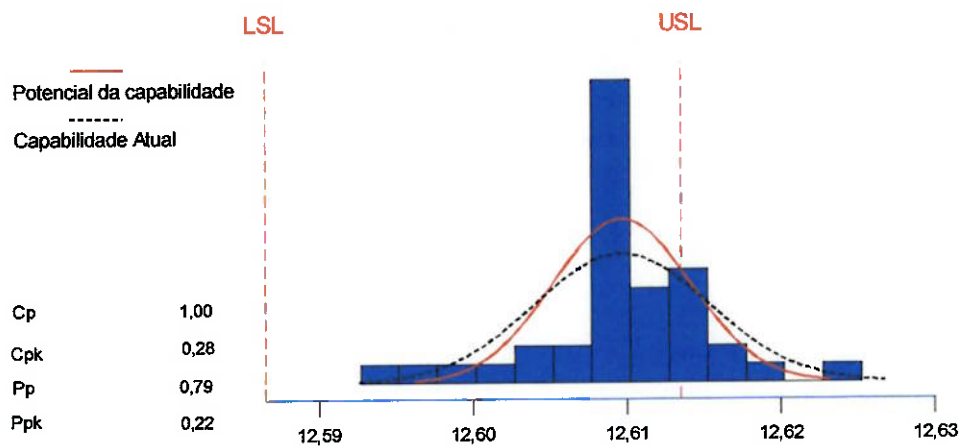


Figura 6.14 - Análise de capacidade do processo do para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após primeira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 12,600mm

O intervalo de tolerância utilizado foi o de 0,027mm de acordo com o diâmetro final do furo, porém para o primeiro furo foi calculado como:

- Limite inferior: $12,6 - 0,0135 = 12,5865$
- Limite superior: $12,6 + 0,0135 = 12,6135$

Tabela 6.10 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,750mm

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio	Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
1	15,456	15,821	15,639	21	15,750	15,773	15,762
2	15,722	15,771	15,747	22	15,746	15,776	15,761
3	15,737	15,780	15,759	23	15,746	15,775	15,761
4	15,739	15,776	15,758	24	15,749	15,775	15,762
5	15,752	15,785	15,769	25	15,746	15,777	15,762
6	15,745	15,770	15,758	26	15,747	15,780	15,764
7	15,745	15,771	15,758	27	15,745	15,781	15,763
8	15,752	15,784	15,768	28	15,739	15,772	15,756
9	15,720	15,786	15,753	29	15,737	15,770	15,754
10	15,743	15,778	15,761	30	15,734	15,779	15,757
11	15,746	15,782	15,764	31	15,741	15,778	15,760
12	15,746	15,772	15,759	32	15,747	15,775	15,761
13	15,747	15,785	15,766	33	15,749	15,817	15,783
14	15,733	15,773	15,753	34	15,739	15,783	15,761
15	15,734	15,744	15,739	35	15,743	15,768	15,756
16	15,733	15,785	15,759	36	15,738	15,777	15,758
17	15,736	15,767	15,752	37	15,750	15,774	15,762
18	15,702	15,771	15,737	38	15,744	15,777	15,761
19	15,739	15,770	15,755	39	15,746	15,775	15,761
20	15,748	15,772	15,760				

