

ÉRICO PESSOA FELIX

nota final
9.7 (nove e sete)

WOM

***ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO PROCESSO DE FURAÇÃO COM
BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO***

**Monografia do trabalho de
formatura apresentado a
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do Diploma de
Engenheiro Mecatrônico.**

São Paulo

2004

ÉRICO PESSOA FELIX

***ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO PROCESSO DE FURAÇÃO COM
BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO***

Monografia do trabalho de formatura
apresentado a Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do Diploma de Engenheiro
Mecatrônico.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Professor Dr:
Gilberto Francisco Martha de Souza

São Paulo

2004

Aos meus pais Luis e Maria Luiza, a quem devo tudo que sou, à minha irmã que sempre me apoiou e a Clara, com quem construirei o meu futuro, pela compreensão, amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gilberto Martha de Souza, pela confiança e pela orientação, mostrando sempre disposição para ajudar e resolver os problemas.

A Clara Di Martino por todo amor e carinho que me ajudaram a vencer mais esta etapa.

A Carmen Elena Patino Rodriguez pelo seu trabalho que me orientou e me ensinou, pela sua disposição em me ensinar à usar os equipamentos e pelas informações que me pouparam muitas horas.

Ao Laboratório de Fenômenos de Superfícies – LFS do Depto. De Engenharia Mecânica, 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.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE SIMBOLOS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
 1 INTRODUÇÃO.....	 1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	3
2 CONFIABILIDADE¹.....	5
2.1 CONFIABILIDADE E A ESTATÍSTICA	7
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE.....	9
2.3 MODELOS DE VIDA.....	9
<i>Tempo até a falha:</i>	10
<i>Função distribuição acumulada</i>	10
<i>Função sobrevivência</i>	11
<i>Função densidade de probabilidade</i>	12
<i>Função taxa de falha</i>	13
<i>Expectativa</i>	14
<i>Distribuição quantil</i>	15
2.4 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE	15
a) Distribuição exponencial	15
b) Distribuição de Weibull	18
c) Distribuição Lognormal	21
3 TESTES ACELERADOS DE VIDA	23
3.1 MÉTODOS DE ACELERAÇÃO	24
3.2 - MODELOS DE ACELERAÇÃO	24
3.2.1 <i>Modelos físicos de aceleração:</i>	25
3.2.2 <i>Modelos empíricos de aceleração</i>	25
3.3 PLANEJAMENTO DE TESTES ACELERADOS DE VIDA.....	27
3.4 ANÁLISE DE DADOS DE TESTES ACELERADOS DE VIDA	27
4 PROCESSO DE FURAÇÃO	29
4.1 BROCAS HELICOIDAIS	29
4.1.1 <i>Tipos e formas construtivas</i>	29

4.1.2	<i>Superfícies de uma broca helicoidal</i>	31
4.1.3	<i>Arestas de uma broca helicoidal</i>	31
4.1.4	<i>Ângulos de uma broca helicoidal</i>	32
4.1.4.1	Ângulos medidos no plano de medida	34
4.1.4.1.1	ângulo de folga " α "	34
4.1.4.1.2	Ângulo de saída " γ "	34
4.1.4.1.3	Ângulo de cunha " β "	34
4.1.4.2	Ângulos medidos no plano de trabalho	35
4.1.4.3	Ângulos medidos num plano perpendicular aos planos de trabalho e de referência	36
4.1.4.3.1	Ângulo de ponta " σ "	37
4.1.4.3.2	Ângulo de posição " κ "	38
4.1.4.3.3	Ângulo de inclinação " λ "	38
4.1.4.3.4	Ângulo de hélice " ϕ "	39
4.1.4.3.5	Ângulo da aresta transversal de corte " ψ "	39
4.1.5	<i>Principais tipos de afiação</i>	40
5	MECANISMOS DE FALHA DE FERRAMENTAS DE USINAGEM	45
5.1	MEDIDAS DO DESGASTE	51
5.2	O MECANISMO DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE METAL DURO	52
5.2.1	<i>Curvas desgaste-velocidade de corte</i>	52
5.2.2	<i>Aresta postiça de corte</i>	55
5.2.2.1	Aresta postiça de corte e o desgaste da ferramenta	56
5.2.2.2	Mecanismos de desgaste da ferramenta na presença de aresta postiça de corte	59
5.2.3	<i>Mecanismos de desgaste na superfície de saída da ferramenta, segundo Trigger e Chao</i>	60
5.2.4	<i>Mecanismos de desgaste na superfície de folga da ferramenta, segundo Takeyama e Murata</i>	61
5.3	MECANISMOS DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO	66
5.3.1	<i>Influência da velocidade de corte</i>	67
5.3.2	<i>Influência do avanço</i>	68
5.3.3	<i>Influência da geometria da ferramenta</i>	69
5.3.4	<i>Influência dos materiais da peça e da ferramenta</i>	70
5.3.5	<i>Os fenômenos físico-químico responsáveis pelo desgaste das ferramentas de aço rápido</i>	73
6	VIDA DA FERRAMENTA	78
6.1	CURVAS DE VIDA DA FERRAMENTA	79
7	CONFIABILIDADE DE FERRAMENTAS DE USINAGEM	85
8	ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONFIABILIDADE DE BROCAS HELICOIDAIS NO PROCESSO DE FURAÇÃO	91

8.1	MODOS DE FALHA NO PROCESSO DE FURAÇÃO	91
8.2	ANÁLISE DO DESGASTE DA BROCA HELICOIDAL.....	93
8.3	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS.....	96
8.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	97
9	CONCLUSÕES.....	117
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Análise de Modos das Falhas de Ferramentas de Usinagem.[16].....	48
Tabela 8.1 - Análise de Modos e Efeitos de Falhas para o Processo de Furação[16]	92
Tabela 8.2- Análise de Modos e Efeitos das Falhas para o desgaste da broca.[16] ...	95
Tabela 8.3 - Teores dos elementos químicos nos aços M2[16]	96
Tabela 8.4 -Composição química ABNT 1020 [16].....	96
Tabela 8.5 - Especificações do centro de usinagem DECKEL MAHO[16].....	97
Tabela 8.6- Condições de operação.....	98
Tabela 8.7 - Valores de desgaste, em mm, para uma rotação de 3500 rpm.....	102
Tabela 8.8 - Valores de desgaste, em mm, para uma rotação de 3750 rpm.....	103
Tabela 8.9 - Valores de desgaste, em mm, para uma rotação de 4000rpm[16]	103
Tabela 8.10 - Parâmetros da distribuição lognormal	104
Tabela 8.11 - Parâmetros das distribuições do tempo, em minutos, para atingir 120 mm	112
Tabela 8.12 - Valores de tempo, em minutos, para atingir $V_B=120 \mu m$	112
Tabela 8.13 - Parâmetros de Taylor.....	113
Tabela 8.14 - Valores de tempo até a falha, em minutos, para as condições usuais	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1[1] – Variável do custo total de um produto em função do grau de confiabilidade	7
Figura 2.2– Representação de uma função Distribuição Acumulada de Probabilidade[1]	10
Figura 2.3 – Representação da Confiabilidade[1]	11
Figura 2.4 – Representação de uma função densidade de probabilidade. [1].....	12
Figura 2.5 – Representação da Função Taxa de Risco. [1].....	13
Figura 2.6- Curva da banheira[1]	14
Figura 2.7 – Representação da Distribuição Exponencial[1].....	17
Figura 2.8 – Representação da Distribuição de Weibull [1].....	20
Figura 2.9 – Representação da Distribuição Lognormal [1].....	22
Figura 4.1 – Partes comuns que compõem uma broca helicoidal[8].....	30
Figura 4.2 – Planos utilizados no sistema de referência para medição dos ângulos de uma broca helicoidal [10].....	33
Figura 4.3 – Variação da cunha cortante ao longo da aresta principal de corte com $\sigma=118^\circ, \phi=30^\circ, \alpha_0=8^\circ$ e $D=25\text{mm}$ [11]	35
Figura 4.4 – Ângulo da broca helicoidal, segundo a norma DIN 6581 [11].....	37
Figura 4.5– Variação do ângulo de inclinação, ao longo da aresta principal de corte, com $\sigma=118^\circ$ e $\tau_0 = 0,16$ (τ = raio do núcleo/ distancia do centro até um ponto na aresta principal de corte) [11]	38
Figura 4.6 – Ângulo de hélice, de ponta e da aresta transversal de corte. [11].....	40
Figura 4.7 – Princípio de afiação de uma broca helicoidal por cone de revolução [6]	42
Figura 4.8 – Afiações especiais, segundo a norma ABNT TB-111[12].....	43
Figura 5.1 – Desgastes convencionais da ferramenta de corte: C1 = largura da cratera; Cp=profundidade da cratera; Cd = distancia do centro da cratera à aresta de corte; I1 = largura do desgaste; Dg, Da e Db = deslocamentos da aresta de corte; Va e Vg = Volumes de <i>desgaste</i> [6].....	50
Figura 5.2 – Curvas de desgaste-velocidade de corte para o torneamento de aço ABNT 1060. [6].....	53
Figura 5.3 – Participação da diferentes componentes no desgaste total da ferramenta;a = deformação na aresta cortante; b = abrasão mecânica; c = cisalhamento da aresta postíça de corte; d = difusão; e = oxidação; f = resultante; [6].....	54
Figura 5.4 – Forma característica de uma aresta postíça de corte; material aço ABNT 1050; ferramenta de metal duro P30 [6]	55
Figura 5.5 – Variação do desgaste da superfície de folga da ferramenta em função da velocidade de corte, para um tempo de usinagem constante. [6]	56
Figura 5.6 – Desgaste da superfície de folga na usinagem com aresta postíça de corte[6]	58
Figura 5.7 – Saída de partículas da resta postíça junto a superfície inferior do cavaco e à superfície da peça; [6].....	60
Figura 5.8 – Relação entre a temperatura de corte e o peso do desgaste por unidade de comprimento de corte; [6]	63

