

CARMEN ELENA PATIÑO RODRÍGUEZ

**CONFIABILIDADE APLICADA AO PROCESSO DE
MANUFATURA DE SISTEMAS MECÂNICOS**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
a obtenção de título de Mestre em
Engenharia.

São Paulo
2004

04/07/05
Sua no: 1415247

CARMEN ELENA PATIÑO RODRÍGUEZ

**CONFIABILIDADE APLICADA AO PROCESSO DE
MANUFATURA DE SISTEMAS MECÂNICOS**

3803

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
a obtenção de título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Professor Dr.
Gilberto Francisco Martha de Souza

São Paulo

2004

Aos meus pais Carmen Maria e Orlando, pelo apoio, amor e cuidados nos momentos importantes desta etapa e a minhas irmãs Lucila e Daniela, que tem sido meu exemplo e minha motivação.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, pela confiança em nosso trabalho, mostrada desde o primeiro momento e o durante o tempo tudo na realização deste trabalho, e pela orientação mostrando sempre disposição para discutir e corrigir o trabalho.

Ao meu amigo José Francisco dos Santos (*in memoriam*) por estar sempre presente para ajudar, escutar e apoiar. Obrigada Fran, pelos momentos compartilhados, dedicação e disposição nos instantes importantes.

Ao meu amigo Diego Hernán Giraldo Vasquez pelo apoio incondicional, tanto no âmbito pessoal como acadêmico. Obrigada por ter-me ajudado a começar e a construir este sonho.

À minha amiga Claudia Patricia Ossa, pelas experiências compartilhadas, pela proximidade, e pelo apoio durante muitos momentos importantes neste mestrado. Obrigada pelo apoio pessoal e acadêmico, mas sobre tudo pela amizade.

Ao meu amigo Fernando Jesus Guevara, pelo apoio nos momentos importantes, pela companhia e pela amizade.

Aos meus amigos da Colômbia e especialmente a Claudia Palacios, que apesar da distância buscaram o meio de me acompanhar e me transmitir força nos momentos em que eu precisei.

Ao Laboratório de Fenômenos de Superfícies – LFS do Depto. de Engenharia Mecânica, pela atenção e presteza com que sempre me atenderam e pela colaboração na realização das medidas do desgaste.

Ao Instituto Tecnológico Brasil-Alemanha – ITBA do Depto. de Engenharia Mecânica, aos técnicos e alunos pela colaboração na realização dos ensaios.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Educação –CAPES pelos recursos concedidos por meio da bolsa de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivos do trabalho	3
1.3 Escopo do trabalho	4
CAPÍTULO 2 ANÁLISE DE PROCESSOS DE MANUFATURA DE COMPONENTES MECÂNICOS	6
2.1 Considerações iniciais	6
2.2 Processos de manufatura mecânica	9
2.2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO	10
2.2.2 PROCESSO DE USINAGEM	13
2.2.3 PROCESSO DE CONFORMAÇÃO	28
2.2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM	37
2.3 Análise de técnicas de avaliação da qualidade em processos	44
2.3.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE	46
2.3.2 DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE – QFD	48
2.3.3 CONTROLE DA QUALIDADE TOTAL -TQC	52
2.3.4 FUNÇÃO PERDA E NÍVEL DA QUALIDADE - QLF	53
CAPÍTULO 3 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE	58
3.1 Considerações iniciais	58
3.2 Conceitos básicos de confiabilidade	59
3.3 Análise de confiabilidade de sistemas	63
3.3.1 DIAGRAMA DE BLOCOS	64
3.3.2 ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DAS FALHAS – FMEA	66
3.3.3 ÁRVORE DE FALHAS - FTA	70

CAPÍTULO 4	CONFIABILIDADE EM PROCESSOS DE MANUFATURA DE SISTEMAS MECÂNICOS	75
4.1	Considerações iniciais	75
4.2	Planejamento dos processos de manufatura	76
4.2.1	FUNÇÕES DO PLANEJAMENTO DOS PROCESSOS	78
4.2.2	FASES NO PLANEJAMENTO DOS PROCESSOS	80
4.3	Análise da confiabilidade das operações de fabricação nos processos de manufatura	84
4.3.1	ELEMENTOS QUE INFLUENCIAM A CONFIABILIDADE DE UMA OPERAÇÃO DE FABRICAÇÃO	84
4.3.2	CÁLCULO DA CONFIABILIDADE DE UMA OPERAÇÃO NO PROCESSO DE MANUFATURA	97
4.4	Proposta de Planejamento dos processos baseado em confiabilidade	99
CAPÍTULO 5	ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONFIABILIDADE DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE FURAÇÃO E CÁLCULO DA CONFIABILIDADE PARA UM PROCESSO DE USINAGEM	115
5.1	Análise experimental da confiabilidade da ferramenta no processo de furação	115
5.1.1	ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESGASTE DA FERRAMENTA	118
5.2	Definição do tempo de troca da ferramenta para o processo de fabricação de um eixo	134
CAPÍTULO 6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	148
6.1	Conclusões	148
6.2	Recomendações para trabalhos futuros	150
CAPÍTULO 7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Tabela comparativa entre processos de fundição [RISCO 1989]	11
Tabela 2.2 Análise de Modos e Efeitos das Falhas - Processo de Fundição	13
Tabela 2.3 Forma do cavaco [FANG 1996]	15
Tabela 2.4 Comportamento da força de corte	16
Tabela 2.5 Aplicações e modos de falha de materiais para ferramenta [DEVRIES 1992]	17
Tabela 2.6 Análise de Modos e Efeitos das Falhas de Ferramenta de Usinagem	28
Tabela 2.7 Classificação dos processos de conformação plástica [BRESCIANI 1991]	30
Tabela 2.8 Valores típicos da velocidade para diferentes equipamentos de forjamento [DIETER 1988]	32
Tabela 2.9 Análise de Modos e Efeitos das Falhas - Processo de estampagem	37
Tabela 2.10 Análise de Modos e Efeitos das Falhas - Processo de Soldagem	43
Tabela 3.1 Questões básicas para a elaboração da análise FMEA	68
Tabela 3.2 Tabela de severidade [FEMEA/FMECA 2003]	69
Tabela 3.3 Símbolos dos Eventos da FTA, adaptado de [GRANT 1996]	71
Tabela 3.4 Representação dos conectores lógicos em uma árvore de falha, adaptado de [GRANT 1996]	72
Tabela 4.1 Fases do planejamento dos processos [REZENDE 1996], folha 01/02	82
Tabela 4.2 Análise de Modos e Efeitos das Falhas – Torno	89
Tabela 4.3 Condições de corte [WANG 2001]	94
Tabela 5.1 Análise de Modos e Efeitos das Falhas - Processo de Furação	117
Tabela 5.2 Análise de Modos e Efeitos das Falhas para o desgaste da broca	119
Tabela 5.3 Teores de elementos químicos nos aços M2 [HANDBOOK 1990]	120
Tabela 5.4 Composição química do aço usado em ensaios de desgaste de ferramenta.	121
Tabela 5.5 Composição química para aços carbono [HANDBOOK 1990]	122
Tabela 5.6 Especificações centro de Usinagem DECKEL MAHO	122
Tabela 5.7 Condições de operação	123

Tabela 5.8 Desgaste em micrometros para 10 brocas testadas, em função do número de furos executados	127
Tabela 5.9 Comparação ente a Distribuição Lognormal e a Distribuição de Weibull	129
Tabela 5.10 Valores tempo de vida da ferramenta para o desgaste de flanco de 120 μm	133
Tabela 5.11 Especificações para cada superfície da peça a ser usinada	136
Tabela 5.12 Tempos de operação na fabricação do eixo	137
Tabela 5.13 Cálculo da confiabilidade das operações e do processo por peça fabricada	140
Tabela 5.14 Confiabilidade para cada operação e do processo para fabricar 12 peças	142
Tabela 5.15 Confiabilidade para cada operação e do processo após de troca da ferramenta 4 na peça 10	143
Tabela 5.16 Comparação entre a confiabilidade da operação, no instante de troca real e no instante de troca antecipado	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Relação entre o cavaco e a força de usinagem [ASTAKAHOV 1997]	14
Figura 2.2 Operações de torneamento: a) Cilindrar, b) Facear, c) Torneiar cônico, d) Sangrar, e) Rosquear, [DAMASCENO 2002].	20
Figura 2.3. Ferramenta de corte de uma aresta de corte, adaptado de [DOYLE 1985]	21
Figura 2.4 Métodos de fresamento: a) Concordante b) Discordante [DINIZ 2000]	22
Figura 2.5 Broca helicoidal, adaptado de [DOYLE 1985]	23
Figura 2.6 Geometria de uma broca helicoidal [DOYLE 1985]	23
Figura 2.7 Classificação dos tipos de desgaste em ferramentas de corte, adaptado de [SANDVIK 2002].	26
Figura 2.8 Etapas do CEP [KANG 2000]	48
Figura 2.9 Modelo conceitual Bob King [RAJALA 1997]	51
Figura 2.10 Estágios do processo QFD [TEMPONI 1999].	52
Figura 2.11 Função de perda [IRANTO 1998]	56
Figura 3.1 Evolução temporal da confiabilidade de um componente ou sistema	61
Figura 3.2 Taxa de falha [LEWIS 1987]	62
Figura 3.3 Digrama de Blocos: a) Componentes dispostos em série. b) Componentes dispostos em paralelo e c) Arranjo misto em série e paralelo	64
Figura 3.4 Árvore de falha para um robô hidráulico de cinco eixo KHODABANDEHLOO 1996]	73
Figura 4.1 Funções do planejamento dos processos [ROZENFELD 1989]	79
Figura 4.2 Diagrama de Pareto de falhas apresentadas em equipamentos de manufatura [WANG 1999]	86
Figura 4.3 Taxa de falha para equipamentos eletromecânicos – Distribuição Lognormal ($x_0 = 452,25$ horas; $S = 1,370$)	86
Figura 4.4 Ação da Manutenção Preventiva - MP na taxa de falha do equipamento. Intervalo de intervenção: 100 horas [WANG 1999]	87
Figura 4.5 Relação entre desgaste da ferramenta e tempo de corte [HITOMI 1979]	93
Figura 4.6 Confiabilidade da ferramenta	95
Figura 4.7 Taxa de falha da ferramenta	96

Figura 4.8 Proposta da Curva da Taxa de Falha para um Processo de Usinagem	99
Figura 4.9 Proposta de planejamento dos processos baseado em confiabilidade	101
Figura 4.11 Fluxograma 1: Planejamento dos processos – Avaliação das restrições tecnológicas, económicas e geométricas, folha 01/03104	
Figura 4.12 Diagrama do processamento lógico para estabelecer as anterioridades	107
Figura 4.13 Fluxograma 2: Planejamento dos processos – Determinação do número de anterioridades por feature	108
Figura 4.14 Fluxograma 3: Planejamento dos processos – Seqüenciamento de operações	109
Figura 4.15 Diagrama de seqüência de operações em série	110
Figura 4.16 Confiabilidade requerida em função de peças produzidas	112
Figura 4.17 Cálculo da confiabilidade através da escolha de ferramenta crítica	113
Figura 4.18 Mudança da confiabilidade com a troca de ferramenta	114
Figura 5.1 Diagrama causa – efeito para o processo de furação	116
Figura 5.2 Definição do desgaste de cratera e de flanco em brocas [SANDVIK 1999]	118
Figura 5.3 Esquema do corpo de prova e da distribuição dos furos	121
Figura 5.4 Dispositivo para fotografar as Brocas	123
Figura 5.5 Evolução do desgaste de flanco para a broca No. 9	125
Figura 5.6 Procedimento para estabelecer o desgaste de flanco da broca número 9 após a execução de 35	126
Figura 5.7 Evolução do desgaste de flanco para as 10 brocas em função do número de furos executados	128
Figura 5.8 Distribuição densidade de probabilidade para a Broca	131
Figura 5.9 Curvas de densidade de probabilidade para a distribuição do desgaste de flanco em função do tempo de operação da broca	132
Figura 5.10 Função Densidade de Probabilidade em função do tempo de usinagem	133
Figura 5.11 Confiabilidade da ferramenta em função do tempo de usinagem	134
Figura 5.12 Desenho Peça	135
Figura 5.13 Análise das <i>Features</i>	136
Figura 5.14 Diagrama da seqüência de operações para a fabricação do eixo	138
Figura 5.15 Confiabilidade das operações do processo de fabricação do eixo	141

Figura 5.16 Confiabilidade do processo após de trocas sucessivas da ferramenta	144
Figura 5.17 Confiabilidade do processo após de trocas sucessivas agrupadas das ferramentas	146

LISTA DE SÍMBOLOS

t	Tempo
v	Velocidade de corte
n	Constante associada ao tempo na equação de Taylor
C	Constante da equação de Taylor
h	Espessura do cavaco
l	Largura do cavaco
α	Ângulo de folga da ferramenta
λ	Ângulo de ataque da ferramenta
γ	Ângulo de saída do cavaco
n_1, n_2, n_3	Constantes associadas à equação de Taylor estendida
$L(y)$	Perda em dinheiro por unidade de produto
y	Variável relacionada com a qualidade do produto
m	Valor nominal para y
$f_T(t)$	Função densidade de probabilidade para T
$F_T(t)$	Função distribuição acumulada de falhas para T
$R(t)$	Confiabilidade no tempo t
$\lambda(t)$	Taxa de falha no tempo t
μ	Média de um conjunto de dados
σ	Desvio padrão de um conjunto de dados
x_0	Constante de localização da distribuição de Weibull
η	Constante de escala da distribuição de Weibull
β	Constante de forma da distribuição de Weibull
$R_s(t)$	Confiabilidade do sistema no tempo t
$R_i(t)$	Confiabilidade do componente i no tempo t

$F_s(t)$	Função distribuição acumulada de falhas para o sistema
$F_i(t)$	Função distribuição acumulada de falhas para o componente i
$R'_i(t)$	Confiabilidade do componente i no modo passivo
V'_B	Nível do desgaste de flanco máximo admissível
v_B	Variável aleatória para o desgaste de flanco
f	Avanço
d	Profundidade de corte
r	Raio da ferramenta de corte
T_1	Tempo médio em que a ferramenta atinge o valor do desgaste
b_n	Constantes associadas aos parâmetros de usinagem e geométricos na equação de Taylor
Z	Número total de <i>Features</i> na peça a ser planejada
$H(i,j)$	Matriz de dados H com i linhas e j colunas
RW	Confiabilidade mínima requerida
N_a	Peças produzidas até o processo atingir RW
t_i	Tempo de execução da operação i-ésima operação
RC	Confiabilidade calculada para o processo
TTF(j)	Tempo de troca j-ésima ferramenta associada com a j-ésima operação i
D	Diâmetro da peça usinada
cv	Coefficiente de variação
$R(t_R)$	Confiabilidade no tempo de troca real
$R(t_R)$	Confiabilidade no tempo de troca antecipada

RESUMO

Nas operações de fabricação mecânica, as variações dimensionais, geométricas e do acabamento superficial são requisitos importantes para garantir o atendimento das especificações de projeto das peças. Este trabalho apresenta a análise da confiabilidade aplicada ao processo de manufatura de componentes mecânicos. O processo de manufatura definido como uma seqüência de operações pré-estabelecidas, visando a transformação geométrica de uma matéria prima até a obtenção da peça especificada em projeto, tem sua confiabilidade dependente da confiabilidade e da seqüência de execução destas operações. A confiabilidade para uma operação de manufatura é definida como a relação estatisticamente independente entre confiabilidade da ferramenta, do operador e da máquina. Para calcular a confiabilidade da ferramenta, adota-se que a vida da mesma é modelada por uma distribuição de probabilidade que indica a chance da ferramenta atingir um certo nível de desgaste em um tempo especificado de uso. Estabelece-se também que a confiabilidade da máquina é uma função da confiabilidade do motor, dos mancais e do eixo principal, sendo representada por uma distribuição exponencial.

Visando a manutenção da confiabilidade do processo de manufatura acima do valor mínimo estabelecido quando do planejamento do mesmo, apresenta-se um algoritmo que permite estabelecer o tempo de troca da ferramenta, para que a seqüência de operações mantenha-se acima da confiabilidade mínima requerida. Para mostrar a aplicação do modelo de confiabilidade é apresentada a avaliação de um processo de manufatura onde estejam envolvidas operações de torneamento e de furação. Para isto são utilizados os resultados obtidos em referências bibliográficas para a confiabilidade do processo de torneamento e são feitos ensaios de furação para estabelecer a distribuição de probabilidade para o desgaste da ferramenta e encontrar a confiabilidade do processo de furação.

ABSTRACT

In mechanical manufacturing process, the part's dimensional, and geometrical tolerances and surface roughness are important requirements to attend the design specification. This study presents mechanical manufacturing process reliability based analysis.

A manufacturing process is defined as a sequence of pre-established operations, aiming the production of a specific part. The process reliability is depended on the operation sequence and their reliabilities. The operation reliability is a statistical relation between cutting tool, operator and machine-tool reliability. The cutting tool life is modeled with a probability function representing the chance that a critical wear magnitude is achieved in a given time period. The machine-tool reliability is modeled according to an exponential distribution, which parameter is dependent on the electrical motor, spindle and bearings failure rates.

Aiming the maintenance of the manufacturing process reliability higher than a minimum value, defined in the process planning, an algorithm to define the cutting tool change period is presented.

The proposed algorithm is used to evaluate the reliability of a manufacturing process composed of turning and drilling operation. The turning reliability is model by data presented in literature and the drilling process reliability is modeled based on test results, planned to define to cutting life, based on wear analysis.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Normalmente, quando se discute o projeto de um produto, destina-se especial atenção às etapas diretamente associadas com a criação do mesmo, incluindo as fases de definição das alternativas de projeto e detalhamento da alternativa escolhida. Outros fatores analisados são a especificação das peças que o compõem e o material empregado na fabricação das mesmas, bem como a especificação e análise dos resultados de ensaios de protótipos do produto.

Entretanto, após a concepção e detalhamento das partes que compõem os produtos, necessita-se da seleção dos processos de fabricação e seqüência dos mesmos incluindo as condições de montagem das partes do produto, a fim de permitir que o produto seja fabricado dentro das condições disponíveis, tanto em recursos quanto em capacidade, atendendo as exigências de qualidade do mesmo ao menor custo possível. Portanto, o projeto de um produto é considerado completo apenas quando este se encontra em sua fase de produção normal, embora ainda susceptível a necessidade de algumas revisões.

Tendo em vista a importância do processo de fabricação das partes que compõem o produto para o sucesso do projeto, os pesquisadores têm voltado grande atenção ao desenvolvimento de pesquisas que têm por objetivo melhorar o processo de fabricação de peças constituintes de componentes mecânicos.

Na busca de alternativas para aumentar o desempenho de seus produtos, os setores industriais investiram, durante as décadas de 1970 e 1980, no desenvolvimento e implantação de técnicas de controle de qualidade, visando o aumento da qualidade do produto, implicando na redução da possibilidade deste apresentar falhas quando utilizado pelo consumidor final.

Inicialmente as técnicas de controle de qualidade foram aplicadas no ambiente fabril, comumente denominado de chão de fábrica, visando o

controle do processo de fabricação do produto, a fim de obter maior uniformidade de desempenho dos componentes, o que, conseqüentemente, aumentaria a possibilidade de desempenho satisfatório do produto final. Estas técnicas de controle de qualidade, que inicialmente basearam-se na aplicação do CEP (Controle Estatístico do Processo), continuaram a evoluir ao longo do tempo, sendo introduzidas outras técnicas onde se incluem os conceitos de Análise de Valor e Círculos de Controle da Qualidade. Posteriormente, visando a organização da documentação e de procedimentos empregados na fabricação dos produtos, a fim de garantir a qualidade dos mesmos sob o ponto de vista de repetibilidade dos processos de fabricação, foram desenvolvidas no final da década de 1980 as Normas ISO-9000, que certamente são consideradas um marco na área de Controle da Qualidade [1CAULCUTT 1995].

Mais recentemente, ao longo da década de 1990, buscando uma maior integração entre a engenharia de produto e a engenharia industrial, foram propostas técnicas para a integração de grupos de projeto e fabricação durante as etapas do próprio projeto do produto, tornando este mais abrangente, pois, além da definição do produto, busca-se adicionalmente a seleção da seqüência de fabricação e montagem das peças que o compõem, de forma a reduzir o tempo de desenvolvimento do produto, bem como obter um produto com maior qualidade já nas fases iniciais de seu desenvolvimento, sendo possível a detecção de problemas de fabricação mesmo durante a fase de seu projeto.

Ainda visando a melhoria do processo de fabricação de um produto, tomando a palavra melhoria como um conjunto de ações que visem reduzir o tempo de fabricação das peças bem como de movimentação de material no chão de fábrica ou mesmo reduzir a possibilidade de ocorrência de defeitos nas peças durante a fabricação, foram desenvolvidas novas metodologias de alocação de recursos no chão de fábrica, tais como a implantação de células de manufatura ou, com o advento da automação industrial, do desenvolvimento das chamadas células flexíveis de manufatura [2STECKE 1986].

Observa-se que todas estas ações têm como objetivo melhorar a qualidade do produto, ou seja, reduzir a possibilidade do mesmo ser fabricado com defeitos, que impeçam o funcionamento deste ou que causem a sua falha prematura quando utilizado pelo cliente.

Tomando atenção na palavra "Falha", tem-se que a técnica de Confiabilidade é empregada para avaliar a probabilidade de um componente operar com sucesso ao longo de um período de tempo pré-determinado, sob condições específicas de uso. Ou seja, a aplicação de técnicas de confiabilidade permite a avaliação da probabilidade de falha de um equipamento, processo ou produto qualquer.

Sob este ponto de vista, as técnicas de confiabilidade podem ser empregadas para determinar a probabilidade de cada elemento envolvido na produção de peças operar corretamente, o que implica, portanto obter peças de acordo com suas especificações.

1.2 Objetivos do trabalho

No contexto deste trabalho será desenvolvida uma metodologia destinada a estabelecer a confiabilidade de um processo de manufatura, analisando o desempenho das máquinas e ferramentas empregadas na fabricação de um dado produto, visando a determinação dos possíveis modos de falhas das mesmas e os seus efeitos sobre a qualidade da peça ou produto, sendo o termo qualidade definido como o atendimento dos requisitos de projeto exigidos para a peça. A determinação destes modos de falha permite a avaliação das possíveis não conformidades do produto associadas com problemas advindos de seu processo de fabricação.

Tendo em vista a importância da qualidade de um produto para o seu bom desempenho no mercado, neste trabalho busca-se a aplicação dos conceitos de Confiabilidade como ferramenta auxiliar no processo de planejamento de manufatura de um produto, apresentado-se uma proposta onde a confiabilidade seja um fator restritivo na seleção dos processos de fabricação das peças e na troca da ferramenta.

Sabendo-se que o desgaste da ferramenta é um fator inerente a qualquer processo de manufatura mecânica, e que a sua ocorrência afeta a qualidade da peça produzida, este trabalho tem como objetivo desenvolver um algoritmo que permita a avaliação do tempo de troca da ferramenta. Este algoritmo baseia-se na distribuição de probabilidade que representa o desgaste da ferramenta e na confiabilidade exigida para o processo de manufatura.

1.3 Escopo do trabalho

Após a introdução e apresentação dos objetivos deste trabalho, no capítulo 2 apresenta-se uma revisão dos processos de manufatura onde se detalham os principais processos empregados na manufatura de peças mecânicas, explorando os modos de falha associados a cada um desses processos e os mecanismos de inspeção normalmente utilizados. No final do capítulo discute-se as principais metodologias de análise da qualidade das peças produzidas por estes processos e como elas podem ser aplicadas no planejamento dos mesmos.

No capítulo 3, definições e considerações sobre os conceitos e técnicas de confiabilidade são apresentadas, avaliando as principais metodologias de análise de confiabilidade que podem ser utilizadas para a análise dos processos, caracterizando suas desvantagens e suas vantagens e o grau de informação necessário para sua aplicação.

No capítulo 4, analisa-se os mecanismos para definir a confiabilidade dentro do processo, considerando os fatores que influenciam esta definição. Adicionalmente procura-se revisar as principais características do planejamento dos processos enumerando as variáveis influentes sobre o mesmo e os procedimentos necessários desta atividade. Neste capítulo são comentadas e exploradas as etapas normalmente envolvidas no planejamento dos processos de manufatura, assinalando as informações necessárias para seu desenvolvimento. Além disso, é analisado o comportamento da confiabilidade tanto para a máquina como para a ferramenta, e verifica-se que a confiabilidade de cada operação e, portanto,

a confiabilidade do processo depende destes dois elementos. No final deste capítulo apresenta-se uma proposta para determinar a seqüência das operações de fabricação de uma peça e para estabelecer o tempo de troca da ferramenta, já que ao enxergar o processo de manufatura como uma seqüência de operações em série, se encontrou que o atendimento da confiabilidade esperada depende da seqüência de operações e especificamente do tempo de troca das ferramentas empregadas para cada uma destas operações. Para tal fim são adaptadas algumas abordagens já existentes, e criados modelos e algoritmos que permitem calcular a confiabilidade de um processo de manufatura para condições específicas.

No capítulo 5 é apresentada a aplicação da metodologia para o cálculo da confiabilidade de processo de manufatura de um eixo, onde intervêm processo de furação e de torneamento. Para obter os dados para o cálculo da confiabilidade da operação de furação, foi executada uma análise experimental desta operação empregando-se brocas fabricadas em aço rápido M2, com 5 mm de diâmetro, que furaram corpos de prova de aço ABNT 1016; nestes ensaios determinou-se a distribuição de probabilidade associada ao desgaste de flanco da broca, a fim de subsidiar a diferencia da confiabilidade da ferramenta. Os dados para o cálculo da confiabilidade do processo de torneamento foram tomados de estudos anteriores, encontrados na literatura.

Nos capítulos 6 e 7, são apresentadas respectivamente, as conclusões obtidas neste trabalho, bem como as recomendações para trabalhos futuros e são listadas as referências bibliográficas citadas ao longo deste texto.

CAPÍTULO 2 ANÁLISE DE PROCESSOS DE MANUFATURA DE COMPONENTES MECÂNICOS

2.1 Considerações iniciais

A manufatura tem existido desde que o homem esteve preocupado em transformar materiais em produtos com características definidas que lhe servissem para sua sobrevivência, selecionando as condições adequadas de produção que lhe permitissem obter os produtos necessários à satisfação de suas necessidades. Portanto, as idéias sobre a manufatura iniciaram-se há muitos séculos, mas nos dois últimos séculos estas têm adquirido um conceito mais amplo e completo, elaborado e sistemático.

Ao final do século XVIII começa a revolução industrial, sendo que um de seus efeitos mais importantes para a manufatura foi a mudança da força do homem pela força gerada por máquina, para o acionamento de máquinas ferramenta ou dispositivos, o que ocasiona um incremento na produção de bens de consumo, com o conseqüente crescimento do comércio, e a expansão dos mercados. O advento da Revolução Industrial permitiu que as empresas se beneficiassem da economia de escala, a partir da divisão do trabalho e do aumento da capacidade de produção dos sistemas de manufatura, exigindo em contrapartida, que os administradores começassem a necessitar de planos de produção, designar tarefas e responsabilidades. A revolução industrial se estende por todo o século XIX. Na Inglaterra, James Watt apresenta as práticas básicas de trabalho industrial em sua planta de motores que é projetada para maximizar o fluxo de produção. Posteriormente, nos Estados Unidos, Eli Whitney é o primeiro a ter uma manufatura de sucesso usando os conceitos de peças intercambiáveis, gerando o conceito de produção seriada em substituição ao processo de produção artesanal, onde um operário fabricava todas as partes do produto, para um processo onde as peças são produzidas por diferentes operários e montadas aleatoriamente em outras peças ou conjuntos produzidas por outros operários, gerando intercambiabilidade e eliminando os ajustes típicos dos processos artesanais. Um século depois, Frederick Taylor estudou os

tempos e movimentos nos postos de trabalho e cria o que se chamou de Administração Científica, onde um operário se especializa na execução de uma única tarefa, repetindo-a por todo o turno de trabalho, mantendo uma cadência pré-determinada, visando o aumento da produtividade de um sistema de produção através da maximização da produtividade de cada tarefa que o compõe. Henry Ford cria a padronização das linhas de montagem progressiva, onde o produto, no caso um automóvel, se move ao longo da linha de produção (no caso montagem), e os trabalhadores, fixos em postos de trabalho, executam uma tarefa específica quando da passagem do automóvel, e Henry Louis Gantt cria os gráficos que levaram seu nome, utilizados para a programação de atividades e a seqüência de operações, minimizando o tempo de folga.

Após a II Guerra Mundial, o caminho natural para reconstruir os países destruídos parecia ser a reprodução do modelo norte-americano de produção em massa, adotado com sucesso pelos países europeus até meados dos anos 70. O Japão, no entanto, devido às características particulares – mercado doméstico limitado e reduzida capacidade financeira para investimento em tecnologias ocidentais – optou por um modelo diferenciado, o sistema de produção enxuta, no início dos anos 70. Neste sistema foram desenvolvidas técnicas que permitiram a diminuição do tamanho dos lotes de produção, proporcionando uma redução dos custos financeiros com a manutenção de estoques. Além disso, a adoção destas técnicas permitiu a redução do desperdício, através do aumento da preocupação com a qualidade das peças fabricadas, cujos defeitos eram identificados e corrigidos imediatamente. O trabalho iniciado nos setores de fabricação foi expandido para as linhas de montagem final. Nas últimas décadas do século XX, a evolução da economia mundial incrementou a necessidade de desenvolver equipamentos e ferramentas que permitissem um aumento na variedade da produção, o que gera novos desenvolvimentos na organização da produção, como os sistemas flexíveis, e produção celular entre outros [SCOTT 1998]. Os sistemas flexíveis de manufatura são sistemas de produção que consistem em um conjunto de estações

interligadas por sistemas automatizados de produção, de manipulação e de carga e descarga de materiais. É caracterizado por aceitar a chegada aleatória de ordens de produção e encomendas personalizadas. As máquinas que intervêm nestes sistemas têm capacidade para diversos processamentos, podendo atender apenas um produto por vez, ou mais do que um produto, eventualmente em mais do que uma fase de produção. A produção celular divide as peças em famílias e cria-se uma célula que inclua as habilidades humanas e todos os equipamentos necessários para produzir a família, isto para obter maior variedade e reduzir custos e tempos de fabricação [⁴NORRIE 1995].

Para os novos sistemas de produção mais evoluídos foi preciso mudar os métodos de inspeção de qualidade e, na área de manufatura desenvolver sistemas como Planejamento dos processos Auxiliado por Computador (do inglês "Computer Aided Process Planning" – CAPP), e o Planejamento das Necessidades da Manufatura (do inglês "Manufacturing Resource Planning" – MRP) que integram as áreas de projeto e de engenharia industrial com a manufatura, pois o CAPP determina o plano do processo (seqüência de operações, utilização de máquinas ferramenta e parâmetros de processo para cada etapa de fabricação, ferramentas de corte, dispositivos de fixação, entre outros) tendo em consideração aspectos econômicos, de qualidade, de especificações e de satisfação do cliente. No ciclo de vida do produto, o projeto e a manufatura são muito importantes e por isto têm recebido especial atenção. De acordo com a literatura [⁵GAYRETLY 1999], o planejamento dos processos (PP) aparece como elemento de ligação entre as atividades de projeto e da manufatura. O MRP leva em consideração fatores externos como a demanda do produto, as novas tecnologias e as variações econômicas externas para determinar as necessidades e restrições da produção em termos de componentes, mão de obra, instalações, entre outros. Vários são os trabalhos apresentados na literatura [⁶MEEKER], [⁷MAROPOULOS 1995], [⁵GAYRETLY 1999], [⁸LEEM 1997] que têm como proposta apresentar a integração entre o MRP e o PP. Contudo, uma solução definitiva ainda não foi apresentada. Muito

desenvolvimento ainda deve ser realizado, além disso, são poucos os trabalhos encaminhados a estudar a confiabilidade dos processos de manufatura e buscando uma estimativa da sua probabilidade de falha.

A seguir são analisados os principais processos de fabricação empregados na manufatura de componentes mecânicos, definindo-se os modos de falha associados aos mesmos. Além disso, são expostas as principais técnicas de qualidade empregadas para a análise dos processos de manufatura. A metodologia desenvolvida no trabalho será exemplificada no processo de usinagem devido a sua ampla aplicação nos processos de fabricação de peças mecânicas, embora, como é mostrado no decorrer deste capítulo, é possível estabelecer os modos de falha qualquer processo de fabricação e, por conseguinte, seguindo a metodologia apresentada nos capítulos posteriores, fazer uma análise de confiabilidade para os mesmos.

2.2 Processos de manufatura mecânica

O processo de fabricação é referenciado como a atividade ou procedimento dedicado à transformar um material em um produto com características específicas. Este processo implica em uma mudança controlada na geometria da matéria prima que se vai transformar em produto final. Entre os principais processos da manufatura mecânica têm-se:

- Fundição,
- Processos de usinagem, onde se destacam o torneamento, fresamento e furação;
- Processos de conformação e,
- Soldagem.

Certamente em literatura especializada sobre o assunto, tal como o livro escrito por Groover [GROOVER 1996], onde são citados outros processos de manufatura, porém os acima citados são os mais empregados na fabricação das peças metálicas, justificando a análise mais detalhada neste texto.

A seguir se apresenta uma revisão destes processos, definindo-se os equipamentos associados a cada um, bem como seus modos de falhas.

2.2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição consiste em vaziar (despejar) metal líquido num molde contendo uma cavidade cuja geometria representa a geometria desejada para a peça final. Os processos de fundição podem ser classificados pelo tipo de molde e modelo e/ou pela força ou pressão usada para preencher o molde com o metal líquido. O processo de fundição permite obter, de modo econômico, peças de geometria complexa, sua principal vantagem em relação a outros processos [10DOYLE 1985].

O processo de fundição aplica-se a vários tipos de metais, tais como aços, ferros fundidos, alumínio, cobre, zinco, magnésio e respectivas ligas. Porém existem também desvantagens. Os aços fundidos, por exemplo, podem apresentar elevadas tensões residuais, microporosidade, zoneamento e variações de tamanho de grão. Tais fatores resultam em menor resistência e ductilidade, quando comparados com aços obtidos por conformação a quente.

2.2.1.1 *Processos de fundição*

Existem muitas variáveis no processo de fundição, tais como o grau de automação, a precisão dimensional, e o acabamento superficial, entretanto destaca-se a influência do tipo de molde nas propriedades físicas do material resultante.

A taxa de extração de calor através do molde determina o tamanho final de grão e, portanto a característica de resistência mecânica da peça. Por este motivo os processos de fundição são muitas vezes classificados de acordo com o tipo de molde utilizado. As características mais representativas dos principais processos de fundição como fundição em areia, fundição em moldes de precisão (molde permanente, fundição sob pressão, molde cerâmico), fundição em casca e molde de cura química são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Tabela comparativa entre processos de fundição [11RISCO 1989]

ATRIBUTO	TIPO DE FUNDIÇÃO				
	AREIA VERDE	MOLDE DE PRECISÃO			MOLDE DE CURA QUÍMICA
	Fundição em areia	Molde permanente	Sob pressão Molde permanente	Molde cerâmico e cera perda	Casca e molde de cura química
Tolerância dimensional (mm)	±1,27 ±3,81	±2,54 ±7,62	±2,54 ±12,7	±0,0254 ±3,81	±0,254 ±5,08
Custo relativo (quantidade alta)	BAIXO	BAIXO	MAIS BAIXO	MAIS ALTO	MÉDIO ALTO
Custo relativo (quantidade baixa)	MAIS BAIXO	ALTO	MAIS ALTO	MÉDIO	MÉDIO ALTO
Peso fundido e cura química (0,5 lb-ton)	ILIMITADO	100 lb	75 lb	oz-100 lb	Casca oz-250 lb
Espessura mínima	1/10"	1/8"	1/32"	1/16"	1/10"
Acabamento superficial	RAZOÁVEL-BOM	BOM	MELHOR	BOM	BOM-CASCA
Facilidade de fundição de peça projeto complexo	RAZOÁVEL-BOM	RAZOÁVEL	BOM	MELHOR	BOM
Facilidade de alteração de projeto na produção	MELHOR	RUIM	PIOR	RAZOÁVEL	RAZOÁVEL
Ligas que podem ser fundidas	ILIMITADA	Base Al e base Cu	Base Al	ILIMITADA	ILIMITADA

2.2.1.2 Defeitos no processo de fundição [12KNOWLESA 2002].

O defeito mais comum apresentado pelo processo de fundição refere-se à heterogeneidades surgidas durante o esfriamento de um material fundido na estrutura interna do material. Estas heterogeneidades podem ser de natureza física (poros) ou de natureza química (segregações).

A presença de poros pode ser causada por contração de solidificação ou por presença de gases dissolvidos. Como resultado da contração de solidificação surgem porosidades no material, que podem ser macroporosidades e/ou microporosidades. No caso dos gases dissolvidos, pela dissolução destes por metais em estado líquido, são formadas bolhas de gás aprisionadas dentro da peça. Para reduzir a ocorrência deste tipo de porosidade é necessário minimizar a dissolução dos gases no metal, adicionar materiais que possam se combinar com o gás e formar massa sólida, proporcionar condições ao metal líquido para que arraste os gases dissolvidos para fora da massa de metal.

A heterogeneidade química é outro tipo de defeito que pode ocorrer em peças fundidas. Este consiste na distribuição heterogênea de elementos de liga e impurezas dentro da estrutura do material. A presença de segregação traz como consequência o fato de que o último líquido a se solidificar (e que se situa no contorno de grão), tem temperatura de fusão mais baixa que o resto do material (mais baixa inclusive do que aquela prevista pelo diagrama de equilíbrio). Esta fusão localizada do contorno resulta em distorções dimensionais na peça chegando a inutilizá-la.

A segregação gravimétrica é outro tipo de segregação que tende a ocorrer quando a composição química da liga é tal que, durante a solidificação, formam-se fases sólidas com densidades muito diferentes. Durante a solidificação em ferros fundidos nodulares, forma-se primeiro a grafita (baixa densidade) no metal líquido (maior densidade). As grafitas flutuantes podem-se movimentar e alinhar-se na peça, criando uma região de concentração, quando heterogeneidade nas propriedades mecânicas do material.

Na Tabela 2.2 é apresentado uma análise do tipo FMEA¹ para o processo de fundição, onde são resumidos os modos de falha para este processo e enumeradas as possíveis causas e suas consequências.

Para inspecionar peças fundidas os três principais métodos são: Inspeção visual, Inspeção dimensional e Inspeção metalúrgica. O objetivo da primeira é detectar defeitos visíveis, resultantes das operações de moldagem, confecção e colocação dos machos, de vazamento e limpeza. O segundo método de inspeção busca conferir as tolerâncias dimensionais da peça resultante do processo. A inspeção metalúrgica inclui a observação da microestrutura do material, uma análise química, ensaios mecânicos para determinar as propriedades do material; e ensaios não destrutivos para verificar se os fundidos não tem defeitos internos.

¹ Do inglês Failure Modes and Effect Analysis – FMEA, definição e características no capítulo 3

Tabela 2.2 Análise de Modos e Efeitos das Falhas - Processo de Fundição

FUNÇÕES	MODOS DE FALHA	CAUSAS	EFEITOS	MÉTODO DE DETECÇÃO DA FALHA
Gerar uma peça com tolerâncias dimensionais, geométricas e acabamento superficial em conformidade com os requisitos de projeto	Presença de poros	<p>Metal líquido mantido em altas temperaturas</p> <p>Condições de fundição incorretas.</p> <p>Faltou borbulhar gás inerte no metal líquido</p> <p>Faltou adicionar matérias para se combinar com o gás</p>	<p>Geração de trincas que conduzam a falha por fadiga ou por fratura</p> <p>Propriedades mecânicas inferiores</p> <p>Acabamento superficial deficiente</p>	<p>Controle do processo</p> <p>Inspeção visual (Macroporosidades)</p> <p>Inspeção metalúrgica</p>
	Heterogeneidade química	<p>Solidificação fora das condições do diagrama de equilíbrio.</p> <p>Alta velocidade de solidificação</p>	<p>Propriedades mecânicas heterogêneas</p> <p>Concentração de tensões</p> <p>Dimensões fora das especificações em caso de reaquecimento</p>	<p>Controle do processo</p> <p>Inspeção Metalúrgica</p>
	Presença de impurezas	<p>Condições de fundição incorretas</p> <p>Dificuldades, erros ou ausência de retirada da escoria.</p>	<p>Propriedades mecânicas heterogêneas</p> <p>Estimulação de falha em processos subseqüentes</p>	<p>Controle do processo</p> <p>Inspeção Metalúrgica</p>

2.2.2 PROCESSO DE USINAGEM

É o processo mecânico que, removendo material com algum tipo de ferramenta, permite dar forma, dimensões e rugosidade específicas, a um bloco de material. Por esta razão a usinagem sempre modifica o componente, peça ou item, nas suas dimensões originais regulamentadas. É de grande importância a escolha das condições ótimas de fabricação, pois destas depende o desempenho do processo e o resultado obtido na peça final, especialmente em termos de tolerâncias dimensionais e/ou de tolerâncias geométricas e de rugosidade superficial. Dado o anterior é

importante analisar as características que influenciam todos os processos de usinagem tais como: a formação do cavaco, as forças e potência de usinagem e algumas características das ferramentas tais como: material, avarias e vida.

Formação do cavaco

Analisar a formação do cavaco e fazer com que ele seja facilmente removível é significativo para o processo de usinagem, já que geralmente os problemas como rugosidade excessiva, defeitos dimensionais e o desgaste da ferramenta podem ser conseqüência da formação e estabilidade do cavaco. A quebra do material depende do aumento do esforço no ponto de ruptura.

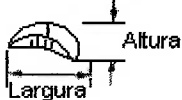

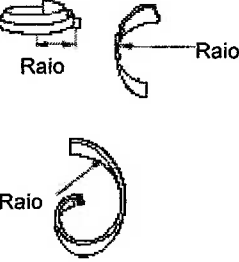
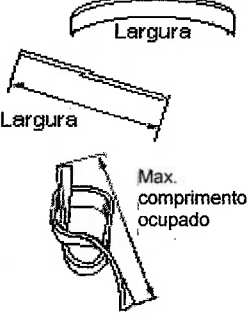
A formação e estrutura do cavaco determinam as condições que garantam sua fratura natural consumindo o mínimo de energia. Astakahov [13ASTAKAHOV 1997] e Bayoumi [14BAYOUMI 1996] apresentam diferentes abordagens sobre a formação do cavaco. As idéias mais relevantes dos trabalhos destes autores podem ser resumidas no fato deles definirem a formação de cavaco começando quando a ferramenta de corte penetra na peça superando a resistência do material, e continuando com a penetração da ferramenta, sem esquecer que a resistência à penetração cresce proporcionalmente à área da peça que é submetida à compressão. Este processo continua até a força de penetração se tornar tão grande que consegue romper o pedaço de material, o qual vai-se movimentando pelo plano de deslizamento da ferramenta. Finalizando o processo a força de penetração decresce rapidamente, e um novo ciclo de formação de cavaco é iniciado. A formação do cavaco depende do material e da força cisalhante.