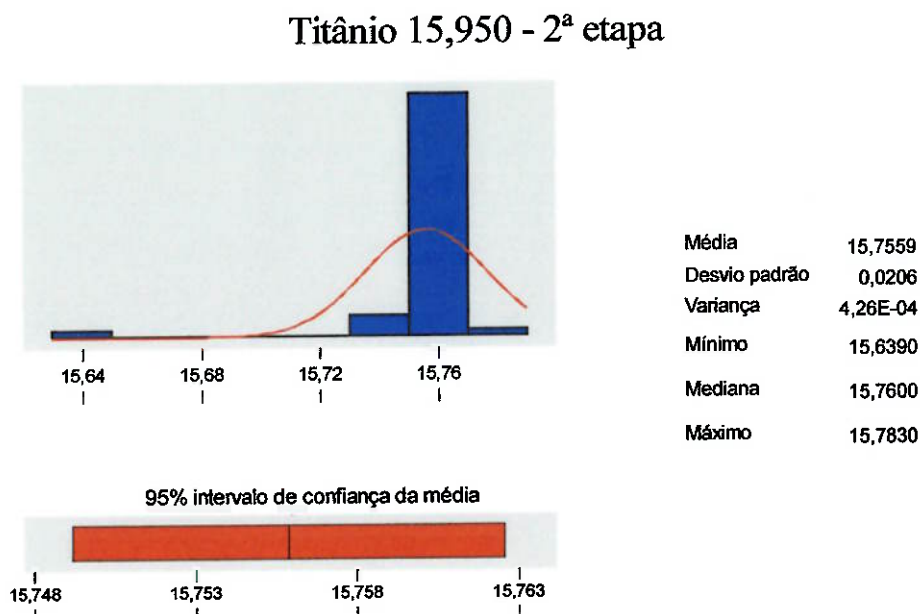


Figura 6.15 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,750mm

O ponto nº1 com valor de 15,639 apresentou a média muito distante do limite mínimo do intervalo de tolerâncias que é de 15,7365 caracterizando algum tipo de causa especial durante sua execução. Decidiu-se por retirá-lo da distribuição a fim de verificar o comportamento do restante da distribuição.

Titânio 15,950 - 2ª etapa após retirada do furo 1

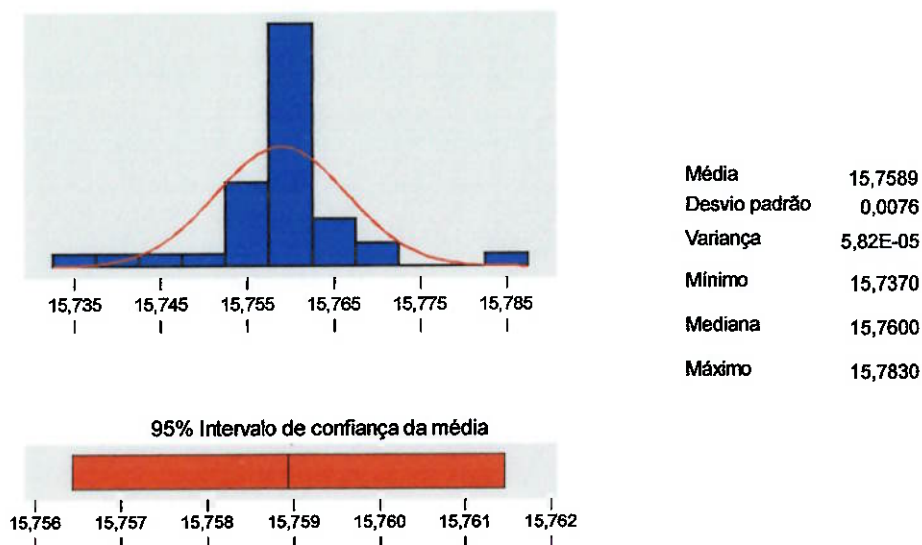


Figura 6.16 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,750mm e retirada do furo nº1.

Capabilidade do processo Titânio 15,950 - 2ª etapa

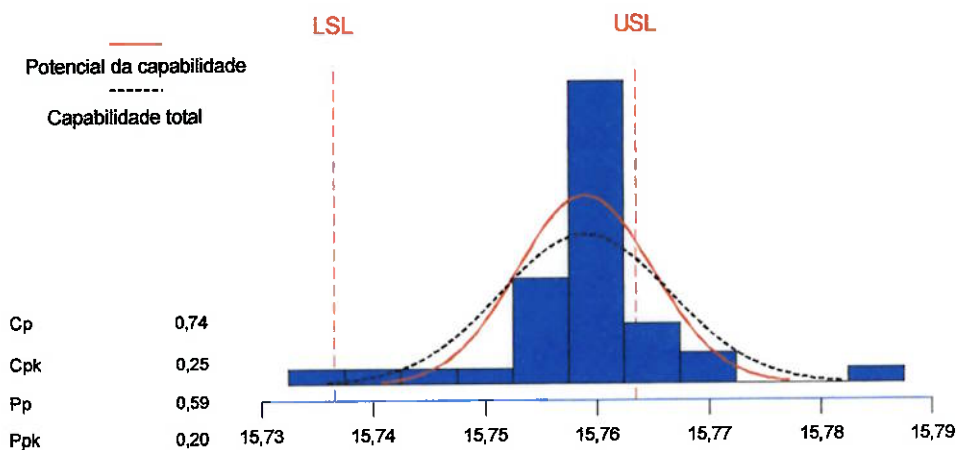


Figura 6.17 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após segunda etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,750mm