Figura 5.9 – Relação entre o desgaste por unidade de tempo e a temperatura absoluta de corte. [6].....	64
Figura 5.10 – Desgaste da superfície de folga em função da velocidade de corte; material aço Ck 53 N; ferramenta de aço rápido EV 4 Co, sem fluido de corte; $a.p = 0,25.2 \text{ mm}^2$; $T = 30 \text{ min}$; $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = -4^\circ$; $\epsilon = 90^\circ$; $\chi = 60^\circ$; $r = 1 \text{ mm}$. [6].....	67
Figura 5.11 – Desgaste na superfície de saída em função da velocidade de corte; nas mesmas condições de ensaio da figura 5.10. [6]	68
Figura 5.12 – Influência do avanço sobre o desgaste da superfície de folga; condições de ensaio idênticas às da figura 5.10. [6].....	69
Figura 5.13 – Curvas de vida de 5 tipos de aço rápido (critério da queima); condições de ensaio idênticas às da figura 5.10. [6]	71
Figura 5.14 – Curvas de desgaste para diferentes tratamentos térmicos; condições de ensaio idênticas às da figura 5.10. [6].....	72
Figura 5.15– Influência da velocidade de corte sobre as grandezas características do processo de usinagem[6]	74
Figura 5.16– Mecanismo de saída e variação da forma geométrica da aresta postíça em diferentes velocidades de corte[6].....	76
Figura 6.1– Determinação da curva de vida de uma ferramenta tomando-se o desgaste I_1 como parâmetro, a) Curvas de desgaste em função do tempo de usinagem. b) Curva de vida da ferramenta para o desgaste $I_1 = 0,8 \text{ mm}$, obtida através das curvas de desgaste. [6]	80
Figura 6.2– Desgastes I_1 e C_p da ferramenta em função da velocidade de corte para um tempo de usinagem de 60 minutos. A curva $I_1 = f(v)$ foi obtida através da figura 6.2[6].....	81
Figura 6.3– Representação em escala logarítmica da curva de vida da ferramenta[6]	82
Figura 6.4– Curvas de Vida do aço rápido (18% W) para diferentes desgastes I_1 , C_p e amolecimento da aresta cortante; material da peça aço C68; $a.p = 0,4.3,0 \text{ mm}^2$; $\chi = 45^\circ$. [6].....	84
Figura 7.1 - Relação entre o desgaste da ferramenta de corte [13]	88
Figura 8.1 - Definição do desgaste de cratera e de flanco em brocas[12]	94
Figura 8.2 - Evolução do desgaste de flanco da broca 1.....	100
Figura 8.3 - Procedimento para estabelecer o desgaste de Flanco da broca 9 após a execução de 35 furos a 4000 rpm [16].....	101
Figura 8.4 - Distribuição densidade de probabilidade para 3500 rpm.....	106
Figura 8.5 - Distribuição densidade de probabilidade para 3750 rpm.....	107
Figura 8.6 - Distribuição densidade de probabilidade para 4000 rpm.....	108
Figura 8.7 - Curvas de densidade de probabilidade para distribuição do desgaste de flanco em função do tempo de operação da broca para 4000rpm	110
Figura 8.8 - Função densidade de probabilidade em função do tempo de usinagem para 3500, 3750 e 4000 rpm.....	111
Figura 8.9 - Curva de vida para 50%.....	113
Figura 8.10 - Curvas de vida e distribuições de probabilidade	114
Figura 8.11 - Extrapolação para as condições usuais	115
Figura 8.12 - Função Densidade de Probabilidade para 2000rpm	116

LISTA DE SIMBOLOS

t	Tempo
v	Velocidade de corte
x	Constante associada ao tempo na equação de Taylor
K	Constante da equação de Taylor
h	Espessura do cavaco
l	Largura do cavaco
α	Ângulo de folga da ferramenta
α_0	Ângulo de folga lateral
α_e	Ângulo efetivo de folga lateral
α_x	Ângulo de folga medido no plano de trabalho
α_y	Ângulo axial de folga
γ	Ângulo de saída da ferramenta
γ_x	Ângulo lateral de saída da ferramenta
γ_y	Ângulo axial de saída da ferramenta
γ_e	Ângulo efetivo de saída da ferramenta
β	Ângulo de cunha da ferramenta
β_x	Ângulo de cunha medido no plano de trabalho
β_y	Ângulo axial de cunha
σ	Ângulo de ponta da ferramenta
κ	Ângulo de posição da ferramenta
λ	Ângulo de inclinação da ferramenta
ϕ	Ângulo de hélice da ferramenta
$f(t)$	Função densidade de probabilidade para t
$F(t)$	Função distribuição acumulada de falhas para t
$R(t)$	Confiabilidade no tempo t
$\theta(t)$	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 Weibull
η	Constante de escala da distribuição de Weibull
$F(t)$	Função distribuição acumulada de falhas
V_B^*	Nível do desgaste de flanco máximo admissível
V_B	Variável aleatória para o desgaste de flanco
f	avanço
d	Profundidade de corte
γ	Ângulo transversal da ferramenta
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
C_v	Coefficiente de variação

RESUMO

O propósito deste trabalho é avaliar a confiabilidade do processo de furação através da análise do desgaste de brocas helicoidais de aço rápido. Para esta avaliação, a falha do processo é definida como sendo a perda da capacidade de gerar furos conforme as especificações de tolerância dimensional e acabamento superficial do projeto, sendo a principal causa desta falha, o desgaste da ferramenta, em especial, o desgaste de flanco, que ocorre na superfície de folga da ferramenta e é incentivado pelo aumento da velocidade de corte. A análise é feita através de ensaios que visam determinar a distribuição temporal do desgaste para diferentes velocidades de corte, isto se faz, pois, os ensaios são realizados com velocidades de corte maiores que a velocidade da condição normal de operação caracterizando um ensaio acelerado de vida. A partir dos dados para velocidades de corte maiores será extrapolada uma distribuição do desgaste ao longo do tempo para a velocidade de corte nas condições normais de uso. Adicionalmente, será definido um tempo de troca da ferramenta baseado em um certo nível de confiabilidade. Os ensaios foram realizados com brocas helicoidais de aço rápido ABNT-M2, os corpos de prova são de aço ABNT-1020 e o desgaste é medido com uma lupa estereoscópica. Os realizados ensaios com duas velocidades de corte e dados para uma terceira velocidade foram encontrados na literatura.

ABSTRACT

The purpose of this work is to estimate the reliability of the drilling process through the wear analysis of helicoids drill. This process failure evaluation is defined as being a lack of capability of making holes in accordance to the dimensional tolerance specifications and surface finishing project, as the major failure reason, the wear tool, specially the flank wear, by increasing the cutting speed.

The analysis goes through tests to determine the tool life distribution associated with different speeds. Once the test are executed with higher cutting speeds instead of regular speed condition of the operation. The accelerated tests data analysis method is used to define the toll flank wear evolution, according to regular machining speeds. Based on experimental results, a Suggested tool exchange period can be suggested, aiming the maintenance of drilling operation reliability.

The tests were done with helicoids drills ABMT M2, the workpiece material is ABNT – 1020 and their wear is measured by the use of a magnifying lens.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Em todos os ramos de atividade atuais, qualidade é um termo presente e imprescindível. Mas a qualidade é definida?