Figura 2.1 Relação entre o cavaco e a força de usinagem [13ASTAKAHOV 1997]

Em termos gerais, as formas de cavaco podem ser caracterizadas dimensional e geometricamente [15FANG 1996], tal como é indicado na Tabela 2.3. Em qualquer das formas do cavaco o contínuo é indesejável já que dificulta tanto a estocagem do cavaco quanto a remoção do mesmo, também o cavaco parcialmente contínuo pode apresentar problemas, como geração de vibrações, que podem acarretar danos como ondulações na superfície usinada, desgaste excessivo da ferramenta, e até mesmo efeitos nocivos como desbalanceamento rotativo nos principais mancais do torno. Para modificar a forma do cavaco pode-se diminuir o ângulo de saída e de inclinação da ferramenta, aumentar o avanço e a profundidade de corte, diminuir a velocidade de corte ou usar um quebra-cavaco cujas dimensões estão relacionadas com o material e a velocidade e espessura de corte. Destas opções a mais utilizada é o uso de quebra-cavaco.

Tabela 2.3 Forma do cavaco [16FANG 1996]

Grupo	Forma do cavaco	Características Dimensionais.	Grupo	Forma do cavaco	Características Dimensionais.
Arco		Altura	Helicoidal - Tubular		Diâmetro
		Largura Máxima			Comprimento
Espiral - Circular		Num. Voltas	Fita		Arranjo
		Raio Máximo			Comprimento

Força de usinagem

No momento em que se inicia a interação entre a aresta de corte e o bloco de material, são desenvolvidas, além das forças de atrito, forças internas de resistência do material à remoção do cavaco que aumentam até equilibrar as forças de corte e seus respectivos momentos. Durante a operação, a força de usinagem varia, produzindo variações na profundidade

de corte, variações nas propriedades mecânicas do material da peça, desgaste e perda da aresta de corte das ferramentas, entre outros.

Na Tabela 2.4 é mostrado o comportamento da força de usinagem com a variação de alguns parâmetros de grande importância no processo de usinagem, segundo Ferraresi [17FERRARESI 1995]. Com referência às características do material pode-se estabelecer que as forças de usinagem aumentam em uma relação diretamente proporcional com a dureza do material e que, para aços carbono, o aumento da porcentagem de carbono acarreta um aumento da pressão específica de corte e por consequência da força de corte.

Tabela 2.4 Comportamento da força de corte

FATOR	PARÂMETRO ANALISADO →	DIREÇÃO DE AUMENTO DA FORÇA DE USINAGEM
Material da peça		<p>Dureza →</p> <p>% de carbono em aços →</p>
Condições de operação		<p>Área secção e corte →</p> <p>Avanço →</p> <p>Velocidade de corte < 25 m/min →</p> <p>Velocidade de corte > 25 m/min →</p>
Ferramenta	<p>Angulo γ →</p> <p>Angulo χ →</p> <p>Desgaste →</p>	<p>Angulo λ →</p>
Cavaco		<p>Secção de cavaco →</p>
Lubrificação		<p>Eficiência de penetração →</p>

Ferramenta de corte

Outro aspecto importante para analisar ao realizar-se uma operação de usinagem é qual ferramenta pode dar as especificações requeridas à peça. Dentro desta análise existem características próprias da ferramenta que podem ser: material, geometria, desgaste e vida. Em termos gerais, no aspecto material, pode-se mencionar sete grandes grupos de acordo com suas propriedades químicas e mecânicas: alto carbono ou com médios e

baixos teores de liga, aço rápido, carboneto cementado (metal duro), com recobrimento, materiais cerâmicos, Diamante, e CBN "Cubic Boron Nitride". Cada um destes materiais oferece condições diferentes de usinagem e induz a ocorrência de modos de falha diferentes para as ferramentas tal como citado por Devries [¹⁸DEVRIES 1992]. A Tabela 2.5 apresenta as principais características das ferramentas empregadas para usinagem.

Tabela 2.5 Aplicações e modos de falha de materiais para ferramenta [¹⁸DEVRIES 1992]

Material da ferramenta	Tipo de materiais de peças compatíveis	Processos de usinagem e faixa de velocidades de corte(v)	Desgaste típico ou modo de falha	Observações
Alto carbono ou médios e baixos teores de liga	Resistência e dureza baixa Ligas não ferrosas e plásticas	Torneamento, furação e alargamento. $v < 0.5$ m/s	Deformação plástica, desgaste abrasivo, micro lascamento.	
Aço rápido	Baixa e média dureza e resistência	Torneamento, furação alargamento, mandrilamento, brochamento e fresamento. $0.5 < v < 2.5$ m/s	Desgaste de flanco e de cratera	
Carboneto cementado (Metal duro)	Baixa e média dureza e resistência	Torneamento, furação alargamento mandrilamento, brochamento e fresamento. $0.5 < v < 2.5$ m/s	Desgaste de flanco e de cratera	Velocidades baixas
Com recobrimento	Ferro fundido, aço inoxidável, superligas (Excetuando o Ti).	Torneamento $0.5 < v < 5$ m/s	Desgaste de flanco e de cratera	Velocidades baixas.
Cerâmicos	Ferro fundido, Nitratos, superligas, ligas não ferrosas e plásticos.	Torneamento $v > 2.5$ m/s	Desgaste de entalhe Lascamento Fratura.	Baixa resistência à fadiga termomecânica implica cortes não interrompidos
Diamante	Cu e Al puros, liga Si - Al, plásticos, resinas epóxi e composto de fibra, ligas não ferrosas.	Torneamento e fresamento $v > 2.5$ m/s	Lascamento, oxidação, grafitização.	Não usinagem de aços de baixo carbono, Co, Ni, Ti.
CBN	Ligas de aços duros, ferro fundido, HSS, Ni.	Torneamento e fresamento $0.5 < v < 5$ m/s	Desgaste de entalhe Lascamento, oxidação, e grafitização.	Pode trabalhar nos materiais que o diamante não pode.

A vida da ferramenta está relacionada com os parâmetros de usinagem, sendo tal relação comprovada experimentalmente. O parâmetro que mais influência é a velocidade de corte e em menor grau está o avanço. O equacionamento de Taylor, bastante empregado para avaliação da vida de uma ferramenta de usinagem, é apresentado na eq. (2.1)

$$vT^n = C \quad (2.1)$$

onde T é o tempo de vida da ferramenta, v é a velocidade de corte, n e C são constantes.

Foi feita outra generalização, indicada na eq. (2.2), incluindo fatores como a espessura (h) e a largura (b) do cavaco onde se incluem quatro constantes empíricas [18DEVRIES 1998]:

$$\left(\frac{T}{T_R}\right) = \frac{K}{\left(\frac{v}{v'_R}\right)^{1/n} \left(\frac{h}{h_R}\right)^{1/n_1} \left(\frac{b}{b_R}\right)^{1/n_2}} \quad (2.2)$$

onde o subscrito R indica um valor de referência. As constantes n, n₁, n₂ e K são constantes determinadas experimentalmente variando a espessura e largura do cavaco que devem cumprir a relação da eq. (2.3).

$$\frac{1}{n} > \frac{1}{n_1} > \frac{1}{n_2} \quad (2.3)$$

O modelo da eq. (2.2) apresenta problemas do tipo experimental pois tem-se uma equação com quatro incógnitas e para resolver-la é necessário a utilização de métodos matemáticos e estatísticos complexos. Além do anterior é necessário manter a relação da eq. (2.3), e utilizar instrumentos sofisticados para medir a largura e espessura do cavaco. Dessa forma a formulação indicada na eq. (2.2) torna-se muito complexa para ser aplicada, sendo usualmente empregada a fórmula de Taylor original, indicada na eq. (2.1).

Shen [19SHEN 1997] mostra experimentalmente que a vida da ferramenta de materiais dúcteis é elevada ao aumentar a velocidade de corte e o avanço. Wardany [20WARDANY 1997] mostra experimentalmente

que o desgaste da ferramenta segue uma distribuição estatística de taxa de falha crescente. Esta análise concorda com os dados obtidos por Shen [¹⁹SHEN 1997], embora na literatura apareçam outras abordagens com modelos empíricos baseados no desenvolvimento do equacionamento de Taylor [²¹WANG 2001].

2.2.2.2 *Processos de usinagem*

Os processos de usinagem mais importantes são explicados brevemente, focando-se nas principais características e nas operações que estes podem realizar para assim identificar as não conformidades do produto geradas por estas operações.

Processo de torneamento

O torneamento é a operação que converte um sólido de geometria qualquer em uma peça de geometria axissimétrica bem definida. Para isto o material é colocado para girar concêntricamente com o eixo da máquina operatriz, ao mesmo tempo em que a ferramenta de corte translada para retirar o material perifericamente. Na Figura 2.2 são apresentados as principais operações realizadas em torneamento, brevemente analisadas abaixo [⁹GROOVER 1996].

Cilindrar: É o torneamento de superfícies de revolução de qualquer perfil. A ferramenta executa dois movimentos, um paralelo e outro transversal ao eixo de rotação da peça resultando num perfil da trajetória conjugada dos movimentos.

Facear: operação que se obtém pelo deslocamento da ferramenta perpendicularmente ao eixo de rotação da peça. Serve para obter superfícies planas nas faces.

Tornear cônico: operação obtida pelo deslocamento da ferramenta obliquamente ao eixo da peça, possível graças ao recurso de girar o porta ferramentas sobre uma base graduada.

Sangrar: operação que consiste em cortar uma peça com uma ferramenta chamada bedame, criando canais internos ou externos.

Rosquear: É a operação que consiste em abrir rosca em uma superfície externa de um cilindro ou cone e no interior de um furo do mesmo tipo. É possível realizar esta operação ajustando convenientemente os parâmetros de movimento da ferramenta.

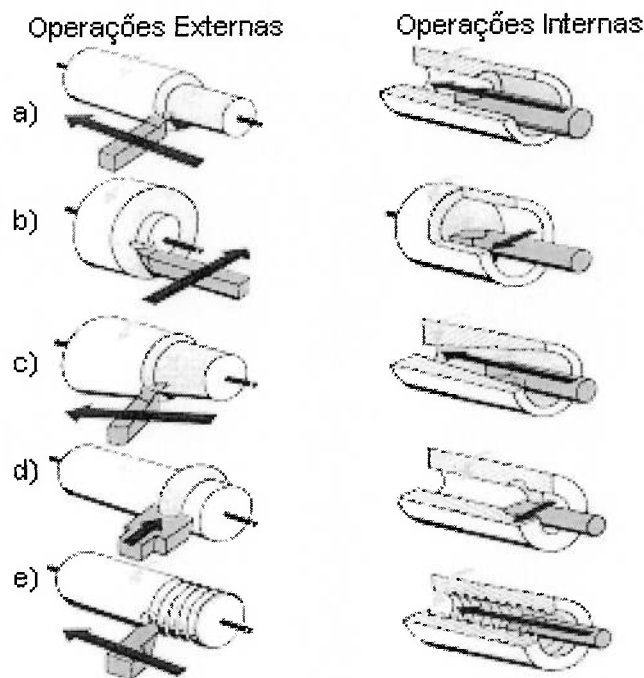


Figura 2.2 Operações de torneamento: a)Cilindrar, b)Facear, c)Tornear cônico, d)Sangrar, e)Rosquear, [22DAMASCENO 2002].

A máquina utilizada para este processo é o torno que, em termos gerais, pode ser descrito como uma base maciça e rígida, uma placa de castanhas que fixa a peça, ligada a uma árvore principal, que faz parte do cabeçote fixo, uma caixa de engrenagens que fornece as mudanças nas velocidades da árvore e de um carro porta ferramenta, que está montado sobre a estrutura da máquina, e o cabeçote móvel ou contra-ponta que está no extremo oposto à árvore principal. Mas existe uma grande variedade de tornos cuja escolha depende de fatores como: as dimensões e formas das peças a produzir; o volume de produção e grau de precisão dimensional e geométrica exigido para a peça.

As ferramentas de corte para torneamento apresentam uma aresta de corte. A Figura 2.3 apresenta as partes que compõe este tipo de

ferramentas. Normalmente são forjadas a partir de uma barra sólida de material para ferramenta ou na forma de pastilhas, as quais são instaladas em um porta pastilhas, que faz o papel de haste a ser fixada no porta ferramenta.

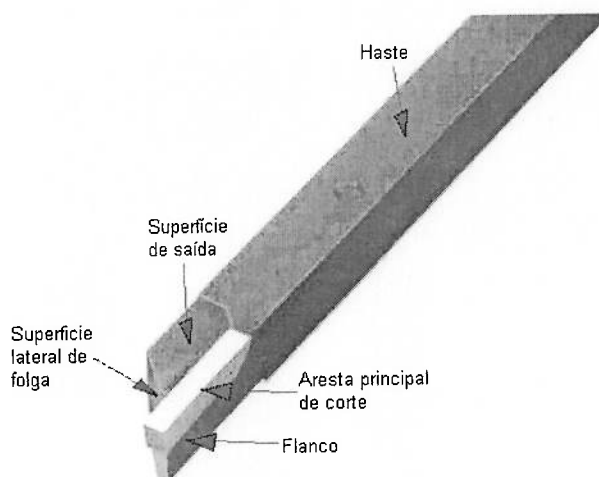


Figura 2.3. Ferramenta de corte de uma aresta de corte, adaptado de [10DOYLE 1985]

Processo de fresamento

O fresamento é um processo cujo objetivo é realizar uma operação de usinagem onde o material é removido por uma ferramenta de múltiplas arestas cortantes. As ferramentas de corte utilizadas neste processo são denominadas fresas que são ferramentas rotativas com múltiplas arestas de corte dispostas simetricamente ao redor de um eixo. As fresas removem o material intermitentemente o que permite que seus dentes esfriem durante o tempo em que não arrancam material e pela presença grande número de dentes o trabalho de usinagem é quase contínuo.

Os métodos de fresamento se referem ao movimento relativo entre a peça e a ferramenta, podendo-se ter fresamento discordante, concordante ou combinado. Na Figura 2.4 indica-se a execução do fresamento concordante e discordante.

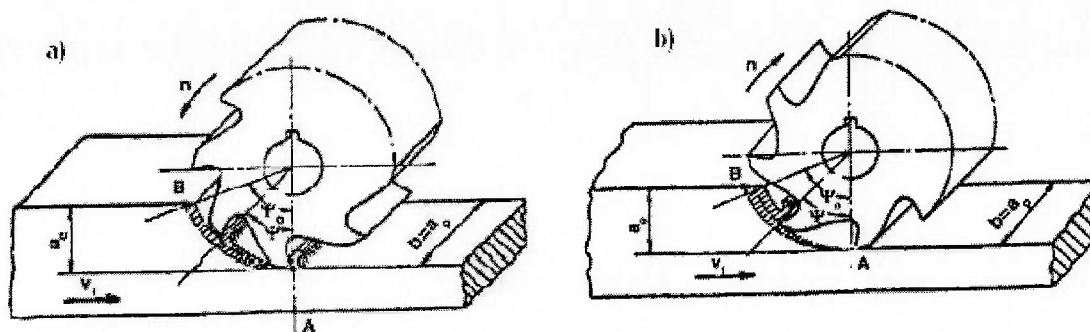


Figura 2.4 Métodos de fresamento. a) Concordante b) Discordante [23DINIZ 2000]

No fresamento concordante o sentido de rotação da fresa é o mesmo do avanço da peça. O corte inicia-se com a espessura máxima do cavaco e a força de corte tende a apertar a peça contra a mesa. O fresamento concordante normalmente causa rugosidades maiores. Algumas das operações onde é usado este tipo de corte é a abertura de rasgos de chaveta e os cortes profundos e longos.

No fresamento discordante, o sentido de rotação da fresa é contrário ao sentido de avanço da peças o que ocasiona que o corte do cavaco se inicie com a espessura mínima. Este tipo de fresamento causa um maior desgaste da ferramenta, já que a aresta de corte começa encruando o material a ser cortado, até que sejam superadas as deformações elásticas e realmente inicie-se o cisalhamento do material. Este encruamento eleva a dureza, fazendo com que o desgaste seja um pouco mais elevado.

Algumas vezes o desbaste é feito no fresamento concordante e o acabamento é feito no fresamento discordante.

A máquina utilizada para este processo é a Fresadora que, em termos gerais, pode ser descrita como uma base maciça e rígida, uma coluna, que é a armação principal da máquina, fazendo parte da coluna a árvore, que recebe a potência do motor de acionamento através de uma transmissão e transmite o movimento para o eixo porta-ferramenta. Outros componentes são o suporte ou consolo que contém os mecanismos de acionamento do carro e da mesa.

Processo de furação

A furação é um processo que produz superfícies cilíndricas internas chamadas comumente de furos. Este processo pode ser realizado removendo todo o material compreendido no volume do furo final (furação em cheio) ou ser realizado com uma peça pré-furada. Além disso, pode ter como finalidade a obtenção de furos com dois ou mais diâmetros o que é conhecido como furação escalonada [24KALPAKJIAN 2001].

A ferramenta utilizada para a obtenção dos furos, geralmente é multicortante e denominada de broca. Na Figura 2.5 encontra-se as partes comuns que compõem uma broca helicoidal.

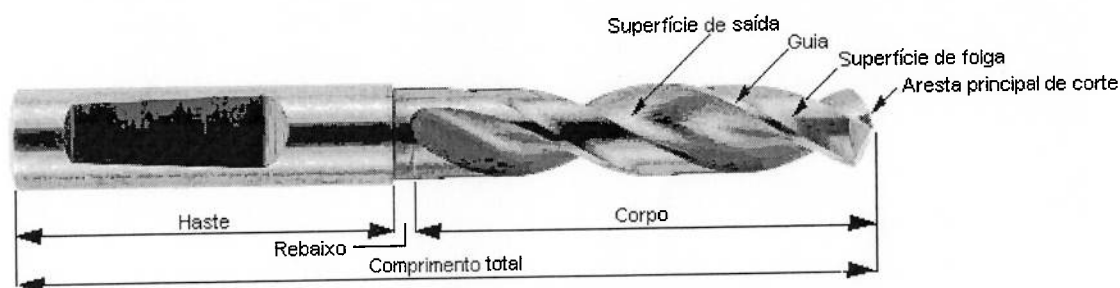


Figura 2.5 Broca helicoidal, adaptado de [10DOYLE 1985]

A ferramenta de corte tem duas partes fundamentais: aresta transversal e a aresta principal de corte indicada na Figura 2.6. As duas arestas estão envolvidas na remoção do material.

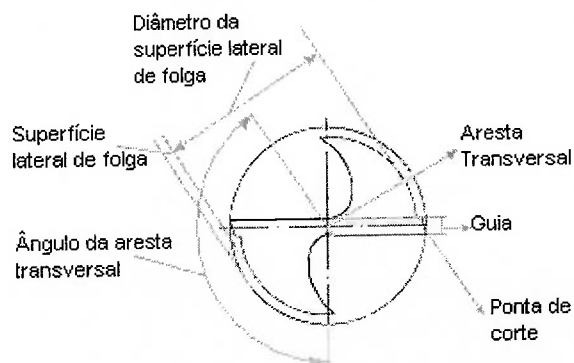


Figura 2.6 Geometria de uma broca helicoidal [10DOYLE 1985]

Para levar a cabo o processo de furação é preciso que a ferramenta ou a peça gire e simultaneamente a ferramenta ou a peça se desloquem

segundo uma trajetória que coincide ou que é paralela com o eixo principal da máquina (torno, fresa ou furadeira).

É importante ressaltar que o processo de furação pode apresentar problemas à medida que a profundidade aumenta, isto devido ao fato que tanto o fluxo do cavaco quanto o acesso do líquido refrigerante torna-se mais difícil. Estes problemas podem ser evitados aumentando-se o fluxo de líquido refrigerante.

2.2.2.3 *Defeitos no processo de usinagem*

Teoricamente se não ocorrerem variação nas forças e momentos que atuam sobre o sistema composto pela peça em bruto, a máquina, o dispositivo de fixação e a ferramenta, o equilíbrio do sistema não é alterado. Não obstante existem outras variáveis, controláveis e não controláveis, que influem no equilíbrio do sistema e que levam a deslocamentos adicionais da ferramenta o que conduz a desvios nas dimensões e rugosidades desejadas para a peça usinada.

Todas as ferramentas de corte desgastam durante a usinagem e continuam desgastando até chegar ao fim da sua vida. O desgaste da ferramenta é inevitável e este tem um efeito negativo sobre processo de usinagem. O desgaste da ferramenta resulta da interação entre a ferramenta e a peça, dependendo das condições de corte, sendo o produto da combinação de fatores mecânicos, térmicos, químicos e abrasivos, que mudam a geometria da aresta de corte. Como é um efeito inevitável se converte em uma dos modos de falha mais importante de um processo de usinagem, e existe uma grande preocupação por conhecer seu comportamento, para tentar controlar seus efeitos sobre a peça usinada.

À medida que a ferramenta vai-se desgastando, observam-se variações no processo de usinagem. A temperatura eleva-se progressivamente, a força e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se alteram, e o acabamento superficial piora. Em condições extremas, ocorre um lascamento intenso no corte, e a superfície usinada apresenta-se áspera. Com ferramentas de aço rápido, ocorre um

sobre aquecimento da aresta, que amolece e fica com aspecto de queimado, ao mesmo tempo em que ocorre um violento aumento do atrito da ferramenta sobre a peça. Em ferramentas de metal duro o aumento das forças de corte, no caso do desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total da aresta. A seguir são apresentados os principais tipos de desgaste, e suas principais características e na Figura 2.7 são mostrados os diferentes tipos de desgaste.

A ferramenta desgasta-se progressivamente e acaba ficando sem fio comumente denominado de ferramenta cega. O principal tipo de desgaste é o desgaste no flanco que acontece na superfície de corte da ferramenta e é causado pelo contato entre a ferramenta e peça, sendo estimulado pelo aumento da velocidade de corte. Nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, sempre ocorre desgaste (desgaste de entalhe), causando acabamento superficial de má qualidade ou fora da tolerância e risco de quebra da aresta, este tipo de desgaste pode-se diminuir reduzindo a velocidade de corte exceto quando usinar materiais resistentes ao calor com cerâmicas, para materiais endurecidos deve-se selecionar uma ferramenta com um ângulo de posição menor ou uma classe mais resistente ao desgaste, ou com cobertura [18DEVRIES 1992].

Outro tipo de desgaste apresentado nas ferramentas de corte é o desgaste da superfície de saída, chamado desgaste de cratera, este é causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco, causando o enfraquecimento da aresta, devido à perda de material pela difusão dos átomos do material usinado na ferramenta e vice-versa. A difusão existe pela afinidade química entre as duas superfícies, fazendo com que os átomos possam se mover livremente através da interface desde que a temperatura seja alta o suficiente para possibilitar uma rápida difusão. O enfraquecimento da aresta facilita a quebra da aresta de corte na área em uso causando acabamento superficial de má qualidade. Este desgaste pode ser estimulado pela elevada temperatura no corte na face de topo e pode ser evitado selecionando uma classe com cobertura de Al_2O_3 e reduzindo a velocidade

para obter uma temperatura mais baixa, depois reduzir o avanço [18DEVRIES 1992].

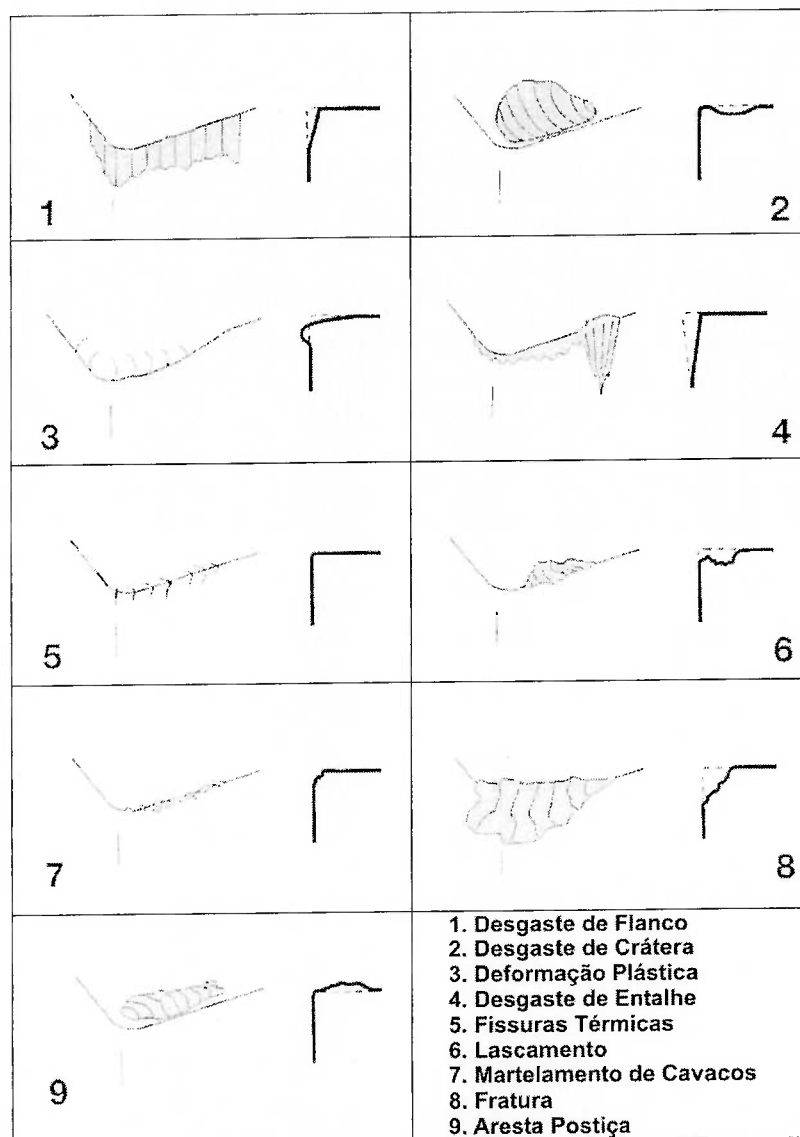


Figura 2.7 Classificação dos tipos de desgaste em ferramentas de corte, adaptado de [25SANDVIK 2002].

Em menor escala outro tipo de desgaste que ocorre na ferramenta é a deformação plástica que pode se manifestar pela depressão da aresta de corte, levando a um mau controle de cavacos e acabamento superficial insatisfatório, existindo risco de desgaste excessivo no flanco, podendo causar à quebra da pastilha ou da ferramenta de corte. Este desgaste é causado pela combinação de temperatura de corte muito alta e pode ser

evitado selecionando-se uma ferramenta de classe mais dura e com melhor resistência à deformação plástica, além de reduzir a velocidade de corte e o avanço [²⁵SANDVIK 2002].

As ferramentas de corte também podem apresentar aresta postiça quando o material da peça é soldado à aresta de corte devido à baixa velocidade de corte. Este tipo de desgaste causa acabamento superficial insatisfatório e microlascas na aresta de corte quando a aresta postiça é removida.

O martelamento de cavacos, as microlascas, as fissuras térmicas e a quebra da ferramenta são outros dos defeitos que podem apresentar as ferramentas de corte. O martelamento de cavacos acontece quando os cavacos contínuos são desviados contra a aresta de corte, podendo danificar a face. Este tipo de desgaste evita-se mudando o avanço ou selecionando uma geometria alternativa para a ferramenta. As microlascas são pequenas fraturas na aresta de corte causando acabamento superficial insatisfatório e desgaste excessivo no flanco. Este defeito pode-se evitar selecionando uma ferramenta tenaz e com geometria mais robusta. As fissuras térmicas são pequenas fissuras perpendiculares à aresta de corte, causando microlascas e acabamento superficial insatisfatório. As fissuras térmicas existem devido a variações de temperatura causadas pela usinagem intermitente, pela variação no fornecimento de refrigerante [²⁵SANDVIK 2002].

Na Tabela 2.6 se apresenta a análise do tipo FMEA genérica para uma ferramenta utilizada num processo de usinagem. Observa-se que a ferramenta pode falhar pela quebra ou por algum tipo de desgaste. A quebra pode-se evitar, mas o desgaste sempre estará presente, mesmo supondo que a única causa seja o próprio envelhecimento da ferramenta, ou seja sem qualquer presença de outro fator acelerador do desgaste, este tipo falha é progressivo e inevitável.

Tabela 2.6 Análise de Modos e Efeitos das Falhas de Ferramenta de Usinagem

FUNÇÕES	MODOS DE FALHA	CAUSAS	EFEITOS	MÉTODO DE DETECÇÃO DA FALHA
Executar o corte de uma superfície, mantendo restrições dimensionais, geométricas e de acabamento superficial	Desgaste de Flanco	Velocidade de corte fora do padrão especificado pelo fabricante Avanço superior ao indicado pela folha de processos Material fora do especificado (mais duro) Não ocorrência da saída do cavaco durante a fabricação Problemas de lubrificação, falta de lubrificação ou uso de lubrificante inadequado.	Diâmetro, altura, raio, comprimento, etc, fora das tolerâncias geométricas e dimensionais. Rugosidade superficial acima do especificados	Emissão acústica Métodos de inspeção na superfície Controle do processo Verificação do aumento do torque ou potência da máquina
	Deformação plástica	Aumento da temperatura, pelo aumento de força e usinagem, devido ao aumento de condições de corte. Material fora do especificado (mais duro)	Rugosidade superficial acima do especificados Problemas no controle do cavaco	Verificação do aumento do torque ou potência da máquina Métodos de inspeção na superfície
	Desgaste cratera	Aumento da temperatura, pelo aumento de força e usinagem, devido ao aumento de condições de corte.	Rugosidade superficial acima do especificados Quebra da ferramenta	Difração de Raios X
	Quebra	Aumento de força de usinagem pela acumulação de cavaco ou formação plástica do material no fundo Erro na seleção do material da ferramenta. Problemas de lubrificação, falta de lubrificação ou uso de lubrificante inadequado.	Diâmetro e/ou altura fora das tolerâncias geométricas e dimensionais Reprocessos Aumento tempo de processamento	Emissão acústica Verificação do aumento do torque ou potência da máquina

2.2.3 PROCESSO DE CONFORMAÇÃO

A conformação mecânica é o processo que através de forças aplicadas por ferramentas adequadas, busca a modificação da forma e dimensões de um corpo pela ação de tensões mecânicas sem que haja remoção de material, esta modificação pode ser executada na presença de

aquecimento ou não. As ferramentas usadas neste processo podem variar desde pequenas matrizes até grandes cilindros [¹⁰DOYLE 1985].

O processo de conformação tem como objetivo produzir peças com excelentes propriedades mecânicas com a mínima perda do material, promovendo a modificação da forma de um material metálico sem acarretar defeitos que inviabilizem seu uso.

O processo de conformação mecânica depende de fatores como a morfologia granular do material trabalhado, a temperatura de trabalho, o estado de tensão e os gradientes e velocidades de deformação desenvolvidas [²⁶HAMBLI 2002]. Em função da temperatura de recristalização e do material utilizado, a conformação mecânica pode ser classificada como trabalho a frio, a morno e a quente. Cada um destes trabalhos fornecerá características especiais ao material e à peça obtida. Estas características são função da matéria prima utilizada, como composição química e estrutura metalúrgica (tamanho e forma granular, porcentagem, distribuição, morfologia, tamanho e natureza de precipitados e soluções sólidas) que dependem da temperatura e da taxa de deformação. Entretanto, considerando o estado de tensões e os gradientes de deformação, os processos podem ser classificados em [¹⁰DOYLE 1985]:

1. O estado de tensões é simples, comumente tração e as deformações são localizadas em regiões específicas da peça. O processo mais comum como estas características é a estampagem.
2. O estado de tensão é mais complexo, envolvendo tanto tensões de tração como de compressão compostas, além de observarem-se deformações em praticamente todas as regiões do corpo. Alguns dos processos que podem ser incluídos neste grupo são: forjamento, laminação, extrusão e trefilação.

Outra classificação comumente usada é aquela que se baseia nos tipos de forças aplicadas ao material para conseguir uma forma específica. Os processos podem ser classificados como de compressão direta, de

compressão indireta, de tração, de flexão e de cisalhamento [27DIETER 1988].

Na Tabela 2.7 se apresenta uma classificação dos processos de conformação incluindo os produtos mais representativos dos diferentes processos.

Tabela 2.7 Classificação dos processos de conformação plástica [28BRESCIANI 1991]

Força Preponderante	Processo	TRABALHO A QUENTE		TRABALHO A FRIO	
		Aços	Não Ferrosos	Aços	Não Ferrosos
Compressão Direta	Laminação	Placas Chapas Barras Perfil	Placas Chapas Barras	Chapas	
	Estampagem	Chapas Placas		Chapas	
	Forjamento	Peças forjadas		Peças pequenas forjadas	
Compressão Indireta	Extrusão	Tubos	Barras Tubos Perfis	Peças pequenas extrusadas	Peças longas extrusadas
	Trefilação			Barras Arames Fios	Barras Arames Fios Tubos
	Embutimento	Peças grandes estampadas a partir de placas		Peças de chapas estampadas	
Tração	Estiramento de Chapas			Peças de chapas estiradas	
Flexão	Dobramento	Peças de chapas e tiras dobradas			
	Calandragem			Tubos	
Cisalhamento	Corte	Peças cortadas de chapas ou perfis pequenos diversos			

2.2.3.1 Processos de conformação para metais

Na segunda coluna da Tabela 2.7 pode-se observar todos os processos de conformação. A seguir são analisados os mais representativos para a produção de componentes mecânicos, definindo-se as principais características, bem como os modos de falha e defeitos associados a cada um destes e a influência na qualidade final da peça.

Processo de Forjamento

O forjamento é o processo de conformação mecânica, que mediante a aplicação de esforços externos em um "blank" montado em uma matriz,

altera plasticamente a forma dos metais. As etapas de processamento que exigem os processos de forjamento para converter o “blank” na peça final são chamadas pré-formas. O número de etapas depende, entre outras características, da geometria, do material e da complexidade da peça, sendo a última influenciada pela presença de secções delgadas, pelas mudanças severas na área da seção transversal da peça, e pelas linhas de partição quando truncadas.

Os principais tipos de forjamento são o forjamento em matriz ou por compressão direta entre ferramentas, geralmente planas. No primeiro, varias cavidades transformam a matéria prima em produto acabado, nas quais o excesso de material escoava para fora da linha de partição, formando a rebarba, nas etapas finais de forjamento. O projeto e o controle adequados da rebarba da peça é essencial para garantir o preenchimento completo da cavidade do molde. Este processo permite produzir peças com tolerâncias dimensionais bem reduzidas. No segundo, o material escoava no sentido perpendicular à direção de aplicação da força (superfície livre mais próxima) já que esta é a direção de menor atrito; este processo é conhecido como forjamento livre. O forjamento em matriz tem um custo inicial mais elevado por tal motivo precisa um volume de produção alto. O forjamento livre é utilizado quando os custos não permitem utilizar o forjamento em matriz (volume de peças pequeno ou peças grandes) ou como uma etapa preliminar deste.

As máquinas mais utilizadas para forjamento a quente são prensas hidráulicas e mecânicas, todas classificadas segundo o seguinte critério: máquinas restritas pela capacidade de carga, e pelo tamanho do curso. Em máquinas restritas pela capacidade de carga, a magnitude de deformação que se pode atingir depende da energia ou da máxima força disponível em cada choque. Sendo assim, quando a deformação requerida pela peça é maior do que a capacidade da máquina, vários golpes são necessários para a conformação da mesma. As máquinas que estão nesta categoria são os martelos, as prensas hidráulicas, e as prensas balancim. Em máquinas restritas pelo curso, a quantidade de deformação é fixada pelo curso da

máquina. E se a energia disponível para realizar a operação não for suficiente, deve-se optar pelo uso de uma máquina de maior capacidade. As máquinas que se enquadram nesta categoria são as prensas mecânicas excêntricas. A escolha do equipamento adequado para realizar certo forjamento depende de diversos fatores, dentre os principais: o tamanho e a complexidade da peça, o material, e a qualidade exigida das peças a serem produzidas.

O martelo de golpes opera suspendendo até certa altura a parte superior da matriz, e deixa que esta caia sobre a outra metade, que é fixada em uma bigorna.

A quantidade de deformação por golpe é determinada pela energia potencial associada à massa e à altura da parte superior da matriz, que será convertida em energia cinética durante a queda, e depois dissipada em forma de energia mecânica de deformação no choque. As prensas mecânicas promovem o movimento relativo dos blocos da matriz e são caracterizadas por comprimir o metal a baixa velocidade [28BRESCIANI 1991]. As prensas hidráulicas aplicam uma pressão uniforme e uma velocidade de deformação praticamente constante, graças à ação de um cilindro hidráulico; estas máquinas são mais utilizadas para o forjamento de peças grandes, embora sua operação seja limitada pela sua capacidade de carga, mas seu custo é elevado, por isto quando se requer operar com peças pequenas e medias, é mais comum utilizar prensas mecânicas. Outros tipos de máquinas neste processo são as prensas de fricção e as prensas horizontais. A Tabela 2.8, mostra os valores recomendados para a velocidade de operação de diversos equipamentos de forjamento.

Tabela 2.8 Valores típicos da velocidade para diferentes equipamentos de forjamento [27DIETER 1988]

MÁQUINAS DE FORJAMENTO	FAIXA DE VELOCIDADE [m/min]
Martelo de queda livre	3,6 – 4,8
Martelo mecânico	3,0 – 9,0
Prensas mecânicas	0,06 – 1,5
Prensas hidráulicas	0,06 – 0,30

Entre martelos e prensas em geral, a velocidade de fechamento é bem maior nos primeiros comparados aos últimos, fator a ser considerado quando o material a ser forjado for sensível à taxa de deformações. Por causa da capacidade limitada de energia das prensas mecânicas, grandes forjados precisam ser produzidos em martelos ou prensas hidráulicas. Por outro lado, as prensas mecânicas aumentam a produtividade por minimizar o tempo de manipulação das peças entre golpes. Assim, para peças menores, a taxa de golpes é maior nestas prensas. Embora a capacidade de golpes da máquina possa ser diferente, o tempo de ciclo, que é calculado considerando também o tempo de manipulação da peça, é o que determina uma escolha adequada de equipamento.

A falta de qualidade nos produtos forjados deve-se à falhas na matéria prima ou na operação. Os defeitos normalmente apresentados nos produtos forjados ocorrem tanto na superfície, quanto no interior dos mesmos.

Entre os defeitos na superfície pode-se mencionar trincas superficiais e gotas frias. As trincas superficiais são uma consequência do trabalho excessivo em temperatura baixa ou da fragilidade a quente do material devido a uma atmosfera inadequada no forno. As gotas frias aparecem como descontinuidades quando duas superfícies se dobram, alguns dos efeitos que podem ocasionar este defeito são: incrustações das rebarbas sobre as peças como consequência de dobras acidentais, fluxos anormais do material quente dentro das matrizes durante o forjamento, distribuição incorreta de massas de material no pré-forjamento, e colocação inadequada do material na matriz, entre outros.

Um dos defeitos internos mais comuns se apresenta quando existe penetração incompleta na cavidade da ferramenta, em função dos golpes rápidos e leves que geram uma mudança na forma da peça, e algumas vezes pode modificar a estrutura do material. Estes golpes rápidos causam diferentes propriedades mecânicas na peça forjada. Este problema só se apresenta quando o processo é realizado com martelo. As trincas internas

são menos freqüentes e são causadas pelas tensões de tração ao se efetuar grandes deformações [²⁶HAMBLI 2002].

Em termos gerais a qualidade superficial da peça conformada depende de fatores como a classe de processo (a quente ou a frio), intensidade da deformação, condições de lubrificação e da ferramenta. Assim como, a precisão dimensional depende fundamentalmente das características da matriz de forjamento e da conformabilidade do material. Quando o trabalho é a quente as tolerâncias dependem da temperatura de trabalho, da intensidade de oxidação superficial e da perda de material.

Processo de Laminação

É o processo de conformação mecânica que modifica a seção transversal de um metal na forma de barra, lingote, placa, fio, ou tira, etc., pela passagem entre dois cilindros com geratriz retilínea (laminação de produtos planos) ou contendo canais entalhados de forma relativamente complexa (laminação de produtos não planos), sendo à distância entre os dois cilindros menor que a espessura inicial da peça metálica. A laminação tem alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser bastante preciso. Na laminação, o material é submetido a tensões compressivas elevadas, resultantes da ação de prensagem dos rolos e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito entre os rolos e o material.

Dependendo das especificações dimensionais para o início e o final do processamento, o processo de laminação pode ser a frio ou a quente, dependendo de onde seja localizada a temperatura de trabalho em relação a uma temperatura de referência, com a temperatura de recristalização.

Na laminação a quente a temperatura de trabalho se situa acima da temperatura de recristalização, evitando assim o encruamento e reduzindo a resistência à deformação plástica; este tipo de laminação é normalmente utilizado quando se requer grandes reduções de seções transversais. Esta não fornece um bom acabamento superficial, por isto quando o acabamento

corresponde a uma especificação da peça se faz necessário utilizar a laminação a frio.

Na laminação a frio o material é deformado a temperaturas abaixo da temperatura de recristalização, melhorando-se algumas propriedades mecânicas, como por exemplo, a resistência à tração, a dureza superficial, e o limite elástico; quando é necessário o material é submetido a um tratamento térmico, entre passes sucessivos. A laminação a frio proporciona acabamento superior e evita a formação de casca de óxidos, quando comparada com a laminação a quente.

Alguns dos defeitos no produto laminado são consequência de problemas no processo de laminação, tais como: falta de ajuste dos cilindros, aquecimento e esfriamento heterogêneo ao longo dos cilindros de laminação, paredes do cilindro desgastadas, guias de entrada assimétricas em relação ao eixo vertical da passagem, quantidade incorreta (excesso ou falta) de metal entrando na passagem, refrigeração defeituosa dos trens de laminação, entre outros fatores. Os defeitos na superfície como cascas, marcas de cilindros, linhas de distensão são devidos a problemas no processo de fundição, no tratamento térmico ou no armazenamento da peça [28BRESCIANI 1991].

Segundo Bresciani [28BRESCIANI 1991]., para conseguir atingir as especificações requeridas é preciso controlar diversos parâmetros de qualidade durante o processamento já que disto depende as propriedades geométricas e mecânicas dos produtos laminados.

Processo de Estampagem:

Consiste na transformação de uma chapa plana de modo a adquirir uma nova forma geométrica plana ou oca, mediante um conjunto de operações como o corte, o dobramento e encurvamento e finalmente a estampagem profunda. Enquanto as duas primeiras são normalmente realizadas a frio, a estampagem profunda pode eventualmente ser feita a quente, se for necessário pelas condições técnicas exigidas.