O intervalo de tolerância utilizado foi o de 0,027mm de acordo com o diâmetro final do furo, porém para o primeiro furo foi calculado como:

- Limite inferior: $15,750 - 0,0135 = 15,7365$
- Limite superior: $15,750 + 0,0135 = 15,7635$

Tabela 6.11 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com alargador de diâmetro 15,957mm H7

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio	Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
1	15,971	15,988	15,980	21	15,972	15,990	15,981
2	15,967	15,983	15,975	22	15,972	15,985	15,979
3	15,972	15,978	15,975	23	15,970	15,997	15,984
4	15,975	15,994	15,985	24	15,977	15,995	15,986
5	15,975	15,992	15,984	25	15,979	16,012	15,996
6	15,978	16,009	15,994	26	15,977	16,084	16,031
7	15,978	16,012	15,995	27	15,972	15,989	15,981
8	15,966	15,983	15,975	28	15,976	16,008	15,992
9	15,972	15,980	15,976	29	15,974	16,004	15,989
10	15,963	15,980	15,972	30	15,978	16,010	15,994
11	15,969	15,980	15,975	31	15,976	16,000	15,988
12	15,966	15,981	15,974	32	15,976	16,006	15,991
13	15,976	15,997	15,987	33	15,980	16,038	16,009
14	15,972	15,982	15,977	34	15,971	16,007	15,989
15	15,972	16,001	15,987	35	15,975	15,996	15,986
16	15,980	16,030	16,005	36	15,974	15,996	15,985
17	15,970	15,991	15,981	37	15,967	15,988	15,978
18	15,975	15,993	15,984	38	15,978	16,012	15,995
19	15,980	16,253	16,117	39	15,977	16,086	16,032
20	15,978	16,006	15,992				

As ferramentas de corte da 3ª etapa apresentaram problemas desgaste excessivo durante o desgaste, necessitando substituição. Foram substituídas nos furos nº 19 e 33 por novas ferramentas. Após a execução do furo 39 (último) verificou-se que a ferramenta também necessitava de substituição.

Titânio 15,950 - 3ª etapa

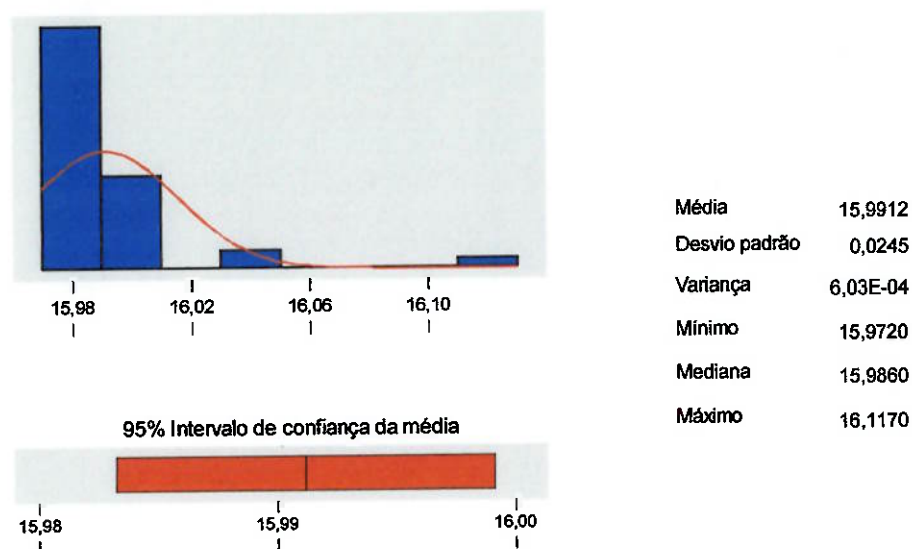


Figura 6.18 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{-0,027}$, valores após terceira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,957 H7.

Conforme citado as ferramentas necessitaram substituição nos pontos n° 19 , n°33 e n°39, em função deste fato, retirou-se estes pontos a fim de verificar o comportamento da distribuição.