Segundo Juran, J. M. (1998), Qualidade pode ser definida de duas maneiras:

1 - “Qualidade” significa que as características do produto ou serviço atendem às necessidades do consumidor e desta maneira proporcionam sua satisfação. Neste ponto de vista, a qualidade está orientada para os lucros, pois através de uma alta qualidade, será proporcionada maior satisfação do consumidor com o objetivo de aumentar os lucros. Porém este conceito requer investimentos que acarretam em aumentos de custos. A partir deste ponto de vista, alta qualidade “custa mais caro”. (Juran, J.M, 1998, p.21)

2- “Qualidade” significa estar livre de defeitos. O produto estaria livre de erros que requerem a execução de re-trabalhos, ou que resultariam em falhas de campo, reclamações e insatisfações dos consumidores, entre outros. A partir deste ponto de vista, a qualidade esta orientada para custos; desta maneira alta qualidade “custa menos”. (Juran, J.M, 1998, p.21)

Os dois significados acima definidos devem ser unificados pela palavra “ajustado ao uso”, mas este significado não é suficiente, é necessário atender as necessidade dos clientes, embora para muitas empresas qualidade é definida como sendo um produto que está de acordo com as especificações. A partir deste ponto de vista, entende-se como verdade que as especificações atendem plenamente as necessidades dos clientes. No entanto esta suposição está incorreta. As necessidades dos clientes envolvem muitas outras coisas que não são encontradas nas especificações dos produtos. Como exemplo pode-se citar explicações de utilização em uma linguagem simples, facilidade e baixo custo de manutenção, entre outras.

Os custos originados em função de uma qualidade baixa podem ser eliminados através da eliminação das deficiências dos produtos; eliminando-se erros, re-trabalho, falhas de campo, etc. Desta maneira, é preciso que os produtos sejam confiáveis.

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

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

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

1.2 Objetivos do trabalho

O desafio de engenheiros e projetistas vai além de avaliar a confiabilidade do seu processo de fabricação, primeiramente a tarefa a ser vencida é como esta avaliação deve ser feita. O trabalho proposto pretende avaliar a confiabilidade de um processo de furação com brocas helicoidais, buscando determinar a distribuição temporal associada a um certo nível de desgaste da ferramenta.

O processo de furação é largamente utilizado na indústria manufatureira. A grande maioria das peças fabricadas leva ao menos um furo, daí a importância do processo de furação. Além disso, geralmente a etapa de furação é uma das ultimas do processo de fabricação de uma peça, por este motivo o processo deve ter uma confiabilidade relativamente grande para não comprometer os gastos em dinheiro e tempo já empregados nas etapas anteriores de fabricação.

As brocas helicoidais de aço rápido são utilizadas atualmente na maioria dos processos de furação. Algumas de suas propriedades favorecem esta ampla utilização tais como: propriedades do aço rápido, geometria característica da broca, e possibilidade de alterar facilmente a geometria da ponta. Além disso, a grande utilização das brocas helicoidais de aço rápido é devido ao fato de sua faixa de aplicação estar compreendida entre 2 e 15 mm o que corresponde a mais ou menos 75% das brocas fabricadas.

Observando os diversos comentários anteriores, optou-se em estudar o processo de furação com brocas helicoidais de aço rápido, de pequenos diâmetros com o objetivo de consolidar os conhecimentos sobre o processo de furação, e se possível contribuir com o assunto.

Para avaliar a confiabilidade do processo de furação com brocas helicoidais é necessário um estudo detalhado da teoria da confiabilidade, ou seja, dos principais métodos probabilísticos envolvidos.

Além do estudo da confiabilidade é necessário o estudo dos principais modos de falha da broca helicoidal de maneira a detalhar quais os mecanismos de desgaste

envolvidos, bem como, caracterizar as variáveis envolvidas no desgaste, equações que modelem o desgaste e os tipos de desgaste.

Por fim este trabalho tem como objetivo propor um ensaio para avaliar a confiabilidade do processo de furação e para tal propósito vamos lançar mão de métodos para aceleração do desgaste.

2 CONFIABILIDADE

Confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um item realizar sua função especificada, sem falhas quando submetido a condições determinadas de uso, em um dado período de tempo. Esta é uma definição puramente científica, mas usualmente a palavra confiabilidade pode ser utilizada com o sentido de “seguro” como, por exemplo, na expressão “Eu tenho um carro confiável”. Porém a definição de confiável como sendo sinônimo de seguro não é suficiente em termos científicos onde deve ser compreendido também como aquilo que é válido, ou seja, um componente confiável deve ser entendido como seguro e válido. Além disso, confiabilidade também significa “repetível” ou “consistente”, por exemplo, um processo de medida pode ser considerado confiável se ele nos indicar sempre um mesmo resultado repetidas vezes.

A confiabilidade está intimamente ligada a qualidade dos produtos. Um produto que possui qualidade é aquele que atende as especificações durante toda a sua vida. Assim é necessário que os fabricantes conheçam o comportamento dos seus produtos durante toda sua vida útil. Desta forma é necessário conhecer os vários parâmetros que influenciam na durabilidade do produto tais como os esforços a que este é submetido, a variabilidade dos materiais que são usados como matérias-primas, quais os fatores humanos relacionados à fabricação e utilização, o meio ambiente a que o produto estará sujeito, entre outros parâmetros.

O fabricante do produto avalia alguns atributos do produto na inspeção final e julga se o produto está apto ou não para ser entregue ao consumidor. Mas por quanto tempo estes atributos ainda serão válidos? Para responder esta pergunta é necessária uma análise da confiabilidade do produto. Assim a qualidade é um atributo instantâneo para o início da vida de um produto ou processo, e a confiabilidade é um retrato móvel de sua utilização. Defeitos que surgem após o início da utilização do produto são considerados “falhas na confiabilidade”.

Em muitos produtos o sistema de garantia da qualidade na manufatura é suficiente para garantir a confiabilidade necessária para sua utilização. Porém em produtos que envolvem algum tipo de risco ou aqueles cujo custo das falhas são

altos é importante sabermos se o produto está funcionando satisfatoriamente após um certo tempo e, além disso, é importante saber até quando o produto vai funcionar de modo satisfatório.

Caso um fabricante decida aumentar a confiabilidade do seu produto, ele vai aumentar os custos de projeto e de produção. No entanto, baixos custos de produção e de projeto não significam baixo custo total do produto. O custo total do produto inclui também os custos envolvidos em toda a vida do produto, assim deve ser somado ao custo de produção e de projeto os custos de garantia, custos de troca das unidades defeituosas, custos dos serviços de assistência técnica, custos dos processos judiciais devido as falhas, custos decorrentes da perda de consumidores em função das reclamações do cliente, etc.

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

A figura abaixo representa esta situação. O custo total do produto é a soma dos custos de produção e de projeto assim como outros custos gerados após a sua liberação. Pode-se observar que em um nível de confiabilidade ótimo, o custo total do produto deve estar no mínimo. O custo de confiabilidade ótimo é tal que coincide com o custo total ao longo de toda a vida do produto.

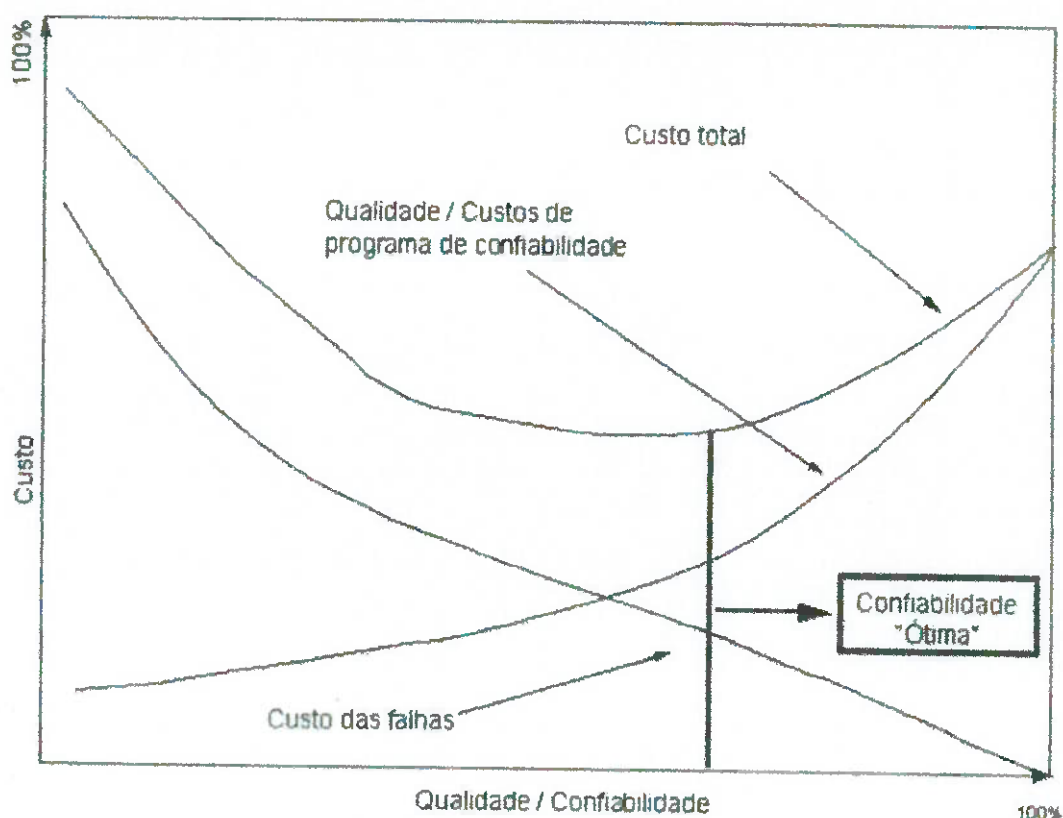


Figura 2.1[1] – Variável do custo total de um produto em função do grau de confiabilidade

O grande problema desta figura é que não é simples quantificar os efeitos das atividades de um programa de confiabilidade, tais como uma certa quantidade de testes, em uma confiabilidade alcançada.