Para realizar esta operação pode ser usada uma prensa mecânica (aplicação da força no punção usando elementos mecânicos como manivelas, engrenagens, excêntricos) ou hidráulicas (com aplicação de pressão hidrostática mediante o uso de pistões acionados por fluido hidráulico). A seleção do tipo de máquina depende das características próprias da peça a ser produzida (forma, dimensão, quantidade, entre outros). O equipamento basicamente consiste numa ferramenta que pressiona a chapa, chamada punção, e um molde no qual a chapa se apóia para ser cortada ou para ser dobrada, que é chamado de matriz. Se a geometria do punção for muito longa, pode existir um terceiro elemento que serve como guia, e assim é evitada a flexão do punção. As formas de secções transversais do punção e da matriz determinam a forma da peça.

O esforço de corte é o responsável pela perda da capacidade de corte da ferramenta, chamada de perda do fio, que tem como conseqüência peças cortadas com contornos pouco definidos e com rebarbas. Para minimizar esta falha é importante escolher o material da ferramenta em função do tipo de processo (corte, dobramento, embutimento), da temperatura de trabalho e do material da peça.

Os erros no processo de estampagem consistem em erros de forma e dimensões da peça obtida, devido a problemas como o desgaste do punção, deficiências na calibração das forças aplicadas para a conformação, desgaste da matriz fazendo com que a forma final fique alterada, ou problemas de superfície da peça como rugosidades excessivas, conicidade, excentricidade ou erros na localização dos furos causados por desgaste das guias e matrizes.

2.2.3.2 Defeitos no processo de conformação

As propriedades mecânicas, metalúrgicas e geométricas dos produtos conformados dependem de fatores como composição química da matéria prima e tipo de processo empregado na conformação. Em termos gerais, para analisar peças conformadas deve-se realizar uma análise do material (propriedades mecânicas, metalúrgicas e características da matéria prima) e

uma análise das condições de processamento, ligada ao desempenho da máquina e do material durante cada processo.

O defeito crítico apresentado por uma peça conformada corresponde às trincas, que se propagam sob carregamento cíclico e podem até causar a fratura da peça. A concentração de tensões é outro defeito que comumente aparece nos processos de conformação. Dependendo do processo esta concentração de tensões pode causar rugas, ondulações ou até rupturas. Para efeito de ilustração, na Tabela 2.9 apresenta-se a análise do tipo FMEA para o processo de estampagem. Da mesma forma pode ser executada esta análise para cada um dos processos mencionados anteriormente.

Tabela 2.9 Análise de Modos e Efeitos das Falhas - Processo de estampagem

FUNÇÕES	MODOS DE FALHA	CAUSAS	EFEITOS	MÉTODO DE DETECÇÃO DA FALHA
Gerar uma peça com espessura, propriedades e acabamento em conformidade com os requisitos de projeto	Trincas ou porosidades	Inclusões do material Armazenamento inadequado Erro na seleção da matriz Problemas de lubrificação, distribuição não homogênea de lubrificação ou uso de lubrificante inadequado.	Rugosidade superficial acima do especificados	Inspeção chapa acabada Controle do processo
	Largura irregular	Cilindros desgastados Produto laminado com problemas de toleranciamento Formação de pasta de óxidos	Rugosidade superficial acima do especificados Retrabalhos Gargalhos na produção Rejeito de peças	Controle do processo anterior Manutenção da máquina Controle do processo
	Estrias de embutimento	Desgaste da ferramenta Formação de pasta de óxidos Erro no processo Problemas de lubrificação, falta de lubrificação ou uso de lubrificante inadequado.	Superfície de acabamento fora das especificações Gargalhos na produção Retrabalhos Rejeito de peças	Inspeção da ferramenta Controle do processo

2.2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM

É o processo de unir peças colocando-as em contato e aquecendo as superfícies de contato de modo a levá-las a um estado de fusão ou de plasticidade, podendo ou não empregar um material de enchimento.

A operação assegura que as propriedades físicas e químicas das juntas sejam aproximadamente constantes ao longo do cordão de solda. Atualmente trabalha-se com a soldagem de diversos materiais, incluindo, além dos tradicionais materiais metálicos, ferrosos e não ferrosos, os plásticos e os vidros [24KALPAKJIAN].

Os processos de soldagem exigem uma fonte de calor e um material de preenchimento, além do material base, que é o material a ser soldado. Como fonte de calor, pode-se utilizar chama ou um arco elétrico gerado entre um eletrodo e material base.

A grande maioria dos processos de soldagem industrial emprega a solda a arco elétrico. Este é formado entre um eletrodo, que pode ser consumível ou não, e a peça a ser soldada. Para a formação do arco elétrico, deve-se aplicar uma tensão e uma corrente entre o eletrodo e a peça, sendo que o arco elétrico é formado com a aproximação do eletrodo em relação à peça a ser soldada. Os processos de soldagem a arco elétrico exigem a utilização de uma proteção gasosa para a poça de fusão, a fim de impedir a oxidação do material fundido, o que implicaria na inclusão de defeitos no cordão de solda.

Outros tipos de processos de soldagem são aqueles com o emprego de chama, nos quais a geração de calor é realizada pela queima de uma mistura de gás combustível com ar ou oxigênio, produzem uma chama concentrada de alta temperatura. Este tipo de soldagem é usado em serviço de reparo. O equipamento é de baixo custo e versátil.

Deve-se ressaltar que existem outros processos de soldagem, tais como, a soldagem a laser ou por feixe de elétrons, porém estes não são usualmente empregados na fabricação de componentes mecânicos, devido ao seu custo de utilização. Especificamente na indústria automobilística emprega-se com freqüência o processo de soldagem a ponto, no qual as peças são unidas pela passagem de uma corrente elétrica de alta intensidade entre as mesmas, gerando a fusão em uma área reduzida, daí o nome soldagem a ponto.

Diferentemente de outros processos de fabricação a soldagem é muito dependente da qualidade da mão-de-obra empregada na sua execução. Os soldadores são operários treinados e certificados por entidades de inspeção e certificação, tais como a PETROBRÁS, a American Bureau of Shipping, o Lloyd's Register of Shipping, entre outras. Mesmo com o emprego de mão-de-obra especializada e a qualificação do próprio procedimento de soldagem, as juntas soldadas ainda apresentam defeitos, os quais podem exercer efeito detrimental sobre a capacidade de resistência mecânica do componente soldado. Na seqüência deste texto é feita uma breve descrição dos defeitos comumente encontrados em juntas soldadas, bem como das técnicas de inspeção empregadas para verificação dos mesmos.

2.2.4.1 Defeitos em juntas soldadas

O melhor grau de soldabilidade por fusão é apresentado pelos metais que são capazes de formar uma série contínua de soluções sólidas um com o outro. A solubilidade limitada resulta numa soldabilidade limitada. A falta de aglutinação entre o metal depositado e o metal base ou incompleta penetração do metal depositado no metal base devido a erros na técnica de soldagem pode causar trincas que poderão precipitar a falha da junta, pelos processos de fadiga ou de fratura. Outro defeito muito comum dentro das juntas soldadas é a porosidade, que ocorre quando se formam bolhas ou bolsas de gás na superfície ou no interior do cordão de solda; este defeito é causado pela presença de gases no metal e/ou umidade no fluxo ou revestimento. Em alguns casos as contrações pós-soldagem dos elementos componentes da junta, o travamento excessivamente rígido das peças, a presença de impurezas em quantidades elevadas no metal causam fissuras na solda. As mordeduras no metal base adjacente ao pé da solda, são causadas pela alimentação não uniforme da vareta de adição, posição inadequada do eletrodo ou da ponta do maçarico ou aquecimento excessivo. Para descobrir estes defeitos têm-se desenvolvido diferentes técnicas de inspeção visando a melhoria do produto soldado e evitando a falha em uso

pela propagação de trincas. A seguir são explicadas as técnicas mais utilizadas na indústria.

Inspeção visual

Esta técnica permite a avaliação e detecção de falhas superficiais como corrosão, contaminação, acabamento superficial de baixa qualidade e descontinuidades na superfície, sendo o mais utilizado na detecção de trincas superficiais.

É uma técnica simples e barata, já que não precisa de equipamento específico, além de boa iluminação e boa visão, podendo ser recomendado o uso de lupas. No entanto há uma variedade de equipamentos que podem ser envolvidos para ajudar a inspeção visual, entre os quais se têm:

- Boroscópios rígidos ou flexíveis para iluminação e observação de partes internas em dispositivos fechados ou inacessíveis.
- Sensores de imagem que permitem o registro visual permanente em forma de fotografias, vídeos ou imagens digitalizadas.

Ainda assim pode-se afirmar que a inspeção visual é a técnica com menor capacidade de detecção de defeitos em uniões soldadas.

Líquidos penetrantes

É um método usado para detectar descontinuidades abertas à superfície em materiais não porosos. Baseia-se na penetração de um líquido numa pequena abertura na superfície do cordão de solda, por ação capilar e pela aplicação de um revelador (que tem propriedades higroscópicas), aparece a descontinuidade. Os líquidos penetrantes podem ser do tipo visível à luz branca ou os fluorescentes visíveis na escuridão com uma lâmpada de luz ultravioleta. Por isto, é um método adequado para detecção de trincas, porosidades, mordeduras, descontinuidades similares.

Dentre as vantagens desta técnica ressalta-se a sua versatilidade, é uma técnica de baixo custo, e sendo de fácil uso pode ser aprendida rapidamente. Desde que o material não seja poroso, pode ser usado em materiais ferrosos e

não ferrosos. Defeitos superficiais pequenos podem ser detectados mais facilmente do que pela inspeção visual, devido à indicação ser de tamanho maior do que o defeito.

Dentre as desvantagens destaca-se que a superfície deve estar livre de óleos, sujeiras e contaminantes que podem mascarar os defeitos. Não é adequado na inspeção de materiais porosos. A efetividade do método pode ser questionada quando operações como lixamento ou martelamento são feitas na superfície da peça, pois podem fechar a descontinuidade aberta à superfície, mascarando a presença da mesma.

Partículas Magnéticas

Esta técnica permite detectar descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos.

Quando materiais ferromagnéticos são magnetizados, os defeitos localizados à superfície do material magnetizado e que estão numa posição aproximadamente perpendicular às linhas do campo magnético criam uma fuga de campo nesta parte da superfície. Quando finas partículas ferromagnéticas são aplicadas nesta superfície, estas se concentram no defeito, delineando a descontinuidade e geralmente indica sua localização, forma, e extensão. A área a ser inspecionada pode ser magnetizada passando-se uma corrente elétrica diretamente através da mesma, ou através de um condutor próximo à peça ou através de bobinas.

Dentre as vantagens deste método podem ser citadas: a sensibilidade a tamanhos e defeitos abertos à superfície. É versátil, relativamente de baixo custo e pode aprender-se rapidamente. Dentre as limitações têm-se a sua aplicabilidade a materiais ferromagnéticos e só detecta defeitos na superfície ou próxima a ela, a sensibilidade diminui conforme a redução do tamanho do defeito.

Inspeção por Ultra-som

O ensaio por ultra-som usa ondas de som de alta frequência (maior do que 20000 Hz) para caracterizar e inspecionar materiais, determinar o tamanho

de defeitos e medir a espessura ou distância a esses defeitos. As unidades de ultra-som contêm um cristal de quartzo ou um material piezelétrico encapsulado num transdutor. Quando uma tensão elétrica é aplicada, o cristal vibra rapidamente. O transdutor de ultra-som é mantido em contato com a superfície do metal que esta sendo inspecionado através de um meio de acoplamento. Quando as ondas de som encontram uma interface (o extremo da peça ou um defeito interno), uma parte da energia do som é refletida ao transdutor. Os dados de ultra-som são recebidos e analisados no detector de falhas por ultra-som.

Entre as vantagens têm-se a assilibilidade de detecção de defeitos tanto superficiais como sub-superficiais, podendo ser localizados e medidos, inclusive defeitos que outros métodos não detectam, pelo reduzido tamanho. Este é o método preferido para detectar defeitos planares como de laminação ou trincas. O método não representa riscos à saúde como na exposição radiográfica.

Dentre as limitações têm-se a necessidade de pessoal altamente treinado, além do que o equipamento é bastante custoso. Não é prático para inspecionar geometrias complexas, peças com rugosidade superficial alta, seções transversais muito finas, ou materiais com tamanho de grão grande e requer-se um padrão de calibração similar ao material inspecionado como referência de um produto sem defeitos.

Na Tabela 2.10 é apresentada a análise do tipo FMEA para o processo de soldagem, onde pode-se observar a aplicação dos métodos de inspeção no método de detecção da falha.

Tabela 2.10 Análise de Modos e Efeitos das Falhas - Processo de Soldagem

FUNÇÕES	MODOS DE FALHA	CAUSAS	EFEITOS	MÉTODO DE DETECÇÃO DA FALHA
Gerar um cordão de solda com acabamento em conformidade com os requisitos do projeto	Presença de poros	Gases no metal Umidade no revestimento Condições de soldagem incorreta	Descontinuidade na superfície Rejeito de peças Peças fora das especificações	Inspeção visual (macroporosidades) Líquidos penetrantes (Material não poroso) Controle do processo
	Ranhuras fundidas no metal base	Alimentação não uniforme da vareta de adição Erros no processo ou no equipamento	Geração de trincas que conduzam a falha Estimulação de falha nos processos sub-seqüentes	Controle do processo Inspeção visual Partículas magnéticas
Gerar juntas soldadas conforme aos requisitos de funcionalidade	Falha por fadiga ou fratura	Aglutinação ou penetração incompleta do metal depositado ou base Presença de poros pela umidade no fluxo	Perda da funcionalidade da junta Devolução de peças	Controle do processo Inspeção radiográfica Inspeção por ultrassom
	Falha pela propagação de trinca interna	Impurezas no metal Condições de soldagem incorreta	Concentração de tensões Estimulação de falha nos processos sub-seqüentes	Controle do processo Partículas magnéticas Inspeção radiográfica Inspeção por correntes paroxítonas

No item 2.2 foram analisados os diferentes processos para a produção de sistemas mecânicos. Foram mostradas algumas análises do tipo FMEA para ilustração dos possíveis modos de falha associados a estes. Na seqüência deste texto são avaliadas as técnicas de controle de qualidade que são comumente usadas na avaliação dos processos e que idealmente deverão fazer parte do método de detecção da falha.

2.3 Análise de técnicas de avaliação da qualidade em processos

Determinar o momento exato onde se inicia a evolução do conceito da qualidade é praticamente impossível, já que desde a formação dos grupos sociais primitivos, que deram origem à construção das sociedades organizadas, o homem tem desenvolvido atividades produtivas, procurando atender suas necessidades definindo parâmetros de conformidade. Na evolução histórica do conceito de qualidade pode-se observar que este foi primeiramente associado à inspeção; com o advento da Revolução Industrial as empresas se beneficiam da economia de escala, a partir da divisão do trabalho e do aumento da capacidade de produção dos sistemas de manufatura, exigindo, em contrapartida, que os administradores executassem planos de produção e designassem tarefas e responsabilidades. A qualidade é encarada exclusivamente pelo departamento de fabricação e o prazo de produção priorizado em detrimento da qualidade; posteriormente o conceito evoluiu para a definição de conformidade e especificações.

Durante a primeira guerra mundial o sistema de manufatura tornou-se mais complexo e como consequência disto a inspeção da qualidade passa a ser considerada dentro das atividades de produção. Este processo foi complementado pelo desenvolvimento das técnicas estatísticas de monitoramento de processo propostas por Shewart. Até a década de 60 (década do Zero Defeito), apesar de toda evolução técnica observada no âmbito da qualidade, as orientações a seu respeito permaneceram majoritariamente defensivas. Esta visão alterou-se a partir da década de 70, quando os aspectos estratégicos da qualidade foram reconhecidos e incorporados e alta tecnologia começa a ser adotada nos processos produtivos, abrangendo o projeto e a produção. O conceito de qualidade passa a envolver todos os departamentos da empresa, tendo como objetivo obter a satisfação do cliente. Passa-se a utilizar técnicas baseadas no Desdobramento da Função de Qualidade (do inglês – “Quality Function Deployment” – QDF) para traduzir em especificações técnicas as necessidades do cliente. Na década do 1980 se percebeu que o

planejamento estratégico da empresa enfatizando a qualidade não era suficiente para seu sucesso. O conceito de satisfação do cliente foi então estendido para outras entidades envolvidas com as atividades da empresa, o que gera o desenvolvimento de técnicas como o Controle da Qualidade Total (do inglês – “Total Quality Control” – TQC) no ocidente e equivalentemente Controle de Qualidade por Toda a Empresa (do inglês – “Company Wide Quality Control” – CWQC) para o oriente. Estas técnicas apoiadas na metodologia do japonês Genichi Taguchi dão início ao desenvolvimento de técnicas de análise de falhas que têm por objetivo a otimização dos processos em geral em pro da melhora da qualidade do produto e de uma redução de custos, caracterizado a qualidade total [29GROVER 2001].

Os rápidos avanços na tecnologia, o desenvolvimento de produtos altamente sofisticados, a concorrência global e o aumento nas expectativas dos clientes têm feito com que a manufatura utilize técnicas para elevar a qualidade de seus produtos de forma que estes possuam uma alta probabilidade de um item executar sua função e operar com sucesso ao longo de sua vida operacional, ou seja, uma alta confiabilidade.

Os conceitos são complementares já que, reduzindo os defeitos no processo a qualidade no produto é aumentada; o que dá como resultado um aumento na satisfação do cliente. A confiabilidade do processo está focada na análise deste para encontrar as possíveis causas que possam fazer, por exemplo, que o processo esteja fora dos limites de especificação, através da análise dos resultados da aplicação do Controle Estatístico do Processo, ou que o produto não cumpra com os requisitos e necessidades do cliente quando ele estiver no mercado. Ao estudar os modos de falha do processo e procurar soluções obtêm-se melhora nos mesmos, assim como a redução dos custos por perda. A sistematização que oferece as técnicas de análise de confiabilidade aplicadas na análise do processo facilita o trabalho na obtenção dos parâmetros de qualidade estabelecidos para o produto

afetar a qualidade do produto, ou seja, minimizar os efeitos negativos ou de prejuízo que possa ocasionar; por exemplo, uma falha no modo de operação da máquina, ou uma falha na troca de ferramenta, fazendo com que o produto não atinja os requisitos operacionais, quando esteja solicitado sob condições previstas.

A seguir se apresenta as principais técnicas de análise de qualidade do processo, caracterizando suas vantagens e desvantagens e grau de informação necessário para sua aplicação.

2.3.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE

O CEP é uma ferramenta estatística que tem como o objetivo promover a prevenção de defeitos, obter-se a melhora da qualidade dos produtos e serviços, e a redução de seus custos de fabricação, através da análise estatística e da inspeção por amostragem de produtos. A análise é executada para verificar que a variabilidade do processo ou do parâmetro especificado esteja dentro dos limites fixados previamente [30SCHIPPERS 1998].

Para atingir o objetivo se constrói a carta de controle de processo, que permite identificar o comportamento do processo ao longo do tempo e detectar comportamentos especiais que possam indicar possíveis anomalias, permitindo, em alguns casos, delinear ações que previnam e bloqueiem sua reincidência. As cartas de controle permitem dar uma avaliação da estabilidade do processo, possibilitando a identificação de causas de variação pelo monitoramento de características de qualidade expressas em valores contínuos (variáveis) ou discretos (presença ou ausência de atributos) que determinam o desempenho do processo.

O CEP permite participação direta e eficaz do operador na análise de qualidade, dado que ele é quem, em tempo real, pode perceber e dar alerta quando o processo tem algum problema. Do anterior se espera ter dois resultados positivos: uma influência positiva na motivação do operador, com a conseqüente redução de falhas deste, e a redução das atividades de

supervisão, permitindo à gerência centralizar seus esforços em ações que visem a melhoria dos processos [³¹RUNGTUSANATHAM 2001].

Na Figura 2.8 observa-se as etapas do CEP permitindo a identificação das falhas e além disso a avaliação da capacidade de cumprir ou não com os requisitos especificados.

O CEP fornece uma descrição detalhada do comportamento do processo, permitindo identificar sua variabilidade que pode ser atribuída a causas aleatórias ou a causas assinaláveis. As causas aleatórias atuam continuamente sobre o processo, sendo de difícil controle. Atuar sobre estas causas normalmente requer investimentos na melhoria de equipamentos, troca de matérias primas ou treinamento de operadores. Uma vez mantidas em níveis razoáveis, estas não afetam de maneira nociva a qualidade dos itens manufaturados. As causas assinaláveis normalmente podem ser solucionadas com a aplicação de algumas técnicas de engenharia do processo e/ou de engenharia de produção.

A partir do estudo das cartas de controle é possível analisar outro fator importante dentro da qualidade do processo: a capacidade dos processos. Avalia-se se o processo é capaz de atender às especificações de uma determinada característica de qualidade, identificando o comportamento do processo e focalizando ações necessárias para eliminar possíveis variações. Com isto se otimiza a produtividade e qualidade, determinam-se os novos padrões de tolerância e ao mesmo tempo se avalia se um novo equipamento é capaz de atender às especificações de produção exigidas da peça, e compara-se o desempenho de diferentes equipamentos. Cabe anotar que um processo pode ser estável e não ser capaz.

A capacidade do processo é medida com índices, calculados supondo variáveis normalmente distribuídas. Os mais freqüentemente utilizados são o C_p e o C_{pk} . O C_p que avalia a capacidade potencial do processo e pode ser interpretado em termos de proporção de produtos não-conformes (que não atendem às especificações), sendo calculado pela razão entre a amplitude da especificação (campo de tolerâncias) e a dispersão ou variabilidade

natural do processo. O índice C_{pk} avalia a capacidade efetiva do processo, verificando se o processo está centrado ou não e é definido como o mínimo entre a diferença entre os limites de especificação inferior e o superior e a média da característica de qualidade do processo em análise, dividida pela semi-amplitude característica. Sempre que o índice C_{pk} resultar menor que o índice C_p correspondente, tem-se um processo não centrado, no caso contrário tem-se um processo centrado.

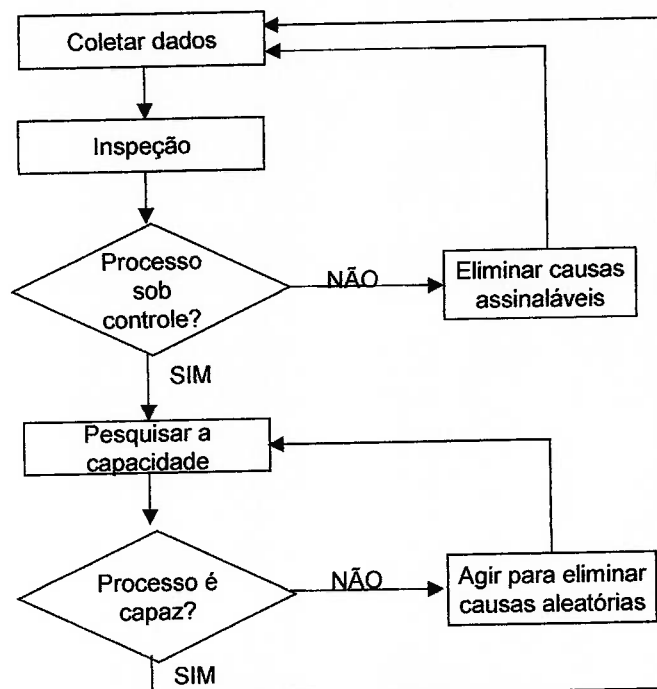


Figura 2.8 Etapas do CEP [³²KANG 2000]

O CEP encontra-se fundamentado na utilização de métodos e técnicas de natureza estatística, que buscam soluções para problemas relacionados à qualidade, entendimento e previsibilidade dos processos e melhorias dos mesmos. O CEP é parte integrante dos programas de qualidade total, adotados como estratégia habilitadora de permanência e expansão nos mercados globalizados.

2.3.2 DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE – QFD

Na década do 70 nasceu no Japão o QFD e uma década depois esta metodologia chega aos Estados Unidos. Seu objetivo é a conversão dos requisitos do consumidor em características de qualidade do produto e a transferência da qualidade de projeto para o produto acabado através de

desdobramentos. Esta atividade sistemática conduz a garantia da qualidade (o ponto essencial da garantia é assegurar a qualidade) e o desenvolvimento do novo produto, permitindo correlações de requisitos e características de qualidade com funções, mecanismos, componentes, processos e matérias primas. Assim, consegue-se realizar em ordem, o desenvolvimento do novo produto em curto espaço de tempo e garantir a qualidade otimizando o processo de produção. Isto é possível porque a metodologia expressa e armazena o que é conhecido acerca das expectativas dos clientes, priorizando-as e sistematizando as relações entre os requisitos do consumidor e as características do produto. A qualidade global do produto é formada através desta rede de relações que se expressam em diagramas e matrizes conectadas por meio dos desdobramentos [³³AKAO 1996].

O desdobramento é baseado na comparação de dois grupos de itens para identificar os elementos que se relacionam e a intensidade desta correlação, bem como hierarquizar os elementos conforme critérios pré-estabelecidos como importância, custo e dificuldade de execução.

Existem hoje três grandes abordagens da metodologia de QFD. As três linhas seguem o mesmo mecanismo de desdobramento, diferindo entre si nas etapas propostas para a execução dos desdobramentos (sendo mais ou menos abrangentes), no número de matrizes utilizado para cada uma destas etapas e no uso de diferentes ferramentas auxiliares.

A primeira abordagem, de Akao [³³AKAO 1996] é bastante abrangente e contempla quatro perspectivas distintas de desdobramento: da qualidade, do custo, da confiabilidade e da tecnologia.

O desdobramento da qualidade e tecnologia tem por objetivos:

- Sistematizar o processo de engenharia simultânea no desenvolvimento do produto, permitindo correlações de requisitos e características da qualidade com funções, mecanismos, componentes, processos e matérias primas.
- Identificar e remover prematuramente gargalos de engenharia.

O desdobramento do custo visa a identificação e remoção prematura de gargalos de custos, sob a ótica de análise de valor. Também permite identificar valores de qualidade para as características técnicas do produto que viabilizem, sem muitas dificuldades, a obtenção dos custos objetivados. O desdobramento da confiabilidade tem por objetivo entender como melhorar a confiabilidade do produto pela definição das suas características. Para a execução das matrizes, pode-se utilizar técnicas como o delineamento de experimentos, Análise de Árvore de Falhas¹ e Análise de Modos e Efeitos de Falhas, entre outros.

Com os quatro desdobramentos se pretende compor um sistema estruturado para gerenciar o desenvolvimento de produtos e serviços com um enfoque voltado para as necessidades do consumidor.

Outra abordagem é a de Bob King, que reorganizou o sistema de Akao agrupando todas as matrizes em uma única matriz chamada de Matriz das Matrizes. Além disto, procurou esquematizar os desdobramentos de maneira mais ordenada. Para cada objetivo como confiabilidade, custos, inovação, métodos de manufatura e outros, segue-se o mesmo procedimento. Para cada uma destas fases também são indicadas as ferramentas mais apropriadas, como indicadas na Figura 2.9 [34RAJALA 1997].

Finalmente, a proposta de Macabe, a abordagem das quatro matrizes, é a mais difundida devido a sua simplicidade. Talvez devido à facilidade de acesso a bibliografias americanas, no Brasil este é o método que tem recebido o maior número de adeptos. As quatro fases desta abordagem se constituem em quatro matrizes que direcionam o desenvolvimento do produto ou serviço, desde os requisitos dos consumidores até a fabricação. Este modelo de QFD, que inclui quatro estágios (Casa da qualidade, planejamento do produto, planejamento dos processos e planejamento da

¹ Do Inglês Failure Tree Analysis – FTA, definição e características no capítulo 3

produção), identifica a intensidade do relacionamento entre os dados das duas tabelas que compõem a matriz, como é indicado na Figura 2.10.

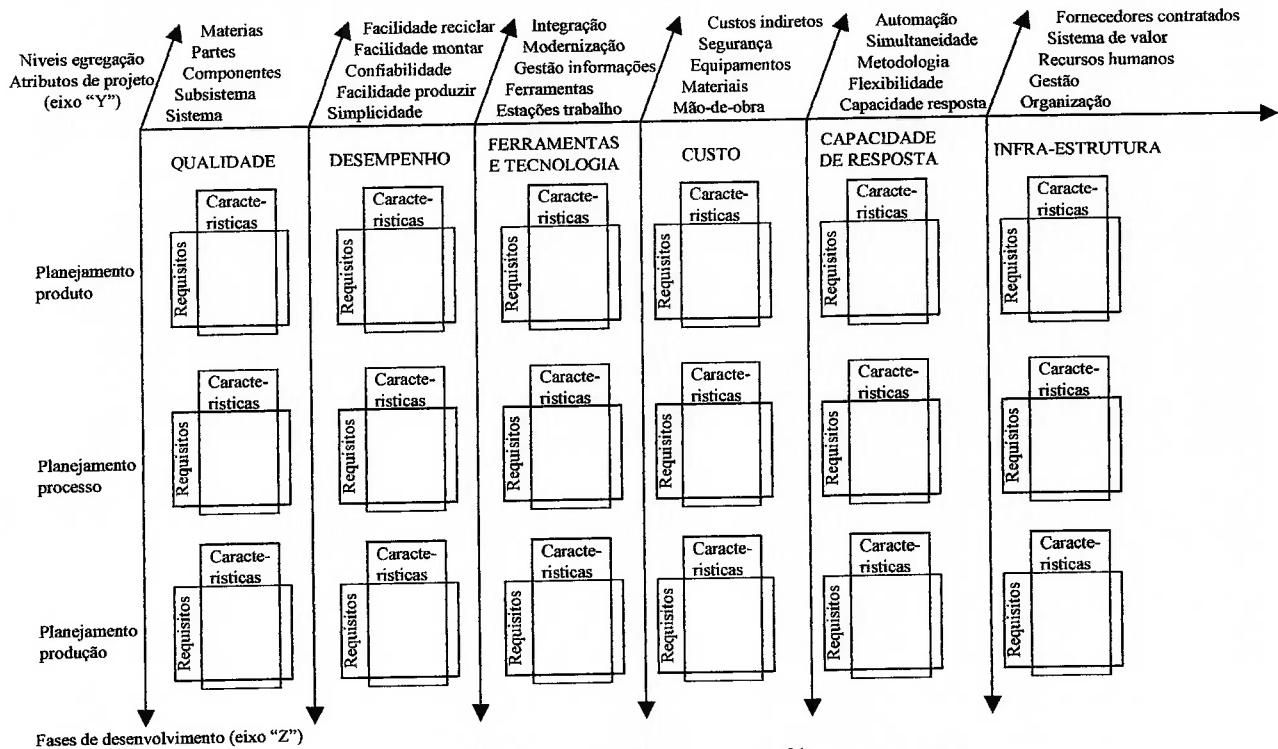


Figura 2.9 Modelo conceitual Bob King [³⁴ RAJALA 1997]

No primeiro estágio se transformam os dados originais coletados em pesquisas de mercado e os analisa para conseguir transferir a importância relativa da informação coletada para a segunda matriz. A segunda matriz ajuda a identificar as partes e subsistemas a serem desdobrados. O estágio três compreende o Planejamento dos Processos de manufatura dos componentes que são desdobrados no estágio anterior. No último estágio se estabelecem os parâmetros do processo que dão ao produto a qualidade e características analisadas no estágio 1 [³⁵TEMPONI 1999].

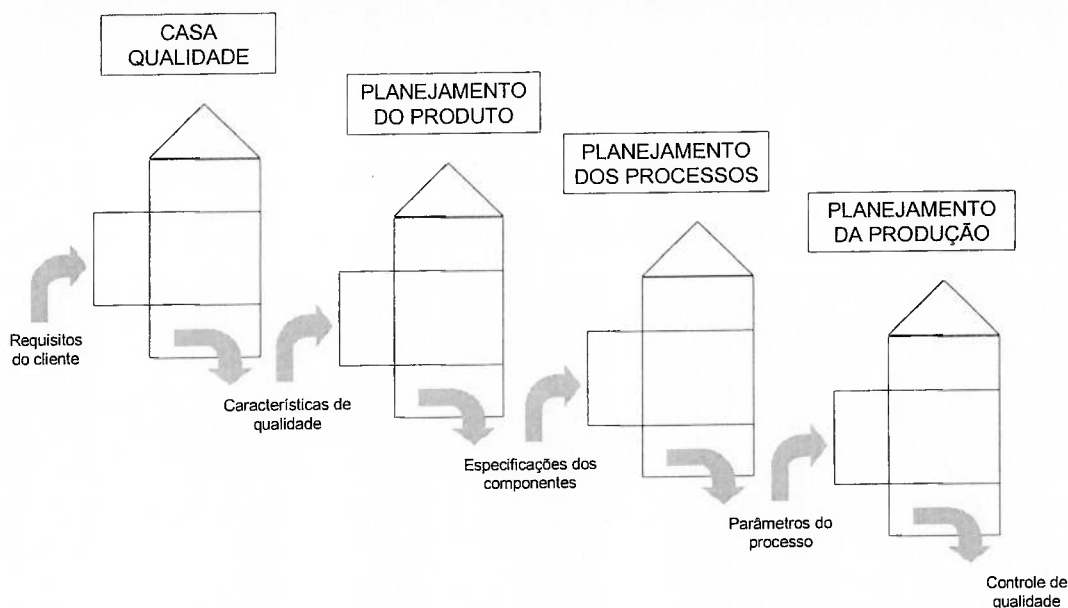


Figura 2.10 Estágios do processo QFD [35TEMPONI 1999].

As diferentes abordagens têm o mesmo objetivo, ou seja, estabelecer relações lógicas entre os requisitos do cliente e a capacidade dos processos e do projeto. Estas relações apóiam o trabalho da confiabilidade já que podem facilitar a determinação dos modos de falha do processo de manufatura e o estabelecimento das relações entre as diferentes etapas do produto para conhecer os efeitos das anomalias do processo na qualidade do produto. Em uma segunda fase o benefício é em sentido inverso dado que a minimização de erros e o estabelecimento da taxa de falha fazem que o produto cumpra melhor o requisito do cliente.

2.3.3 CONTROLE DA QUALIDADE TOTAL -TQC

O TQC é definido como um sistema gerencial que, com o envolvimento de todas as pessoas em todos os setores da empresa, visa satisfazer as necessidades do cliente, através da prática do controle da qualidade. Tendo como premissa básica que o objetivo principal de uma empresa é a sua sobrevivência. O TQC identifica às pessoas afetadas pela existência do produto, e busca a forma de atender suas necessidades, tendo presente que em momentos diferentes a empresa interage com

consumidores, acionistas, empregados e por último com a comunidade na qual está situada.

A aplicação desta técnica cria uma vantagem competitiva sustentável, através do constante aprimoramento do processo de identificação e atendimento das necessidades e expectativas dos clientes quanto aos produtos e serviços requeridos, e da utilização eficiente dos recursos existentes de modo a agregar o máximo de valor ao resultado final. Os objetivos da utilização deste método gerencial são:

- Garantir uma maior satisfação do cliente, fornecendo produtos e serviços que correspondam às suas expectativas, monitorando suas constantes mudanças. É preciso criar um canal de comunicação sempre aberto com o mercado promovendo uma contínua conversação. Este canal tem como função básica saber: o que o cliente pensa em todas as etapas da compra do produto.
- Melhorar a qualidade do atendimento.
- Maior eficiência e produtividade, mantendo cada etapa do processo produtivo sob controle, detectando possíveis falhas e rastreando suas causas.
- Maior integração do pessoal, promovendo a comunicação entre os vários setores e diferentes níveis hierárquicos.
- Redução de custos, minimizando retrabalhos.
- Maior lucratividade e crescimento.

2.3.4 FUNÇÃO PERDA E NÍVEL DA QUALIDADE - QLF

Nos anos 1980 Taguchi desenvolveu uma filosofia que introduz o planejamento experimental para desenvolver produtos ou processos de tal modo que sejam robustos em relação às condições ambientais e às variações dos componentes minimizando variações à volta de um determinado valor requerido. O Método Taguchi usa uma combinação de métodos de engenharia e de estatística para alcançar melhorias rápidas na

qualidade e no custo através da otimização do projeto do produto e do processo de produção. Este método relaciona qualidade e custos como nenhum outro. Esta abordagem foi denominada de controle de qualidade “off-line”.

Segundo Taguchi a qualidade é medida pelo desvio que uma característica funcional apresenta em relação ao valor esperado da mesma. Os fatores chamados “Ruídos” (temperatura, umidade, desgaste, vibrações, etc.) causam tais desvios e resultam em perda de qualidade do produto. Este prejuízo pode ser avaliado através de uma função perda [³⁶TAGUCHI 1989].

A proposta do método Taguchi é a de determinar a função perda do produto e otimizá-la empregando técnicas estatísticas. Estas análises permitem identificar de que maneira o fator “Ruído” influencia no desempenho do produto e assim encontrar os parâmetros ótimos de projeto que minimizam ou mesmo consigam as eliminar. Assim, em lugar da tendência tradicional de isolar o produto dos fatores “Ruído”, o que pode ser de difícil execução e/ou encarecer o processo produtivo, o método de Taguchi ambiciona realizar projetos que eliminem os efeitos dos fatores “Ruído” no produto [³⁷DESSOUKY 2002].

Taguchi considera a existência de três fases no desenvolvimento de um produto ou de um processo: planificação do sistema, planificação dos parâmetros e planificação de tolerâncias. No planejamento do sistema se usam os princípios científicos ou de engenharia para determinar uma configuração básica. No planejamento dos parâmetros são determinados os valores específicos dos parâmetros. No planejamento de tolerâncias estudam-se as tolerâncias permitidas para os vários fatores. Devem ser detectados os componentes que são mais sensíveis e quais os que podem ser usados com uma tolerância grande.

Taguchi inovou ao apresentar uma definição de qualidade que é operacional, definindo qualidade de um produto como: “a perda que um produto causa à sociedade depois de embarcado, desconsiderando-se

qualquer perda provocada por suas funções intrínsecas” [³⁶TAGUCHI 1989]. Aqui a qualidade é definida como perda, além disso, a definição engloba a sociedade como um todo como sendo o elemento atingido pela perda de qualidade. Sua definição de qualidade se assemelha à sua definição de custo. A perda imposta à sociedade devido ao nível de qualidade de um produto é composta basicamente de: perda devido a efeitos colaterais danosos provocadas pelo produto e de perda devido à variação de desempenho do produto. Essa variação de desempenho engloba tanto a variação entre duas unidades diferentes do mesmo produto como a variação de desempenho de um mesmo produto ao longo do tempo. Essa variação deve ser considerada com respeito às características de qualidade do produto.

Na eq. (2.4) pode-se ver que a Função de Perda tem como objetivo determinar quantitativamente a perda de qualidade devido a variações funcionais.

$$L(y) = k (y - m)^2 \quad (2.4)$$

onde, $L(y)$: perda em dinheiro por unidade de produto quando as características de qualidade são iguais a y ,

k : constante de proporcionalidade,

y : valor da variável relacionada com a qualidade do produto,

m : valor nominal (meta) de y ,

$(y - m)$: tolerância.

A função perda pode diminuir em função da variação de variância das variáveis do processo e/ou da tolerância. Segundo a função perda, qualquer afastamento da característica de qualidade em relação ao valor nominal implica em perda, e a perda aumenta de forma quadrática conforme y se afasta de m . A representação da perda de qualidade através de uma função quadrática é uma aproximação da função perda real. Argumentos baseados na expansão da verdadeira função Perda em série de Taylor [³⁸IRANTO 1998], [³⁹WANG 2001] podem ser usados para justificar a aproximação.

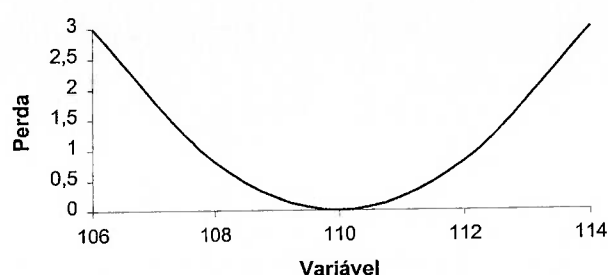


Figura 2.11 Função de perda [³⁸IRANTO 1998]

A função de perda fornece uma direção clara de atuação no sentido de aumentar a qualidade do produto, e conseqüentemente reduzir perdas. A função perda de qualidade apresenta diversos aspectos interessantes como a utilização dos conceitos de qualidade e de custo e engloba em um mesmo modelo aspectos econômicos e de engenharia. Além disso, permite a otimização dos custos globais da produção.

É preciso esclarecer que o método Taguchi foi desenvolvido com uma grande preocupação de facilitar sua aplicação prática, o que lhe rendeu grande fama entre as empresas e profissionais, principalmente japoneses, e, por outro lado muitas críticas de especialistas em estatística. Há um conjunto grande de obras que apresentam as limitações dos procedimentos adotados por Taguchi, visando a diminuição da complexidade do método, principalmente quanto à otimização. E, somado a estes problemas de ordem técnica, existe também outra barreira para sua adoção que é a necessidade de testes que, para produtos complexos ou mais caros, pode tornar-se inviável. Mas quando estes inconvenientes são solucionados a função de perda pode ser útil para determinar os custos em que se incorre por ter um produto defeituoso.

Em suma, as ferramentas de qualidade aqui estudadas são, em sua maioria, complementares, isto é, cada uma delas busca estabelecer o efeito de uma não conformidade sobre a capacidade do produto para executar a função para a qual foi projetada. Considera-se, pelas desvantagens e vantagens apresentadas anteriormente, que as ferramentas que mais contribuem no planejamento da manufatura são principalmente o CEP, e o QFD sob enfoque de Clausing. O CEP permitirá dar alarmes sobre não

conformidades dos componentes e o QFD estabelecerá como a dita não conformidade afetará as expectativas dos clientes e dos processos posteriores ao que apresenta falha.

CAPÍTULO 3 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE

3.1 Considerações iniciais

Durante a Segunda Guerra Mundial, os conceitos da confiabilidade passaram a ser utilizados, dados a necessidade de instrumentos técnicos e analíticos que permitissem a estimativa da vida útil do equipamento. Após este conflito global tem-se grande desenvolvimento das técnicas de confiabilidade visando a sua utilização pela indústria nuclear, já que o alto risco de manipulação cria a necessidade de estudar e trabalhar na diminuição da probabilidade de falha. Outra das indústrias que nesta época começa a utilizar os conceitos da confiabilidade no desenvolvimento de critérios de projeto de seus equipamentos é a aeroespacial, visando a avaliação da probabilidade de falha de sistemas empregados em veículos de exploração do espaço ou mesmo em aeronaves convencionais. Inicia-se a investigação sobre a causa dos acidentes aéreos e se estabeleceu uma relação entre o número de acidentes e o número de horas voadas. Os resultados obtidos tiveram sucesso e outras indústrias interessaram-se pela metodologia; como foi o caso da divisão de locomotivas da General Motors Corporation que conseguiu estender a vida útil dos motores de tração.