Titânio 15,950 - 3ª etapa com retirada dos furos 19, 33, 39

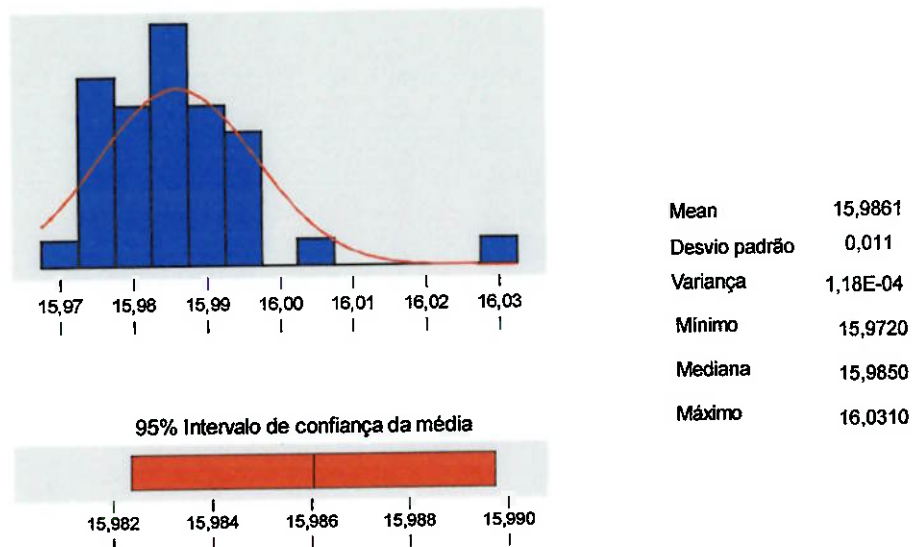


Figura 6.19 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos furos de 15,950^{+0,000}/_{+0,027}, valores após terceira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,957 H7. Foram retirados os pontos nº19, nº33 e nº39.

Capabilidade do processo Titânio 15,950 - 3ª etapa

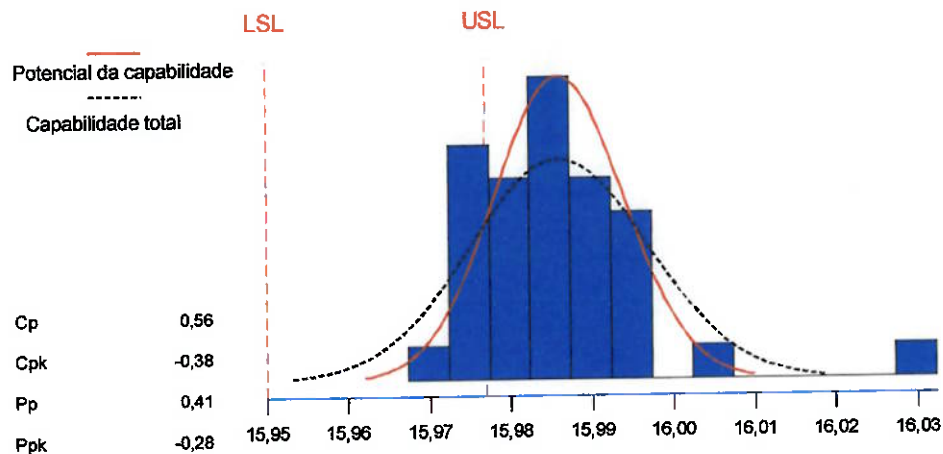


Figura 6.20 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Titânio com espessura de 13,73mm, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, diâmetro dos final dos furos de $15,950^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com broca escalonada de diâmetro 15,957 H7. Foram retirados os pontos nº19, nº33 e nº39.