2.1 Confiabilidade e a Estatística

Os métodos estatísticos são indispensáveis no estudo da confiabilidade. A confiabilidade é definida como uma probabilidade desta forma para que um trabalho de confiabilidade seja bem desenvolvido é necessário conhecer os métodos estatísticos pertinentes. É importante lembrar que a análise da confiabilidade depende de uma série de dados que devem ser tratados estatisticamente. O problema surge quando é necessário quantificar as grandezas

que serão tratadas estatisticamente para a determinação da confiabilidade de um produto ou sistema.

Esses dados trazem consigo uma dose de incerteza, isto porque a confiabilidade geralmente extrai tais informações daquelas pessoas que usam o produto, e também em função da grande variedade de ambiente nos quais os produtos estão sujeitos a operar.

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

- A obtenção de uma identificação antecipada de modos de falha e o entendimento e remoção de suas causas raízes – melhorando assim sua confiabilidade;
- A obtenção de informações de campo para ajudar e melhorar o projeto do produto de futuras gerações ou novos modelos;
- A determinação de quanto tempo cada unidade deve funcionar antes de seu envio para o consumidor, e em que condições, a fim de evitar falhas prematuras de campo. Este procedimento é geralmente chamado de “burn in”.
- A quantificação da confiabilidade a fim de determinar se o produto está pronto para ser lançado, ou seja, se o produto já alcançou o seu nível especificado de confiabilidade;
- A variação e previsão de custos de garantia;
- A decisão da necessidade de um “recall” para produto no campo.
- A avaliação da capacidade de um processo de fabricação para produzir o produto dentro das especificações de projeto.

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

- Testes de laboratório para avaliar a durabilidade, desgaste, propriedades relativas ao tempo de vida de materiais em particular, componentes ou subsistemas;
- Teste de vida operacional em sistemas completos ou subsistemas, feitos antes do produto ser lançado para os consumidores;

- De utilização no campo pelos consumidores;

2.2 Classificação dos Dados para Análise de Confiabilidade

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

Os dados podem ser classificados como:

Dados Completos: significa que cada valor da característica em estudo de cada unidade observada é conhecido. As informações a respeito da amostra são completas;

Dados censurados: Dados de confiabilidade geralmente são censurados, isto porque algumas unidades não apresentam falhas, e ainda melhor, somente seus tempos de vida, mas não seus tempos de falha são conhecidos. Um motivo comum para censurar dados é a necessidade de analisá-los antes que as unidades falhem. Quando os tempos censurados das unidades que não falham é diferente, a análise dos dados se torna muito mais difícil. Este caso pode acontecer quando diferentes unidades do produto são colocadas em teste em diferentes momentos, quando as unidades sofrem diferentes graus de exposição através do tempo, ou ainda, quando a análise de falhas é feita para um modo de falha particular. Os testes censurados podem ser divididos em dois tipos:

Tipo 1: O teste termina após um tempo determinado de ensaio;

Tipo 2: O teste termina após um determinado número de falhas.

2.3 Modelos de vida

Os modelos de vida visam definir a confiabilidade de um produto ou sistema, representando a probabilidade deste permanecer operando até um certo instante de tempo. As falhas são caracterizadas através de probabilidades. Algumas das características são apresentadas na seqüência:

Tempo até a falha:

A distribuição do tempo até a falha, T , de um produto pode ser caracterizada pelas seguintes funções:

- Função distribuição acumulada;
- Função densidade de probabilidade;
- Função de sobrevivência;
- Função de risco;

A escolha de qual função se aplica a cada caso depende da prática específica para onde o problema está sendo direcionado.

Função distribuição acumulada

Função Distribuição Acumulada

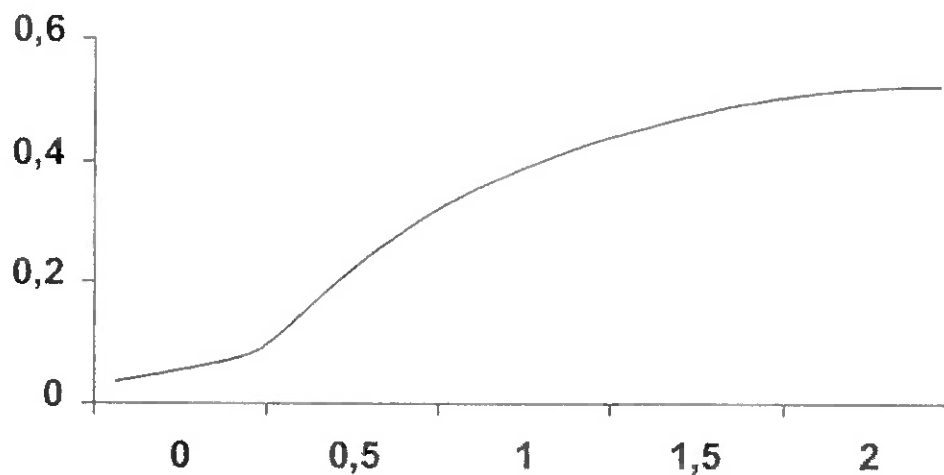


Figura 2.2– Representação de uma função Distribuição Acumulada de Probabilidade[1]

Fornece a probabilidade de que uma unidade, selecionada aleatoriamente em uma população ou processo irá falhar antes de um tempo t , podemos ainda interpretar a função distribuição acumulada de probabilidade como sendo a proporção de unidades na população que vai falhar antes de um tempo t .

Função sobrevivência

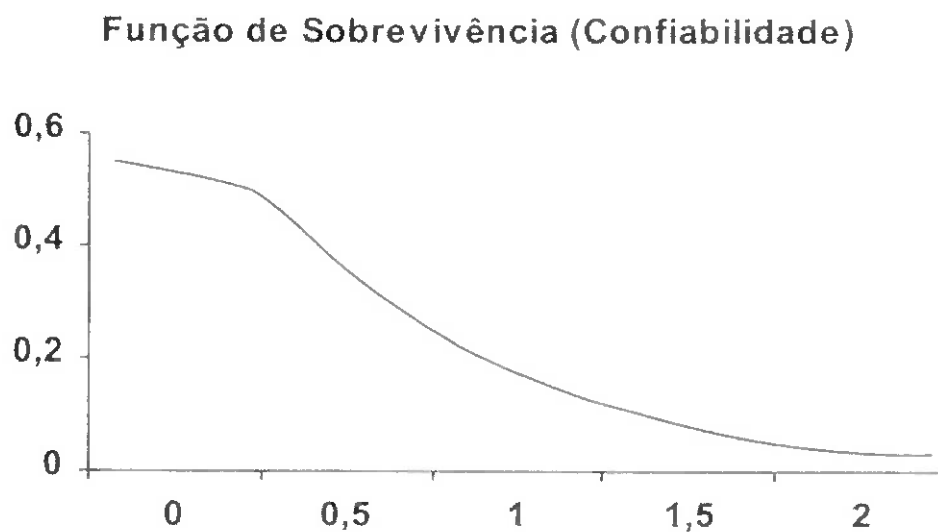


Figura 2.3 – Representação da Confiabilidade[1]

A função de sobrevivência também pode ser chamada de função confiabilidade e é o complemento da função distribuição acumulada, fornece a probabilidade de um item sobreviver até um tempo t .

Função densidade de probabilidade

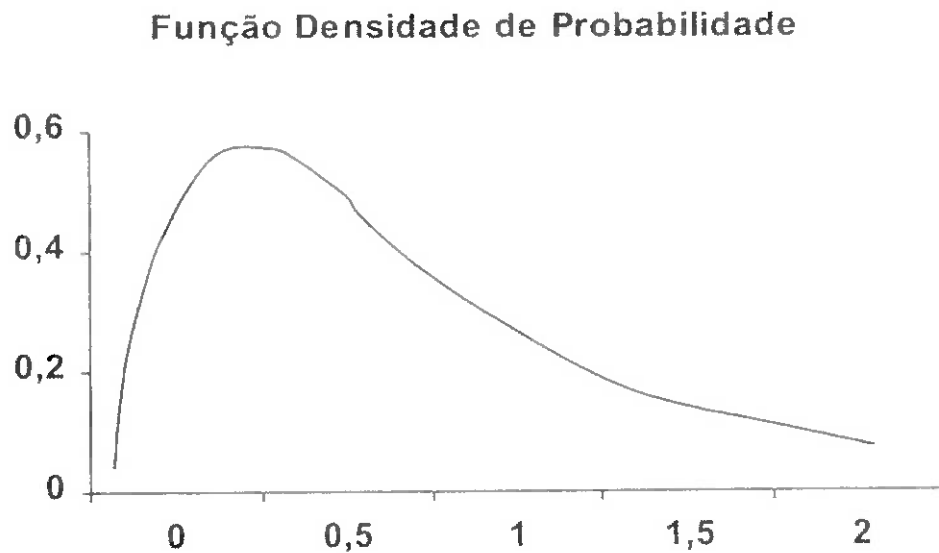


Figura 2.4 – Representação de uma função densidade de probabilidade. [1]