A evolução dos conceitos de confiabilidade na década de 60 permite que na década de 70, estes conceitos sejam empregados no projeto de estruturas complexas, como, por exemplo, estruturas aeronáuticas, civis ou navais; considerando novas variáveis que ajudaram a evitar os elevados prejuízos associados a acidentes de grandes proporções em termos de perdas materiais ou vidas humanas. Graças a esta preocupação começam a ser utilizadas técnicas como as Árvores de Falha e a Análise de Modos e Efeitos de Falha, para conseguir encontrar tanto as causas como as conseqüências das falhas, e técnicas, como o diagrama causa efeito, são utilizadas como uma ferramenta que pode dar alguns indicadores sobre relação causa/efeito das falhas em uma fase preliminar da análise de confiabilidade.

Na atualidade, as exigências do mercado têm levado a muitas outras indústrias dar importância à redução da probabilidade de falha, assim garantir a confiabilidade do produto e mais recentemente no processo de fabricação dos mesmos. A inclusão de conceitos de confiabilidade no Planejamento dos Processos (PP) de manufatura é muito pouco difundida e ainda estes dois campos são estudados de forma isolada, mas já começa a ter-se consciência que para obter produtos conformes o planejamento da manufatura deve ter um alto grau de confiabilidade para que os erros no processo afetem o mínimo possível a qualidade final do produto.

3.2 Conceitos básicos de confiabilidade

Confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de que um componente, equipamento, ou sistema execute as operações para as quais foi projetado por um tempo determinado, sem apresentar falhas. Deve-se notar que a confiabilidade precisa definir um desempenho específico que é esperado, assim como as condições e o tempo de utilização. Especificamente para um processo de manufatura a confiabilidade pode ser definida como a habilidade que este tem de manufaturar produtos com características específicas, sob condições determinadas por um período pré-estabelecido. Este período que neste trabalho sempre se denominará tempo, pode ser definido em termos do número de peças produzidas, ou mesmo tempo ou ciclos de trabalho.

A definição de confiabilidade considera não só o fato de que a ocorrência de falha nos sistemas mecânicos, elétrico, hidráulico ou de processamento de máquina operatiz causam interrupção do processo de manufatura caracterizando a falha, mas também considera que existem falhas que podem fazer com que as peças resultantes possuam características que não estejam dentro dos limites admissíveis. Estas características podem ser de não atendimento às especificações de tolerâncias dimensionais, geométricas e de rugosidade superficial.

Para determinar a confiabilidade de um processo ou operação de manufatura existem duas fases principais: o planejamento e a execução

[⁴⁰RAMAKUMAR 1993]. Na primeira é preciso definir a função do equipamento, a importância do mesmo no processo e o que seria considerado como uma falha; também é importante definir como vai ser realizado o experimento para coleta dos tempos até a falha e a definição do espaço físico que envolve o equipamento incluindo a instalação do mesmo. Na fase de execução é importante que as máquinas analisadas estejam nas mesmas condições de solicitação e de uso de aquele que vai ser avaliado. Para realizar esta fase é preciso medir o tempo até falhar, e se calcular a função distribuição acumulada (que representa a proporção de itens que falharam até tempo t_i), a qual expressa a probabilidade de ocorrer falha até um tempo t .

Defina-se agora o tempo até ocorrer a falha, T , como uma variável aleatória e sua correspondente função densidade de probabilidade $f(t)$ para um intervalo de tempo específico está representada na eq. (3.1):

$$f_T(t)\Delta t = P(t \leq T \leq t + \Delta t) \quad (3.1)$$

A eq. (3.2) define a função distribuição acumulada $F(t)$ para $f_T(t)$ a qual representa a probabilidade de que o tempo T em que ocorra uma falha seja menor ou igual ao tempo de estudo, t .

$$F_T(t) = \int_0^t f_T(u) du \quad \Rightarrow \quad F_T(t) = P(T \leq t) \quad (3.2)$$

Segundo a definição de confiabilidade dada anteriormente, esta pode ser expressa pela eq. (3.3).

$$R(t) = P(T > t) \quad \Rightarrow \quad R(t) = 1 - F_T(t) \quad (3.3)$$

Deste ponto de vista matemático, a função distribuição acumulada (eq. (3.2)) é sempre crescente, já que representa a área sob a curva representativa da função de densidade de probabilidade para os tempos de falha T . A confiabilidade é o inverso aditivo da função distribuição acumulada (eq. (3.3)), e será uma função decrescente no tempo. A definição anterior concorda com o ponto de vista físico de operação, pois se espera que quanto maior seja o tempo de operação menor será a probabilidade de que

o sistema possa cumprir suas funções, dado o envelhecimento natural que este vai sofrendo. A curva de confiabilidade é genericamente indicada na Figura 3.1.

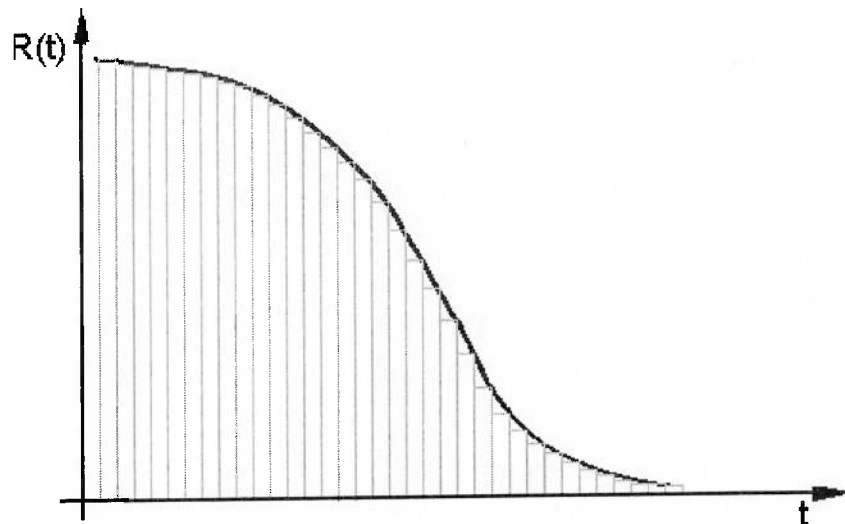


Figura 3.1 Evolução temporal da confiabilidade de um componente ou sistema

Unido ao conceito de confiabilidade está o conceito da taxa de ocorrência de falha instantânea ($\lambda(t)$), que é definida como a seguinte probabilidade condicional: "A probabilidade de que o sistema falhará em um tempo $T < t + \Delta t$ dado que ainda não falhou até o tempo $T = t$ ". A taxa de falha é expressa pela relação da eq (3.4):

$$\lambda(t) \Delta t = P\{T < t + \Delta t | T > t\} \quad (3.4)$$

Da definição da eq. (3.4) se tem que:

$$P\{T < t + \Delta t | T > t\} = \frac{P\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\}}{P(T > t)}$$

$$P\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\} \equiv P(t < T < t + \Delta t)$$

$$P(t < T < t + \Delta t) = f(t) \Delta t$$

$$P(T > t) = R(t)$$

$$\therefore \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.5)$$

Da eq. (3.5) se pode dizer que a taxa de falha depende do intervalo que se esteja observando ou do estado ou tempo de operação do item analisado.

Uns dos modelos propostos que tenta explicar o desenvolvimento temporal da taxa de falha é a curva da banheira indicada na Figura 3.2. É importante esclarecer que nem todos os processos, equipamentos ou componentes, apresentam todas as fases apresentadas nesta curva.



Figura 3.2 Taxa de falha [⁴¹LEWIS 1987]

A primeira parte da curva apresentada na Figura 3.2 corresponde ao começo da vida útil, período no qual existe um processo de adaptação onde ocorrem falhas devido a erros de manufatura ou problemas nos materiais e a taxa de ocorrência de falha é maior, mas decresce com o tempo; este período é conhecido como falha precoce. Depois segue o período da falha aleatória, onde a taxa de ocorrência de falha é constante; a função de distribuição que reflete este comportamento é a distribuição exponencial, dada sua propriedade de carência de memória, ou seja, o tempo que leva operando não influencia na ocorrência de falha, sendo os componentes eletrônicos um exemplo típico deste comportamento. Na última fase, quando a taxa de falha cresce por causa do envelhecimento, é onde fenômenos como o desgaste e a fadiga, entre outros, começam a ser relevantes no

desempenho do processo, produto ou equipamento. Esta fase é apresentada pela maioria dos sistemas mecânicos. Lewis [⁴¹LEWIS 1987] mostra um típico comportamento da taxa de falha dos componentes mecânicos onde se observa como a fase dois é reduzida ao mínimo e a fase três é realmente predominante.

As principais distribuições de probabilidade utilizadas na definição da função densidade de probabilidade dos tempos de falha são: Exponencial (λ), Lognormal ($\mu_{\ln(x)}$; $\sigma_{\ln(x)}$) e Weibull (x_0 ; η ; β). A primeira destas distribuições é característica de sistemas eletrônicos, a segunda se apresenta em estudos de resistência mecânica de materiais e a terceira, que é a mais abrangente destas distribuições, é comumente utilizada para modelar problemas de carregamento.

3.3 Análise de confiabilidade de sistemas

“Sistema é um conjunto de partes operando interligadas de modo a formar um conjunto, sendo que cada uma das partes operando isoladamente pode conduzir a resultados diferentes do todo” [⁴²CARDOSO 2000]. Os processos de manufatura são sistemas já que estes podem ser modelados como uma combinação de várias operações, que por sua vez dependem da interação de operadores, máquinas e ferramentas, para fabricar peças que estejam de acordo com especificações.

A confiabilidade de um sistema pode ser analisada principalmente por três metodologias: Diagrama de Blocos, Análise de Modos e Efeitos das Falhas (do inglês “Failure Modes And Effects Analysis” - FMEA), e a análise da árvore de falhas (do inglês “Fault Tree Analysis” - FTA). Nas seções subseqüentes introduzem-se as principais características destas metodologias, enumerando suas vantagens e desvantagens, as informações necessárias para sua utilização e os resultados obtidos com sua aplicação.

3.3.1 DIAGRAMA DE BLOCOS

A representação por diagrama de blocos procura reproduzir a seqüência de processamento de informações através de um arranjo de componentes (blocos), que são considerados unidades autônomas.

As interligações podem ser representadas em série, em paralelo ou em uma combinação de ambas, tal como indicado na Figura 3.3. O tipo de arranjo influi decisivamente na confiabilidade do sistema e sua escolha depende das características próprias deste e de fatores econômicos, físicos e lógicos.

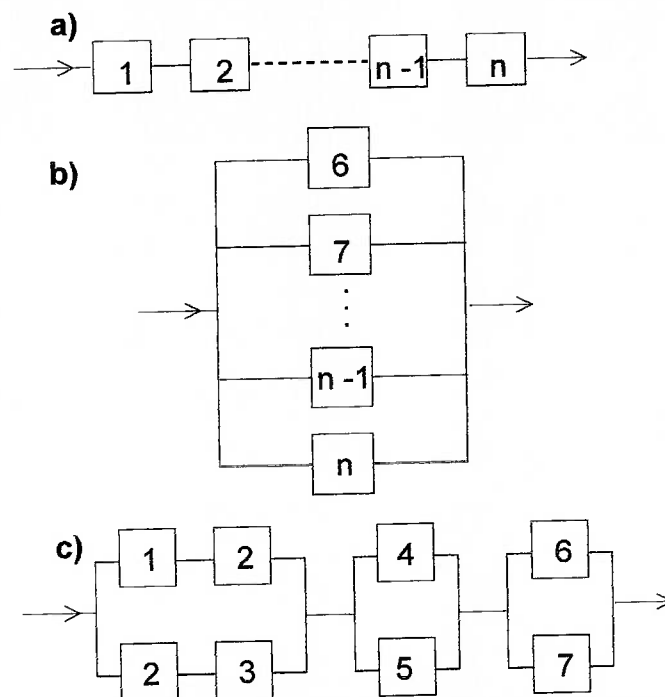


Figura 3.3 Digrama de Blocos. a) Componentes dispostos em série. b) Componentes dispostos em paralelo e c) Arranjo misto em série e paralelo

O arranjo em série apresenta a característica de que uma falha em qualquer componente interrompe toda a operação. Isto faz com que o aumento no número de componentes tenha efeito negativo na confiabilidade do sistema já que ao aumentar o número de componentes a confiabilidade sempre diminui. Considerando que as causas de falha dos componentes são independentes é possível calcular a confiabilidade do sistema ($R_s(t)$) como o produto das confiabilidades de cada componente ($R_i(t)$) como é indicado na eq. (3.6):

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3.6)$$

Quando o arranjo é em paralelo têm-se dois casos: o paralelo ativo e o paralelo passivo. No primeiro caso todos os componentes estão ativos e podem realizar as mesmas funções e suas falhas são independentes, i.e., o sistema só falha quando todos seus componentes falham. No segundo caso um componente só começa a operar quando o outro falha.

Os sistemas em paralelo ativo só falham se todos seus elementos falharem, por esta razão é mais simples definir a confiabilidade definindo primeiro a sua probabilidade de falha $F_s(t)$, indicada na eq. (3.7).

$$F_s(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (3.7)$$

onde $F_i(t)$ é a probabilidade de falha do i -ésimo componente em paralelo.

Substituindo a eq. (3.2) na eq. (3.7), a confiabilidade do sistema, quando esta tem um arranjo de paralelo ativo, está definida na eq. (3.8):

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (3.8)$$

onde $R_i(t) = 1 - F_i(t)$, é a confiabilidade do i -ésimo componente em paralelo.

Da eq. (3.8) pode-se concluir que o sistema tem maior confiabilidade que cada componente. Idealmente deve-se tentar arranjos em paralelo, mas isto nem sempre é possível, por custos ou pelas características próprias do sistema.

A confiabilidade para o sistema redundante passivo ou paralelo passivo é dada como uma probabilidade condicional, isto é, a mesma é calculada como a soma da confiabilidade do componente ativo com a probabilidade condicional do componente passivo operando dada a falha do componente ativo, qual é a probabilidade que o sistema funcione com sucesso. A eq. (3.9) mostra a confiabilidade do sistema $R_s(t)$ o caso particular em que se têm dois componentes (1 e 2) em um sistema redundante passivo.

$$R_s(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(t_1) [R'_2(t_1) R_2(t - t_1)] dt \quad (3.9)$$

onde o termo entre os colchetes expressa a probabilidade de operação do componente 2 considerando a situação passiva e em operação, após da falha do componente 1, e:

$R_s(t)$: Confiabilidade do sistema

$f_1(t)$: Função densidade de probabilidade da unidade 1 no modo ativo

$R'_2(t)$: Confiabilidade da unidade 2 no modo passivo e

$R_1(t)$ e $R_2(t)$: Confiabilidade das unidades 1 e 2 no modo ativo

A presença da integral, na eq (3.9), torna este problema, na grande maioria de vezes, um problema de solução numérica, principalmente quando se tem mais de um componente no modo passivo.

O diagrama de blocos permite ter uma visão geral do sistema, de como é o fluxo de informação no sistema, embora não informe as conseqüências que tem as falhas sobre a operação do sistema, pois qualquer falha já é considerada fatal sob o aspecto da operacionalidade de cada bloco. A grande vantagem deste método de análise é a possibilidade de definir a confiabilidade do sistema.

3.3.2 ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DAS FALHAS – FMEA

A análise do tipo FMEA é um método usado para identificar os pontos vulneráveis que pode ter o sistema, estudando desde o projeto de linhas de produção (chão de fábrica) até o planejamento da manutenção, passando pelo planejamento dos processos de manufatura e outras fases necessários para obter um produto com características específicas. Para aplicar esta metodologia é preciso enumerar os possíveis modos de falha dos componentes que fazem parte do sistema em análise, considerando as características de operação do mesmo, e definir as conseqüências de cada um dos modos de falha sobre a operação desse sistema, além de identificar as ações que podem eliminar ou reduzir a chance de ocorrência de um dado

modo de falha. Uma vantagem da análise tipo FMEA é a geração de uma documentação bastante detalhada sobre o processo.

A produção de produtos manufaturados pode ser analisada com esta metodologia, sob dois pontos de vista:

- Projeto: também conhecida como DFMEA (do inglês "Design Failure Modes and Effects Analysis"), onde se avalia o produto sob o ponto de vista do seu projeto, buscando-se definir os modos de falha dos componentes e seus efeitos sobre o funcionamento do produto, visando a melhora do produto.
- Processo: em alguns casos recebe o nome de PFMEA (do inglês "Process Failure Modes and Effects Analysis"), que tem por objetivo analisar as possíveis falhas do processo de produção de componentes de um produto e suas conseqüências sobre a qualidade final do produto.

O projeto e o processo exercem influência um sobre outro dado que alguns modos de falha de projeto podem ser causados pelas restrições existentes no processo ou modos de falha do processo podem ser originados por exigências do projeto.

Para o planejamento dos processos de manufatura é preciso determinar todas as possíveis falhas do processo que possam causar uma não conformidade no produto.

A análise do tipo FMEA apresenta como vantagem identificar os modos de falha de um componente e suas conseqüências, associados com a interação dos componentes com outros componentes e/ou subsistemas. Para o processo identifica e busca prevenir as falhas que dependem da manufatura de peças, ou do processo de montagem; identifica processos críticos permitindo verificar componentes e sub-sistemas que devem receber atenção especial na montagem ou fabricação. A análise do tipo FMEA é baseada nas cinco questões apresentadas na Tabela 3.1, que pretendem dar diretrizes gerais para sua elaboração.

Tabela 3.1 Questões básicas para a elaboração da análise FMEA

1	Quais são os modos de falha dos componentes e/ou operações?
2	Quais são os efeitos destas falhas sobre o sistema?
3	Quão críticos são estes efeitos?
4	Como detectar a falha?
5	Quais as medidas contra estas falhas, que evitam ou minimizam os seus efeitos?

Sob o ponto de vista de uma análise do processo, para responder à primeira pergunta é necessário determinar se o processo a ser planejado é um processo novo. Neste caso é importante encontrar outros processos realizados anteriormente que tenham características similares, para ter uma idéia inicial de quais são os componentes e etapas que apresentam mais falhas. Com uma equipe bem documentada e a utilização de ferramentas como o diagrama de causa-efeito e do diagrama de Pareto deve-se estabelecer quais são as etapas críticas. No caso em que o processo seja conhecido pode-se utilizar, as cartas de controle do processo, os índices de capacidade, os relatórios de produção e a experiência dos operadores, para estabelecer os fatores que implicam na perda de controle do mesmo.

Na segunda questão se estabelece como falhas nas operações e falhas dos equipamentos afetam o processo e a qualidade do produto, não pode se esquecer que o objetivo é evitar que as falhas dentro do processo afetem características e especificações fundamentais no produto causando a perda de funcionalidade.

Para responder à pergunta 3 existem vários métodos para medir a criticidade da falha para o sistema. A norma MIL-STD-1629A define quatro categorias de severidade: i. Catastrófica, ii. Crítica, iii, Marginal e iv. Menor. As normas ISO definem 10 graus de severidade baseados no efeito das mesmas, como é apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Tabela de severidade [43] FMEA/FMECA 2003I

Severidade	Efeito	Observações
1	Sem Efeito	Nenhum efeito no produto ou em processos subseqüentes.
2	Efeito Muito Ligeiro	O cliente mais provavelmente não observará a falha. Efeito muito ligeiro no desempenho de produto/processo. Falha não vital observada às vezes.
3	Efeito Ligeiro	Cliente ligeiramente irritado. Efeito ligeiro no produto ou no desempenho do processo. Falha não vital observada na maioria das vezes.
4	Efeito Menor	O cliente experimenta o menor incômodo. Efeito menor no desempenho do produto/processo. A falha não requer o reparo. A falha não vital observou-se sempre.
5	Efeito Moderado	O cliente experimenta algum descontentamento. Efeito moderado no desempenho do produto/processo. A falha na parte não vital requer o reparo.
6	Efeito Significante	O cliente experimenta o desconforto. O desempenho do produto/processo degradou, mas operável e seguro. Peça não vital inoperável.
7	Efeito Maior	Cliente descontente. Efeito principal no processo; retrabalho/reparos na parte necessária. Desempenho do produto/processo afetado severamente, mas funcional e seguro. Subsistema inoperável.
8	Efeito Extremo	O cliente muito descontente. Efeito extremo no processo; o equipamento danificou. Produto inoperável, mas seguro. Sistema inoperável.
9	Efeito Sério	Efeito potencial perigoso. Capaz de parar o produto sem acidente; segurança relacionada; falha dependente do tempo. Rompimento às operações do processo subseqüente. O cumprimento com regulamento do governo está sob risco.
10	Efeito Perigoso	Efeito perigoso. Segurança relacionada, falha repentina. Sem cumprimento com regulamento do governo.

Segundo o projeto e o processo podem ser utilizados um destes dois métodos ou desenvolver um método próprio de classificação de severidade, como é o caso de algumas empresas do setor automobilístico.

A quarta questão avalia os diferentes métodos e mecanismos que existem para detectar a falha, assim, por exemplo, o emprego da amostragem estatística e outras técnicas de qualidade mencionadas no capítulo 2 podem ser utilizadas para subsidiar as respostas a esta questão, técnicas de manutenção poder ser utilizadas para registrar os parâmetros operacionais de máquinas operatrizes, sendo que variação nos mesmos pode ser indicativa do processo de desenvolvimento de uma falha.

A última pergunta tem como objetivo sistematizar o método e realimentar-o para que a metodologia constitua um processo de melhora contínua onde possa se determinar a origem da falha, e encontrar soluções

que evitem a sua ocorrência ou minimizar os efeitos associados a esta ocorrência. As ferramentas de qualidade e a manutenção preditiva são técnicas fundamentais para serem empregadas como resposta a esta questão.

A análise do tipo FMEA é um método analítico padronizado para detectar e eliminar problemas potenciais de forma sistemática e completa, onde a informação é coletada em um formulário. Alguns dos benefícios que a aplicação da análise FMEA oferece, além dos já mencionados, são as diminuições dos custos de falha e dos custos de retrabalho. Uma vez que os custos iniciais da sua execução e da implantação de medidas preditivas sejam superados o retorno começa ser significativo. A análise do tipo FMEA constitui uma ferramenta fundamental na análise de confiabilidade dado que estabelecendo os modos de falha e seus efeitos, pode-se começar a contagem para determinar a função de densidade de probabilidade das falhas, [44KHODABANDEHLO 1996].

3.3.3 ÁRVORE DE FALHAS - FTA

A análise do tipo FTA é um outro método para avaliar a confiabilidade dos sistemas. Este método é sistemático e padronizado, capaz de fornecer bases objetivas para funções diversas tais como a análise de modos comuns de falhas em sistemas, justificar alterações em sistemas e demonstrar o atendimento a requisitos regulamentares e/ou contratuais, dentre outras.

Sua utilidade consiste em determinar as causas de uma falha a partir de seus sintomas, relacionando-os com os componentes, subsistemas ou eventos que poderiam tê-los causado.

Na elaboração da árvore de falhas, há uma lógica a ser observada, pois um sintoma necessariamente tem um número finito e conhecido de causas as quais, para máquinas, podem ser pesquisadas e determinadas com precisão, desde que se conheça, ao menos, seu diagrama de blocos. A montagem da árvore de falha apresenta a seguintes etapas:

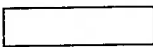

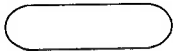

1. Análise qualitativa
2. Elaboração do diagrama

3. Análise quantitativa

A finalidade da análise qualitativa é determinar a origem do problema ou evento topo; para isto precisa-se montar uma equipe multidisciplinar que deve estar composta por projetistas e calculistas, engenheiros de manutenção, engenheiros e técnicos de produção, engenheiros de materiais, técnicos em confiabilidade, entre outros, os quais detêm o conhecimento do processo, para a identificação do problema e sua origem. Depois de identificado o evento topo, se procura uma meta de desempenho do produto/processo e, portanto uma insatisfação do cliente.

O objetivo da elaboração do diagrama é mostrar mediante um modelo gráfico de uma maneira simples os encadeamentos dos diferentes eventos que podem dar por resultado o evento principal ou evento topo, para isto se utilizam símbolos de eventos; e símbolos de portas lógicas indicadas respectivamente na Tabela 3.4 e na Tabela 3.3.







Tabela 3.3 Símbolos dos Eventos da FTA, adaptado de [45GRANT 1996]

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
	Eventos que são saídas de portas lógicas
	Eventos associados a falhas básicas
	Eventos não realizados (omitidos)
	Parâmetro associado a um evento que deve ser montado
	Evento condicional, usado em janelas de inibição.
	Indica a conexão com outro símbolo ou evento

Os símbolos de eventos buscam padronizar a estrutura da árvore, e fazer desta uma ferramenta com um grande componente visual. Conhecendo o significado dos símbolos é possível entender os problemas apresentados por determinados componentes e qual é a criticidade considerada, e indica algumas ações preventivas que podem ser empregadas sobre os itens mais críticos sob o aspecto de gerar o evento topo.

As portas lógicas pretendem indicar a relação existente entre os diferentes eventos, que são identificadas como entradas e saídas das portas lógicas.

Tabela 3.4 Representação dos conectores lógicos em uma árvore de falha, adaptado de [45GRANT 1996]

SÍMBOLO	NOME	RELAÇÃO CASUAL
	E	Evento de saída só ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem
	OU	Evento de saída ocorre se pelo menos um dos eventos de entrada ocorrerem
	INIBIÇÃO CONDICIONAL	Evento de entrada só conduz ao evento de saída se o condicional ocorrer
	E DE PRIORIDADE	Evento de saída ocorre se os eventos de entrada ocorrerem na ordem de esquerda para
	OU EXCLUSIVA	Evento de saída ocorre se só um evento de entrada ocorrer
	M EM N	Evento de saída ocorre se M em N dos eventos de entrada ocorrerem

A análise qualitativa procura atribuir aos eventos de nível mais básico probabilidades de falha a partir de: dados técnicos da literatura, análise dos históricos de falha, manuais do fabricante, empresas

similares. A partir da aplicação de teoremas de probabilidade, considerando as indicações das portas lógicas, pode-se calcular a probabilidade de ocorrência do evento falha principal (evento topo). Na Figura 3.4 se apresenta como exemplo ilustrativo a árvore de falha onde o evento topo é o movimento indesejado do braço do robô e tem quatro sub –eventos relacionados com a falha em cada um dos sistemas que estão envolvidos no movimento.

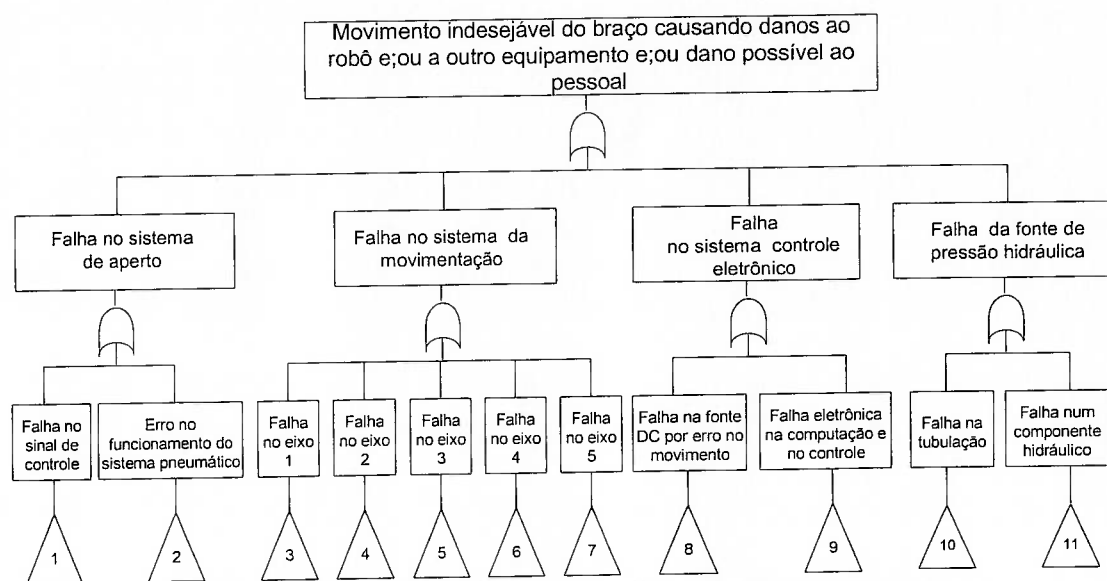


Figura 3.4 Árvore de falha para um robô hidráulico de cinco eixo
⁴⁴[KHODABANDEHLOO 1996]

A complexidade da árvore de falhas cresce com a complexidade do equipamento ou processo bem como com o nível de detalhamento desejado. Muitas vezes ao analisar um sistema será útil utilizar programas computacionais no desenvolvimento da FTA. É importante considerar que árvores de falha que abordam um mesmo evento topo podem ser diferentes entre si, então pode ser útil combinar várias árvores, consolidando o conhecimento sistematizado por diferentes pessoas ou equipes.

Tanto a análise tipo FMEA como a análise tipo FTA são métodos que servem para previsão de falhas em processos e produtos. Existe uma relação entre estes dois métodos já que a análise FMEA estabelece de maneira lógica o encadeamento das falhas de um sistema e este facilita a elaboração da análise tipo FTA. Cada um dos eventos básicos da análise

tipo FTA pode ser representado como um item da análise FMEA, então as falhas podem ser hierarquizadas por meio dos índices de risco. Por outro lado a análise FMEA pode servir como uma consolidação das listas de verificação dos modos de falha, suas causas e efeitos, e servirá como uma análise preliminar para a elaboração da FTA.

CAPÍTULO 4 CONFIABILIDADE EM PROCESSOS DE MANUFATURA DE SISTEMAS MECÂNICOS

4.1 Considerações iniciais

O Plano de Processo é estabelecido para uma peça usualmente sem considerar que o sistema (máquina, ferramenta, operador) é desgastado no decorrer do processamento. O fato do planejamento dos processos não considerar o dinamismo do processo de fabricação pode levar à produção de peças não conformes, já que a confiabilidade do sistema diminui com o tempo causando a variação no acabamento superficial e nas tolerâncias dimensionais e geométricas das peças produzidas. Neste capítulo se propõe uma metodologia onde a confiabilidade é considerada um fator restritivo na seleção dos processos de fabricação, bem como na definição dos tempos de troca das ferramentas empregadas nas diversas operações listadas no plano do processo. Como é mostrada nos itens a seguir, a concepção do seqüenciamento das operações como uma estrutura em série, permite a análise da confiabilidade mediante emprego do método do diagramas de blocos e permite mostrar de que modo o atendimento da confiabilidade esperada depende da seqüência de operações e especificamente do tempo de troca estabelecido para cada ferramenta envolvida nas diversas operações que compõem o plano de processo.

O seqüenciamento de operações é projetado para que o processo de fabricação de uma peça atenda as restrições tecnológicas representadas pelas máquinas dos processos, geométricas definidas pela peça, e econômicas, obtendo assim uma confiabilidade que é conseqüência da confiabilidade das diversas operações contidas no plano de processo. Considerando-se o planejamento dos processos como uma atividade dinâmica tem-se que a confiabilidade do mesmo será válida até ocorra a troca da primeira ferramenta. Neste momento a confiabilidade do processo muda e será preciso uma nova avaliação da sua confiabilidade, a fim de determinar os tempos de troca das demais ferramentas.

Para cumprir o objetivo deste capítulo se abordam primeiro as características principais do Planejamento dos Processos (PP) de manufatura, explorando as funções do planejamento e enumerando os procedimentos necessários para realizar com sucesso esta atividade. Após esta revisão são determinados os elementos que influenciam na confiabilidade do processo, para finalmente apresentar uma proposta de PP, baseada em confiabilidade. Nesta proposta são inter-relacionados conceitos PP com os conceitos de confiabilidade, visando estabelecer políticas ou procedimentos que permitam obter processos com probabilidades de falha mínimas, esta última caracterizada como a possibilidade de fabricação de peças que não atendam aos requisitos de projeto da mesma, expressos em termos dimensionais, geométricos e de acabamento superficial.

4.2 Planejamento dos processos de manufatura

Na literatura sobre o tema aparecem diversas definições para o PP que têm diferentes enfoques; no entanto, existem similaridades em pontos importantes relativos à definição deste termo.

Algumas das definições encontradas na literatura a respeito deste conceito são apresentadas a seguir.

Halevi [⁴⁶HALEVI 1995] expressa que o planejamento dos processos pode ser definido como a atividade que determina de que forma um produto deve ser fabricado e corresponde ao passo primeiro no plano de manufatura.

Zhang [⁴⁷ZHANG 1995] define o planejamento dos processos como a função que estabelece os requisitos tecnológicos necessários, e seleciona as operações e as condições de execução das mesmas, para transformar um material bruto em um produto acabado.

De acordo com Chang *et al. apud.* [⁴⁸KUMAR 2003] e outros autores como Maropoulos [⁷MAROPOULOS 1995], o planejamento dos processos é a seleção e o seqüenciamento de operações de manufatura de forma detalhada, visando converter uma matéria prima em um componente acabado, de acordo com especificações funcionais.

Apesar das aparentes diferenças entre as definições, é possível observar que há conceitos em comum:

- Processo de transformação de um material bruto em um produto acabado.
- Escolha de alguns recursos dentre os disponíveis, como máquinas-ferramentas, ferramentas de corte, dispositivos de fixação.
- Definição de seqüência de operações, definição de condições de corte e definição de operações auxiliares.
- O tempo de validade do planejamento dos processos não é mencionado, se entende então que estas definições concebem este como estático no tempo.

A partir do anteriormente explicado e de acordo aos objetivos deste trabalho se definirá o planejamento dos processos como a atividade que, avaliando restrições tecnológicas, econômicas e geométricas, seleciona as máquinas, ferramentas, tempo de troca para cada ferramenta, condições de corte e seqüência de operações de fabricação para um tempo pré-estabelecido onde a fabricação de produto terá uma confiabilidade pré-determinada a qual permite cumprir os requisitos do cliente tanto em qualidade como em custo e funcionalidade.

Da anterior definição pode-se observar algumas inclusões importantes que não são consideradas pelos autores que têm trabalhado neste tema:

- Tempo pré-estabelecido para o seqüenciamento das operações. As condições das máquinas e ferramentas mudam com o decorrer do tempo; uma mesma produção de peças pode ter diferentes seqüências das operações, em diferentes tempos, buscando minimizar as falhas.
- A confiabilidade pode fazer parte decisiva na seleção das operações, das máquinas, das ferramentas e do tempo de troca para as ferramentas. A confiabilidade começa ser considerada

como parte do processo de manufatura e não só uma condição externa do produto.

- Para evitar o dano na peça processada por falhas ocorridas dentro do processo é preciso considerar o PP como uma atividade que não é estática no tempo, muito pelo contrário, deve-se procurar mecanismos que permitam considerar o desgaste dos componentes, das máquinas, das ferramentas e do próprio operador. A inclusão da confiabilidade dentro deste conceito pode ser uma alternativa para modelar a consequência da ocorrência destes fatores sobre o processo de manufatura.

O resultado final do planejamento é um plano do processo onde são expostas, de forma resumida, todas as funções que devem ser executadas no processo de manufatura seja de um componente ou de um conjunto mecânico. Neste plano se incluem as operações, máquinas e ferramentas selecionadas, assim como as seqüências de operações, tempos de fabricação, materiais e todas as informações que possam servir na fabricação de uma peça. Este plano de processo só é válido enquanto a confiabilidade especificada do processo esteja sendo obtida.

4.2.1 FUNÇÕES DO PLANEJAMENTO DOS PROCESSOS

As funções específicas do planejamento dos processos vão de acordo com as restrições, especificações e padrões de cada aplicação, podendo haver diferenças importantes devido à características específicas que cada processo de fabricação pode exigir.

Entretanto, a função geral do PP concerne à definição de parâmetros para as atividades da manufatura. Esta definição de parâmetros é feita a partir do projeto do produto e de restrições de requisitos de materiais. Também fazem parte das funções do PP a definição de parâmetros de cada operação empregada na fabricação de um componente e especificações de ferramental a ser empregado, assim como a definição de dispositivos e procedimentos para o controle da qualidade e para a análise de capacidade das máquinas. Em casos mais abrangentes as funções do planejamento

incluem a análise e o cálculo de capacidade do chão de fábrica, bem como a configuração de postos de trabalho, a estimativa de tempos e o estabelecimento de métodos padronizados.

Rozenfeld [⁴⁹ROZENFELD 1989] divide as funções do planejamento em dois grupos principais: Planejamento Macro e Planejamento Detalhado das Operações, tal como indicando na Figura 4.1. No primeiro se estudam os aspectos mais gerais do processo de fabricação, iniciando pelos dados organizacionais e chegando até a seqüência de operações, especificando as máquina e ferramentas necessárias. No segundo grupo detalha-se cada operação, selecionando-se em detalhe as ferramentas e dispositivos, bem como as condições de operação e os tempos de processo.

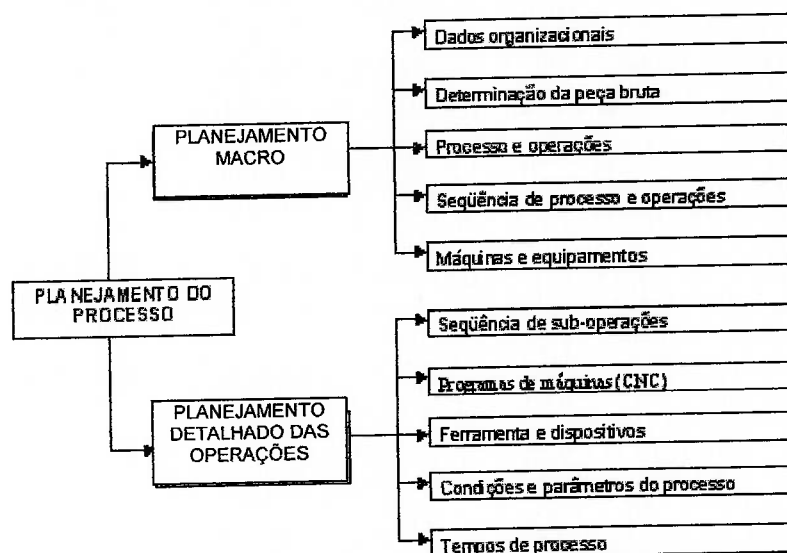


Figura 4.1 Funções do planejamento dos processos [⁴⁹ROZENFELD 1989]

Groover [⁹GROOVER 1996], define quatro funções básicas no planejamento dos processos: 1) Determinar os processos, métodos que podem ser usados e determinar a seqüência das operações; 2) Determinar as condições apropriadas para as operações; 3) Selecionar os equipamentos (máquinas, ferramentas), os sistemas de fixação e estimar os tempos padrões por operação, e; 4) Estimar os custos de produção os quais influenciam a seleção de operações, máquinas e ferramentas .

Esta segunda definição para as funções do planejamento é mais abrangente, embora não sejam consideradas a confiabilidade do processo, nem a taxa de falha das máquinas, e algumas outras variáveis que podem ser relevantes quando se deseja estabelecer a seqüência de operações e parâmetros de operação que permitam obter um produto conforme as especificações e com baixo custo.

Neste trabalho se considera que a função do PP é a integração das áreas de projeto de produto, processos, produção e custos para estabelecer a seqüência de operações, máquinas e ferramentas que permitam obter um produto conforme. A função do PP vai se cumprir por um tempo pré-estabelecido, que está relacionado com o tempo no qual a confiabilidade do processo permite obter peças dentro das especificações.

4.2.2 FASES NO PLANEJAMENTO DOS PROCESSOS

Existe um grande número de fatores que afetam o PP entre estes fatores pode-se mencionar: a forma e as dimensões do material base, a disponibilidade de máquinas operatrizes e suas ferramentas de corte, as fixações e montagens e as restrições impostas pela qualidade exigida; todas estas e algumas outras devem estar consideradas nas fases do planejamento dos processos para que este possa cumprir com as funções mencionadas no item 4.2.1.

Na literatura se encontram diferentes abordagens sobre o tema fases do planejamento. A seguir são mencionadas aquelas que foram consideradas relevantes e significativas segundo os objetivos deste trabalho.

De acordo com Norrie [⁴NORRIE 1995] e Halevi [⁴⁶HALEVI 1995], o planejamento dos processos é executado conforme as seguintes fases:

1. Interpretação de dados de entrada e das especificações: analisar o projeto de fabricação e a quantidade de peças a ser produzidas, assim como os requisitos deste em relação ao material, tolerâncias dimensionais e geométricas, rugosidades e características geométricas.

2. Seleção de processos primários: determinar que processos podem gerar os requisitos gerados a partir da análise executada no item 1.
3. Determinação de tolerâncias de fabricação: em função dos dois itens anteriores se definem as tolerâncias admissíveis para a peça ao longo das diversas etapas do processo de fabricação, tendo em vista a execução dos processos primários.
4. Seleção de superfícies de referência e de dispositivos de fixação.
5. Seleção e agrupamento das operações: análise das relações de precedência para o estabelecimento dos grupos de operações necessárias nos processos já selecionados.
6. Determinação das máquinas e da seqüência de operações: definir, em função da análise das anterioridades e restrições tecnológicas o fluxo de operações especificando a máquina selecionada e a ferramenta utilizada para execução de cada operação.
7. Agrupamento de operações por máquina: reunir as operações a serem realizadas na mesma máquina visando a diminuição do tempo de processo.
8. Seleção de métodos e equipamentos de inspeção, que possibilitam a verificação dimensional, geométrica e do acabamento superficial das peças produzidas permitindo a avaliação do atendimento aos requisitos de projeto da peça.
9. Preparação das folhas de processo. Rezende [⁵⁰REZENDE 1996] apresenta um outro enfoque. O autor considera duas fases distintas para o planejamento. A primeira destas é chamada "Roteamento do processo" e corresponde a um planejamento geral, onde a peça é analisada, e identificam-se as operações necessárias para a fabricação, incluindo os tratamentos térmicos e superficiais necessários para que a peça cumpra com especificações pré-estabelecidas. A segunda fase é denominada "Planejamento detalhado das operações". Neste é feito um planejamento

em termos de máquinas, ferramentas, superfícies de referência para a fabricação, dispositivos de fixação, condições de corte, entre outras. Na Tabela 4.1 é apresentado um resumo deste enfoque, especificando as características a serem analisadas em cada sub-fase.