Comentários:

- A distribuição dos furos finais mostrou estar com boa aderência a curva normal, porém com tendência para os limites superiores em todas as etapas;
- Principalmente na terceira etapa, a distribuição apresentou a maioria de seus pontos além do limite superior de especificação, representando um processo certamente reprovado;
- Os índices de capacidade demonstraram incapacidade total do processo além de uma grande descentralização em relação ao centro dos limites de tolerância;
- O intervalo de confiança da média calculado indicou que para uma especificação de 95% a grande maioria dos pontos estariam com valores acima do limite superior de tolerâncias;

- Os resultados indicam que o processo pode não ser aplicado para o início da produção em série, o desgaste excessivo das ferramentas de corte indica que seu conceito de construção ou material não estão adequados para sua finalidade;
- Os responsáveis pelas especificações dos parâmetros de processo e das ferramentas estão buscando alternativas para melhoria nas condições de usinagem dos furos e modificação do material utilizado nas ferramentas de corte a fim de minimizar o desgaste;
- É necessário um estudo detalhado da vida útil das ferramentas para que seja possível prever o momento de sua substituição ou re-afiação;
- A única correlação conclusiva entre as três etapas é que todas tenderam para os limites superiores com muitos pontos ultrapassando o mesmo;
- É necessário a aplicação de ferramentas como FMEA para a identificação dos modos de falha responsáveis por resultados tão negativos.

6.2.6 - CDP de Titânio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $19,124^{+0,000}_{+0,027}$

A furação do CDP de espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $19,124^{+0,000}_{+0,027}$ é feita em três etapas, a primeira broca escalonada tem diâmetro de 14,2mm, a segunda broca escalonada de 18,900 mm e o alargador final tem diâmetro de 19,124mm H7. Os dados foram coletados após a etapa final.

Tabela 5.12 – Dados do CDP de Titânio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos furos de $19,124^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com alargador de diâmetro 19,124mm H7.

Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio	Furo	Ø Min	Ø Max	Ø Médio
1	19,139	19,168	19,154	18	19,136	19,153	19,145
2	19,140	19,173	19,157	19	19,136	19,165	19,151
3	19,130	19,161	19,146	20	19,138	19,154	19,146
4	19,142	19,159	19,151	21	19,133	19,169	19,151
5	19,136	19,164	19,150	22	19,140	19,153	19,147
6	19,141	19,160	19,151	23	19,135	19,158	19,147
7	19,129	19,165	19,147	24	19,142	19,149	19,146
8	19,140	19,164	19,152	25	19,142	19,156	19,149
9	19,134	19,156	19,145	26	19,144	19,156	19,150
10	19,142	19,152	19,147	27	19,135	19,161	19,148
11	19,139	19,152	19,146	28	19,141	19,149	19,145
12	19,143	19,156	19,150	29	19,134	19,159	19,147
13	19,128	19,163	19,146	30	19,142	19,149	19,146
14	19,139	19,157	19,148	31	19,137	19,159	19,148
15	19,132	19,166	19,149	32	19,143	19,162	19,153
16	19,137	19,156	19,147	33	19,133	19,159	19,146
17	19,133	19,169	19,151	34	19,141	19,152	19,147

Titânio 19,124 - 3ª etapa

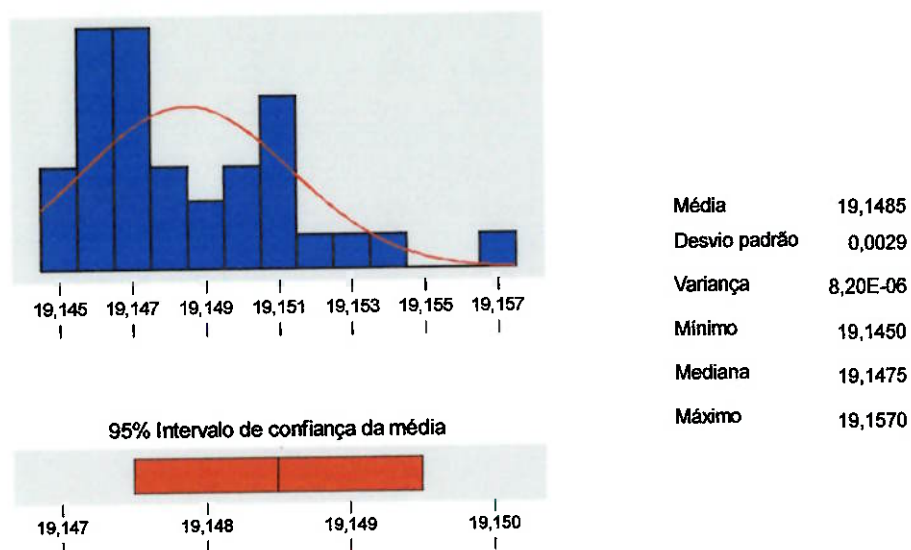


Figura 6.21 – Histograma, curva normal aproximada e intervalo de confiança para o CDP de Titânio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos final dos furos de $19,124^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com alargador de diâmetro 19,124mm H7.