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

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.1)$$

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

Função taxa de falha

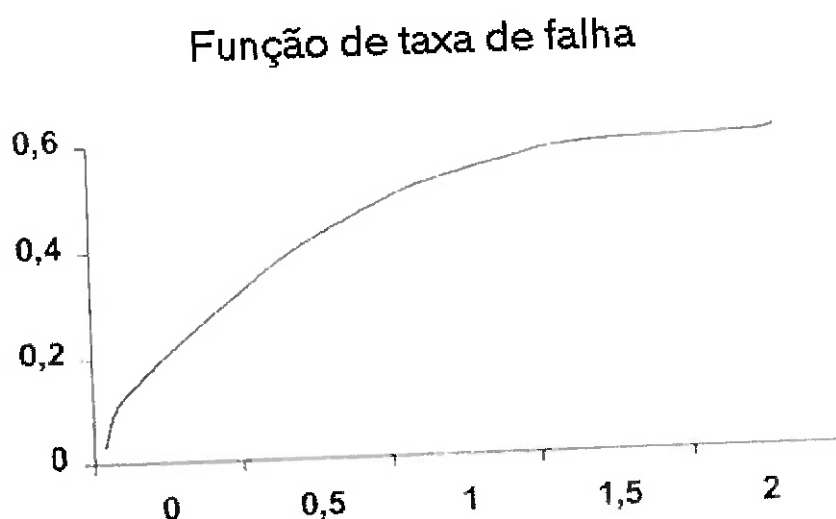


Figura 2.5 – Representação da Função Taxa de Risco. [1]

Também conhecida como função de risco, função de falha instantânea, entre outros nomes é definida como:

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t)} \quad (2.2)$$

A função taxa de risco expressa a tendência de falhas no próximo pequeno intervalo de tempo, dado que o componente operou sem falhas até o instante de tempo t .

Segundo Juran, J. M. (1998), a “Curva da banheira”, indicada na figura 2.5, descreve um modelo conceitual bastante útil para análise de falha da população de alguns produtos. A primeira parte da curva mostra que devem acontecer falhas prematuras (mortalidade infantil). A segunda parte da curva mostra que durante a maior parte do tempo de vida do produto, o risco de falha permanece constante. A terceira parte da curva mostra as falhas de fim de vida que ocorrem devido ao desgaste excessivo. A figura 2.5 mostra uma curva genérica, sendo que

dependendo da natureza do comportamento ou sistema avaliado, a curva pode apresentar-se de forma mais pronunciada em um determinado trecho da curva genérica.

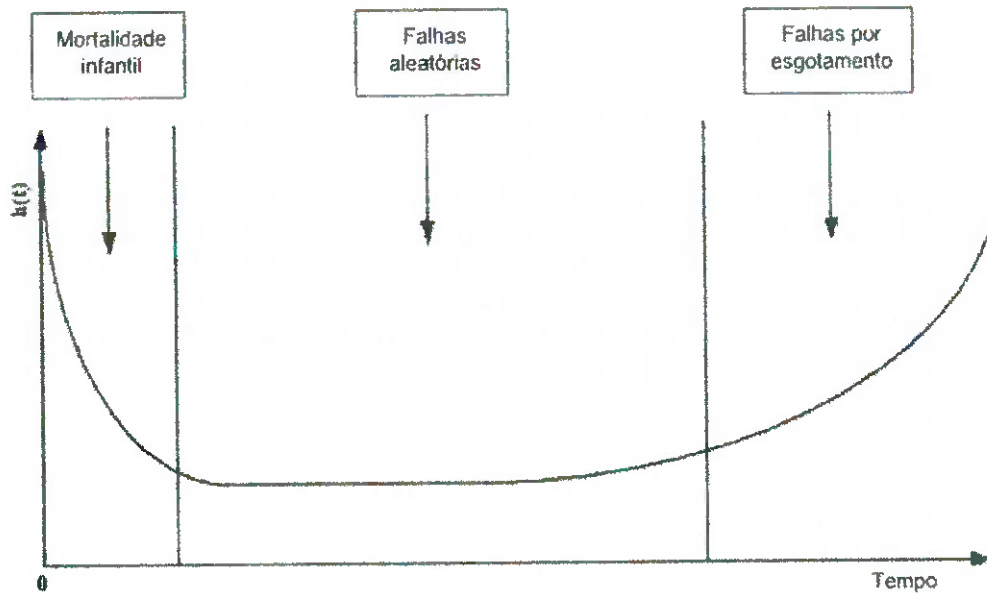


Figura 2.6- Curva da banheira[1]

Ainda existem outras grandezas de interesse na confiabilidade estas são descritas abaixo:

Expectativa

Também pode ser chamada de “primeiro momento”. A expectativa de uma distribuição de probabilidade de uma variável positiva aleatória T é a medida da tendência central ou tempo “Médio”, e é definido por:

$$E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt \quad (2.3)$$

Distribuição quantil

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

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

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

2.4 Distribuições de probabilidade

As principais distribuições de probabilidade empregadas no estudo da confiabilidade são descritas na sequência deste texto:

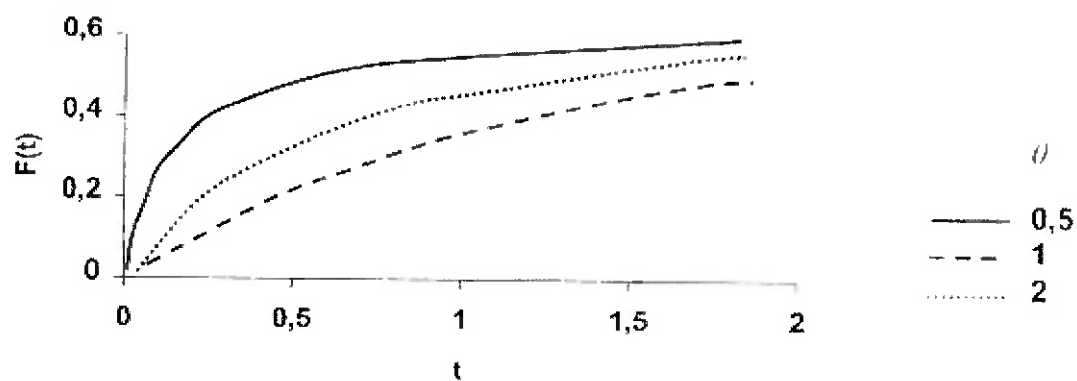
a) Distribuição exponencial

A função distribuição acumulada para uma distribuição exponencial é:

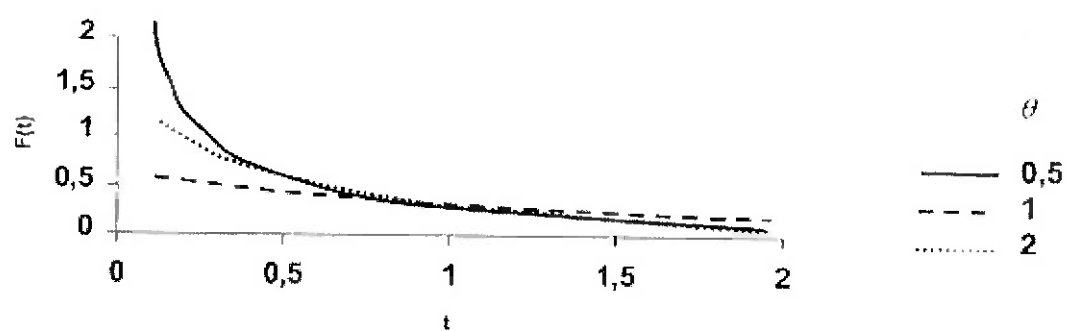
$$F(T; \theta) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad t > 0 \quad (2.3)$$

Onde o parâmetro simples da distribuição $\theta > 0$ é um parâmetro de escalar. A função distribuição acumulada, função densidade de probabilidade, e função taxa de risco são mostradas na figura 2.6.

a - Função Distribuição Acumulada



b- Função densidade de probabilidade



c - Função de Taxa de Falha

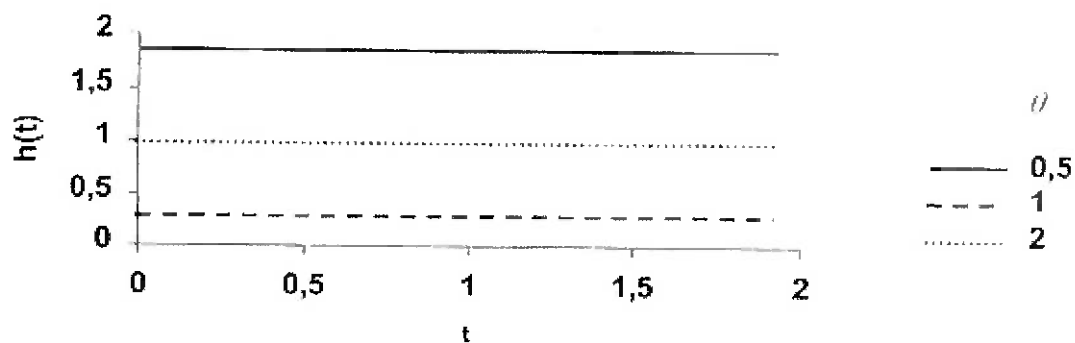


Figura 2.7 – Representação da Distribuição Exponencial[1]