Tabela 4.1 Fases do planejamento dos processos [⁵⁰REZENDE 1996], folha 01/02

Fase	Sub-fase	Características analisadas	
Roteamento do processo	Análise do desenho da peça	Estrutura da peça	
		Análise das superfícies	
		Estudo do material e tratamentos térmicos	
		Estudo das dimensões das superfícies	
	Seleção preliminar dos métodos de usinagem	Forma da superfície	
		Dimensões da superfície	
		Precisão e acabamento requeridos	
		Peso e forma da peça	
		Material e tratamento térmico	
		Volume de produção	
	Divisão da rota de processo em etapas	Tipo de acabamento requerido	Desbaste
			Semi-Acabamento
			Acabamento
	Agrupamento e separação de operações gerais	Capacidade das máquinas e das ferramentas	
		Disponibilidade das máquinas	
		Tempo de processamento e de preparação entre operação	
		Tamanho e peso da peça	
		Volume de produção	
	Seleção de tratamentos térmicos	Tipo de tratamento térmico	Normalizado
			Revenido
			Têmpera
			Recozimento
			outros
Características do projeto			
Acabamento requerido			
Definição de operações auxiliares	Inspeção		
	Limpeza		

Tabela 4.1 Fases do planejamento dos processos [⁵⁰REZENDE 1996], folha 02/02

Tabela 4.1 Fases do planejamento dos processos [⁵⁰REZENDE 1996], folha 02/02

Planejamento detalhado	Seleção de Máquinas operatrizes	Precisão da máquina vs. Precisão requerida pela operação	
		Área de trabalho da máquina	
		Potência da máquina	
		Produtividade máquina vs. Volume produção desejado	
		Disponibilidade das máquinas	
	Seleção de Ferramentas	Ferramenta	Geometria
			Material
		Processo de usinagem	
		Máquina selecionada	
	Seleção de dispositivos de fixação	Precisão especificada no projeto para a superfície	
Tempos de preparação			
Custos de operação			
Planejamento detalhado	Seleção de superfície de referência	Tipo de referência	Projeto
			Fabricação
			Medição
			Montagem
		Dimensões e tolerâncias de projeto	
		Dimensões e tolerâncias de fabricação	
	Determinação de dimensões e tolerâncias de usinagem	Acabamento superficial da operação anterior	
		Determinação de sobre metal ideal para ser retirado em cada passe	
	Seleção de condições de corte	Profundidade de corte	Potencia da máquina operatriz
			Aresta de corte
			Rigidez da peça
			Fixação
		Avanço	Acabamento superficial
Velocidade de corte	Volume de produção		
	Custos		
Estabelecimento de tempos padrão	Tempos de operação		
	Tempos de preparação		
Documentação do plano do processo	Roteamento dos processos		
	Planejamento detalhado das operações		

4.3 Análise da confiabilidade das operações de fabricação nos processos de manufatura

Um processo de manufatura de componentes mecânicos é composto por uma seqüência de operações que são organizadas para garantir que uma peça ou conjunto seja fabricado em condições ótimas de qualidade e custos, atendendo aos requisitos de projeto.

Em uma operação de fabricação pode-se identificar três elementos básicos: o operador, a máquina e a ferramenta. A interação destes três elementos vai determinar o desempenho da operação e, como se descreverá na seqüência deste texto, do processo como um todo.

Como já foi mencionado no capítulo 3, na primeira etapa de análise da confiabilidade deve-se definir a função, a importância na cadeia produtiva e o que seria considerado como uma falha de cada um dos elementos mencionados anteriormente, para uma operação de fabricação específica. Com a definição da falha pode-se encontrar o elemento ou elementos críticos sob o aspecto de redução da confiabilidade, os quais devem ser objeto de análise, a fim de evitar a excessiva redução de confiabilidade da operação. Para obter respostas a estas questões é preciso que técnicas de análise de qualidade, como o diagrama de causa efeito do processo, diagrama do pareto, o Controle Estatístico do Processo (CEP), subsidiem a análise do tipo FMEA.

4.3.1 ELEMENTOS QUE INFLUENCIAM A CONFIABILIDADE DE UMA OPERAÇÃO DE FABRICAÇÃO

A análise de confiabilidade de um processo de fabricação envolve a avaliação da probabilidade de falha do próprio operador, da máquina e da ferramenta. A confiabilidade dos mesmos pode ser modelada por distribuições de probabilidade específicas.

As falhas aleatórias representam erros que ocorrem sem apresentar uma tendência de desvio específico. Estas falhas são causadas pelo uso de ferramentas inadequadas ou pela utilização de interfaces homem-máquina muito complexas. O treinamento pode reduzir a ocorrência destes erros [⁴⁵GRANT 1996].

Os erros sistemáticos são causados pela utilização de instrumentos ou máquinas com erros de calibração, ou pela utilização inadequada de instrumentos de medição pelo operador. Estes erros são identificados na análise correta e contínua do CEP e podem ser corrigidos através de constante calibração de equipamentos e pelo treinamento de operadores.

Já os erros esporádicos são causados por falta ou excessivo zelo quando da execução de uma operação específica.

As falhas humanas aleatórias e esporádicas tendem a introduzir uma possibilidade constante de produção de peças defeituosas, sendo que esta pode tornar-se crescente em função da fadiga física ou emocional do operador. Usualmente estas falhas podem ser controladas, com a aplicação de estudos de métodos, tempos e movimentos. Estes estudos consideram a utilização de paradas para descanso ao longo de um turno de trabalho além da divisão das operações em um intervalo temporal e a estimativa da produtividade considerando as condições próprias do trabalho.

4.3.1.2 *Equipamento*

A confiabilidade de um equipamento de manufatura, mais especificamente uma máquina operatriz, é dependente dos mecanismos de falha de seus diversos sub-sistemas, que podem ser classificados basicamente em mecânicos, elétricos, eletrônicos e hidráulicos, como indicado na Figura 4.2. Normalmente a confiabilidade destes sistemas difere significativamente, havendo sub-sistemas com características de falhas aleatórias enquanto outros sub-sistemas apresentam processos de falha que envolvem acumulação do dano. Alguns dos sub-sistemas que apresentam falha do tipo aleatória são os sensores e alguns atuadores, motores de passo e servo-motores; um exemplo de sub-sistemas com

significativamente, havendo sub-sistemas com características de falhas aleatórias enquanto outros sub-sistemas apresentam processos de falha que envolvem acumulação do dano. Alguns dos sub-sistemas que apresentam falha do tipo aleatória são os sensores e alguns atuadores, motores de passo e servo-motores; um exemplo de sub-sistemas com acumulação de dano é o desgaste e a fadiga de mancais, engrenagens, parafusos de potência e de eixos.

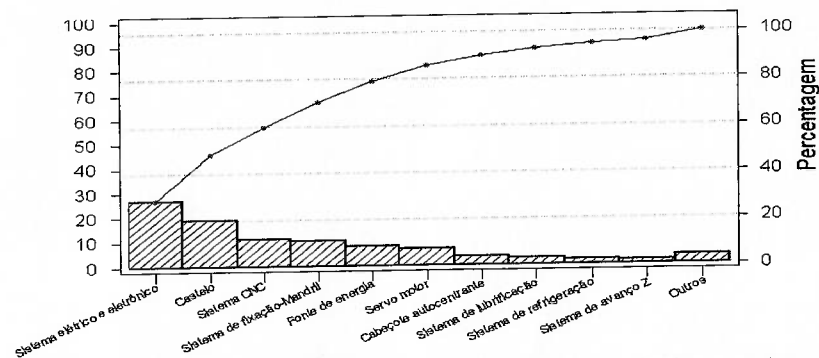


Figura 4.2 Diagrama de Pareto de falhas apresentadas em equipamentos de manufatura [51WANG 1999]

Na literatura, encontram-se diversos estudos que analisam a confiabilidade de equipamentos utilizados para a manufatura de componentes mecânicos. Wang [51WANG 1999] apresenta um estudo de confiabilidade, onde são analisados os modos de falha apresentados por 80 máquinas CNC durante dois anos. Este estudo estabelece que a distribuição de probabilidade que caracteriza a confiabilidade para este tipo de máquinas é a distribuição Lognormal falhando em média a cada 452,25 horas. Na Figura 4.3 se apresenta a taxa de falha para esta distribuição.

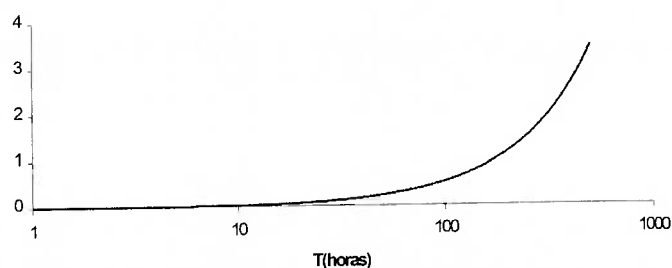


Figura 4.3 Taxa de falha para equipamentos eletromecânicos – Distribuição Lognormal ($x_0 = 452,25$ horas; $S = 1,370$)

No gráfico indicado na Figura 4.3 se observa que no começo da vida útil o equipamento pode apresentar falhas aleatórias, (modo de falha característico dos componentes elétricos e eletrônicos), embora depois de ultrapassar às 100 horas de utilização sem manutenção a taxa de falha começa ser crescente, entrando assim na fase de envelhecimento, onde fenômenos como a fadiga e o desgaste de componentes mecânicos são predominantes na redução do desempenho da máquina.

A priori, o resultado encontrado por Wang [⁵¹WANG 1999] estaria em contradição com outros autores como Mejabi [⁵²MEJABI 1995] e Freiheit [⁵³FREIHEIT 2002] os quais estabelecem, que sob algumas considerações, a probabilidade de falha em um equipamento de manufatura pode ser modelada com o emprego de uma distribuição exponencial.

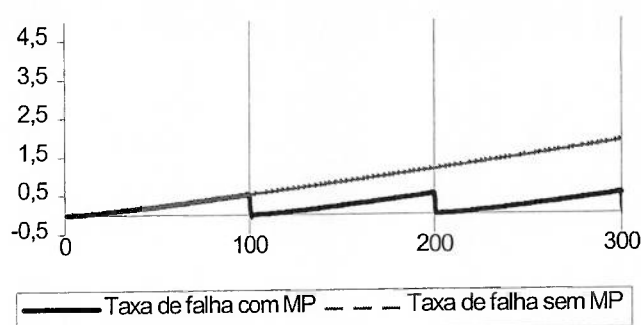


Figura 4.4 Ação da Manutenção Preventiva - MP na taxa de falha do equipamento. Intervalo de intervenção: 100 horas [⁵¹WANG 1999]

A afirmação de que a probabilidade de falha de máquinas operatrizes segue uma distribuição de probabilidade exponencial pode ser feita tendo em vista as seguintes considerações:

- Manutenção preventiva: o equipamento recebe em intervalos fixos de tempo, reparações, restaurações ou até substituições de componentes que tem como objetivo restaurar a funcionalidade do equipamento. A manutenção preventiva tem como consequência o retorno do equipamento às condições iniciais de funcionamento, fazendo com que a taxa de falha não atinja magnitudes elevadas, tal como indicando na Figura 4.4. A manutenção preventiva evita o aumento da taxa de falha, prevenindo assim a falha por desgaste

de componentes mecânicos e por acumulação de dano. Dessa forma pode-se modelar a taxa de falha por uma constante, e, portanto a probabilidade de falha é modelada por uma distribuição exponencial. Esta distribuição é válida entre os intervalos de manutenção preventiva.

- Tempo de estudo limitado: o tempo de operação da máquina sem manutenção preventiva não pode ultrapassar o tempo em que se verifica o início do aumento da taxa de falha associada ao desgaste dos componentes mecânicos. Além disso, é importante considerar que os componentes mecânicos principais como o eixo árvore e as engrenagens de transmissão foram projetadas com vida infinita e coeficiente de confiabilidade alto, fatos que retardam a contribuição significativa dos fenômenos do envelhecimento (desgaste, fadiga, etc.).
- A técnica de Análise de Modos e Efeitos das Falhas pode ser utilizada para prever as possíveis causas de falha em máquinas ferramenta. Já que estas falhas podem afetar a qualidade da peça produzida ou mesmo impedir seu funcionamento, através da aplicação de técnicas preditivas, pode-se detectar a ocorrência do desenvolvimento da falha, antes da mesma prejudicar a operação da máquina, possibilitando o reparo. Na Tabela 4.2 é indicada um modelo desta análise para um torno.

Tabela 4.2 Análise de Modos e Efeitos das Falhas – Torno

FUNÇÕES	MODOS FALHA	CAUSAS	EFEITOS	MÉTODO DE DETECÇÃO DA FALHA
Obter peças com dimensões dentro das especificações	Dimensões fora das tolerâncias	Vibrações Erro na escolha das condições de usinagem Aumento da força de corte Nivelção incorreta da peça Flambagem do eixo árvore	Reprocessos Perda de capacidade do processo Problema de montagem em operações posteriores Desgaste ou até quebra da ferramenta de corte	Treinamento do operador Manutenção Prediva
Funcionamento adequado da máquina durante toda a operação	Operação não pode ser iniciada	Quebra de componentes mecânicos Quebra de componentes elétricos ou eletrônicos Quebra nos componentes hidráulicos	Aumento de tempo de preparação Gargalos de operação Perda de capacidade do processo	Manutenção preditiva, ou preventiva. Inspeções por parte do operador

Tendo em vista as considerações acima, é possível estabelecer que os defeitos introduzidos nas peças usinadas, pelas falhas da máquina após, a etapa de falha precoce, têm uma taxa de ocorrência considerada constante, não devendo apresentar um padrão de comportamento crescente ao longo do tempo.

4.3.1.3 Ferramenta

Os defeitos introduzidos nas peças como função de falhas nas ferramentas, têm uma taxa de ocorrência crescente no tempo, pois as ferramentas apresentam como principal modo de falha, o desgaste, que é um mecanismo de dano acumulativo.

A confiabilidade do processo de desgaste de uma ferramenta, utilizada em operações de usinagem, representa a probabilidade de que em um tempo T o valor de desgaste da ferramenta atinja um nível de desgaste V_B^* [54HITOMI 1979]. Como o desgaste de uma ferramenta é um mecanismo cumulativo, a confiabilidade da mesma deve ser representada por uma função distribuição de probabilidade que simule taxas de falha crescentes

com o tempo, sendo as mais representativas as distribuições Normal, Weibull e Lognormal. Esta análise discorda do que é apresentado por [53FREIHEIT 2002] que propõe que a função densidade de probabilidade empregada para representar o desgaste da ferramenta segue uma distribuição exponencial, o que seria equivalente a dizer que a taxa de falha da ferramenta é constante, desconsiderando que o mecanismo de desgaste é inevitável e progressivo.

Estudos experimentais apresentados por Hitomi [54HITOMI 1979], ElWardani [55 WARDANY 1997], e Wang [56WANG 2001] mostram que uma das distribuições de probabilidade que melhor modela o desgaste de flanco da ferramenta em operações de torneamento, é a distribuição Lognormal. A seguir se ilustra como exemplo o cálculo da confiabilidade de uma ferramenta qualquer, supondo que o desgaste da mesma segue uma distribuição Lognormal [54HITOMI 1979]. Quando o desgaste segue outra distribuição é possível seguir este procedimento e encontrar a confiabilidade da ferramenta em termos do tempo de vida da mesma, porém o equacionamento obtido deve diferir do abaixo indicado.

Seja v_B uma variável aleatória, que representa o desgaste de flanco da ferramenta, sendo função das condições de corte e do erro estatístico, expressa pela relação indicada na eq. (4.1):

$$v_B = \psi(f, v, d, t, \gamma, r) \cdot \theta(\xi) \quad (4.1)$$

onde, f é o avanço, v a velocidade de corte, d a profundidade de corte, t o tempo de corte, γ o ângulo da aresta transversal da ferramenta e r o raio da ferramenta, o sendo o símbolo, Ψ , representativo de uma função, neste caso a função de Taylor que corresponde a função que relaciona estas variáveis e θ representa a função do erro estatístico.

A equação de Taylor é uma expressão empírica empregada para prever o desgaste de flanco de uma ferramenta de usinagem em função das condições de corte. Entretanto, experimentalmente, os valores obtidos para o desgaste de flanco apresentam dispersão em relação ao valor previsto

pela equação de Taylor, sendo esta dispersão representada pela função do erro.

Tomando logaritmo natural na eq. (4.1) obtêm-se:

$$\begin{aligned} \ln(v_B) &= \ln[\psi(f, v, d, t, \gamma, r) \cdot \theta(\xi)] \\ \ln(v_B) &= \ln[\psi(f, v, d, t, \gamma, r)] + \ln[\theta(\xi)] \\ \ln(v_B) &= \ln[\psi(f, v, d, t, \gamma, r)] + \varepsilon \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde ε corresponde ao logaritmo da função erro estatístico.

Assumindo que o desgaste da ferramenta segue uma distribuição Lognormal, a média da distribuição definida eq. (4.3), corresponde à mediana do desgaste de flanco sofrido pela ferramenta, sendo representado por V_{B_0} :

$$V_{B_0} = E[\ln(v_B)] = E[\ln(\psi(f, v, d, t, \gamma, r))] + E[\varepsilon] \quad (4.3)$$

A variabilidade do sistema estará dada pelo quadrado da diferença existente entre o valor esperado (correspondente ao valor resultante da equação que relaciona as variáveis) e o valor real obtido em ensaios de desgaste. Daí que o segundo parâmetro da distribuição Lognormal, a variância representada pelo símbolo σ^2 , é definida na eq (4.4).

$$\begin{aligned} \text{Var}[\ln(v_B)] &= E\left[\left(\ln(v_B) - V_{B_0}\right)^2\right] \Rightarrow \\ \text{Var}[\ln(v_B)] &= E[\varepsilon^2] \Rightarrow \\ \text{Var}[\ln(v_B)] &= \sigma^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Na eq. (4.5) é representada a equação de Taylor estendida, indicando a relação matemática entre o desgaste da ferramenta e os parâmetros da operação de usinagem, já mencionados anteriormente .

$$\hat{v}_B = C_0 \cdot f^{b_1} \cdot v^{b_2} \cdot d^{b_3} \cdot \gamma^{b_4} \cdot r^{b_5} \cdot t^{b_6} \quad (4.5)$$

onde C_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 , b_6 são constantes que dependem das condições do ensaio e o \hat{v}_B é a estimativa do valor do desgaste para um dado tempo de usinagem, que corresponde ao valor médio da distribuição de

probabilidade que representa o desgaste do flanco, em um tempo específico de operação da ferramenta.

Assim a função densidade de probabilidade para a distribuição do desgaste de flanco da ferramenta é representada pela função Lognormal, sendo expressa pela eq. (4.6):

$$f(v_B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot v_B} e^{\left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln v_B - C_0 - f^{b1} \cdot v^{b2} \cdot d^{b3} \cdot \gamma^{b4} \cdot r^{b5} \cdot t^{b6})^2 \right]} \quad (4.6)$$

Supõe-se que a ferramenta começa o corte no $t=0$ e que a falha da ferramenta ocorre no tempo $t=T$. Então a probabilidade de falha $F(T)$ e a confiabilidade da ferramenta $R(t)$ definidas no tempo de falha, são representada pelas eq. (4.7) e

$$F(T) = P(t \leq T) = \int_0^T f(t) dt \quad (4.7)$$

$$R(T) = 1 - F(T) \quad \Rightarrow \quad (4.8)$$

$$R(T) = 1 - \int_0^T f(t) dt$$

Por outro lado pode-se afirmar que a probabilidade de falha da ferramenta é também a chance de que esta falhe um tempo t especificado, devido a que o desgaste, neste intervalo de tempo, atinja o V_B^* , esta definição está representada na eq. (4.9)

$$P(v_B \geq V_B^*) = 1 - \int_0^{V_B^*} f(v_B) \cdot dv_B \quad (4.9)$$

Considerando a evolução do desgaste da ferramenta, apresentada na Figura 4.5, verifica-se que para cada instante do tempo existe uma probabilidade do desgaste ser inferior a V_B^* , sendo que esta probabilidade é reduzida dado o aumento do tempo de utilização da ferramenta.

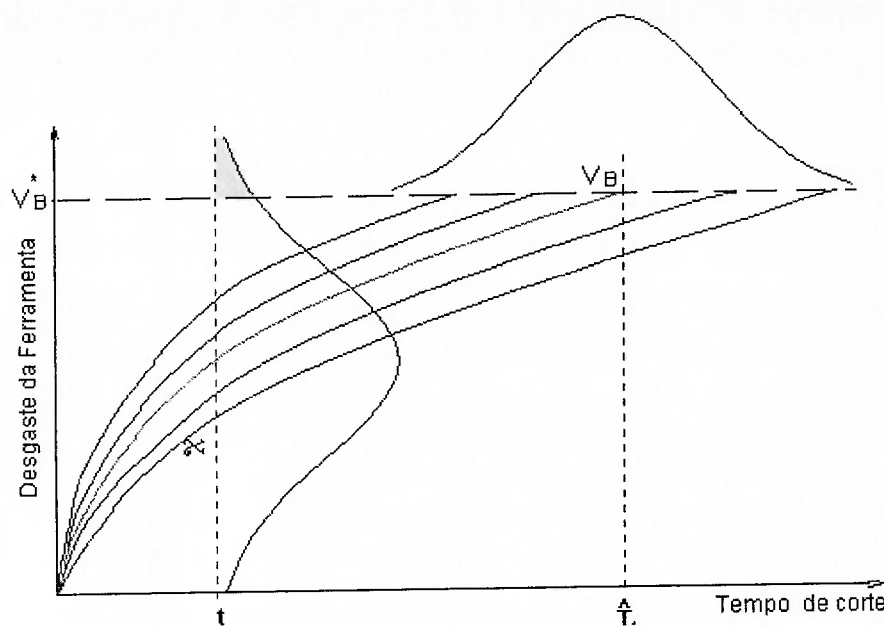


Figura 4.5 Relação entre desgaste da ferramenta e tempo de corte [⁵⁴HITOMI 1979]

Na Figura 4.5 pode-se ver que assim como existe uma distribuição probabilística para o desgaste atingido num tempo t , existe também uma distribuição de probabilidade para o tempo em que a ferramenta atinge um desgaste V_B^* , e que no \hat{T}_1 o valor do desgaste médio é V_B^* , conclusão apresentada na eq. (4.10)

$$P(T < t) = P(v_B \geq V_B^*)$$

$$\int_0^t f(t) \cdot dt = 1 - \int_0^{V_B^*} f(v_B) \cdot dv_B \quad (4.10)$$

Do anterior tem-se que a confiabilidade da ferramenta no tempo t , determinada em função do desgaste da mesma é:

$$R(t) = 1 - P(T < t)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \left(\frac{\sigma}{b_6}\right) \cdot t} \cdot e^{-\left[\frac{\ln(\hat{T}_1) - \ln(t)}{\sqrt{2} \left(\frac{\sigma}{b_6}\right)}\right]^2} \quad (4.11)$$

O tempo no qual a ferramenta atinge um certo valor de desgaste V_B^* , corresponde à vida da ferramenta, \hat{T}_1 . Substituindo o valor este valor, na eq. (4.5) se tem:

$$\hat{T}_1 = \left[\frac{V_B^*}{C_0 \cdot s^{b_1} \cdot v^{b_2} \cdot d^{b_3} \cdot \gamma^{b_4} \cdot r^{b_5}} \right]^{1/b_6} \quad (4.12)$$

onde \hat{T}_1 é o tempo médio para que ela atinja um desgaste V_B^* , e b_6 é uma constante derivada da eq. (4.5).

Wang [⁵⁶WANG 2001] realizou ensaios de torneamento, para analisar o desgaste de uma ferramenta de aço rápido (HSS). Os ensaios foram realizados com as condições apresentadas na Tabela 4.3. Para determinar os tempos médios para a vida da ferramenta foi medido experimentalmente o desgaste de vinte ferramentas no decorrer no tempo até que estas atingiram um desgaste igual a 0,3 mm. As ferramentas foram testadas para três velocidades de corte. Para posteriormente calcular o tempo de vida médio da ferramenta para cada velocidade. Estes tempos médios são apresentados na última linha da Tabela 4.3. A eq (4.13), mostra os valores das constantes e das condições de corte, ao ser substituídos na eq. (4.12). As constantes apresentadas na eq (4.13) são achadas resolvendo o sistema de equações resultante de substituir, o desgaste V_B^* (0,3 mm), as condições de corte e os tempos médios encontrados na eq. (4.5).

Tabela 4.3 Condições de corte [⁵⁶WANG 2001]

Velocidade (m/min)	88,1979	125,35	208,92	313,37
Avanço (mm/rev)	0,2	0,2	0,2	0,2
Profundidade de corte (mm)	1,5	1,5	1,5	1,5
Tempo de vida médio (min)	245,11	84,07	17,23	4,90

$$\hat{T}_1 = \left[\frac{V_B^*}{2,133 \cdot 10^{-5} \cdot 0,2^{0,4943} \cdot 0^{1,4331} \cdot 1,5^{0,4042}} \right]^{1/0,322} \quad (4.13)$$

Na Figura 4.6 apresentam-se as curvas de confiabilidade para a ferramenta em função das velocidades de corte. Os valores utilizados para construir o gráfico foram calculados sabendo que a ferramenta segue uma distribuição Lognormal e substituindo os valores de \hat{T}_1 pelos valores da última linha da Tabela 4.3, e a variância foi extraída dos dados apresentados por Wang [⁵⁶WANG 2001]. O intervalo de tempo utilizado foi

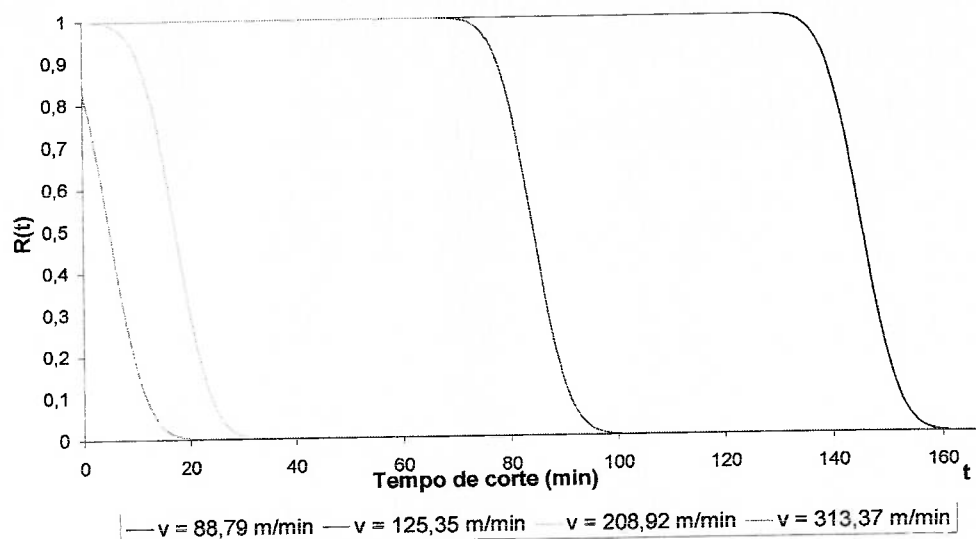


Figura 4.6 Confiabilidade da ferramenta

A taxa de falha para este mesmo exemplo é calculada aplicando a eq (3.5) e se apresenta na Figura 4.7 onde pode-se observar que esta é crescente para diferentes condições de corte, além disso é possível observar que com menor velocidade o período de falha precoce aumenta, sendo menos prolongada com o aumento da velocidade. Isto acontece porque a menores velocidades o desgaste é menor, e no caso da ferramenta falhar precocemente, sob estas condições, será devido a problemas com a própria fabricação da ferramenta.

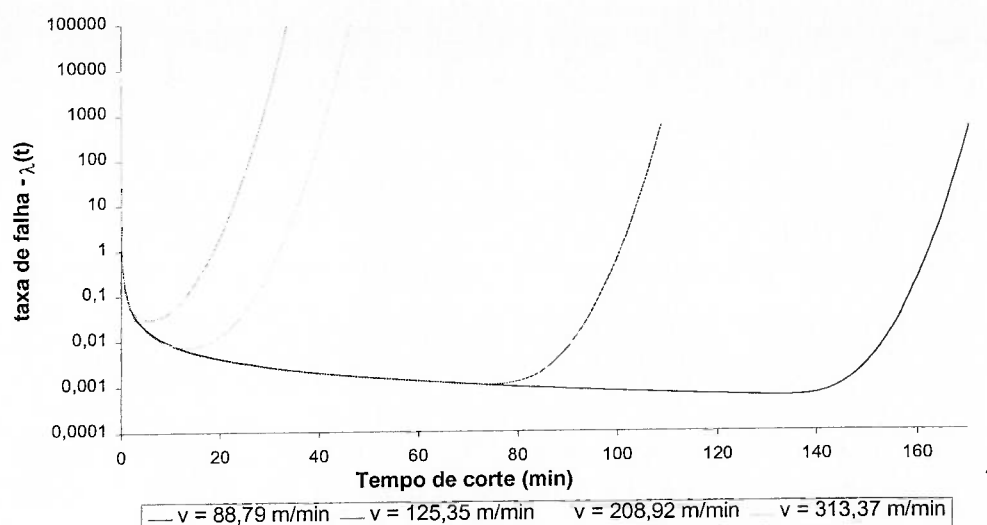


Figura 4.7 Taxa de falha da ferramenta

O desgaste da ferramenta tem como consequência a perda de tolerâncias dimensionais e geométricas das peças usinadas. Em função das pesquisas bibliográficas, verifica-se que ainda não existe uma clara relação entre o desgaste da ferramenta de usinagem e a perda de tolerância da peça fabricada. Pode-se apenas afirmar que existe um tempo médio \hat{T}_1 necessário para a ferramenta apresentar um desgaste de flanco de V_B^* . Mesmo com esta observação ainda é possível afirmar que haverá uma quantidade de peças defeituosas, por perda de tolerância dimensional ou geométrica, causada pelo desgaste da ferramenta, antes que a mesma atinja o tempo médio entre falhas, considerado como o tempo médio para a ferramenta apresentar um desgaste de V_B^* .

Analisando o desgaste da ferramenta pode-se chegar a controlar a variabilidade dimensional da superfície usinada, que está associada com a não-conformidade da peça produzida.

Ressalta-se que para uma distribuição Lognormal, a probabilidade de a ferramenta atingir o desgaste de 0,3 mm em tempos iguais ou inferiores ao tempo médio até a falha é cerca de 50%, ou seja, há uma chance elevada, sob o ponto de vista da confiabilidade, da ferramenta apresentar o desgaste de 0,3 mm antes de ser atingido o tempo médio até a falha da ferramenta.

4.3.2 CÁLCULO DA CONFIABILIDADE DE UMA OPERAÇÃO NO PROCESSO DE MANUFATURA

Considerando-se a análise de confiabilidade acima explicada, pode-se supor que os três elementos (operador, máquina, ferramenta) atuam como um sistema em série, dado que a falha em um dos três ocasiona a falha do sistema. Segundo o exposto, a confiabilidade de uma operação pode ser entendida como um sistema em série, formado pelo operador, pela máquina e pela ferramenta. Aplicando a eq. (3.6) pode-se dizer que a confiabilidade da operação é dada pela eq. (4.14).

$$R_{\text{operação}}(t) = R_{\text{operador}}(t) \cdot R_{\text{máquina}}(t) \cdot R_{\text{ferramenta}}(t) \quad (4.14)$$

Segundo o explicado nos itens 4.3.1.1 e 4.3.1.2, a taxa de ocorrência de falha do operador e da máquina são constantes, o que resulta em que a confiabilidade destes elementos é representada respectivamente por distribuições exponenciais com parâmetros (taxas de falha) λ_1 e λ_2 , respectivamente. Onde os parâmetros representam a taxa de falha tanto para a máquina, quanto para o operador. A ferramenta não tem taxa de falha constante então a confiabilidade não será a distribuição exponencial e segundo o apresentado no item 4.3.1.3 será uma distribuição com taxa de falha crescente. As distribuições comumente utilizadas em confiabilidade que modelam uma taxa de falha crescente são a Distribuição Normal, a Distribuição de Weibull e a Distribuição Lognormal.

Sob o ponto de vista da taxa de peças defeituosas produzidas num certo intervalo de tempo, pode-se afirmar que a curva da taxa de falha para uma operação de usinagem inicialmente apresenta um padrão decrescente no tempo, indicando a ocorrência de falhas precoces. Estas falhas precoces estão associadas com erros de preparação da máquina, erros de posicionamento ou mesmo de seleção da ferramenta, e a utilização de um procedimento de usinagem fora dos padrões recomendados para o material da peça. Estes erros causam a fabricação de peças defeituosas logo no início do processo, chamando a atenção do operador e dos inspetores de qualidade para algum problema de processo ou da máquina. Em alguns

casos quando isto ocorre a operação de fabricação é abortada até que o problema seja resolvido. Usualmente estes erros aparecem no início da operação, e a sua ocorrência diminui ao longo do tempo.

Posteriormente a taxa de produção de peças defeituosas atinge um valor constante, sendo a sua ocorrência aleatória. Esta fase está associada com a ocorrência de defeitos aleatórios na própria máquina, como a existência de vibração causada por alguma condição externa ou mesmo induzida por um posicionamento incorreto da peça na máquina operatriz, e variações nas condições físicas do material da peça, que tornam a fabricação incompatível com as condições de usinagem pré-definidas para a peça em fabricação entre outros. A ocorrência destas condições implica na produção de peças defeituosas, a uma taxa constante no tempo. Esta taxa constante é empregada pelo controle da qualidade para previsão do total de peças defeituosas em um lote ou em outros julgamentos probabilísticos, os quais são baseados no emprego de uma distribuição binomial.

Finalmente a taxa de produção de peças defeituosas torna-se crescente, sendo este crescimento associado com o aumento do desgaste de flanco da ferramenta. Este desgaste inicia-se na fabricação das primeiras peças e aumenta ao longo do tempo, até sua magnitude ultrapassar a taxa de ocorrência de falhas aleatórias, causando o aumento da produção de peças defeituosas. O comportamento descrito anteriormente é indicado na Figura 4.8.

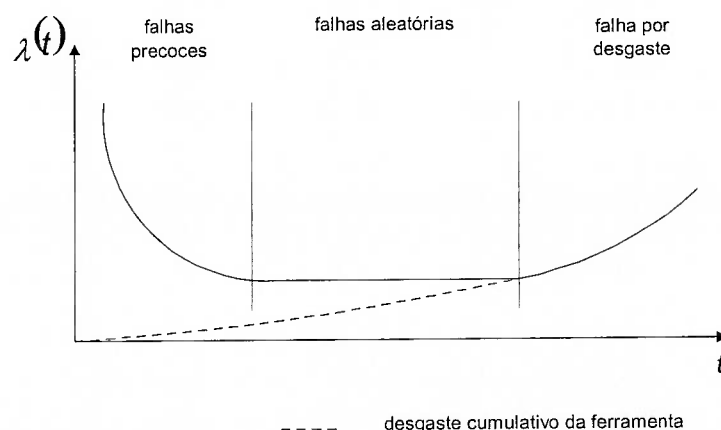


Figura 4.8 Proposta da Curva da Taxa de Falha para um Processo de Usinagem

Desta análise pode-se concluir que o elemento determinante na confiabilidade da operação é a ferramenta, mas sua confiabilidade é dada por seu desgaste, assim, por exemplo, no caso do ensaio de Wang [56] WANG 2001], quando o mesmo atinge 0,3 mm, tem-se uma confiabilidade de 50%. Concluindo, pode existir uma chance grande de produzir peças defeituosas se a ferramenta operar até o valor de sua vida média.

A utilização da vida média da ferramenta, como critério para a troca de ferramenta, não garante a minimização do número de peças defeituosas produzidas, pois como mostrado anteriormente, quando a magnitude da taxa de falha da ferramenta ultrapassa a taxa de ocorrência de falhas aleatórias, há um incremento na probabilidade de aumentar a produção de peças defeituosas. Nesta situação, conhecendo-se a curva de confiabilidade da ferramenta, definida como a probabilidade de ser atingida uma certa magnitude de desgaste em um tempo de operação específico, define-se a confiabilidade desejada da ferramenta, e troca-se a mesma no tempo em que a confiabilidade é atingida, evitando-se a necessidade de avaliações dimensionais e geométricas freqüentes, ao menos nas fases iniciais de produção de uma peça, para avaliar empiricamente o tempo de troca da ferramenta.

4.4 Proposta de Planejamento dos processos baseado em confiabilidade

Para se realizar o cálculo da confiabilidade do processo de forma eficiente deve se implementar esta proposta em um sistema inteligente ou deve se adaptar os sistemas de Planejamento de Processos Auxiliado por Computador, do inglês Computer Aided Processes Planning – CAPP, já existentes incluindo neles módulos de cálculo de parâmetros para as distribuições, cálculo da confiabilidade e estabelecimento do tempo de troca da ferramenta, utilizando a metodologia proposta nesta dissertação. É por esta razão que os algoritmos listados neste item são apresentados como fluxogramas gerais, pois a implementação desta proposta em sistemas CAPP fará parte de trabalhos futuros.

O cálculo da confiabilidade é baseado no conhecimento do Plano do Processo e especificamente da seqüência de operações. Para isto propõe-se avaliar as fases e sub-fases do PP sob abordagens específicas que considerem a confiabilidade do processo. Para esta avaliação é preciso criar alguns modelos e algoritmos para as sub-fases onde não se tem encontrado abordagens sob enfoque da confiabilidade, mas para aquelas sub-fases onde os autores que trabalham no tema já tem se aprofundado bastante utiliza-se estes modelos já existentes, adaptando-os sob o enfoque da confiabilidade, como indicado na Figura 4.9.

A primeira fase que compreende a análise preliminar da fabricação da peça, denominado de Roteamento do Processo, indicado na Tabela 4.1. Esta pode ser feita com o auxílio de uma base de dados da peça; esta base de dados pode ser substituída no caso de possuir programas que estejam habilitados para tomar automaticamente os dados da peça a ser usinada, como é no caso de alguns CAPP, mas no caso de não contar com eles devido a seu elevado custo, pode-se optar por construir uma base de dados onde o planejador terá que introduzir as informações.

A segunda fase do PP é o planejamento detalhado e para abordar a sub-fases que têm a ver com a seleção da máquina, das ferramentas e dos dispositivos de fixação se propõe utilizar os algoritmos e a metodologia proposta por Accetturi [⁵⁷ACCETTURI 1997]. Para seguir este procedimento este autor propõe um modelo para escolher as condições operacionais, máquinas e ferramentas ótimas para executar a fabricação uma peça. Embora a proposta de Accetturi seja mais abrangente, esta só será utilizada nestas sub-fases já que ele considera o PP estático e por esta razão o modelo não considera a confiabilidade como fator restritivo na escolha e no seqüenciamento de operações. Para realizar este seqüenciamento das operações de fabricação se propõe aplicar uma série de algoritmos que estabelecerão a Matriz de Anterioridades de Halevi. Para a aplicação destes algoritmos é necessário ter armazenado os dados sobre as máquinas e sobre as ferramentas existentes, em outro banco de dados.

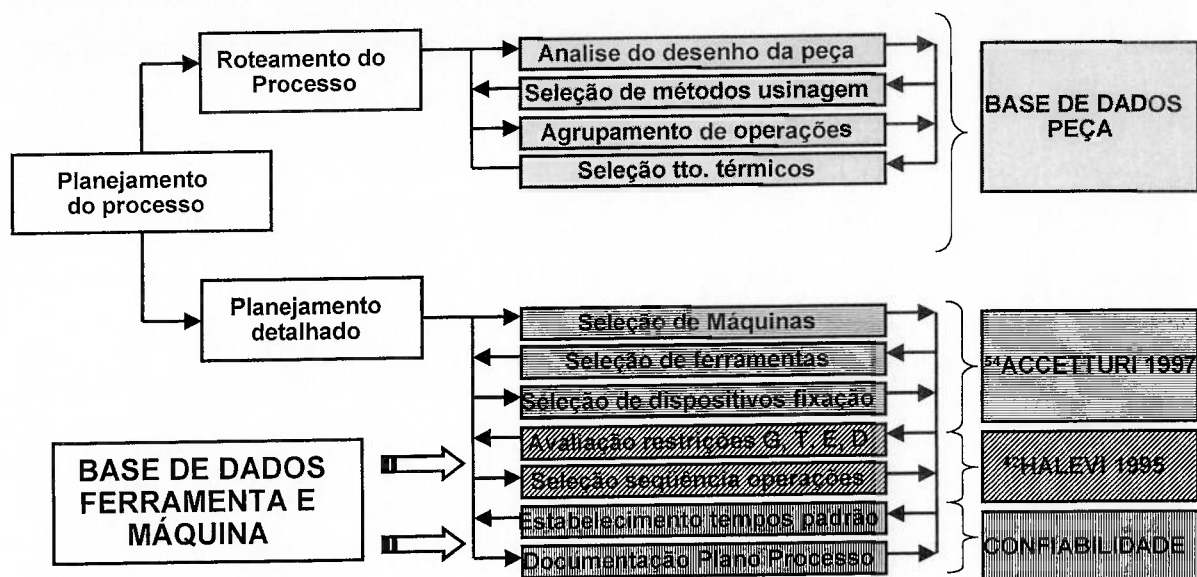


Figura 4.9 Proposta de planejamento dos processos baseado em confiabilidade

Segundo o anterior será necessário contar com quatro bancos de dados onde estarão armazenadas informações características das peças, das máquinas, das ferramentas e sobre as operações gerais e específicas.

O banco de dados sobre a peça deve conter informações gerais da peça cujo processo de fabricação vai ser planejado, como o nome, o código, o material em que deve a peça ser fabricada. Estas informações são introduzidas pelo usuário e são diferentes para cada peça nova. Outra tabela deste item é chamada operação superfície e descreve as características de cada uma das superfícies em que foi subdivida a peça; estas características basicamente são o tipo de operação que precisa ser aplicada para obtenção de cada superfície, rugosidade da superfície geométrica e características geométricas da superfície. A tabela que complementa este item é aquela onde se informa se a peça é tratada termicamente e as operações que podem anteceder a execução deste tratamento.

Para as informações da máquina são requeridas tabelas que contém as informações gerais das máquinas existentes, sua capacidade, as dimensões limites em cada um dos eixos, e as falhas gerais que apresenta este equipamento bem como a frequência que estas falhas ocorrem permitindo a definição da taxa de falha da máquina. Outra tabela que deve

relacionar as operações de fabricação que podem ser executadas em cada máquina.

Para as informações referentes à ferramenta é preciso informar três itens básicos: materiais, geometria e os principais modos de falha para cada tipo de ferramenta, incluindo a distribuição de probabilidade que representa a variação do tempo de trabalho da ferramenta até esta atingir um nível de desgaste específico.

Com respeito às tabelas explicativas para as operações devem conter informações sobre as operações empregadas no processo de fabricação da peça: operações necessárias, máquina que executa a operação, e algumas informações sobre o tempo médio entre falha para a máquina e a ferramenta, bem como o tempo médio de reparo da máquina quando realizada cada operação empregada no processo de fabricação. Com a informação sobre distribuição probabilística para cada operação.

A seguir se descreve o processamento lógico para definição de operações de fabricação de uma peça, avaliando as restrições do tipo tecnológicas, geométricas, dimensionais e econômicas. Prévio a este processamento deve-se aplicar os algoritmos de Accetturi [57ACETTURI 1997] para escolher as máquinas, ferramentas e dispositivos de fixação. Na Figura 4.10, é apresentada as rotinas e sub-rotinas que se devem seguir para estabelecer o plano do processo.

As variáveis utilizadas para o processamento lógico são:

Z: Número total de *Features*¹

N: *Feature* analisada

M: *Feature* fixada

¹ *Features*: conjunto de superfícies simples, em que é sub-divida uma peça. Estas superfícies devem possuir as mesmas características tanto de geometria, rugosidade, tolerâncias e dimensões como de fabricação. A fabricação de uma *feature* pode requer uma ou varias operações, mas durante a operação deve-se manter plano e os parâmetros, alguma mudança em qualquer característica implicará a criação de uma nova *feature*.