Capabilidade do processo Titânio 19,124

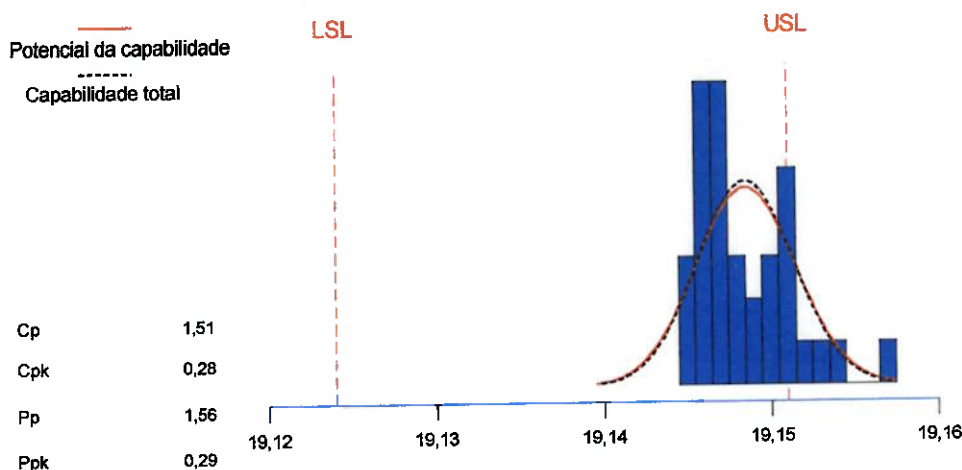


Figura 6.22 – Análise de capacidade do processo do para o CDP de Titânio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos final dos furos de $19,124^{+0,000}_{+0,027}$, valores após terceira etapa de furação com alargador de diâmetro 19,124mm H7.

Comentários:

- Ao contrário dos casos anteriores em titânio, os resultados no CDP de Titânio com espessura de 19,20mm, diâmetro dos final dos furos de $19,124^{+0,000}_{+0,027}$, foram regulares, uma boa aderência com a curva normal, e novamente uma tendência para os limites superiores do intervalo de tolerâncias;
- O desgaste das ferramentas de corte não foi tão grande quanto nos CDP's de Titânio anteriores, desta maneira devemos estudar as diferenças existentes para que possam ser aproveitadas nos casos onde o resultado não foi satisfatório;
- O intervalo de confiança da média demonstrou que 95% dos valores estariam dentro do intervalo de tolerância, porém está claro o grande número localizado exatamente no limite superior, o que representa um grande risco; Os índices de Cp e Pp indicam uma boa capacidade do

- processo, porém o C_{pk} e o C_{pk} demonstram a necessidade de deslocar a distribuição para o centro do intervalo de tolerâncias, ou seja, o processo ainda tem muito o que melhorar;
- O processo estaria “aprovado com ressalvas” para o início da produção em série, deve necessariamente sofrer melhorias que podem ser promovidas através da aplicação de ferramentas como o FMEA.

7 – Conclusões e Recomendações

O principal objetivo desse trabalho foi o de avaliar a confiabilidade e a qualidade de um novo processo de manufatura, mais especificamente um processo de furação de precisão a ser empregado na fabricação de componentes estruturais de aviões, onde havia a necessidade de conhecer o seu comportamento antes dos início da produção em série.

O estudo foi executado com o emprego de corpos de prova que simulam a estrutura real, em termos de material, espessura a ser furada e também em termos da rigidez da peça. Os corpos de prova foram furados de acordo com a especificação do processo de furação, incluindo a mesma broca, ferramenta e condições de lubrificação.

A partir da análise dos resultados do processo de furação, caracterizados pela dimensão dos furos obtidos nos diversos corpos de prova, é possível dizer que o processo de furação em alumínio pode ser realizado de acordo com o método proposto inicialmente. Já a furação em titânio necessariamente sofrerá mudanças pois os testes provaram que o processo de manufatura proposto, bastante similar ao processo usado para o alumínio, não será capaz de cumprir seus objetivos, em termos de garantia da tolerância dimensional dos furos.