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

b) Distribuição de Weibull

A função distribuição acumulada para a distribuição de Weibull é:

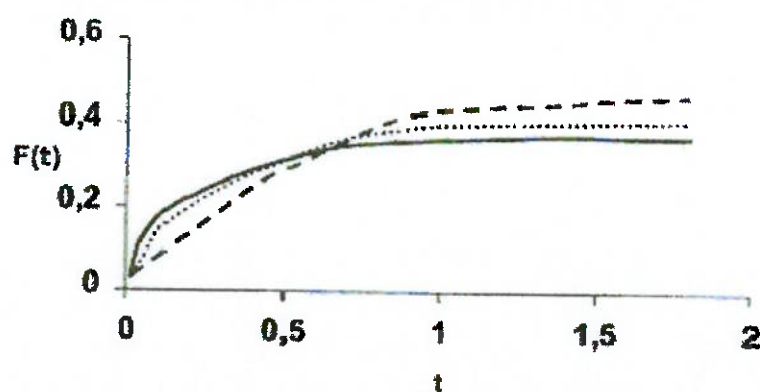
$$F(t; \eta; \beta) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad t > 0 \quad (2.4)$$

onde $\beta > 0$ é o parâmetro de forma e $\eta > 0$ é o parâmetro de escala. O quantil p da distribuição é dado por $t_p = \eta [-\log(1-p)]^{\frac{1}{\beta}}$. A função de risco é $h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta} \right) \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}$. A função distribuição exponencial é um caso especial da

distribuição de Weibull onde $\beta = 1$. A importância prática da distribuição de Weibull origina-se da habilidade para descrever distribuições de falhas que geralmente possuem diversas formas diferentes. Conforme ilustrado nas figuras abaixo, com $0 < \beta < 1$, a função de risco da distribuição de Weibull é decrescente, e com $\beta > 1$ a função de risco é crescente. Sendo assim, a distribuição pode ser usada para descrever tanto riscos decrescentes (região de mortalidade infantil) como riscos crescente (falhas por esgotamento), mas não para ambos. A distribuição de Weibull é geralmente usada como modelo de vida para isolantes, falhas de capacitores, rolamentos de esferas, e muitos outros produtos, assim como o modelo para resistência de materiais. Para muitas aplicações existe uma justificativa teórica para seu uso.

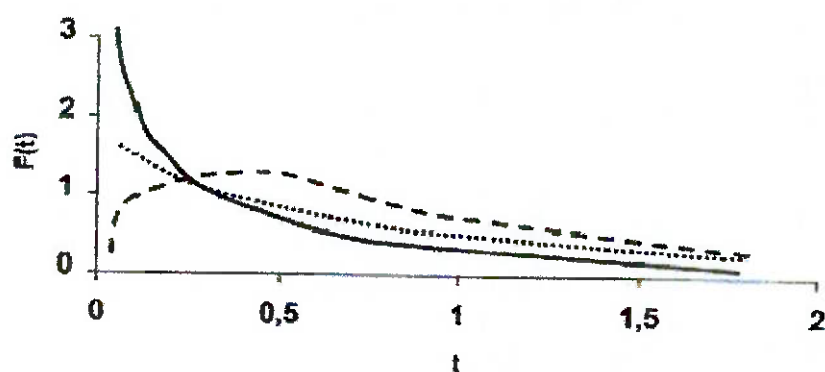
As representações das funções para distribuição de Weibull são mostradas a seguir:

a - Função Distribuição Acumulada



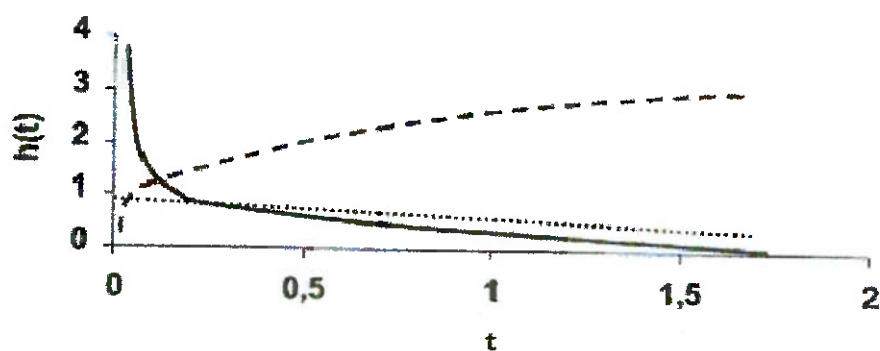
	β	η
—	0,5	1
- - -	1	1
...	2	1

b - Função Densidade de Probabilidade



	β	η
—	0,5	1
- - -	1	1
...	2	1

c - Função de Taxa de Falha



	β	η
—	0,5	1
- - -	1	1
...	2	1

Figura 2.8 – Representação da Distribuição de Weibull [1]

c) Distribuição Lognormal

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

A função distribuição acumulada da lognormal é:

$$F(t; \mu; \sigma) = \Phi_{nor} \left[\frac{\log(t) - \mu}{\sigma} \right] \quad t > 0 \quad (2.5)$$

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

A distribuição lognormal é normalmente usada como um modelo para a distribuição de tempos de falha. A função taxa de risco da distribuição lognormal geralmente começa em zero, aumenta até o máximo, então retorna para zero em um valor alto de t .

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

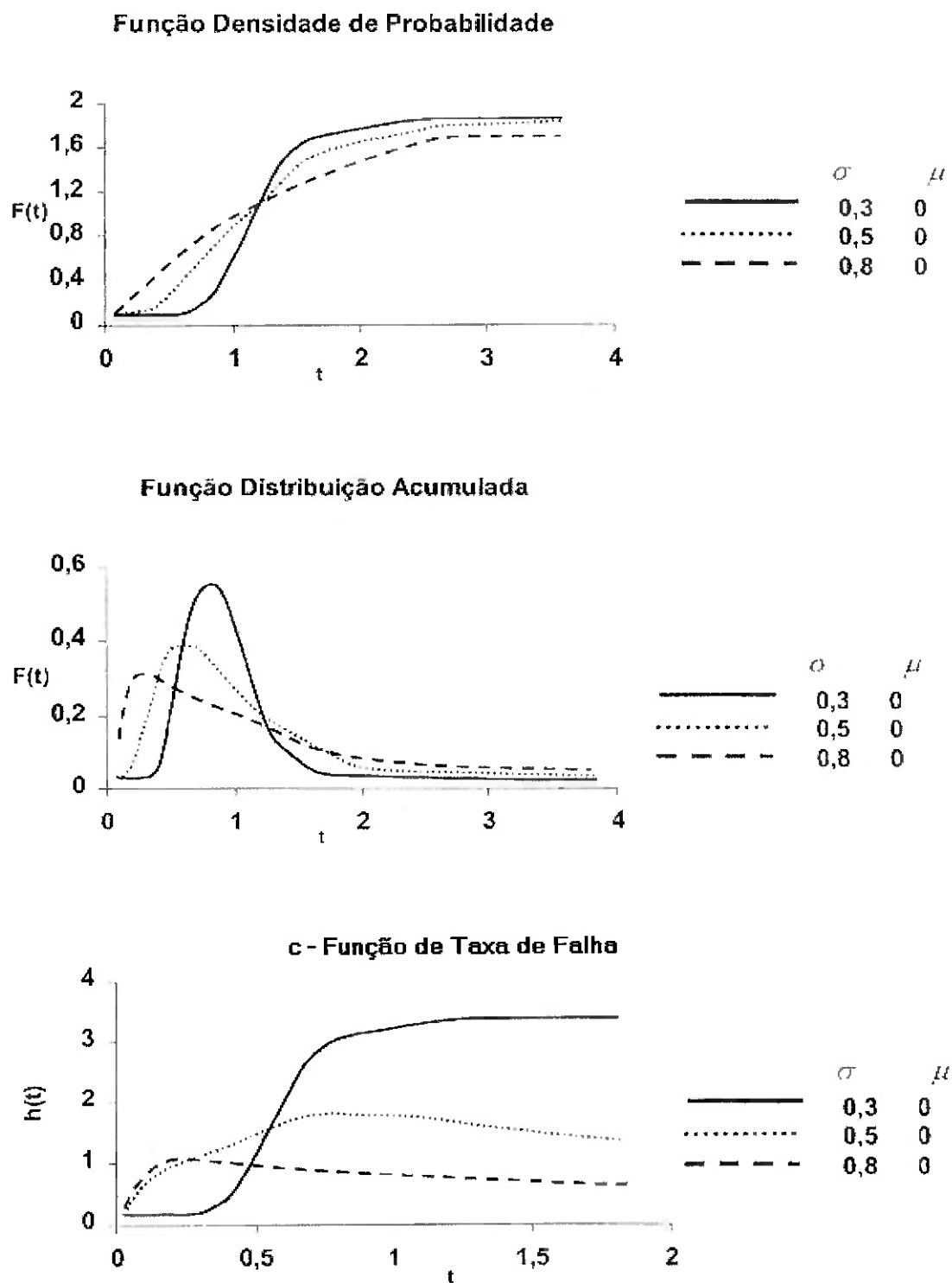


Figura 2.9 – Representação da Distribuição Lognormal [1]

3 TESTES ACELERADOS DE VIDA

A maioria dos produtos é projetado para operar por anos sem falhar, assim, é de se esperar que poucas unidades falhem em um teste realizado nas condições normais de um produto. Desta forma é particularmente difícil estimar a distribuição de tempo até a falha ou o desempenho a longo prazo de componentes de produtos de alta confiabilidade.