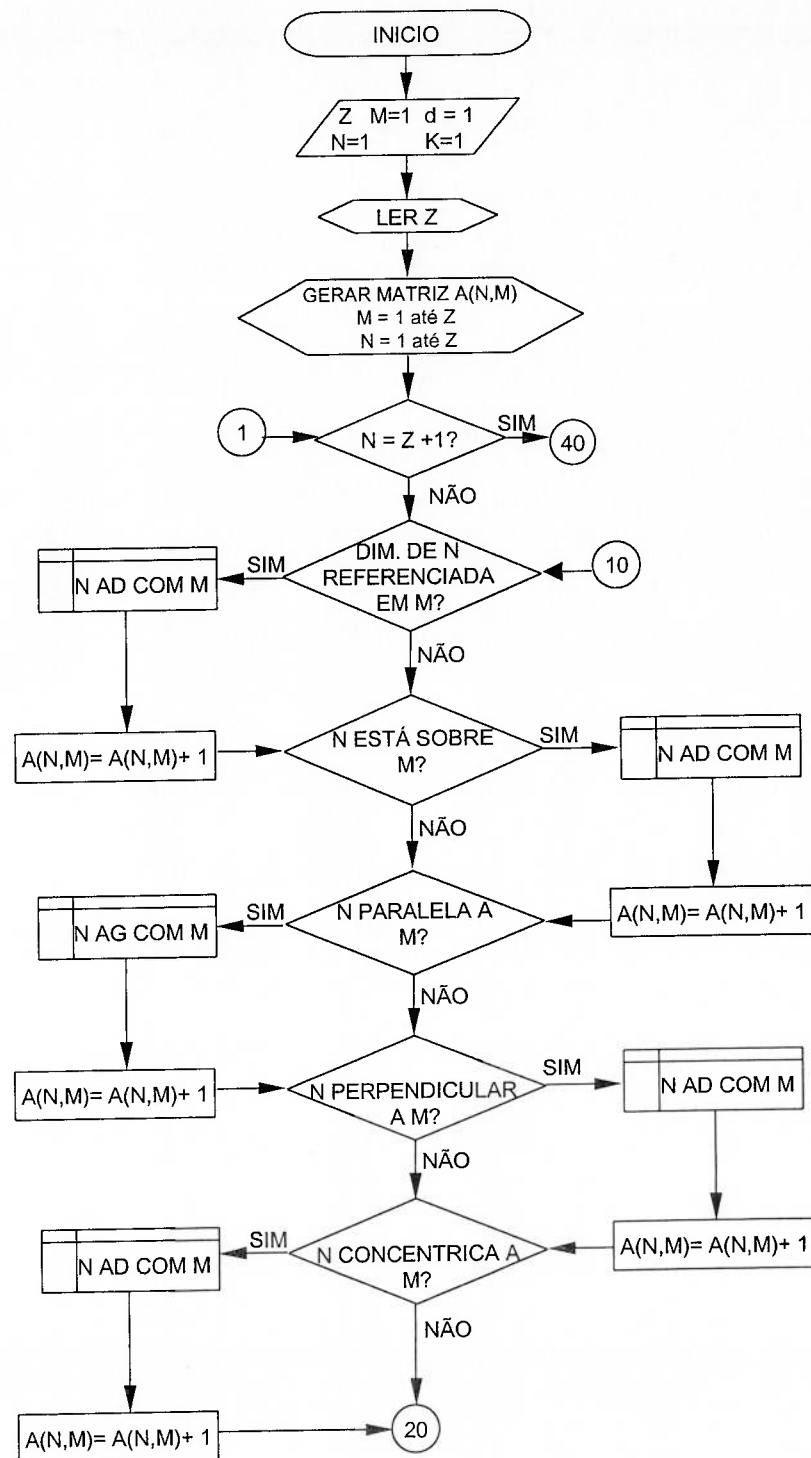


Figura 4.10 Fluxograma 1: Planejamento dos processos: Avaliação das restrições tecnológicas, económicas e geométricas, folha 01/03

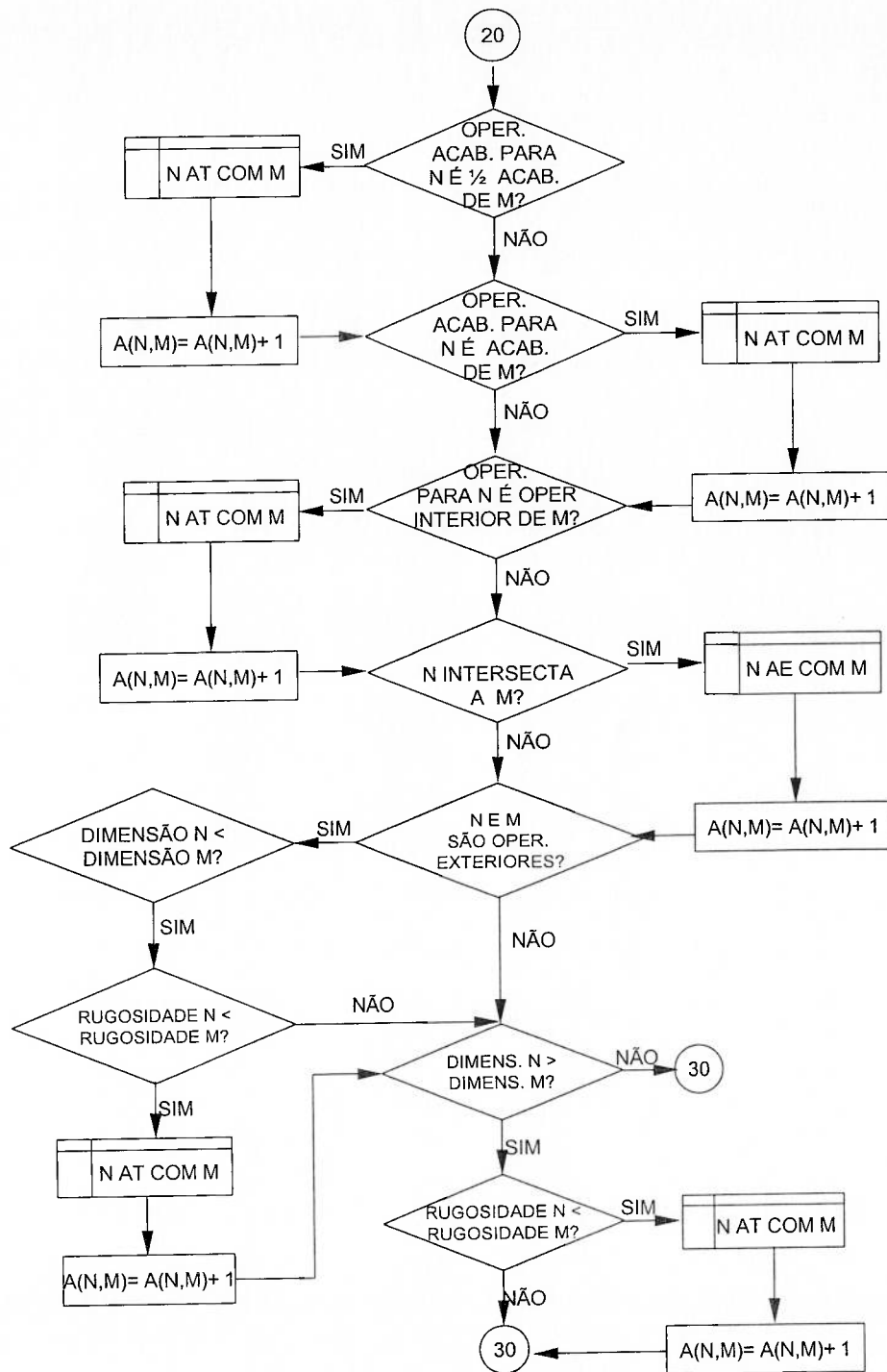


Figura 4.10 Fluxograma 1: Planejamento dos processos – Avaliação das restrições tecnológicas, económicas e geométricas, folha 02/03

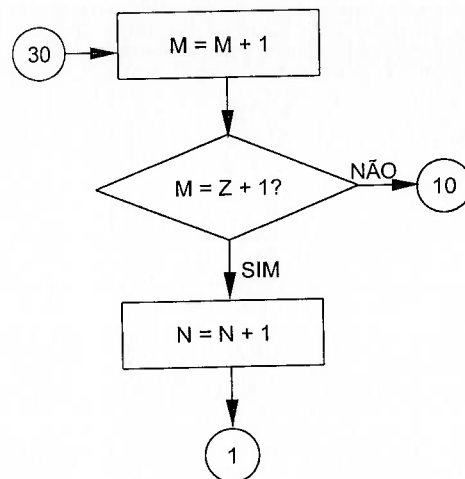


Figura 4.10 Fluxograma 1: Planejamento dos processos: Avaliação das restrições tecnológicas, econômicas e geométricas, folha 02/03

O objetivo do fluxograma 1 é, fixando uma superfície M , avaliar as restrições que têm as superfícies $N \square M$ e estabelecer anterioridades dimensional (AD), tecnológicas (AT), geométricas (AG), ou econômicas (AE) que estas têm. Assim por exemplo, o algoritmo começa fixando a *Feature* $M=1$ e questionando se a dimensão da *Feature* $N=2$ depende de $M=1$, no caso disto acontecer, se guardará a informação, ($N=2$ tem Anterioridade Dimensional (AD) com $M=1$) colocando um 1 na posição 1,2 de matriz A; sempre que exista a anterioridade será somada uma unidade à quantidade que esteja armazenada na posição M,N . No caso que não exista anterioridade se continua questionando para estabelecer se a *Feature* $N=2$ tem outras AD, AG, AT, ou AE. Ao terminar com a *Feature* $N=2$ continuará a *Feature* $N=3$, e assim por diante até avaliar todas as *Features* N , quando terminar de avaliar as anterioridades das *Features* N ($N=Z$) com *Feature* $M=1$, passará fixar a *Feature* $M=2$ e faz de novo o algoritmo aplicado para $M=1$; o algoritmo continuará até quando $N=M=Z$ momento no qual a matriz A corresponderá à Matriz de anterioridades trabalhada por Halevi.

Na Figura 4.11 se apresenta explicação gráfica do processamento lógico seguido pelo fluxograma 1, indicado na Figura 4.10. Observe-se que este fluxograma avalia, o tipo de anterioridades que pode aparecer em uma peça usinada.

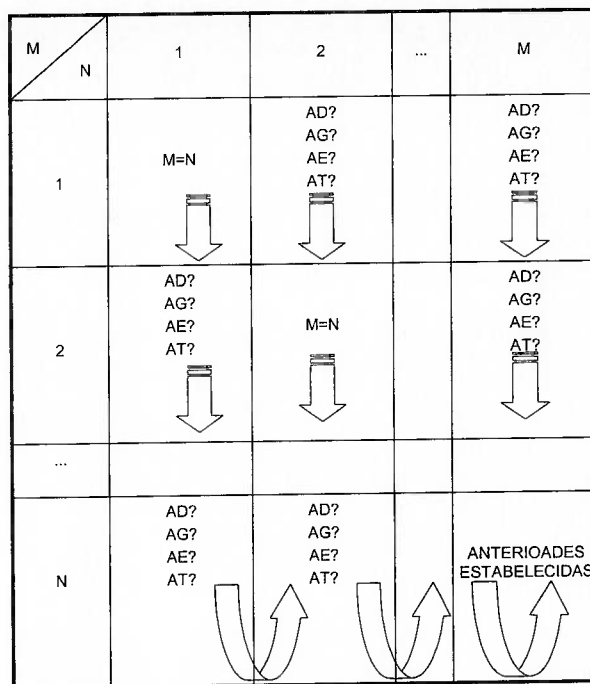


Figura 4.11 Diagrama do processamento lógico para estabelecer as anterioridades

O objetivo do fluxograma 2, indicado na Figura 4.12 é gerar uma matriz $Y(Z,2)$ que estabelecerá o número de anterioridades totais para cada um das *Features* da peça. A primeira coluna da matriz $Y(Z,2)$ terá o número correspondente às superfícies armazenadas no banco de dados, a segunda coluna corresponderá à soma de todas as entradas da linha N da matriz de Anterioridades A .

No algoritmo apresentado no Fluxograma 3, indicado na Figura 4.13 se inicia o seqüenciamento das operações. Este trabalha sobre a coluna 2 na matriz Y , coluna que indica o número de anterioridade por *feature*, procurando a existências de zeros nesta, ou seja, é procurada aquelas *features* que não apresentam anterioridades. Ao encontrar as *features* sem anterioridades, é armazenado seu valor N . Posteriormente, cria-se uma matriz $C(i,E)$ que possua zeros em todas as entradas excetuando a coluna onde ocorreu o zero da matriz Y , Podendo assim realizar a subtração entre a Matriz $A(M,N)$ e $C(I,E)$, operação que indicará que a operação referente à primeira operação já foi considerada no plano de processo. Depois de realizar a subtração, o processo do fluxograma 3 é feito tantas vezes

quantas sejam preciso até programar o seqüenciamento de todas as *Features*, da peça que esteja sendo analisada.

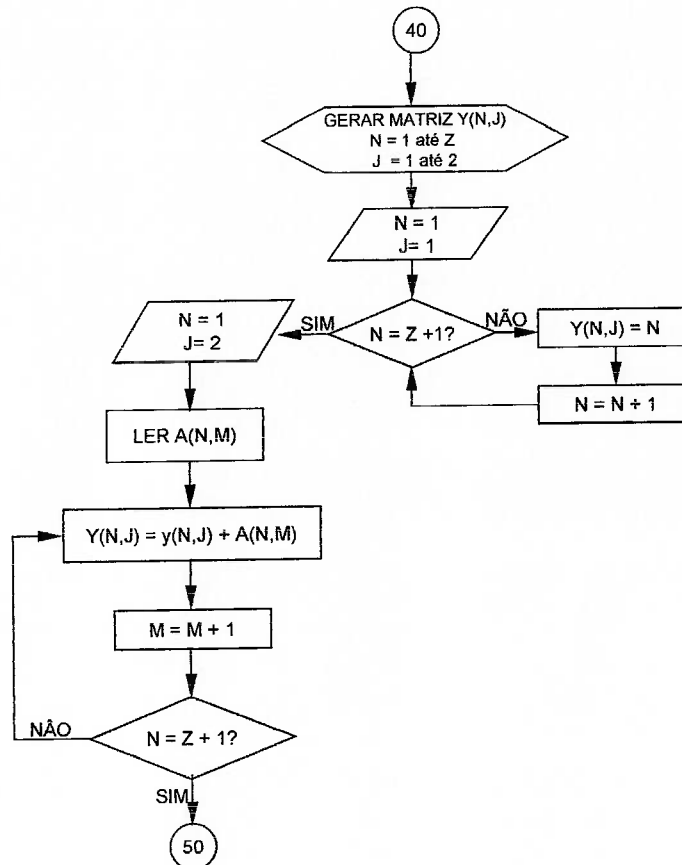


Figura 4.12 Fluxograma 2: Planejamento dos processos – Determinação do número de anterioridades por feature

Os fluxogramas 1, 2, e 3 mostram a seqüência lógica para o seqüenciamento de operações dos processos para a manufatura de uma peça. A seqüência lógica apresentada desta forma é importante porque a informação resultante desta será a base para o cálculo da confiabilidade do processo que será apresentado a seguir.

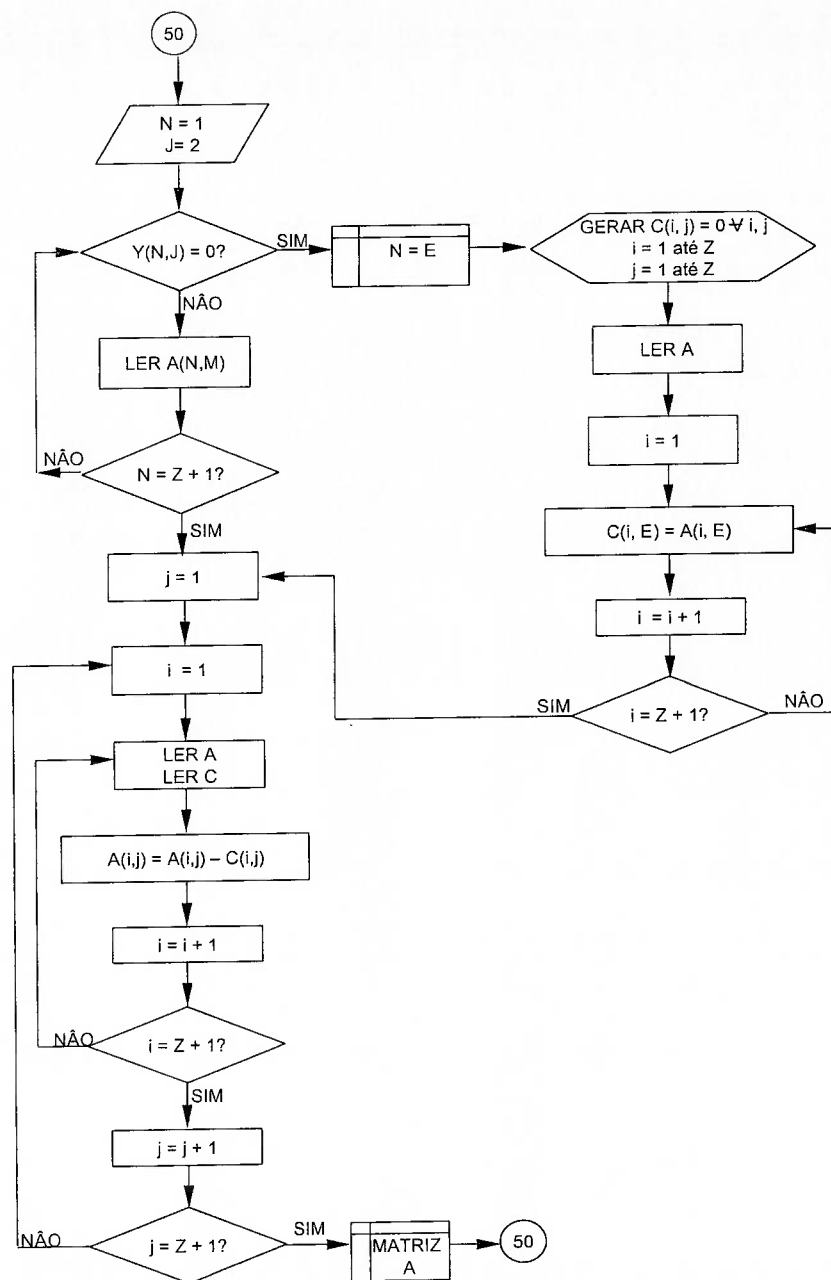


Figura 4.13 Fluxograma 3 Planejamento dos processos – Seqüenciamento de operações

Aplicando os Fluxogramas anteriormente explicados obtém-se o seqüenciamento de operações, as quais devem ser executadas em série. Dessa forma, sob o ponto de vista de análise de confiabilidade, a seqüência de operações pode ser analisada como um diagrama de blocos em série, sendo cada operação representada por um bloco, tal como indicado Figura 4.14.

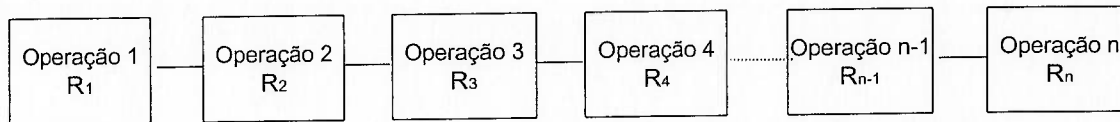


Figura 4.14 Diagrama de seqüência de operações em série

Logo, a partir do seqüenciamento de operações do plano do processo é possível determinar o tempo de operação de cada ferramenta e de cada máquina para a fabricação de uma peça, já que na base de dados estão armazenados as informações necessárias para isto (velocidades de corte, avanço e profundidades para cada *Features*, entre outros). Com este tempo determina-se a confiabilidade de cada operação com o emprego da eq. (4.14). A que a confiabilidade do processo é representada pela eq. (4.15).

$$R_{\text{processo}}(t) = \prod_{i=1}^n R_{\text{operação}_i}(t_i) \quad (4.15)$$

Sendo $t = \sum_{i=1}^n t_i$, onde t_i corresponde ao tempo de execução de cada operação.

Tal como indicado no item 4.3.2 a confiabilidade de cada operação é dependente da confiabilidade da máquina operatriz, do operador e da ferramenta. Destas, a falha da ferramenta apresenta taxa de falha crescente no tempo e sua substituição periódica pode alterar a confiabilidade de operação e conseqüentemente do processo.

Supondo que em uma única operação de fabricação a confiabilidade exigida será R_W . Conhecendo a curva de confiabilidade da operação, tal como esquematicamente representada na Figura 4.15, quando a operação atinge a confiabilidade mínima requerida esta terá produzido N_a peças. Caso seja necessário uma produção superior a N_a , a ferramenta deve ser substituída para aumentar a novamente a confiabilidade do processo, tornando-a superior ao valor mínimo requerido. Caso a ferramenta não seja trocada, a operação terá uma confiabilidade reduzida a valores inferiores ao mínimo requerido aumentando a produção de peças defeituosas. Supondo que o tempo de execução da operação para obtenção de uma peça seja t_i e a ferramenta seja trocada após a execução de N_a peças, o tempo de troca da ferramenta para a operação (TTF) será:

$$TTF = t_i \cdot N_a \quad (4.16)$$

Esse problema de determinação do tempo de troca da ferramenta torna-se mais complexo quando se analisa um processo de fabricação composto por várias operações em série.

Neste caso para produção de uma determinada peça cada operação utiliza um tempo t_i , e o tempo total do processo será a somatória dos tempos gastos em cada operação.

Dessa forma, para a fabricação de uma peça a confiabilidade do processo é calculada conforme indicado na eq. (4.15). Para a fabricação da segunda peça, a confiabilidade de cada operação é calculada considerando-se que esta trabalhou por um tempo igual $2t_i$, e a confiabilidade do processo é calculada pela relação:

$$R_{\text{processo}}(2 \cdot t) = \prod_{i=1}^n R_{\text{operação}_i}(2 \cdot t_i) \quad (4.17)$$

Generalizando na eq., (4.17), ao final da produção de N peças a confiabilidade do processo é calculada por:

$$R_{\text{processo}}(N \cdot t) = \prod_{i=1}^n R_{\text{operação}_i}(N \cdot t_i) \quad (4.18)$$

Com esta relação, pode-se definir a curva de confiabilidade em função do número de peças produzidas, cuja forma é similar a indicada na Figura 4.15.

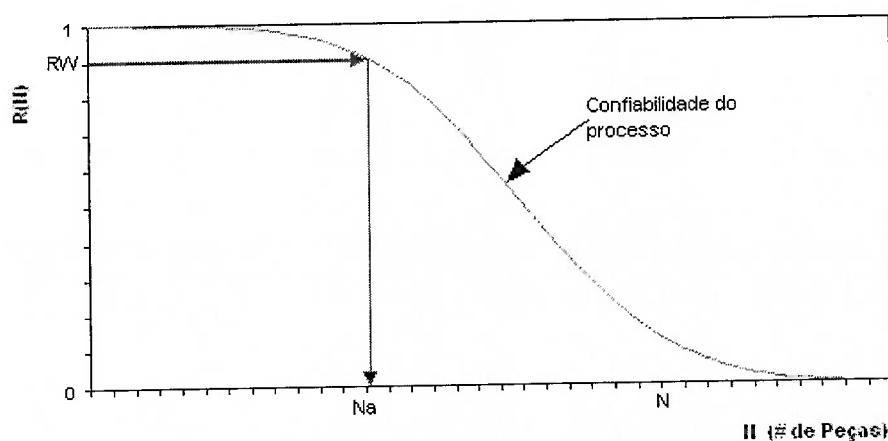


Figura 4.15 Confiabilidade requerida em função de peças produzidas

Caso a confiabilidade exigida para o processo seja RW, pode-se definir o número de peças que podem ser produzidas até ser atingida esta confiabilidade, seguindo o mesmo procedimento proposto no caso da análise de uma única operação.

Se o valor obtido for inferior ao tamanho do lote de produção, deve-se prever a substituição de ferramentas. No caso da análise de um processo, esta definição envolve a seleção das ferramentas a serem trocadas e o tempo de troca das mesmas.

Para esta seleção deve-se seguir o seguinte procedimento:

1. No instante em que o processo atinge a confiabilidade mínima requerida, verificar entre as ferramentas qual a que apresenta maior taxa de falha, ou menor confiabilidade. Essa ferramenta deve ser trocada, sendo denominada de ferramenta crítica.
2. Recalcular a confiabilidade do processo, para produzir um número mínimo de peças superior a N_1 , sendo N_1 o número de peças produzidas até ser atingida a confiabilidade RW e substituída a ferramenta crítica. Nesse cálculo deve-se considerar que a ferramenta trocada ainda não usinou qualquer peça.
3. Repetir as etapas 1 e 2 até que se tenha finalizando a produção do número de peças desejado.

Deve-se ressaltar que este algoritmo considera que o efeito da redução da confiabilidade da máquina e do operador ao longo do período de produção muito reduzido em comparação com o efeito do desgaste das ferramentas.

Na Figura 4.16 é apresentado o algoritmo que resume o exposto anteriormente. O procedimento para determinar confiabilidade do processo é sistemático, por isso um algoritmo, como o apresentado na Figura 4.16 que utiliza as informações das anterioridades de Halevi, ajudará para que este procedimento não atrase o plano de produção e uma vez ele chegue ao chão de fábrica, esteja acompanhado da informação dos tempos de troca para cada uma das ferramentas envolvidas no processo; idealmente tanto os

ao chão de fábrica, esteja acompanhado da informação dos tempos de troca para cada uma das ferramentas envolvidas no processo; idealmente tanto os algoritmos para estabelecer a Matriz de Halevi, quanto os utilizados para calcular a confiabilidade do processo e tempo de troca da ferramenta devem fazer parte de um sistema inteligente para que sua execução seja otimizada.

A variáveis utilizadas são:

T: Tempo para fabricar uma peça $T = \sum t_i$

t_i : Tempo de operação para fabricar uma peça

k: Número de operações requeridas para fabricar a peça

N: Número de peças fabricadas

RC: Confiabilidade calculada para o processo

RW: Confiabilidade mínima requerida

H: Contador de número ferramentas trocadas.

TTF(j): Tempo de troca da j-ésima associada com a j-ésima operação

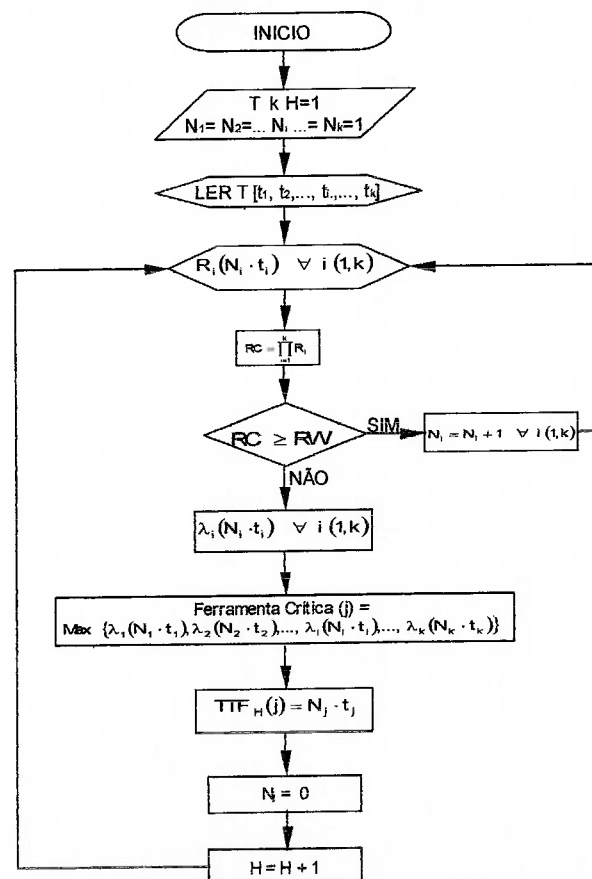


Figura 4.16 Cálculo da confiabilidade através da escolha de ferramenta crítica

Cada vez que seja preciso trocar a ferramenta a confiabilidade do processo muda e melhora um pouco tendendo ao voltar à confiabilidade inicial, por esta razão a confiabilidade do processo é válida até trocar a ferramenta, após da troca é preciso estabelecer a nova confiabilidade e a nova ferramenta crítica para estas novas condições, como apresentado esquematicamente na Figura 4.17

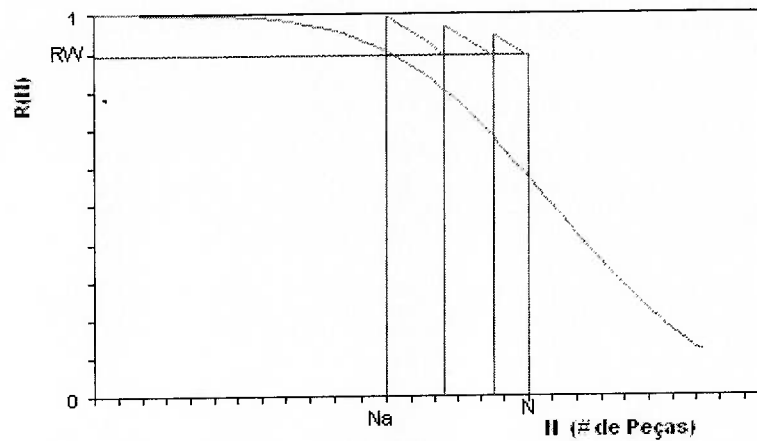


Figura 4.17 Mudança da confiabilidade com a troca de ferramenta

Este algoritmo para determinação do tempo de troca de ferramentas é uma tentativa de maximizar a utilização de uma ferramenta sem comprometer a confiabilidade do processo.

CAPÍTULO 5 ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONFIABILIDADE DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE FURAÇÃO E CÁLCULO DA CONFIABILIDADE PARA UM PROCESSO DE USINAGEM

Neste capítulo é exemplificada a aplicação da metodologia apresentada no Capítulo 4, para a determinação do tempo de troca da ferramenta visando a manutenção da confiabilidade do processo, na análise do processo fabricação de um eixo, que é manufaturado por operações de torneamento e de furação realizadas em tornos CNC.

Dada a existência de uma maior quantidade de estudos visando sobre a confiabilidade da ferramenta empregada no processo de torneamento [54HITOMI 1979], [55WARDANY 1997], [56WANG 2001], considerou-se importante estudar a operação de furação para obter os dados experimentais que permitam calcular distribuição de probabilidade para o desgaste da broca em função do número de furos e portanto calcular a confiabilidade da ferramenta.

A seguir é apresentado o estudo experimental para caracterizar a confiabilidade de uma ferramenta empregada no processo de furação, e posteriormente os dados obtidos neste estudo são utilizados no cálculo da confiabilidade do processo de fabricação da peça mecânica utilizada para exemplificar a metodologia proposta nesta dissertação.

5.1 Análise experimental da confiabilidade da ferramenta no processo de furação

No capítulo 2 foi descrito o processo de furação e foram descritas algumas características importantes do mesmo. Agora, como primeira etapa da análise da confiabilidade deste processo, são estabelecidas as variáveis relevantes para definir: função do processo de furação, a importância deste na cadeia produtiva, e as falhas dentro do processo que podem causar a execução de um furo fora das especificações de projeto. Ao mesmo tempo esta análise serve para verificar a importância que o desgaste da ferramenta

tem dentro das falhas do processo. Estas variáveis são definidas no diagrama de causa efeito apresentada na Figura 5.1, e com a análise tipo FMEA apresentada na Tabela 5.1.

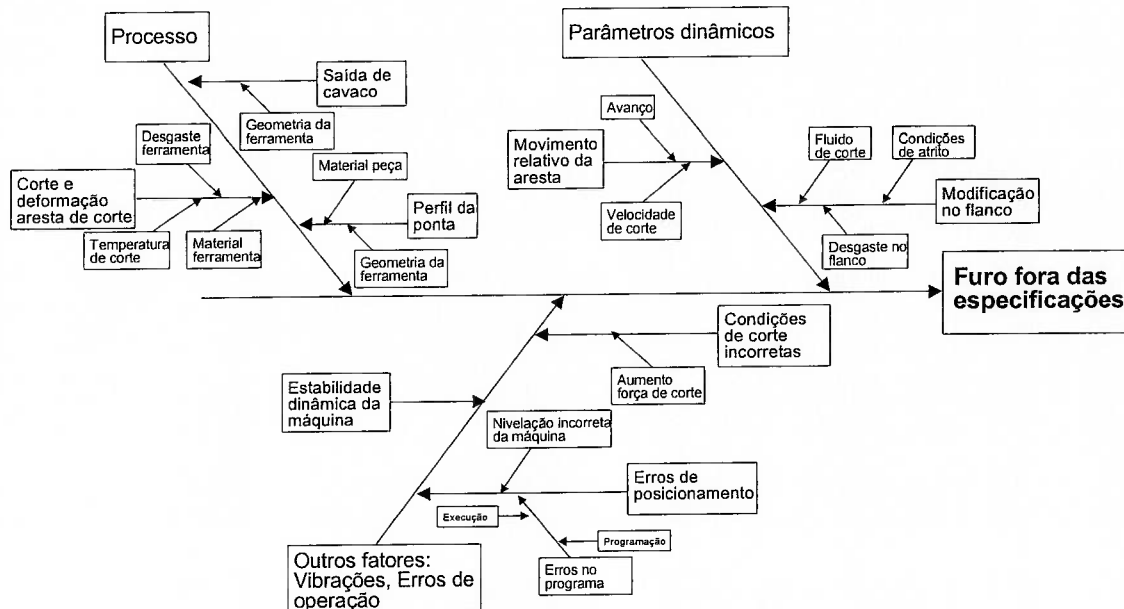


Figura 5.1 Diagrama causa – efeito para o processo de furação

O diagrama de causa-efeito mostra a relação existente entre a obtenção de furos fora das especificações e os parâmetros relevantes tanto no processo como na operação, representados nos efeitos chamados: processo, parâmetros dinâmicos e em outros como vibrações e erros de operação. Observa-se que o desgaste da ferramenta tem influência direta sobre quase todas estas causas. O furo fora das especificações pode ser causado pelo erro de localização, erro na dimensão e erro na cilindrada do furo, entre outros. Os erros de dimensão são causados pelo desgaste da ferramenta, formação do cavaco e pela vibração da máquina como é mostrado experimentalmente por Furnee, [58 FURNNE 2000]. Na Tabela 5.1 é apresentado a análise do tipo FMEA para o processo de furação, onde pode-se verificar melhor cada um dos modos de falha do mesmo, suas possíveis causas e o possível método de detecção da falha.

Tabela 5.1 Análise de Modos e Efeitos das Falhas - Processo de Furação

FUNÇÕES	MODOS DE FALHA	CAUSAS	EFEITOS	MÉTODO DE DETECÇÃO DA FALHA
Obter furo cilíndrico de diâmetro ϕ e profundidade h , com rugosidade, e tolerâncias geométricas e dimensionais especificadas no projeto.	Diâmetro e/ou altura fora das tolerâncias	Desgaste da ferramenta Face frontal da broca quebrada Formação de cavaco não desejado Flambagem eixo-árvore Fixação incorreta da broca Condições de corte incorretas Refrigeração inadequada Escolha incorreta da broca	Retrabalho Perda de capacidade do processo Refugos	Inspeção dimensional no furo Observação de ruídos e vibrações excessivos no processo Monitoramento dos esforços de corte
	Falta de retilidade da linha de centro	Nivelação incorreta da máquina Paralelismo incorreto da mesa – carro porta fuso (X-Y) Perpendicularidade incorreta da mesa - carro porta fuso em Z Fixação incorreta da peça e/ou da broca	Problemas na montagem das peças Rejeição da peça Perda de capacidade do processo Retrabalho	Inspeção geométrica no furo Monitoramento da vibração no início do corte
	Defeitos de superfícies	Vibrações no eixo-árvore ou/e ferramenta Formação de cavaco não desejado Avaria ou desgaste da ferramenta	Rugosidade superficial acima do especificado Retrabalho Erros de forma	Inspeção geométrica e de rugosidade no furo. Monitoramento da vibração, e dos esforços de corte. Inspeção visual da broca
	Distância entre centros incorreta	Vibrações na máquina Erro no posicionamento da máquina Flambagem eixo-árvore Furo de centro ou pré furo localizado incorretamente	Problemas na montagem das peças no conjunto final Rejeição de peças Perda de capacidade do processo	Inspeção do furo

Como já foi explicado no capítulo 4, dos três elementos relevantes da análise de confiabilidade de um processo (operador, máquina e ferramenta),

a ferramenta apresenta os mais complexos modos de falha e pode-se converter no elemento mais relevante para evitar furos fora das especificações, dado que os erros dependentes do operador podem ser controlados com treinamento e implementação de engenharia de métodos e movimentos e os erros da máquina podem ter uma taxa de ocorrência praticamente constante e de magnitude reduzida, através do emprego da prática de manutenção preventiva. Por estas razões a análise experimental tem como objetivo caracterizar a confiabilidade da ferramenta de corte para o processo de furação, encontrando para a mesma a distribuição de probabilidade para o desgaste de flanco, o qual é considerado o principal modo de falha deste tipo de ferramentas.

5.1.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESGASTE DA FERRAMENTA

A broca apresenta principalmente dois tipos de desgaste: o desgaste de flanco (V_B) e de cratera (K_B) tal como indicado na Figura 5.2. O primeiro tipo de desgaste se apresenta próximo a periferia da broca onde a velocidade de corte é máxima e o segundo é observado sobre a superfície de saída do cavaco.

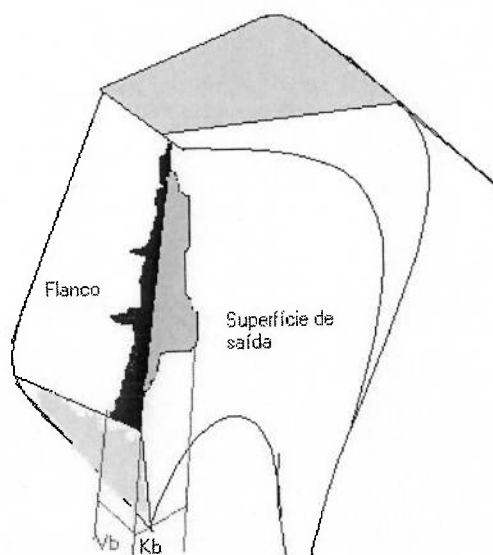


Figura 5.2 Definição do desgaste de cratera e de flanco em brocas [⁵⁹SANDVIK 1999]

Pode-se observar que a variação do desgaste de flanco é alta e por isto existem diversos valores considerados limites superiores para este desgaste que dependem da zona onde se está mensurando-o. Os valores recomendados pelo fabricante para o desgaste admissível para brocas variam entre 0,20 mm e 0,40 mm, como função de seu diâmetro e do material empregado na sua fabricação. Estes valores limites superiores para o desgaste de flanco estão associados com a perda de capacidade de obtenção de furos conforme tolerâncias previamente especificadas.

Analisando a tabela FMEA para o processo de furação indicada na Tabela 5.1 e dada a relação existente entre o desgaste da ferramenta com os erros dimensionais e a rugosidade final do furo, é importante analisar separadamente o processo de desgaste da ferramenta, visando caracterizar as principais causas associadas ao mesmo. Para isto emprega-se a análise do tipo FMEA, conforme indicada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Análise de Modos e Efeitos das Falhas para o desgaste da broca

FUNÇÕES	MODOS DE FALHA	CAUSAS	EFEITOS
Obter furos cilíndricos de diâmetro ϕ e profundidade h.	Desgaste excessivo da broca	Velocidade de corte fora do padrão especificado pelo fabricante Avanço superior ao indicado pela folha de processos Material fora do especificado (mais duro) Fundição do cavaco e adesão na broca. Folga na haste da broca. Não ocorrência da saída do cavaco durante a furação Problemas de lubrificação, falta de lubrificação, não direcionado na ponta da broca ou uso de lubrificante inadequado. Fixação inadequada.	Diâmetro e/ou altura fora das tolerâncias geométricas e dimensionais exigidas Rugosidade superficial acima do valor especificados

Neste trabalho o desgaste é medido na periferia da broca, como indicado na Figura 5.2, onde espera-se valores de magnitude para esta grandeza, uma vez que a velocidade de corte é maior nesta zona.

5.1.1.1 Equipamentos e materiais utilizados

A ferramenta utilizada é uma broca de aço-rápido ABNT M2. Cabe ressaltar que este material se enquadra dentro dos aços ao molibdênio do grupo M na classificação da American Iron and Steel Institute – AISI [60HANDBOOK 1990]. Devido à combinação dos elementos de liga, o aço-rápido ABNT M2 apresenta alta resistência ao amolecimento a elevadas temperaturas. Sua dureza máxima geralmente é 65 HRC. Os principais elementos de liga de aço-rápido são o cromo, o molibdênio, o tungstênio e o vanádio. O cobalto também é muito utilizado, pois aumenta significativamente a dureza a quente, aumentando a eficiência das ferramentas utilizadas em operações que gerem altas temperaturas, proporcionando maiores velocidades de corte em operações de desbaste nos processos tradicionais de usinagem. A Tabela 5.3 apresenta a composição química do aço M2.

Tabela 5.3 Teores de elementos químicos nos aços M2 [60HANDBOOK 1990]

C	V	Mo	W	Cr	Mn	Si	Ni
0,80 - 0,85	1,70 - 2,10,	6,00 - 6,50	4,50 - 5,00	3,80 - 4,00	0,10 - 0,40	0,10 - 0,40	<0,30.

Os ensaios de furação foram executados em corpos de prova como forma de paralelepípedo, tal como indicado na Figura 5.3. Estes corpos de prova possuem comprimento de 220 mm, largura de 30 mm, e altura de 30 mm. Tendo em vista o comprimento e a largura do corpo de prova, prevê-se a execução de 3 carreiras de 25 furos em cada corpo, tal como indicado na Figura 5.3.

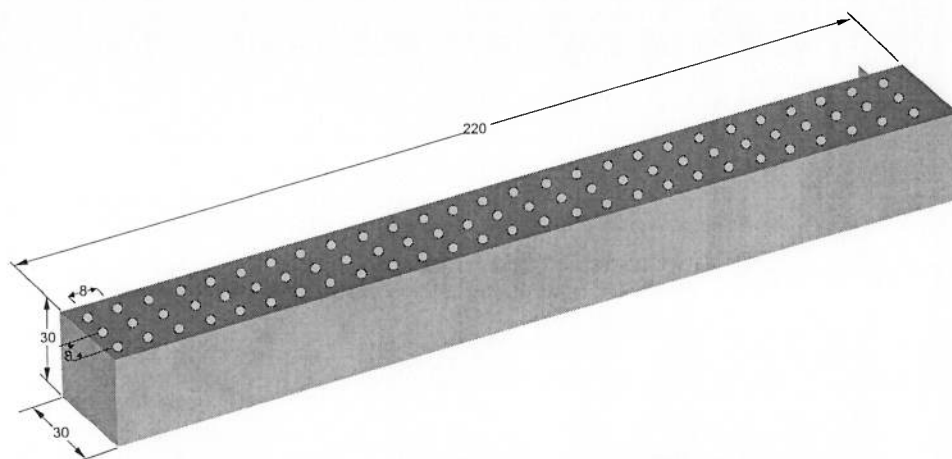


Figura 5.3 Esquema do corpo de prova e da distribuição dos furos

A composição química do material foi feita utilizando microsonda EDS acoplada a microscópio eletrônico de varredura *Philips XL30TMP* instalado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP, sendo os resultados mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Composição química do aço usado em ensaios de desgaste de ferramenta.