Os resultados dos testes da furação em alumínio foram tão bons que permitiram até testes que simularam modos de falha e também uma aceleração na degradação das ferramentas de corte, permitindo uma demonstração da importância da lubrificação / refrigeração da ferramenta de corte. Porém como o objetivo inicial do trabalho não

foi voltado para definir modos de falha específicos ou mesmo a vida útil das ferramentas, recomenda-se um estudo específico no qual podem ser utilizadas técnicas de ensaios de vida acelerados a fim de conhecer o desgaste e a vida útil das ferramentas.

Apesar dos bons resultados, onde obteve-se uma boa aderência da distribuição dos diâmetros à distribuição normal, ocorreram pontos isolados muito distantes do restante da distribuição da maioria dos pontos, o que representa a presença de causas especiais responsáveis por não conformidades no dia-a-dia da produção. Em função disso, ferramentas como o citado FMEA devem ser utilizados a fim de identificar os modos de falha, corrigi-los, e implementar um ciclo de melhorias contínuas no processo.

Os testes de furação em titânio demonstraram que a proposta inicial para o processo necessitará de mudanças que podem envolver a variação no número de etapas utilizadas para a obtenção do diâmetro final do furo, modificações dos materiais utilizados nas ferramentas de corte, modificações no desenho das ferramentas de corte, além de outros pontos que devem ser identificados através do uso das técnicas citadas neste trabalho. Testes como os realizados neste trabalho serão novamente realizados para avaliar as melhorias no processo de furação em titânio.

Os custos adicionais resultantes da rejeição do processo de furação proposto para peças em titânio serão resultantes de fatores associados com o novo processo de furação, tais como um maior ciclo de fabricação (em função da eventual necessidade da utilização de um número adicional de etapas), e um maior controle durante a execução do processo, além de outros. Certamente estes custos não serão maiores que os custos resultantes das não conformidades que iriam ocorrer com a utilização de um processo sem confiabilidade conforme foi demonstrado, isto porque estas não conformidades seriam bem mais abrangentes em suas conseqüências excedendo os portões da empresa podendo chegar aos clientes, o que prioritariamente deve ser evitado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- JURAN, J. M.. **Juran's Quality Control Handbook**, 5th ed. Frank M. Gryna, associate editor , V1 pp. 2.1 –2.2; 48.1 - 48.28.
- O'CONNOR, Patrick D. T.. **Practical Reliability Engineering**, 2nd ed. Chichester ; New York : Wiley, c1985.
- MONTGOMERY, Douglas C - **Introduction to Statistical Quality Control** – 2nd ed. John Wiley & Sons Inc. NY, 1991.
- WERKEMA, Maria Cristina Catarino – **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos** – Belo Horizonte, MG : Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995.
- WERKEMA, Maria Cristina Catarino. **As ferramentas da Qualidade no gerenciamento de processos** – Belo Horizonte, MG : Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995.
- DUNCAN, A. J.. **Quality Control and Industrial Statistics** – 4 Th ed., Irwin, Homewood, Illinois, 1974.
- ESTADOS UNIDOS, Metal Cutting Tool Institute. **Metal cutting tool handbook**. 7th ed., : Published for the United States Cutting Tool Institute by Industrial Press, c1989.
- OAKLAND, Jonh S.. **Statistical Process Control** 3rd ed. Butterworth – Heinemann, Oxford , 1996.
- Diniz, A. M.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L.. **Tecnologia da Usinagem do Metais** 2^a ed. – Artliber Editora LTDA, 2000.

Ferraresi, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**: Edgard Blucher, 1995

ESTADOS UNIDOS, Chrysler, Ford & GMC - **Análise de Modo e Efeito de Falha Potencial** - FMEA - Manual de Referência - 1st ed. – AIAG – Southfield - MI, 1995.

NIST/SEMATECH **e-Handbook of Statistical Methods**, Estados Unidos,
Apresenta recursos e atividades desenvolvidas em
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. Acesso em Jun / Jul / Ago 2002.

Ramos, A. W.. **Controle Estatístico de Processo I** – Fundação Vanzolini, Escola Politécnica USP.

Wayne, Nelson. **Accelerated testing :statistical models, test plans and data analyses**. New York : Wiley, c1990.