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

Geralmente, informações obtidas com a execução de testes com altos níveis de esforços (taxa de uso, temperatura, ou pressão) devem ser extrapolados através de um modelo físico para obter estimativas de vida ou desempenho em longo prazo sob níveis de esforços de menor magnitude, considerando o uso nas condições normais. Os resultados destes testes acelerados de vida são usados no processo do projeto de confiabilidade para avaliar ou demonstrar a confiabilidade de componentes e/ou subsistemas para certificar componentes, detectar modos de falha e comparar a qualidade de diferentes fabricantes de um mesmo produto, da maneira mais rápida possível. Os testes acelerados de vida tem se tornado mais importantes em função da rapidez das mudanças tecnológicas, produtos mais complexos e com mais componentes, pressão pela rápida introdução de novos produtos no mercado, e na alta expectativa dos consumidores para uma melhor confiabilidade.

3.1 Métodos de aceleração

Os três principais métodos de aceleração empregados na execução de testes acelerados são:

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

3.2 - Modelos de aceleração

A análise dos testes acelerados de vida, além daqueles testes em que somente acontece em um aumento da taxa de utilização, deve ser um modelo físico razoável relacionados a algumas variáveis de aceleração como temperatura, voltagem, pressão, tempo até a falha, entre outros. Posteriormente este modelo deve ajustar-se

para descrever o efeito real que esses fatores acelerados tem nas falhas, ou seja, deve-se trazer (extrapolar) o modelo acelerado para a condição real, demonstrando o que deveria acontecer no produto real.

3.2.1 Modelos físicos de aceleração:

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

3.2.2 Modelos empíricos de aceleração

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

Algumas orientações para o uso de modelos de aceleração incluem:

- usar a teoria física tanto quanto possível, e escolher as variáveis de aceleração que correspondam aos fatores causadores das falhas reais;

- Investigar tentativas anteriores para acelerar modos de falha similares àquele de interesse;
- Projetar testes acelerados para minimizar, tanto quanto possível, o grau de extrapolação necessário. Testes acelerados com alto grau de aceleração podem causar modos de falha que não iriam aparecer em condições normais de uso. Se falhas estranhas não são reconhecidas, elas podem levar a conclusões seriamente incorretas;
- A maioria dos testes acelerados são usados para obter informações de modos de falha simples ou relativamente simples (ou correspondentes medidas de degradação). Se existe mais de um modo de falha, é normal que diferentes modos de falha sejam acelerados a diferentes taxas e, a menos que isto seja explicável podem levar a interpretações incorretas dos resultados dos ensaios;
- Na pratica, relações de aceleração são difíceis de serem verificadas em sua totalidade. Os dados de vida acelerada deveriam ser usados para procurar novas maneiras de atuação em um modelo de aceleração assumido, funcionando como re-alimentação para ajuste do modelo de aceleração;
- Modelos simples tem provado serem mais práticos nas extrapolações para as condições de uso que modelos elaborados multi-paramétricos, tendo em vista a dificuldade de avaliação de todos os parâmetros que o influenciam;
- É interessante incluir algumas unidades de testes em condições que nenhuma falha seria esperada durante a duração do teste. Se falhas ocorrerem nessas condições, levaria a sérias preocupações a respeito da confiabilidade(isto sugere que o modelo assumido não é adequado);
- O programa de testes acelerados de vida deve ser planejados e conduzidos por times de incluam pessoas com conhecimentos do produto e seu ambiente de uso, com conhecimento de aspectos físicos, químicos, mecanismos de falha, os aspectos estatísticos do projeto e análise de experimentos de confiabilidade.

3.3 Planejamento de testes acelerados de vida

Geralmente testes acelerados de vida precisam ser concluídos dentro de custos rigorosos e tempos restritos. Planejar cuidadosamente é essencial. Os recursos necessitam ser usados de maneira eficiente, e o grau de extrapolação minimizado, para o melhor grau possível. Durante a fase de planejamento dos testes de um estudo, os executores devem tentar explorar o tipo de resultados que deveriam obter como função do modelo assumido no plano proposto de teste. Métodos de simulação, de acordo com os descritos nas orientações anteriores para a escolha do tamanho da amostra, também fornecem entras importantes nesse processo.

3.4 Análise de dados de testes acelerados de vida

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

- 1- Traçar, em gráficos de probabilidade, os dados obtidos em cada condição de teste (nível do fator de aceleração) separadamente, para sugerir e extrapolar a adequação de possíveis modelos de distribuição probabilística para representar a confiabilidade do produto;
- 2- Para cada condição de teste, conforme sugerido no passo anterior, ajustar modelos individualmente para os dados usando o método de máxima probabilidade. Traçar linhas da máxima probabilidade em um gráfico de múltipla probabilidade para cada uma destas condições. Usar os pontos traçados e ajustar as linhas para avaliar se o que foi assumido é razoável.
- 3- Ajustar o modelo para a relação assumida entre a vida e a variável de aceleração. Traçar o modelo ajustado em um gráfico de probabilidade, junto com os dados traçados;
- 4- Realizar uma análise residual e outro diagnostico de verificação das suposições feitas para o modelo (como uma análise de regressão padrão)

- 5- Obter as estimativas desejadas e os intervalos de confiança, e avaliar se são razoáveis;
- 6- Estimar a vida e a probabilidade de falha nas condições de uso.

4 PROCESSO DE FURAÇÃO

4.1 Brocas Helicoidais

As brocas helicoidais são ferramentas de usinagem destinadas a execução de furos, através do movimento rotativo e simultaneamente do avanço axial da broca ou da peça a ser furada ao longo do eixo de rotação.

Além do aço rápido, outros materiais podem ser utilizados na confecção de broca helicoidais, como por exemplo, o carboneto de tungstênio ou metal duro. Também podem ser confeccionadas brocas com pastilhas intercambiáveis de metal duro fixadas na ponta desta.

As brocas de aço rápido geralmente são confeccionadas com materiais do tipo ASTM A-600 M2, M35 ou M42, e seus detalhes construtivos serão mostrados nos próximos itens.

4.1.1 Tipos e formas construtivas

As brocas devem ser fixadas pela haste durante o processo de furação, e as formas mais comuns de hastes de fixação são do tipo paralela e cônica.

A figura 3.1, mostra a nomenclatura das partes que compõem uma broca helicoidal.