Elemento	%
C	0,142
Mn	0,765
Si	1,673
S	0,123
Fe	97,296

O teor de carbono foi determinado também pelo método da Fusão sob gás inerte, em equipamento *HORIBA-5210* com fluxo de argônio de alta pureza. Obtendo-se um valor de $0,123 \pm 0,002\%$, próximo do indicado na Tabela 5.4.

Comparando-se a composição química do aço do corpo de prova com a composição química dos aços baixos carbono, indicada na Tabela 5.5, verifica-se que o aço do corpo de prova pode ser classificado como AISI 1016. Embora essa classificação não seja precisa, com certeza pode-se afirmar que se trata de um aço baixo carbono, informação suficiente para

planejar as condições do experimento, no que diz respeito à relação da velocidade de corte e avanço.

Tabela 5.5 Composição química para aços carbono [60HANDBOOK 1990]

ESPECIFICAÇÃO		COMPOSIÇÃO QUÍMICA			
NORMA	GRAU	C	Mn	P (máx.)	S (máx.)
SAE/AISI (1995)	1006	0,08máx	0,25-0,40	0,030	0,035
	1008	0,10máx	0,30-0,50	0,030	0,035
	1010	0,08-0,13	0,30-0,60	0,030	0,035
	1012	0,10-0,15	0,30-0,60	0,030	0,035
	1015	0,13-0,18	0,30-0,60	0,030	0,035
	1016	0,13-0,18	0,60-0,90	0,030	0,035
	1017	0,15-0,20	0,30-0,60	0,030	0,035
	1018	0,15-0,20	0,60-0,90	0,030	0,035
	1019	0,14-0,20	0,70-1,00	0,030	0,035
	1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,030	0,035
	1021	0,18-0,24	0,60-0,90	0,030	0,035

Os furos foram realizados num centro de usinagem Deckel Maho DMC 63 V de 3 eixos cujos dados são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Especificações centro de Usinagem DECKEL MAHO

Acionamento Principal	Potencia do Motor [kW]	12,5 KW
	Rotação Max. [rpm]	8000
	Momento de giro [Nm]	57
Eixo X	Avanço Max. [mm/min]	3000
	Deslocamento [mm]	630
Eixo Y	Avanço Max. [mm/min]	3000
	Deslocamento [mm]	500
Eixo Z	Avanço Max. [mm/min]	3000
	Deslocamento [mm]	500

Para determinação do desgaste de flanco, executou-se a análise da superfície da broca utilizando uma Lupa estereoscópica, NIKON-SMZ80, de alta qualidade com câmara digital JVC TKC1380, instalada no Laboratório de Fenômenos e Superfícies do Departamento de Engenharia Mecânica da

FPUSP. Para garantir a posição do plano do flanco perpendicular ao eixo da lente da lupa, foi construído um dispositivo que permite fixar a broca e assim obter a mesma inclinação de todas as brocas fotografadas, garantindo o perpendicularismo entre o eixo da lupa e o plano do flanco da broca. Este dispositivo é num bloco de madeira, com um furo interior a 59° , como apresentado na Figura 5.4.

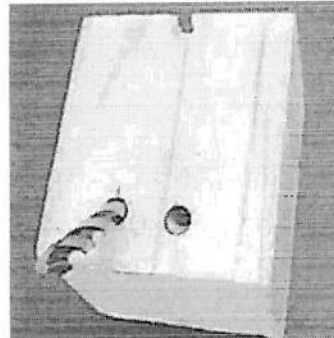


Figura 5.4 Dispositivo para fotografar as Brocas

5.1.1.2 Procedimento experimental

Têm-se 10 corpos de prova, numerados na seqüência de 1 a 10, e para cada corpo de prova tem-se uma broca de 5mm de diâmetro, tendo assim uma broca por corpo de prova. Inicialmente são realizados 20 furos, já que em uma fase de ensaios preliminares se encontrou que antes deste número de furos o desgaste era muito baixo e não era possível estabelecer um valor para o desgaste. Após destes 20 furos são realizadas seqüências de 5 furos até completar, 45 furos em cada corpo de prova desde que não haja falhado a broca, por desgaste, antes da execução destes 45 furos. As condições de furação foram mantidas para todas as seqüências de furos, sendo estas apresentadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 Condições de operação

Diâmetro da broca[mm]	5
Profundidade do furo[mm]	25
Avanço [mm/rev]	0,025
Rotação [rpm]	4000
Velocidade de corte ¹ [mm/min]	62831

¹ $v = N \cdot \pi \cdot D$, onde N representa a rotação da máquina e D o diâmetro da broca.

A relação da velocidade de corte for baseada no valor máximo admissível para execução de furação em aço baixo carbono, conforme indicação do catalogo do fabricante da broca [⁵⁹SANDVIK 1999]. Esta velocidade de corte é a máxima indicada para as operações usuais de fabricação com lubrificação, conforme o catálogo do fabricante, caracterizando a execução de um ensaio acelerado, cujo objetivo é definir a função densidade de probabilidade que representa magnitude do desgaste de flanco em uma aresta de uma broca em função do número de furos executados.

Adicionalmente os ensaios de função foram executados sem lubrificação. Optou-se por este procedimento, pois a presença de lubrificante causaria a necessidade de controle de mais uma variável no ensaio, havendo, em informações obtidas em literatura, uma série de discussões sobre o efeito da lubrificação no desgaste da ferramenta. Adicionalmente, ausência de lubrificação acelera o processo de desgaste da ferramenta, corroborando com o objetivo de um ensaio acelerado.

Na lupa estereoscópica, com um aumento de 25 vezes, foram fotografadas as duas arestas de corte de cada uma das 10 brocas. A fotografias foram tiradas antes de começar os ensaios e ao termino de cada seqüência de 5 furos, a partir dos 20 furos, obtendo assim, para cada broca, informações sobre o desgaste de flanco após a execução 0, 20, 25, 30, 35, 40 e 45 furos.

A Figura 5.5 apresenta imagens que indicam a evolução do desgaste para a broca número 9, de uma das suas arestas. Esta evolução foi obtida para as duas arestas de corte de todas as brocas ensaiadas. Nesta seqüência pode se observar como o desgaste de flanco vai evoluindo, alterando todas as superfícies da broca, tornando-se difícil obter um ponto de referência para medir o desgaste. Por esta razão, para estabelecer o valor do desgaste, após a execução de um determinado número de furos, executa-se uma análise comparativa entre a imagem da superfície da broca

desgastada e a imagem da superfície da mesma broca sem desgaste, ou seja, na condição de “nova”.

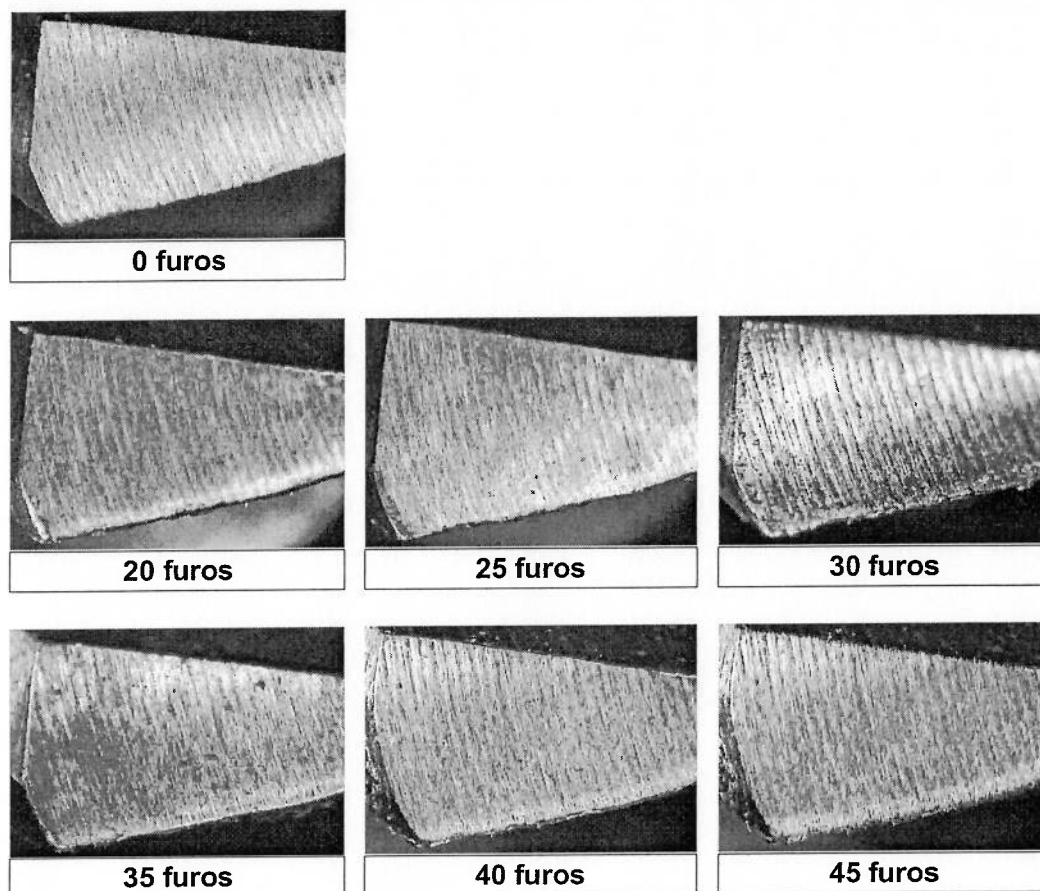


Figura 5.5 Evolução do desgaste de flanco para a broca No. 9

As medições de desgaste são feitas estabelecendo e medindo a diferença existente entre a posição da aresta de corte na broca nova (Zero furos) e a posição desta aresta, na mesma broca, depois de efetuados um número dado de furos. Para conseguir isto à imagem da broca nova é sobreposta a imagem da broca após da furação e nesta nova imagem são estabelecidas as linhas de referência que representam a aresta de corte da broca nova e a aresta de corte da broca usada. Após da obtenção destas linhas é utilizado um programa de análise de imagem (LEICA QWIN) para calcular a distância perpendicular entre as duas arestas de corte (na condição nova e desgastada) no extremo da broca onde o desgaste é maior. Esta distância representa o desgaste de flanco após a execução de um determinado número de furos. Na Figura 5.6 ilustra-se este procedimento

para a avaliação do desgaste de flanco da broca número 9 após a execução de 35 furos. Executou-se este procedimento de análise para cada uma das duas arestas de corte das 10 brocas utilizadas no estudo. Dessa forma, após a execução de um número de furos, tem-se 20 valores para a magnitude do desgaste de flanco, suficiente para caracterizar a função densidade de probabilidade associada ao nível de desgaste de flanco da broca.

Como ao longo do ensaio obtém-se 6 medições de desgaste de flanco para cada aresta de corte, correspondentes a registros após da execução 20, 25, 30, 35, 40 e 45 furos respectivamente, define-se a evolução do desgaste de flanco em função do número de furos executados, bem como a sua variação probabilística, representada pela função densidade de probabilidade.

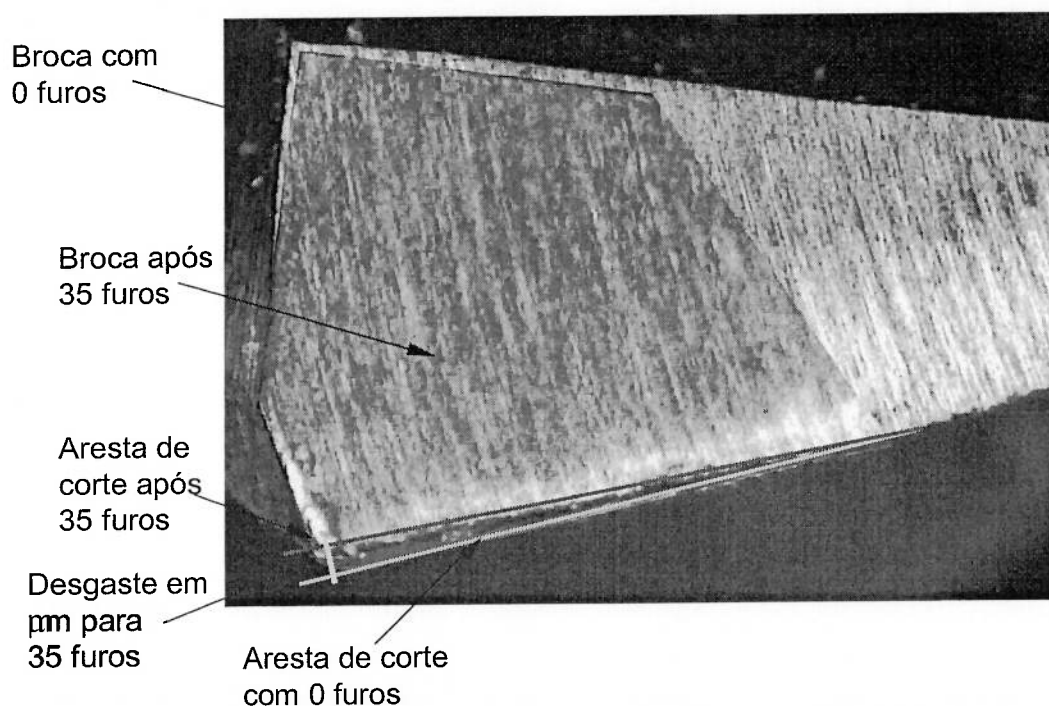


Figura 5.6 Procedimento para estabelecer o desgaste de flanco da broca número 9 após a execução de 35

5.1.1.3 Análise de dados

O desgaste de flanco de cada broca foi medido como é indicado no item 5.1.1.2. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 5.8. Pode-se

observar que nem todas as brocas conseguiram concluir o ensaio, já que estas falharam antes de 45 furos, sendo este um indicador da variabilidade da magnitude do desgaste de flanco das mesmas. Dentre as brocas que não concluíram o ensaio pode-se ressaltar a de número 4, que executou apenas 30 furos, falhando na seqüência dos furos de número 31 a 35.

Os dados da Tabela 5.8 são apresentadas em micrometros, sendo apresentados de forma gráfica na Figura 5.7. Verifica-se que o desgaste é crescente em função do aumento do número de furos executados, porém a taxa de crescimento do desgaste não é constante. Observa-se que entre 40 e 45 furos a taxa de crescimento do desgaste é mais elevada, indicando a proximidade do momento de falha da broca, que é caracterizada pela incapacidade de executar a operação de furação. Ressalta-se também que há uma boa coerência entre as magnitudes de desgaste de flanco registradas para as duas arestas cortantes de uma broca, após a execução de um número específico de furos.

Tabela 5.8 Desgaste em micrometros para 10 brocas testadas, em função do número de furos executados

Broca No.	Aresta	Número de furos						Broca No.	Aresta	Número de furos					
		20	25	30	35	40	45			20	25	30	35	40	45
1	a	63,26	72,16	86,27	141,90			6	a	82,30	88,46	103,90	112,62	125,20	129,20
	b	56,90	70,80	91,58	152,60				b	79,31	83,83	90,56	106,17	117,30	148,50
2	a	59,25	65,93	73,78	87,66	108,28	122,66	7	a	53,49	78,70	98,78	114,40	133,50	136,40
	b	53,08	69,92	75,15	89,45	112,46	125,78		b	49,22	62,47	96,26	107,80	117,40	131,00
3	a	69,79	75,66	86,66	109,74	127,60		8	a	70,05	72,62	75,65	96,91	98,45	
	b	66,44	75,00	89,55	112,80	136,10			b	71,45	76,24	81,29	98,25	103,87	
4	a	45,95	76,80	123,00				9	a	43,77	63,93	66,82	87,30	97,66	99,23
	b	36,31	79,85	129,40					b	39,38	63,49	76,78	84,70	86,44	87,79
5	a	69,37	90,78	92,95	131,19	156,11	159,39	10	a	61,05	98,56	100,56	112,43	115,57	148,10
	b	65,48	94,75	100,97	136,17	141,69	153,34		b	68,26	75,65	89,15	106,01	139,98	161,50

De posse dos valores do desgaste, para um determinado número de furos, pode-se determinar a função densidade de probabilidade que expressa a variação probabilística do desgaste de flanco da broca, após um

número de furos pré-definidos. Nesta determinação considera-se o valor de desgaste obtido para as arestas de corte das 10 brocas, após a execução de um dado número de furos. Para determinação desta função densidade de probabilidade foi utilizada o programa Weibull 6++ desenvolvido pela ReliaSoft, encontrando que as distribuições que melhor modelaram o fenômeno de desgaste de flanco obtido após a execução de um dado conjunto de furos foram a distribuição Lognormal e a distribuição de Weibull com dois parâmetros.

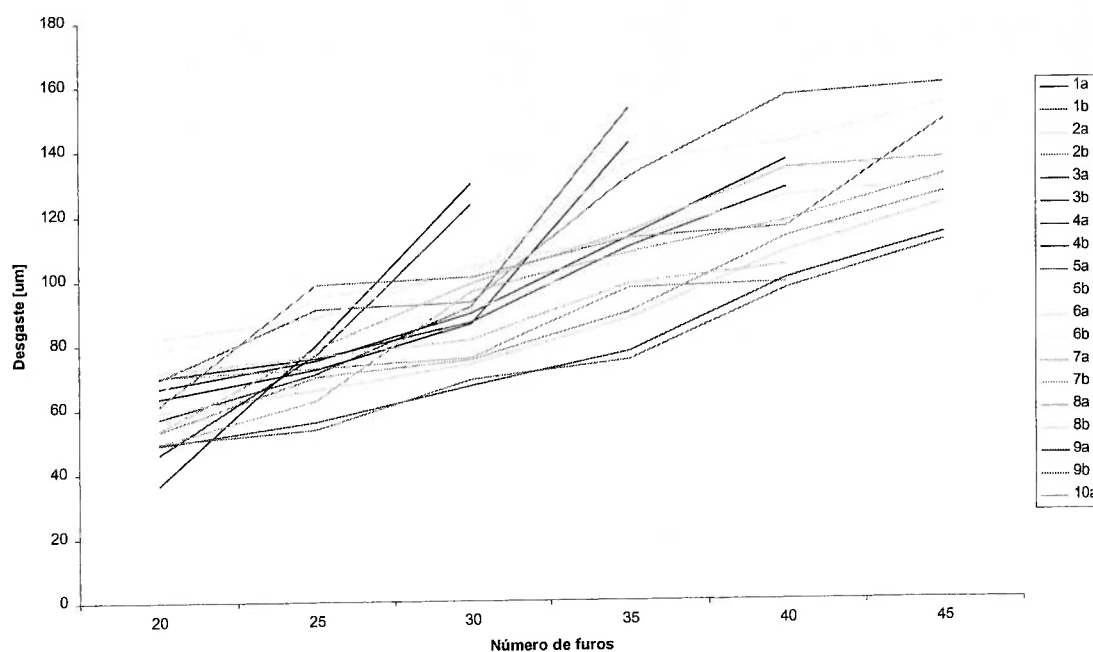


Figura 5.7 Evolução do desgaste de flanco para as 10 brocas em função do número de furos executados

A Tabela 5.9 apresenta os valores médio (μ) e o coeficiente de variação (cv) obtidos para a magnitude do desgaste, após a execução de um número pré-determinado de furos, definidos pelas distribuições Lognormal e de Weibull. Adicionalmente nesta mesma tabela apresenta-se coeficiente de correlação obtido pelas distribuições acima citadas, que representa o quanto uma dada distribuição explica a variação dos dados experimentais. Pode-se observar que, pelo o valor obtido para o coeficiente de correlação, representado pelo símbolo ρ , a distribuição que, na maioria de vezes, melhor

modela este fenômeno é a distribuição Lognormal, embora cabe ressaltar que as duas distribuições estão muito próximas e não seria estranho encontrar que sob algumas condições a distribuição que melhor explicasse o comportamento do desgaste da ferramenta fosse a distribuição de Weibull. A definição da distribuição Lognormal para modelar o fenômeno de desgaste é consoante com os valores obtidos na literatura tal como o citado por [⁵⁴HITOMI 1979]

Tabela 5.9 Comparação ente a Distribuição Lognormal e a Distribuição de Weibull

Número de furos	Distribuição Lognormal			Distribuição de Weibull		
	μ	$CV = \frac{s}{\mu}$	ρ	μ	$CV = \frac{s}{\mu}$	ρ
20	59,86095	0,23922	0,9802	59,50145	0,348314	0,9922
25	76,88989	0,139776	0,9857	76,5777	0,30511	0,9476
30	92,13024	0,175121	0,9805	91,65213	0,327363	0,9532
35	111,3736	0,18198	0,9766	110,7094	0,330294	0,9442
40	121,2168	0,170214	0,9893	120,6041	0,327905	0,9908
45	138,7904	0,132982	0,985	138,1165	0,306062	0,9779

Na Figura 5.8 é apresentada as funções densidade de probabilidade para a magnitude do desgaste em função do número de furos executados. Para 20, 30, 35, 40, 45 furos as distribuições são assimétricas à direita, observa-se que o desgaste médio localiza-se à direita das observações mais freqüentes; no caso para 25 furos a distribuição é muito mais centrada.

Na Figura 5.9 apresenta-se a evolução do desgaste da ferramenta em função do tempo de trabalho da broca, que é o parâmetro usualmente empregado na atividade industrial para caracterizar o período operacional da ferramenta. O tempo para execução de um furo é 15 segundos, sendo este o valor empregado na transformação de número de furos executados para tempo de trabalho da broca. Nesta figura identifica-se a função densidade de probabilidade que representa a variação do desgaste de flanco para os tempos de operação da broca considerados neste estudo. A curva que une os valores médios do desgaste para cada tempo de operação, representa a variação do desgaste em função do tempo de operação da broca, a qual

pode ser usada como referência para definir o tempo de troca da ferramenta, considerando-se uma magnitude de desgaste admissível. Este último é definido em função do efeito do aumento do desgaste sobre o acabamento superficial e sobre as tolerâncias dimensionais e geométricas do furo.

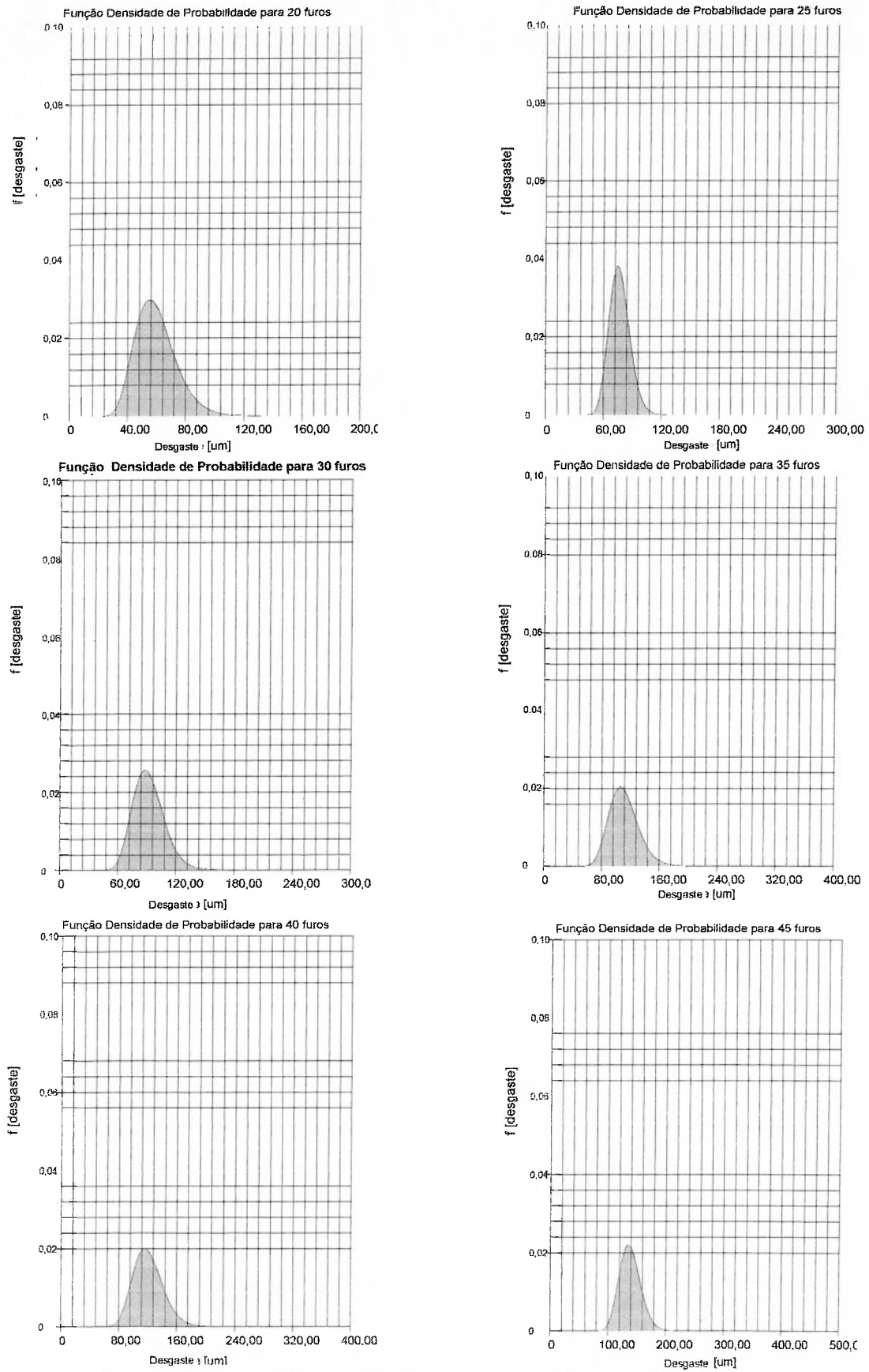


Figura 5.8 Distribuição densidade de probabilidade para a Broca

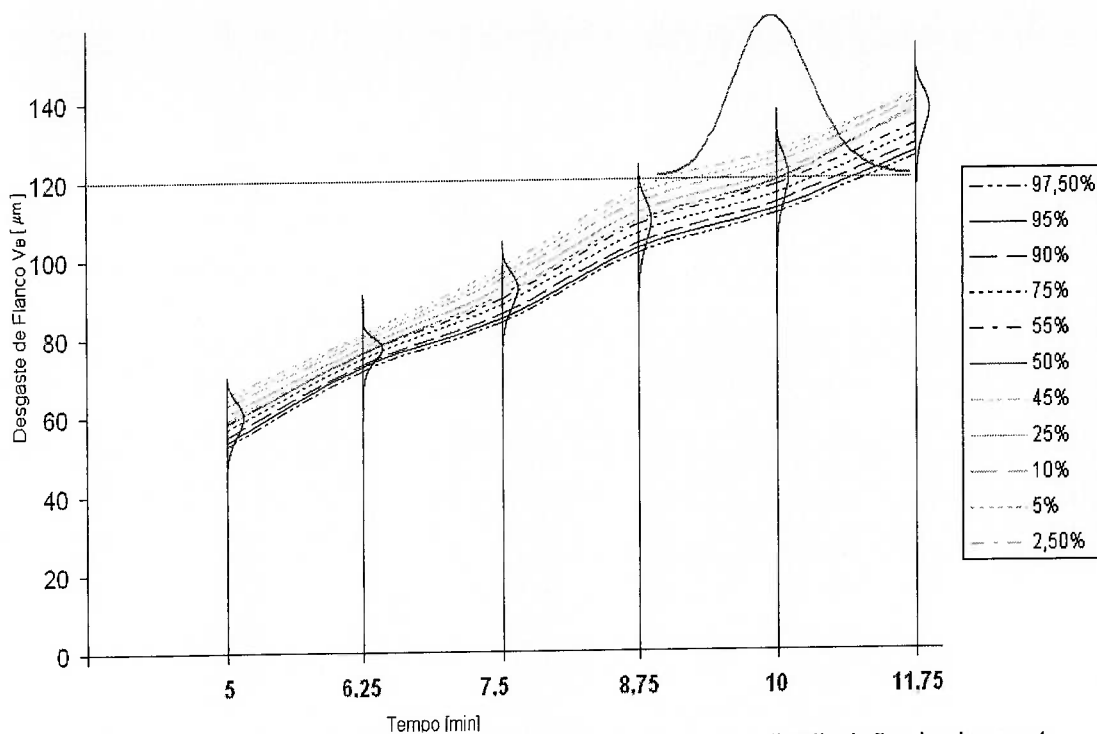


Figura 5.9 Curvas de densidade de probabilidade para a distribuição do desgaste de flanco em função do tempo de operação da broca

Fixando-se um valor máximo admissível para o desgaste, tem-se que o tempo de operação da broca associado à este valor máximo também é uma variável aleatória, pois a evolução do desgaste para diferente brocas não é constante, tal como indicado na Figura 5.9.

Empregando-se o procedimento proposto por Hitomi [⁵⁴HITOMI 1979], pode-se fixar um valor máximo admissível para o desgaste e, a partir das curvas de desgaste das arestas de corte das 10 brocas utilizadas neste estudo define-se a distribuição dos tempo de operação nos quais é atingido este valor admissível para o desgaste de flanco.

Fixando-se um valor de desgaste admissível $V_B = 120 \mu\text{m}$, obtém-se os tempos de operação para as brocas empregadas neste estudo, apresentados na Tabela 5.10. Utilizando-se o programa Weibull 6++ define-se a função densidade de probabilidade associada ao tempo de operação das brocas até ser atingido o desgaste $V_B = 120 \mu\text{m}$, sendo esta indicada na Figura 5.10. O valor do tempo médio de operação é 10,03 minutos, com

coeficiente de variação de 0,0359, sendo esta distribuição modelada por uma distribuição Lognormal.

Tabela 5.10 Tempo de vida da ferramenta para o desgaste de flanco de 120 μm

Significância %	2,50	5	10	25	45	50	55	75	90	95	97,50
Tempo de vida da ferramenta [min]	9,0878	9,2954	9,5223	9,8460	9,9947	10,026	10,1486	10,3248	10,5297	10,6847	10,7899

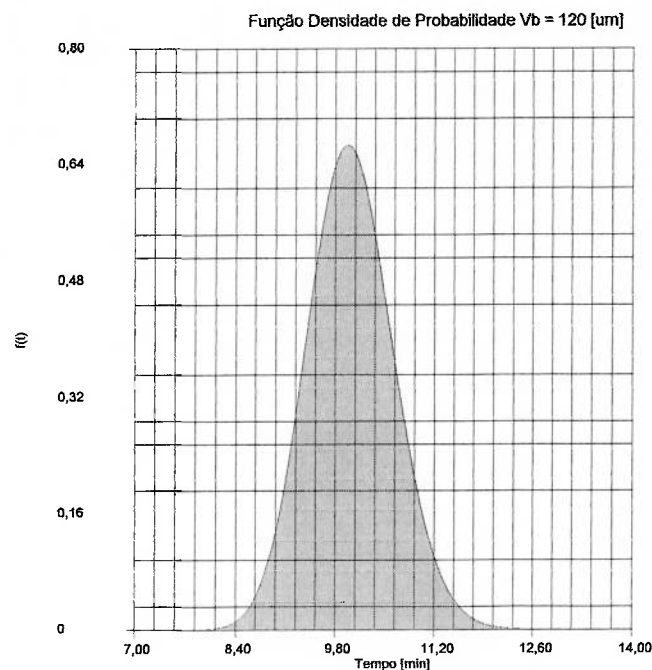


Figura 5.10 Função Densidade de Probabilidade em função do tempo de usinagem

Tendo a Função Densidade de Probabilidade, pode-se então aplicar a eq. (3.2) e a eq. (3.3) para obter a confiabilidade em função de tempo de furação. Na Figura 5.11 se observa o comportamento no decorrer do tempo da confiabilidade e o intervalo de confiança, de grau de confiança 95%, para esta. Pode-se concluir que quando o tempo de furação sobre-passa os 8,40 minutos a confiabilidade da ferramenta decresce rapidamente. No caso em estudo, este seria o tempo médio indicado para a troca da ferramenta, a fim de evitar que a mesma opere com desgaste de flanco de maior magnitude, fato que poderia prejudicar a qualidade do furo produzido.

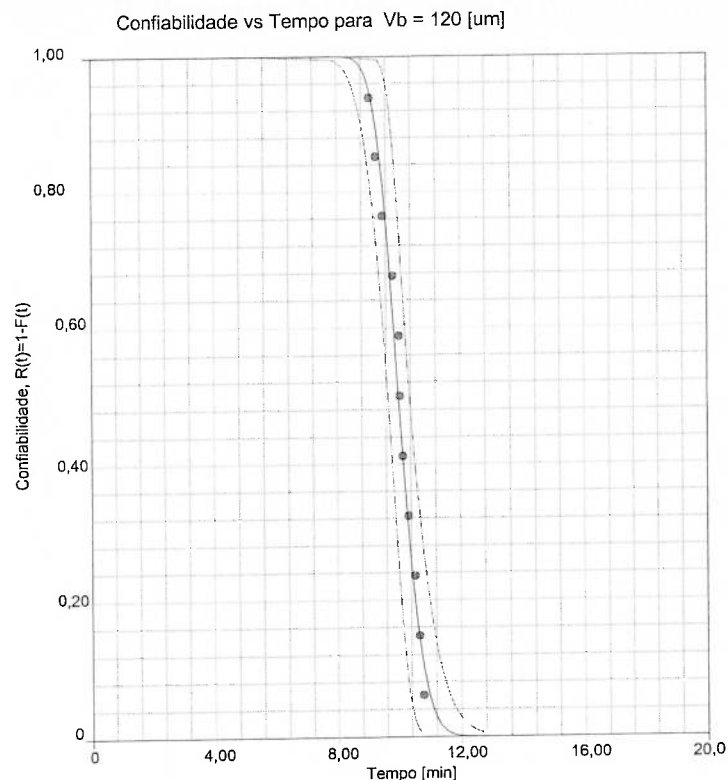


Figura 5.11 Confiabilidade da ferramenta em função do tempo de usinagem

5.2 Definição do tempo de troca da ferramenta para o processo de fabricação de um eixo

Neste item do capítulo 5 apresenta-se a aplicação do algoritmo apresentado no item 4.4 desta dissertação para definição do processo de fabricação de uma peça mecânica. Para uma peça específica define-se a seqüência de fabricação da mesma, o diagrama de blocos do processo de fabricação, e conhecendo-se a confiabilidade de cada operação do processo, define-se a confiabilidade do mesmo, em função do número de peças produzidas. Para garantir a confiabilidade mínima do processo define-se o tempo de troca das ferramentas empregadas em cada operação, conforme procedimento apresentado no fluxograma da Figura 4.16.

Na Figura 5.12 é apresentado o desenho da peça que vai ser fabricada, com as dimensões e tolerâncias especificadas. A peça a ser fabricada corresponde a um eixo, que possui perfurações em cada extremo

com roscas tipo NPT, empregadas como canais de lubrificação para as buchas dos mancais que servem de apoio ao eixo.

Considera-se que o eixo é usinado a partir de um cilindro laminado fabricado em aço SAE/AISI 1010 de dimensões 149 X ϕ 38 mm. As dimensões, formas, tolerâncias e rugosidades específicas são obtidas por torneamento ou por furação, segundo especificação apresentada nos próximos itens. As superfícies usinadas devem ter uma rugosidade de 1,25 μ m. O estudo será feito para fabricar 45 peças. O desenho da peça é apresentado na Figura 5.12, onde indica-se um corte e dois detalhes que representam detalhes geométricos de grande importância para a fabricação da peça. Todas as medidas apresentadas no desenho estão em milímetros.

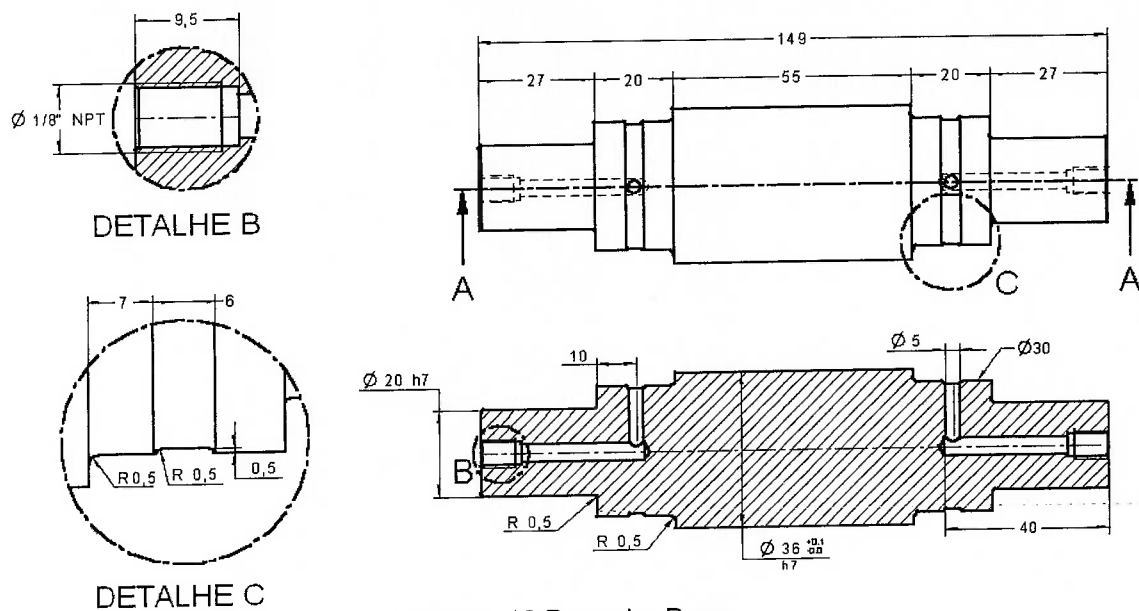


Figura 5.12 Desenho Peça

Na Figura 5.13 representa-se a peça subdividida em *Features*³ que correspondem às superfícies com características diferentes e que precisam de operações ou máquinas diferentes para serem usinadas. A partir delas se estabelecem os métodos e operações preliminares de usinagem que dão origem ao seqüenciamento de operações.

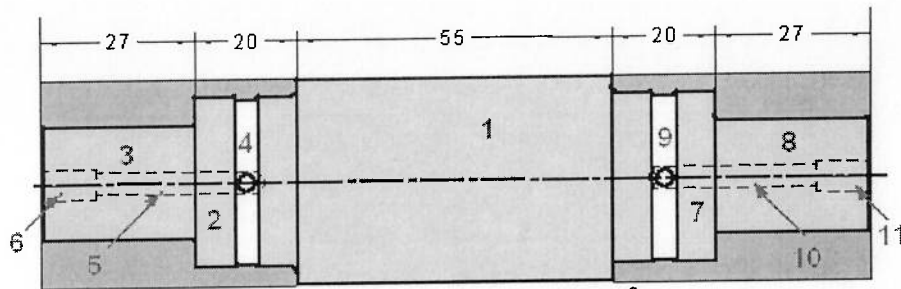


Figura 5.13 Análise das *Features*³

Na Tabela 5.11 apresenta-se, para cada superfície, as dimensões, tolerâncias e condições de usinagem específicas das mesmas. Os registros desta tabela permitem ao planejador obter as informações necessárias para introduzir no banco de dados as informações sobre a peça possibilitando estabelecer a Matriz de Anterioridades e o seqüenciamento de operações.

Tabela 5.11 Especificações para cada superfície da peça a ser usinada

Features	Especificações	Máquina	Ferramenta*	Operações necessárias		
				Acabamento	1/2Acabamento	_Desbaste_
1	$\phi = 36$ H7; L=55	Torno	Pastilha	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	$\phi = 30$; L=20	Torno	Pastilha		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	$\phi = 20$ H7; L=27	Torno	Pastilha		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Canal $\phi = 29$; L= 6	Torno	Pastilha		<input checked="" type="checkbox"/>	
5	Furo $\phi = 5$; L= 40	Torno	Pastilha			<input checked="" type="checkbox"/>
6	Furo $\phi = 7,937$ L=9,5	Torno	Pastilha			<input checked="" type="checkbox"/>
7	$\phi = 30$; L=20	Torno	Pastilha		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	$\phi = 20$ H7; L=27	Torno	Pastilha	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Canal $\phi = 29$; L= 6	Torno	Pastilha		<input checked="" type="checkbox"/>	
10	Furo $\phi = 5$; L= 40	Torno	Broca			<input checked="" type="checkbox"/>
11	Furo $\phi = 7,93$ L=9,5	Torn	Broca			<input checked="" type="checkbox"/>
12	Furo $\phi = 5$ L=15	Furadeira	Broca			<input checked="" type="checkbox"/>
13	Furo $\phi = 5$ L=15	Furadeira	Broca			<input checked="" type="checkbox"/>

*As especificações para a pastilha e para a broca podem ser encontradas em Wang [56 WANG 2001] e no item 5.1.1.1 desta dissertação, respectivamente.

Na Tabela 5.12 é apresentada a seqüência de operação que resulta da aplicação dos algoritmos e dos modelos apresentados no item 4.4, e os tempos de usinagem estimados para cada operação.

Tabela 5.12 Tempos de operação na fabricação do eixo

Operação	Tipo de operação	Features de trabalho ¹	Dimensões finais após da operação [mm]	Condições			Tempo de Usinagem [min]	
				Avanço [mm/rev]	Profundidade [mm]	Velocidade [mm/min]		
1	Furar	Desbaste	12	$\phi = 5$	0,025	15	62831,84	0,15
2	Furar	Desbaste	13	$\phi = 5$	0,025	15	62831,84	0,15
3	Tornear	Desbaste	1,2,3	$\phi = 36,3$ L=100	0,15	1	125350*	0,604860
4	Tornear	Desbaste	2, 3	$\phi = 30,3$ L=45	0,15	1	125350**	0,730609
5	Tornear	Desbaste	3	$\phi = 20,3$ L=27	0,15	1	125350*	0,549653
6	Tornear	½ Acabamento	1	$\phi = 36,1$ L=55	0,1	0,1	208920*	0,298566
7	Tornear	½ Acabamento	2	$\phi = 30$ L=20	0,1	0,15	208920*	0,090224
8	Tornear	½ Acabamento	3	$\phi = 20,1$ L=27	0,1	0,1	208920*	0,081607
9	Tornear	Acabamento	1	$\phi = 36$ L=55	0,08	0,05	313370*	0,248123
10	Tornear	Acabamento	3	$\phi = 20$ L= 27	0,08	0,05	313370*	0,06767
11	Tornear	Acabamento	4	$\phi = 29$ L= 6	0,08	0,05	313370*	0,021805
12	Furar	Desbaste	5	$\phi = 5$	0,025	40	62831,84	0,4
13	Furar	½ Acabamento	6	$\phi = 5$	0,025	9,5	62831,84	0,095
14	Tornear	Desbaste	7,8	$\phi = 30,3$ L=45	0,15	1	125350*	1,004304
15	Tornear	Desbaste	8	$\phi = 20,3$ L=27	0,15	1	125350*	0,730609
16	Tornear	½ Acabamento	7	$\phi = 30$ L=20	0,1	0,15	208920*	0,090224
17	Tornear	½ Acabamento	8	$\phi = 20,1$ L=27	0,1	0,1	208920*	0,081607
18	Tornear	Acabamento	8	$\phi = 20$ L= 27	0,08	0,05	313370*	0,06767
19	Tornear	Acabamento	9	$\phi = 29$ L= 6	0,08	0,05	313370*	0,021805
20	Furar	Desbaste	10	$\phi = 5$	100	40	62831,84	0,4
21	Furar	½ Acabamento	11	$\phi = 7,937$	100	9,5	62831,84	0,095

*Dados de literatura para demonstrar o algoritmo, [⁵⁶WANG 2001]

Os tempos de usinagem para as operações de torneamento e para as operações de furação são estimados pela eq. (5.1) e pela eq. (5.2) respectivamente, [⁹GROOVER 1996]:

$$T_m = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{v \cdot f} \quad (5.1)$$

$$T_m = \frac{d}{N \cdot f} \quad (5.2)$$

onde T_m é o tempo de usinagem, D é o diâmetro da *feature* a ser torneada, L é o comprimento das *features* a ser torneadas, v é velocidade de corte e f é o avanço, d é a profundidade do furo e N é a rotação da máquina.

Para o cálculo da confiabilidade, devido a algumas limitações nos dados disponíveis na literatura e nos dados obtidos experimentalmente, são adotadas as seguintes hipóteses:

- Caso as operações apresentarem as mesmas condições de usinagem, a mesma ferramenta, a mesma máquina e realizadas seqüencialmente, estas são agrupadas no mesmo bloco, já que para efeitos do cálculo da confiabilidade estas operações podem ser representadas como uma operação com um tempo de usinagem igual à soma dos tempos de usinagem das mesmas, tendo associada uma ferramenta. Assim, por exemplo, o bloco torneamento de desbaste agrupa as operações No. 3, 4, e 5, utilizando a ferramenta denominada como Ferramenta # 2
- A ferramentas utilizadas para as operações de acabamento, semiacabamento e desbaste são diferentes.
- As máquinas envolvidas no processo (tornos e furadeiras) têm igual taxa de falha.
- O tempo médio entre falhas dos operadores envolvidos no processo é muito maior que o tempo de fabricação das peças, supondo-se que durante o tempo de fabricação das peças a confiabilidade do operador é igual a 1.

A Figura 5.14 apresenta a representação em diagrama de blocos para as operações envolvidas no processo de fabricação do eixo, tal como foi indicado no item 4.4, sendo a descrição das mesmas apresentadas na Tabela 5.13.



Figura 5.14 Diagrama da seqüência de operações para a fabricação do eixo

A confiabilidade das operações de usinagem do eixo foi calculada aplicando a eq. (4.14).

Segundo o apresentado no item 4.3.1.2, a confiabilidade de um equipamento de manufatura pode ser modelada como uma distribuição exponencial. A confiabilidade das máquinas utilizadas para a simulação do processo de usinagem do eixo é modeladas como uma distribuição exponencial, onde a falha é esperada a cada 43603,8 minutos [⁵¹WANG 1999].

Segundo indicado no item 4.3.1.3 a confiabilidade da ferramenta deve ser representada por uma função de distribuição de probabilidade crescente. As ferramentas para o torneamento são modeladas por uma distribuição Lognormal, com os parâmetros encontrados experimentalmente por Wang [⁵⁶WANG 2001], e a confiabilidade das ferramentas para a furação são modeladas por uma distribuição Lognormal, com os parâmetros apresentados nesta dissertação, no item 5.1.1.3. Na Tabela 5.13 são apresentadas as expressões utilizadas para o cálculo da confiabilidade no processo de fabricação do eixo e o tempo necessário para a execução de cada operação, sendo que a somatória dos mesmos indica o tempo de fabricação de uma peça.

A Figura 5.15 mostra o comportamento dos valores de confiabilidade, em função do número de peças produzidas para as operações envolvidas no processo de fabricação. Estas confiabilidades foram calculadas empregando as expressões apresentadas na eq. 4.21. Em termos gerais para este caso, as operações que mais demoram em apresentar decréscimo de confiabilidade em começar este decréscimo são aquelas para as quais o tempo de processamento é reduzido.

Tabela 5.13 Cálculo da confiabilidade das operações e do processo por peça fabricada

OPERAÇÃO	FERRAMENTA	CONFIABILIDADE POR PEÇA	TEMPO DE USINAGEM POR PEÇA
Furação	Ferramenta # 1	$R_1(t_1) = e^{-t_1/43603,8} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln(t_1) - \ln(10,08)}{0,0599} \right) \right]$	0,2
Torneamento desbaste 1	Ferramenta # 1	$R_2(t_2) = e^{-t_2/43603,8} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln(t_2) - \ln(79,49)}{0,3345} \right) \right]$	1,88512
Torneamento semiacab. 1	Ferramenta # 3	$R_3(t_3) = e^{-t_3/43603,8} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln(t_3) - \ln(16,21)}{0,3491} \right) \right]$	0,4704
Torneamento acabam. 1	Ferramenta # 4	$R_4(t_4) = e^{-t_4/43603,8} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln(t_4) - \ln(4,66)}{0,3104} \right) \right]$	0,3376
Furação Torno 1	Ferramenta # 5	$R_5(t_5) = e^{-t_5/43603,8} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln(t_5) - \ln(10,08)}{0,0599} \right) \right]$	0,495
Torneamento desbaste 2	Ferramenta # 6	$R_6(t_6) = e^{-t_6/43603,8} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln(t_6) - \ln(79,49)}{0,3345} \right) \right]$	1,73491
Torneamento semiacab. 2	Ferramenta # 7	$R_7(t_7) = e^{-t_7/43603,8} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln(t_7) - \ln(16,21)}{0,3491} \right) \right]$	0,17183
Torneamento acabam. 2	Ferramenta # 8	$R_8(t_8) = e^{-t_8/43603,8} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln(t_8) - \ln(4,66)}{0,3104} \right) \right]$	0,08948
Furação Torno 2	Ferramenta # 9	$R_9(t_9) = e^{-t_9/43603,8} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln(t_9) - \ln(10,08)}{0,0599} \right) \right]$	0,495
TOTAL		$R_{\text{Processo}}(t) = R_1(t_1) \cdot R_2(t_2) \cdot R_3(t_3) \cdot R_4(t_4) \cdot R_5(t_5) \cdot R_6(t_6) \cdot R_7(t_7) \cdot R_8(t_8) \cdot R_9(t_9)$	5,87934

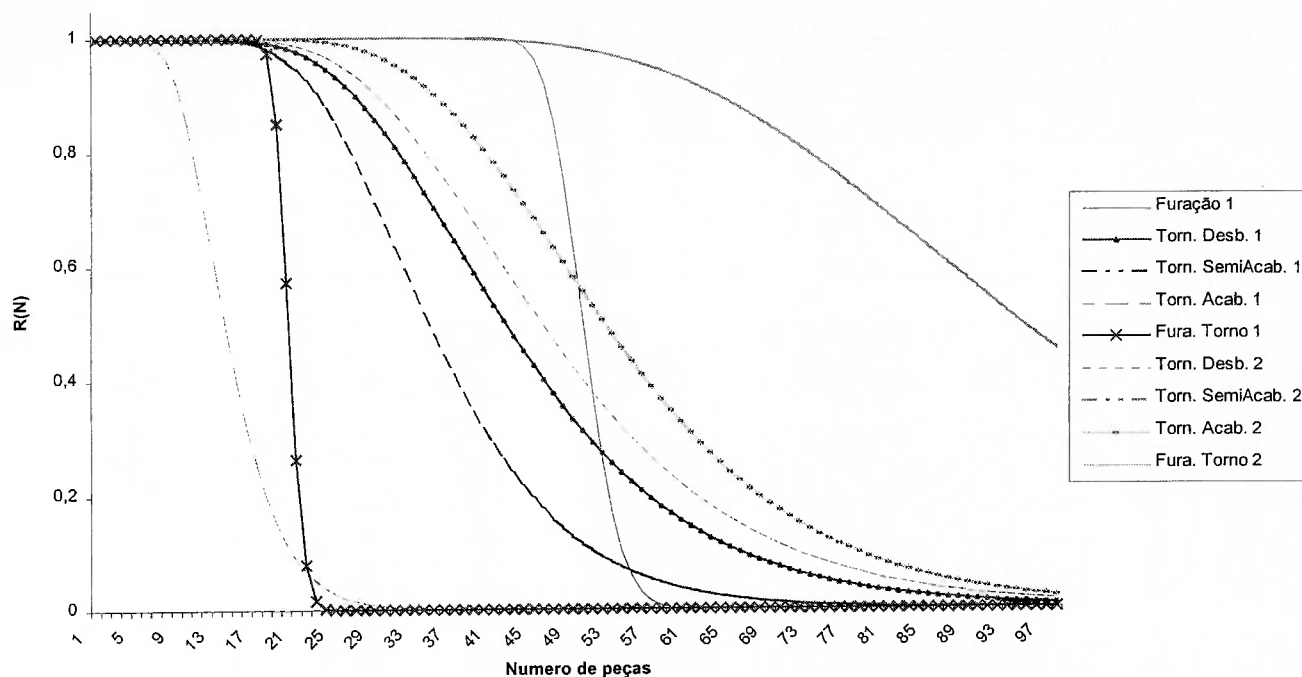


Figura 5.15 Confiabilidade das operações do processo de fabricação do eixo

Estas informações permitem calcular a confiabilidade do processo e aplicar o algoritmo apresentado na Figura 4.16. Para estabelecer o tempo de troca para as ferramentas utilizadas na produção da peça, se calcula a confiabilidade do processo após da fabricação de cada peça, e avalia-se a confiabilidade do mesmo em relação ao valor mínimo requerido, que neste caso é fixado em 80%. Na Tabela 5.14 são apresentados os valores de confiabilidade para o processo, até a fabricação da peça 11, instante em que a confiabilidade do processo atingiu o valor de 76,838%, valor que é inferior à confiabilidade mínima requerida. Este valor indica que após da fabricação da peça 10 deve-se verificar qual das 9 ferramentas é a ferramenta que apresenta maior taxa de falha ou menor confiabilidade neste instante. Pode-se mostrar que a ferramenta que apresenta maior taxa de falha, quando fabricadas 10 peças, é a Ferramenta # 4, utilizada para o torneamento de acabamento, sendo esta a ferramenta crítica e por isto deve ser trocada.

Tabela 5.14 Confiabilidade para cada operação e do processo para fabricar 12 peças

# de peças	Fura.	Torn. Desb.	Torn. ^{1/2} Acab.	Torn. Acab.	Fura. Torno	Torn. Desb.	Torn. ^{1/2} Acab.	Torn. Acab.	Fura. Torno	Confiabilidade do processo
1	1,00000	0,99996	0,99999	0,99999	0,99999	0,99996	1,00000	1,00000	0,99999	0,99987
2	0,99999	0,99991	0,99998	0,99998	0,99998	0,99992	0,99999	1,00000	0,99998	0,99973
3	0,99999	0,99987	0,99997	0,99998	0,99997	0,99988	0,99999	0,99999	0,99997	0,99960
4	0,99998	0,99983	0,99996	0,99994	0,99995	0,99984	0,99998	0,99999	0,99995	0,99943
5	0,99998	0,99978	0,99995	0,99944	0,99994	0,99980	0,99998	0,99999	0,99994	0,99880
6	0,99997	0,99974	0,99994	0,99639	0,99993	0,99976	0,99998	0,99999	0,99993	0,99563
7	0,99997	0,99970	0,99992	0,98583	0,99992	0,99972	0,99997	0,99999	0,99992	0,98495
8	0,99996	0,99965	0,99991	0,96105	0,99991	0,99968	0,99997	0,99998	0,99991	0,96007
9	0,99996	0,99961	0,99990	0,91680	0,99990	0,99964	0,99996	0,99998	0,99990	0,91574
10	0,99995	0,99955	0,99986	0,85188	0,99989	0,99960	0,99996	0,99998	0,99989	0,85075
11	0,99995	0,99947	0,99976	0,76961	0,99988	0,99954	0,99996	0,99998	0,99988	0,76838
12	0,99994	0,99932	0,99953	0,67626	0,99986	0,99946	0,99995	0,99997	0,99986	0,67485

Após da troca da ferramenta é recalculada a confiabilidade do processo, sendo estes valores apresentados na Tabela 5.15, onde observa-se que após da troca da ferramenta a confiabilidade para o processo de fabricação da peça 10 é de 99,84%, observando-se o efeito positivo da troca desta ferramenta sobre o processo. Como o valor da confiabilidade obtida é superior que o valor da confiabilidade mínima requerida, não requerendo troca de outras ferramentas, pode-se continuar com processo até obter novamente uma confiabilidade do processo menor do 80%, que neste caso se apresenta após da fabricação da peça 17, onde as ferramentas críticas correspondem às brocas do processo de furação no torno, Ferramentas #s 5 e 9, como é apresentado na Tabela 5.15. Após da troca recalcula-se a confiabilidade do processo e continua-se da mesma forma até completar a produção das 45 peças, que é considerado o lote de fabricação.

Tabela 5.15 Confiabilidade para cada operação e do processo após de troca da ferramenta 4 na peça 10

# de peças	Fura.	Torn. Desb.	Torn. ^{1/2} Acab.	Torn. Acab.	Fura. Torno	Torn. Desb.	Torn. ^{1/2} Acab.	Torn. Acab.	Fura. Torno	Confiabilidade do processo
10	0,99995	0,99947	0,99976	0,99999	0,99988	0,99954	0,99996	0,99998	0,99988	0,99840
11	0,99994	0,99932	0,99953	0,99998	0,99986	0,99946	0,99995	0,99997	0,99986	0,99790
12	0,99994	0,99906	0,99902	0,99998	0,99985	0,99933	0,99995	0,99997	0,99985	0,99695
13	0,99994	0,99860	0,99800	0,99994	0,99984	0,99910	0,99994	0,99996	0,99984	0,99517
14	0,99993	0,99782	0,99616	0,99944	0,99983	0,99871	0,99994	0,99994	0,99983	0,99162
15	0,99993	0,99656	0,99311	0,99639	0,99977	0,99807	0,99994	0,99990	0,99977	0,98353
16	0,99992	0,99464	0,98841	0,98583	0,99791	0,99707	0,99993	0,99981	0,99791	0,96199
17	0,99992	0,99186	0,98161	0,96105	0,97363	0,99557	0,99993	0,99966	0,97363	0,88263
18	0,99991	0,98800	0,97226	0,91680	0,85011	0,99341	0,99993	0,99939	0,85011	0,63177

Na Figura 5.16 apresenta-se a confiabilidade do processo realizando as 45 peças, com as trocas necessárias para manter a confiabilidade dentro dos limites desejados (80% - 100%). Neste gráfico se indicam as ferramentas a serem trocadas em função das peças produzidas. Observa-se que no decorrer do processo as ferramentas vão se desgastando e começam afetar a confiabilidade do mesmo, sendo positivo o efeito das trocas das ferramentas, permitindo manter a confiabilidade do processo acima da confiabilidade mínima requerida. É importante perceber que fazer a trocas de ferramentas entre a produção de um número de peças reduzido, pode afetar a produtividade e a eficiência do processo, por isto deve-se avaliar a possibilidade de agrupar as trocas sob o ponto de vista de custos, tentando não afetar significativamente a confiabilidade do processo.

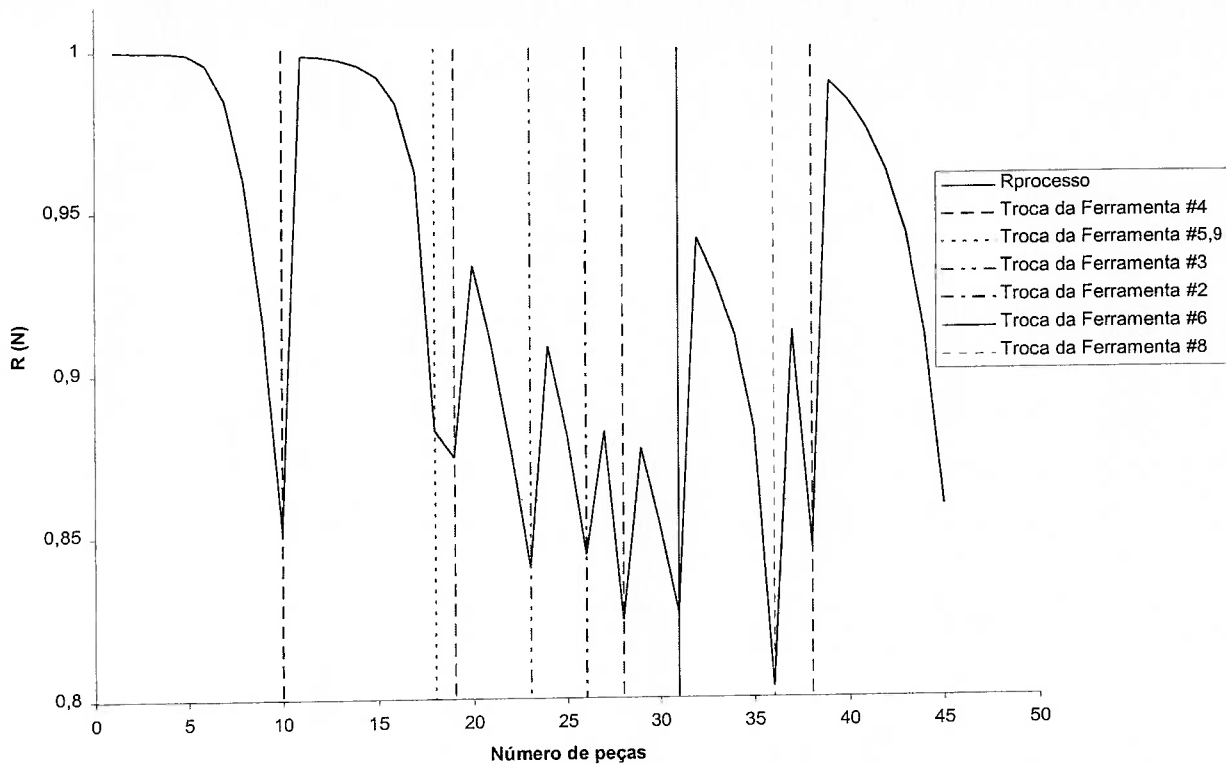


Figura 5.16 Confiabilidade do processo após de trocas sucessivas da ferramenta

Tendo em conta o anterior, quando se apresentam trocas em intervalos, que o planejador considere pouco eficientes para o processo de fabricação, deve-se estudar o que acontece com a confiabilidade do processo no caso de utilizar a ferramenta crítica no estado desgastado até a próxima troca ou então trocar antes a seguinte ferramenta crítica, embora esta ainda não tenha atingido os níveis de confiabilidade para que seja considerada como ferramenta crítica.

Neste caso a confiabilidade das operações, para a fabricação do eixo, decresce rapidamente, então não seria viável considerar a possibilidade de esperar que a ferramenta crítica produza algumas peças após da sua designação, já que a confiabilidade do processo chegaria a níveis inadmissíveis. Um exemplo desta observação é indicado na Tabela 5.14 onde verifica-se o valor para a confiabilidade do processo, no caso de não trocar a ferramenta # 4 para a fabricação da peça 12 chega a ser de 67%. Isto é causado pelo decréscimo súbito da confiabilidade da Ferramenta # 4, como indicado na Figura 4.6, refletindo diretamente na confiabilidade da

operação e, por conseguinte na confiabilidade processo. Por esta razão a decisão mais recomendável, para casos como este, seria antecipar a troca da próxima ferramenta crítica, uma vez que não se incorra em custos elevados.

Na seqüência deste texto apresenta-se uma análise para a antecipar ou não a troca de uma ferramenta, visando os custos de sub-utilizar a ferramenta, do ponto de vista da confiabilidade. É importante esclarecer que dentro do chão de fábrica real deve-se também fazer outras considerações desde associados aos custos das ferramentas e custo de afiação, entre outros.

Comparar a confiabilidade da operação, da ferramenta analisada, no instante de troca real (t_R) quando não são agrupadas as trocas posteriores, e no instante de troca antecipada (t_A), é fator de decisão, já que se estas foram muito diferentes a antecipação da troca da ferramenta não seria recomendável. O segundo fator decisivo está relacionado com a freqüência de troca da ferramenta, já que antecipar excessivamente a troca de uma ferramenta que tem uma taxa de falha alta seria diminuir, ainda mais, seu próximo intervalo de troca.

Para aplicação desta análise nesta dissertação, considera-se que a Ferramenta # 4 é a ferramenta que apresenta um valor de taxa de falha maior, como indicado na Figura 4.7, então deve-se analisar a possibilidade de agrupar as trocas de ferramentas no mesmo instante de trocar a Ferramenta # 4 ou num instante próximo, estes instantes são após da fabricação das peça 10, 19, 28 e 38. Na Tabela 5.16 indica-se a comparação entre a confiabilidade da operação no instante de troca real e no instante de troca antecipada. Observa-se que a confiabilidade para a ferramenta # 2 no instante de troca antecipada e no instante de troca real tem uma diferença pequena, o que significaria que o grau de sub-utilização com a troca antecipada é reduzido. No caso das trocas antecipadas para as ferramentas #s 4 e 6 a diferença entre as duas confiabilidades é maior, então para decidir antecipar a troca deve-se tomar considerações de custos e produtividade entre outros. Neste caso será suposto que será aprovada a antecipação da

troca da ferramenta, e os resultados da confiabilidade do processo são apresentados na Figura 5.17.

Tabela 5.16 Comparação entre a confiabilidade da operação, no instante de troca real e no instante de troca antecipado

No. DE PEÇA	# da ferramenta de troca antecipada	$R_{\text{operação}}(t_R)$	$R_{\text{operação}}(t_A)$
18	4	$R_{\text{operação}}(19)= 0,851$	$R_{\text{operação}}(18)= 0,916$
24	2	$R_{\text{operação}}(26)=0,898$	$R_{\text{operação}}(24)=0,931$
28	6	$R_{\text{operação}}(31)=0,867$	$R_{\text{operação}}(28)=0,919$
36	4	$R_{\text{operação}}(37)= 0,851$	$R_{\text{operação}}(36)= 0,916$

Agrupando as trocas das ferramentas conforme os critérios anteriormente mencionados pode-se diminuir o número de paradas para troca de ferramenta de oito para cinco, o que faria mais eficiente o processo.

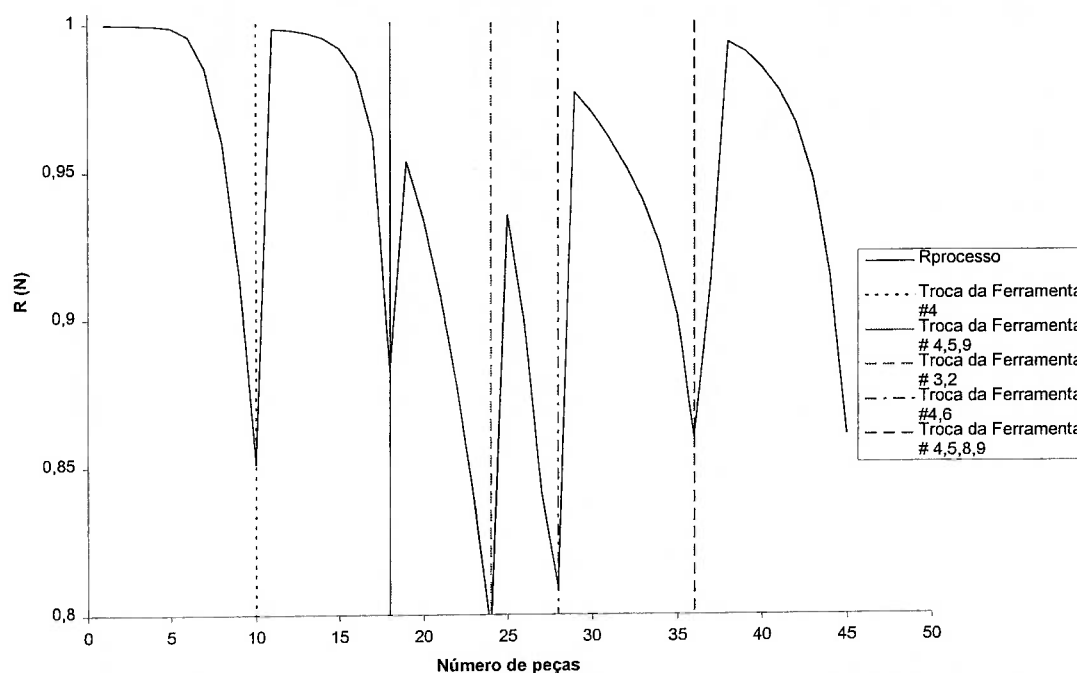


Figura 5.17 Confiabilidade do processo após de trocas sucessivas agrupadas das ferramentas

A ferramenta # 4 afeta significativamente o decréscimo na confiabilidade do processo, associado a isto existe dois fatores: sua alta taxa de falha e seu tempo de processamento maior, a combinação destes dois fatores ocasiona que o tempo de troca para esta ferramenta seja o menor, quando comparadas com as outras ferramentas, o que diminui o intervalo de

substituição da mesma. Deste modo, a aplicação do algoritmo de troca da ferramenta pode dar alarmes sobre a falta de capacidade de algumas ferramentas e dependendo das condições do processo, pode-se tomar medidas e fazer ajustes que aumentem o intervalo de troca da ferramenta, como por exemplo, mudar a ferramenta # 4 para uma ferramenta, que para as condições de torneamento ou utilizadas apresente uma menor taxa de falha.

A aplicação do algoritmo de troca de ferramenta permite manter a confiabilidade do processo em limites aceitáveis. Caso a ferramenta não seja trocada, a operação, e conseqüentemente o processo, terá uma confiabilidade reduzida a valores inferiores ao mínimo requerido podendo aumentar a produção de peças defeituosas.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A confiabilidade de um processo de fabricação pode ser entendida como a capacidade do mesmo produzir peças de acordo com uma especificação dimensional e/ou geométrica. Neste estudo procurou-se analisar, de uma forma qualitativa, o processo de furação, apresentando-se os fundamentos teóricos do mesmo e se estabelecendo as falhas do processo, o que permite estimar o desempenho tanto do processo como dos elementos que intervêm no mesmo, principalmente a confiabilidade da ferramenta.

Constatou-se a importância do uso de uma técnica que permita estabelecer um modelo para a confiabilidade num processo, visando melhorá-lo progressivamente mediante o uso adequado do modelo estabelecido.

Verificou-se que embora existam falhas no processo, associadas com falhas da própria máquina operatriz e com falhas do operador, é o desgaste da ferramenta que vai ser determinante na confiabilidade do mesmo, já que este fenômeno é progressivo é inevitável, apresentando taxas de falha crescentes no tempo.

A análise da taxa de falha do processo fornece informações mais relevantes sobre o mesmo. Inicialmente espera-se uma taxa de falhas decrescente, sendo a mesma associada com a ocorrência de erros no próprio planejamento dos processos de usinagem, ou mesmo na seleção ou instalação da ferramenta. Estas falhas são rapidamente corrigidas, e produzem poucas peças defeituosas. Sanados estes eventuais problemas, a taxa de falha do processo passa a ser constante, e esta associada com falhas aleatórias da máquina, principalmente vibrações, ou com variabilidade do material base da peça. Estas falhas provocam a produção de peças defeituosas, com uma porcentagem de ocorrência de defeitos praticamente

constante. Em função do desgaste da ferramenta, há um aumento da taxa de falha do processo, caracterizada pelo aumento da produção de peças defeituosas. Este aumento da taxa de falhas indica a necessidade de substituição da ferramenta.

Determinou-se a distribuição densidade de probabilidade que representa a variação do desgaste de flanco para condições específicas de operação de uma broca de aço rápido, encontrando que a distribuição que melhor modela este fenômeno é a distribuição Lognormal. Fixando-se um valor máximo admissível para o desgaste de 120 μm , tem-se que o tempo médio de operação da broca associado a este valor é 10,02 minutos.

Sugere-se que o melhor critério para seleção do tempo de troca da ferramenta envolva a definição de uma confiabilidade associada ao processo de desgaste desta ferramenta, sendo que esta confiabilidade representa a probabilidade da ferramenta atingir um certo nível de desgaste em um tempo de uso específico. Este tempo de uso, que está associado a uma probabilidade de falha definida pelo planejador do processo, é o tempo recomendado para se executar a troca da ferramenta, a fim de manter a confiabilidade do processo, é tomado em função da porcentagem de peças defeituosas produzidas pelo mesmo. Nesta situação, apresenta-se um algoritmo que permite estabelecer o tempo de substituição da ferramenta de modo que a confiabilidade do processo seja superior à confiabilidade mínima requerida por este, e conseqüentemente seja evitado o aumento do número de peças defeituosas. Este tempo de substituição da ferramenta é determinado em função do número de peças máximo de peças que podem ser produzidas antes que as ferramentas que possuam a mais alta taxa de falha devam ser trocadas. A demonstração de uso deste algoritmo é executada através da análise de um processo de usinagem onde intervêm operações de torneamento e de furação, e constatou-se a sua eficiência, tanto por ser um método sistemático para garantir a confiabilidade do processo quanto por dar alarmes sobre a falta de capacidade de algumas ferramentas em atender os requisitos do processo.

Ressalta-se que o tempo de substituição da ferramenta deve ser inferior ao tempo médio para a mesma apresentar um desgaste com uma magnitude pré-definida. Tal fato implica na possibilidade de aumento da produção de peças defeituosas, mesmo antes de a ferramenta atingir o tempo médio de vida acima definido.

O assunto abordado neste trabalho é bastante amplo, mas os resultados aqui alcançados permitem concluir que o emprego dos conceitos de confiabilidade permitem analisar processos de manufatura e obter resultados que ajudem a tomar decisões para planejar processos com altos níveis de confiabilidade e aumentando a probabilidade de obtenção de produtos conforme aos requisitos de projeto.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Este trabalho pode ser ampliado, determinando as curvas de desgaste de brocas para diversas velocidades de corte os quais aliados com os resultados apresentados nesta dissertação podem ser utilizados para determinar a relação existente entre a velocidade de corte e o tempo de vida da ferramenta.

Em trabalhos futuros pode-se medir o desgaste por métodos indiretos como análise de vibrações e medição de rugosidade, encontrando a relação entre estes parâmetros e o desgaste de flanco, para obter medidas do desgaste que possam ter maior precisão e poder comparar estes resultados com os aqui obtidos.

As metodologias aqui apresentadas podem ser utilizadas para desenvolver sistemas inteligentes que integrem os conceitos de confiabilidade no planejamento dos processos ou integrar estes conceitos aos sistemas CAPP permitindo uma aplicação sistemática e generalizada para o planejamento dos processos baseado em confiabilidade.

Estender as técnicas e metodologias aqui estudadas para outros processos de usinagem como outros processos de fabricação mecânica,

pode subsidiar a avaliação de confiabilidade de processos de manufatura, mais complexos utilizados na indústria de manufatura.

A aplicação à indústrias da análise feita neste trabalho, constitui-se em uma sugestão para trabalhos futuros, pois a coleta de dados em campo, permitirá uma aplicação mais ampla dos conceitos tratados neste trabalho e estabelecendo o efeito real do algoritmo na otimização da processo produtivo sob o ponto de vista da manutenção de uma confiabilidade.

CAPÍTULO 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ [CAULCUTT 1995] Caulcutt R. **Achieving Quality Improvement**, Campan and Hall, p. 428, 1995.
- ² [STECKE 1986] STECKE K.; **Flexible Manufacturing Systems :Operations Research Models and Applications**, Amsterdan : Elsevier, p. 592, 1986
- ³ [SCOTT 1998] Scott M.; Meredith J. **Operations Management: a process approach with spreadsheets**, New York: Wiley, p. 828 1998.
- ⁴ [NORRIE 1995] Norrie D.; Gu P., **Intelliegent Manufacturing Planning**, London: Chapman-Hall, 1995
- ⁵ [GAYRETLI 1999] Gayretli A.; Abdalla S. An object-oriented constraints-based system for concurrent product development. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing** No 15, p. 133 – 144, 1999
- ⁶ [MEEKER 1995] Meeker W.; Hamada M. Statistical tools for the rapid development & evaluation of high-reliability products, **IEEE Transactions on Reliability**, v. 44, No 2, p. 187 – 198, 1995
- ⁷ [MAROPOULOS 1995] Maropoulos P. Review of research in tooling technology, process modeling and process planning, **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v. 8, No 1, p. 13 – 20, 1995
- ⁸ [LEEM 1997] Leem C. A practical monitoring strategy for machining process control, **International Journal of Production Research**, v. 35, No 4, p. 1051 – 1066, 1997
- ⁹ [GROOVER 1996] Groover M. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. London: Prentice-Hall, 1996
- ¹⁰ [DOYLE 1985] DOYLE L., **Manufacturing Processes and Materials for Engineers**, Prestice-Hall, p 1442, 1985.
- ¹¹ [RISCO 1989] Risso C., **Tecnologia Mecânica**, São Paulo: Edusp, 1989.
- ¹² [KNOWLESA 2002] Knowlesa D.; Thomasa C.; Keenb D.; Chen Q. In service embrittlement of cast 20Cr32Ni1Nb components usedin steam reformer applications, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 1979, No 3, p. 181-189, 2002.

-
- ¹³ [ASTAKHOV 1996] Astakhov v.; Shevts S.; Osman M. Chip structure classification based on mechanics of its formation, **Journal of Materials Processing Technology**, No. 71, p. 247 – 257, 1997
- ¹⁴ [BAYOUMI 1996] Bayoumi A.; Xie J. A study on shear banding in chip formation of orthogonal machining, **International Journal Machine Tools Manufacture**, v. 36 No 10, p. 835 – 847, 1996
- ¹⁵ [FANG 1996] Fang X.; Fei J.; Jaeahir I. A hybrid algorithm for predicting chip form/chip breakability in machining, **International Journal Machine Tools Manufacture**. v. 36 No 10, p. 1093 – 1107, 1996
- ¹⁶ [FANG 1996] Fang X.; Fei J.; Jaeahir I. A hybrid algorithm for predicting chip form/chip breakability in machining, **International Journal Machine Tools Manufacture**. v. 36 No 10, p. 1093 – 1107, 1996
- ¹⁷ [FERRARESI 1995] Ferraresi D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, São Paulo: Edgard Blucher, p. 472 1995.
- ¹⁸ [DEVRIES 1992] Devries W., **Analysis of Material Removal Processes**, New York: Springer-Verlag, p. 254, 1992
- ¹⁹ [SHEN 1997] Shen Q.; Lee T.; Lau W., Wear characteristics and flank wear model of the main cutting edges in spade drilling of ductile metals. **Wear** No 208, p. 73 – 80, 1997.
- ²⁰ [WARDANY 1997] Wardany T.; Elbestawi M., Prediction of tool failure rate in turning hardened steels, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, No13, p. 1 – 16, 1997.
- ²¹ [WANG 2001] Wang K.; Lin W.; Hsu F., A new approach for determining the reliability of a cutting tool, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, No 17, p. 705 – 709, 2001
- ²² [DAMASCENO 2000] Damasceno F. **Processos de Fabricação**, Porto Alegre: PUCRS, p. 66, 2002
- ²³ [DINIZ 2000] Diniz A.; Marcondes F.; Coppini N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, Artliber, p. 248, 2000

-
- ²⁴ [KALPAKJIAN 2001] Kalpakjian S.; Schmid S.; **Manufacturing Engineering and Technology**, Prentice Hall, p. 1148, 2001
- ²⁵ [SANDVIK 2002] S.A. SANDVIK, **Modern Metal Cutting**. 2002
- ²⁶ [HAMBLLI R 2002] Hambli R., Influence of Material Properties Variation on Damage Evolution During Extrusion Processes, **The international Journal of Advanced Manufacturing Technology**, No 20, p. 676 – 682, 2002
- ²⁷ [DIETER 1988] Dieter G., **Mechanical Metallurgy**, New York: McGraw-Hill, 1988
- ²⁸ [BRESCIANI 1991] Brescini E.; Zavaglia C.; Button S., **Conformação Plástica dos Metais**, Campinas: Unicamp, 1991
- ²⁹ [GROVER 1991] Grover P., QFD not just a tool but a way of quality management, **International Journal Production Economics**, No 69, p. 151 – 159, 2001
- ³⁰ [SCHIPPERS 1998] Schippers W., An integrated approach to process control, **International Journal of Production Economics**, No 69, p. 1993 – 105, 1998
- ³¹ [RUNGTUSANATHAM 2001] Rungtusanatham M., Beyond improved quality: the motivational effects of statistical process control, **Journal of Operations Management**, No 19, p. 653 – 673, 2001.
- ³² [KANG 2000] Kang, B., Integrated machine learning approaches for complementing statistical process control procedure, **Decision Support Systems**, No 29, p. 59 – 72, 2000
- ³³ [AKAO 1996] Akao Y., **Introdução ao Desdobramento da Qualidade**, Belo Horizonte : Ufmg / Fundação Christiano Ottoni, 1996
- ³⁴ [RAJALA 1997] Rajala M.; Savalainen T.; Jagdev H., Exploration methods in business process re-engineering, **Computer in industry**, No 33, p. 367 – 385, 1997
- ³⁵ [TEMPONI 1999] Temponi C., House of quality: A fuzzy logic based requirements analysis, **European Journal of Operational Research**, No 117, p. 340 – 354, 1999
- ³⁶ [TAGUCHI 1989] Taguchi G., **Quality Engineering in Production Systems**, New York: McGraw-Hill, 1989
- ³⁷ [DESSOUKY 2002] Dessouky Y.; Bayer A, A simulation and design of experiments modeling approach to minimize building maintenance costs, **Computers and Industrial Engineering**, No 43, p. 423 – 436, 2002

-
- ³⁸ [IRANTO 1998] Irianto D., Loss to society derived from utility and cost function, **Omega International Journal of Management Science**, v. 26, No 5, p. 671 – 677, 1998
- ³⁹ [WANG 2001] Wang J.; Feng C., An optimization model for concurrent selection of tolerances, **Computers and Industrial Engineering**, No 43, p. 423 – 436, 2001
- ⁴⁰ [RAMAKUMAR 1993] Ramakumar R., **Engineering Reliability**, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1993
- ⁴¹ [LEWIS 1987] Lewis E., **Introduction to Reliability Engineering**, New York: Wiley, 1987.
- ⁴² [CARDOSO 2000] Cardoso I., **Elaboração de Políticas de Manutenção: Uma Abordagem Voltada à Análise De Confiabilidade**. Dissertação de mestrado. 2000. p. 189. Escola Politécnica Universidade São Paulo. Sao Paulo
- ⁴³ [FMEA/FMECA 2003} **Standard Profile: Provides The Most Common Options Found in the Major FMEA/FMECA Guidelines**. ReliaSoft. 2003
- ⁴⁴ [KHODABANDEHLO 1996] Khodabandehlo K., Analyses of robot systems using fault an event trees, **Reliability Engineering and System Safety**, v. 53, p. 247-264, 1996.
- ⁴⁵ [GRANT 1996] Grant I.; Coombs C., **Handbook of Reliability Engineering and Management**, New York: McGraw Hill, 1996
- ⁴⁶ [HALEVI 1995] Halevi G.; Weill R., **Principles of Planning**, London: Campman & Hall, 1995.
- ⁴⁷ [ZHANG 1995] Zhang H; Smith M. A progressive approach for the integration of process planning and scheduling, **IEEE.Transactions**, v. 27, p. 456-464, 1995.
- ⁴⁸ [KUMAR 2003] Kumar M.; Rajotia S., Integration of scheduling with computer aided process planning. **Journal of Materials Processing Technology**, No 6643, p. 1-4, 2003
- ⁴⁹ [ROZENFELD 1989] Rozenfeld H., Sistema modular de planejamento dos processoss (CAPP) aplicado ao contexto nacional, **IV Simpósio sobre "CAE/CAD/CAM"**, 1989.
- ⁵⁰ [REZENDE 1996] Rezende F. **Planejamento dos Processoss de Fabricação Assistido por Computador Através de um Sistema Especialista Baseado Na Tecnologia De Features: Um Modelo de Desenvolvimento Voltado para a**

Realidade Industrial. . Dissertação de mestrado. 1996. p. 142. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

- ⁵¹ [WANG 1999] Wang Y.; Jia Y.; Yu J., Zheng Y.; Yi S., Failure probabilistic model of CNC lathes, **Reliability Engineering and System Safety**, No 65, 307-314, 1999.
- ⁵² [MEJABI 1995] Mejabi O.; Black J., Simulation of complex manufacturing equipment reliability using object oriented methods, **Reliability Engineering and System Safety**, No 48, p. 11 – 18. 1995.
- ⁵³ [FREIHEIT 2002] Freiheit T.; Hu J. Impact of machining parameter on machine reliability and system productivity, Transactions of the ASME. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. v. 124, p. 296 – 304, 2002.
- ⁵⁴ [HITOMI 1979] HITOMI 1979 K.; NAKAMURA N.; INOUE S., Reliability Analysis of cutting tools, **Journal of Engineering for Industry**, v. 101, No 2, p. 185 – 190, 1979
- ⁵⁵ [WARDANY 1997] El Wardany T.; Elbestawi M., Prediction of tool failure rate in turning hardened steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 13, No 1, p. 1 – 16, 1997.
- ⁵⁶ [WANG 2001] WANG K.; LIN W.; HSU F. A new approach for determining the reliability of a cutting tool”, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 17, p. 705 – 909, 2001.
- ⁵⁷ [ACCETTURI 1997] Accetturi G., **Sistema de Apoio à Decisão na Escolha de Condições Operacionais para Processo de Usinagem**. Dissertação de mestrado. 1997. p. 142. Escola Politécnica Universidade São Paulo. Sao Paulo
- ⁵⁸ [FURNEE 2000] FURNEE R.J.; WU C.L.; ULSOY A. G. Statistical analysis of the effects of feed, speed, and wear on hole quality in drilling. Transactions of the ASME. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. v. 122, p. 267 – 273, 2000.
- ⁵⁹ [SANDVIK 1999] S.A. SANDVIK, COROMANT. **Ferramentas Rotativas**. 1999
- ⁶⁰ [HANDBOOK 1990] American Society for Metals **Metals Handbook**, Ohio : American Society for Metals. 1990