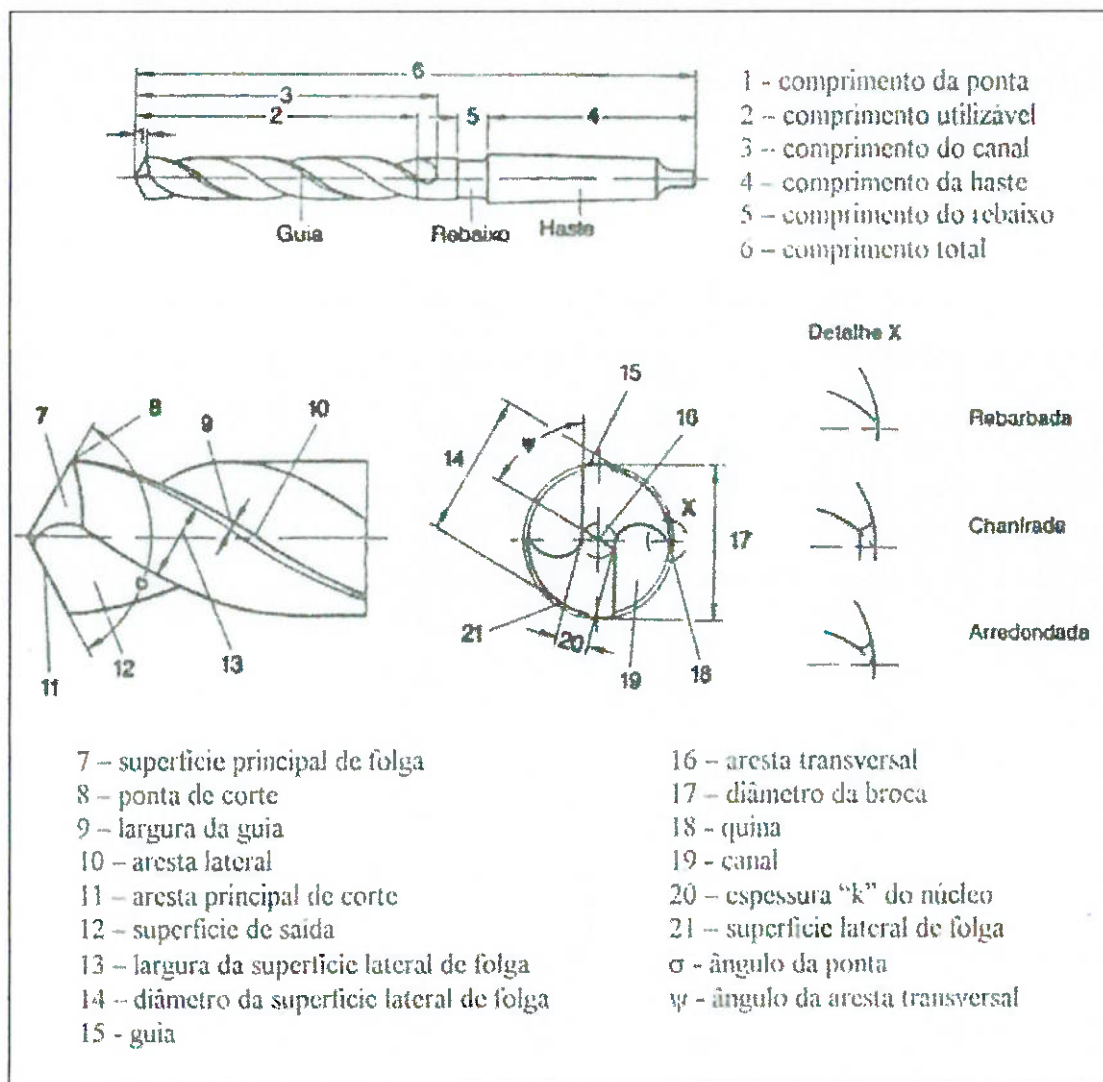


Figura 4.1 – Partes comuns que compõem uma broca helicoidal[8]

Dentre as diversas partes enumeradas na figura 3.1, pode-se comentar algumas, e dentre elas cita-se:

Comprimento utilizável: corresponde ao máximo comprimento de furo que pode ser executado durante o processo de furação, pois acima esse comprimento, a saída de cavaco é bloqueada e a broca pode se romper;

Aresta principal de corte: é responsável pelo contato direto com o material na interface de remoção de mesmo, fazendo com que haja separação do cavaco;

Superfície de saída: corresponde a superfície pela qual o cavaco ira deslizar após a separação do material;

Guia: possui diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca, e tem duas funções básicas: a primeira como o próprio nome diz é guiar a broca dentro do furo, e a segunda é evitar que toda a parede da broca sofra atrito com as paredes do furo, diminuindo assim os esforços necessários para furação;

Canais: são responsáveis por conduzir o cavaco retirado para fora do furo;

Núcleo: parte interior da broca. É o principal fator para conferir rigidez à broca;

Diâmetro: é a medida entre as duas guias da broca, e tem normalmente tolerância dimensional h8;

4.1.2 Superfícies de uma broca helicoidal

A broca helicoidal é uma ferramenta de usinagem e como tal apresenta superfícies, arestas de corte e seus ângulos característicos, conforme apresentados na figura 3.1.

Superfície de folga: são as superfícies que defrontam com as superfícies de folga, e conforme apresentado na figura 3.1, a broca helicoidal apresenta duas superfícies de folga, sendo uma principal e outra secundária também chamada de lateral.

Superfície de saída: são as superfícies da cunha cortante, sobre as quais o cavaco se forma. Estas superfícies são formadas pelos canais helicoidais.

4.1.3 Arestas de uma broca helicoidal

Arestas principais de corte: são as arestas formadas pela interseção das superfícies principais de folga e de saída. Na broca helicoidal geralmente existem duas arestas principais a corte.

Arestas secundárias de corte: também chamadas de arestas laterais de corte, são as duas linhas helicoidais formadas pela interseção das guias com os canais helicoidais.

Aresta transversal de corte: é uma aresta particular das brocas helicoidais que não existem nas demais ferramentas de usinagem. É formada pela interseção das duas superfícies principais de folga.

4.1.4 Ângulos de uma broca helicoidal

Cada ângulo de uma broca helicoidal é definido com o auxílio de um sistema de referência, formado por três planos ortogonais entre si e passando por um ponto de referência da aresta cortante. Os três planos são denominados:

plano de referência da broca: é o plano que contém o eixo da broca e passa pelo ponto de referência da aresta principal de corte;

plano de corte da broca: é o plano que contém a aresta principal de corte e é perpendicular ao plano de referência;

plano de medida da broca: é um plano perpendicular aos planos de referência e de corte, passando pelo ponto de referência da aresta principal de corte.

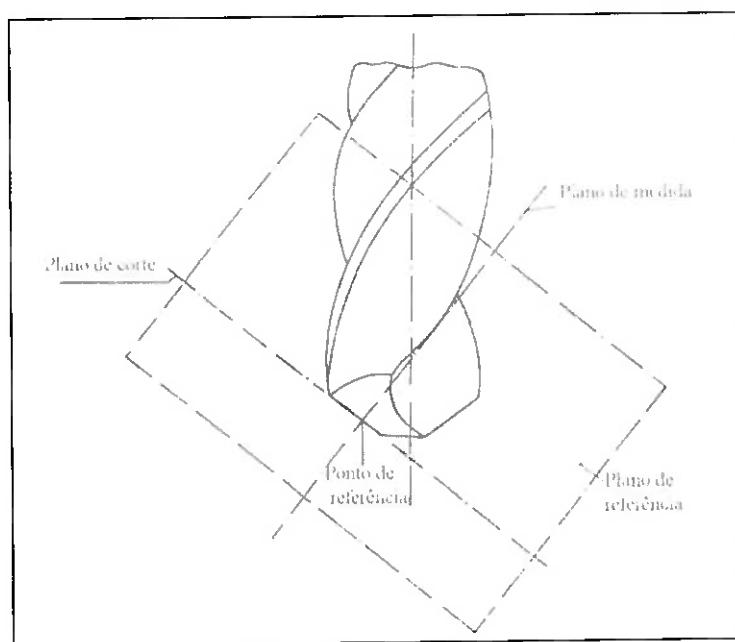


Figura 4.2 – Planos utilizados no sistema de referência para medição dos ângulos de uma broca helicoidal [10]

Existem também os planos de referência da broca:

- plano efetivo de referência da broca: é um plano que passa pelo ponto de referência da aresta principal de corte e é perpendicular a direção efetiva de corte;
- plano efetivo de corte da broca: é um plano que contém o aresta principal de corte e é perpendicular ao plano efetivo de referência;
- plano efetivo de medida: é um plano perpendicular aos planos efetivos de referência e de corte, passando pelo ponto de referência da aresta principal de corte;

Citam-se também os planos de trabalho:

- plano de trabalho no sistema efetivo de referência: é o plano que contém as direções de corte e de avanço, passando pelo ponto de referência;
- plano de trabalho no sistema de referência da broca: é o plano que passa pelo ponto de referência da aresta principal de corte, paralelo ao eixo da broca e perpendicular ao plano de referência desta;

4.1.4.1 Ângulos medidos no plano de medida

4.1.4.1.1 *ângulo de folga “ α ”*

O ângulo de folga é um ângulo característico de todas as ferramentas de usinagem, com a função de reduzir o atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície gerada na peça.

Ele é o ângulo formado pela superfície de folga e o plano de corte. É positivo, quando a reta de intersecção dos planos de corte e de medida for externa à cunha da ferramenta. Dependendo do sistema de referência, tem-se o ângulo de folga da broca “ α ”, ângulo efetivo de folga “ α_c ”, ou ângulo lateral de folga “ α_0 ” ou “ α_x ”.

4.1.4.1.2 *Ângulo de saída “ γ ”*

O ângulo de saída é formado pela superfície de saída e o plano de referência. É positivo, quando a reta de intersecção dos planos de referência e de medida for externa à cunha da ferramenta. Dependendo do sistema de referência, tem-se o ângulo de saída da broca “ γ ”, ou o ângulo efetivo de saída “ γ_e ”.

4.1.4.1.3 *Ângulo de cunha “ β ”*

O ângulo de cunha é formado pelas superfícies de folga e de saída.

Das definições anteriores decorre que:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

$$\alpha_c + \beta_e + \gamma_e \neq 90^\circ$$

Analogamente aos ângulos de saída “ γ ”, e de folga “ α ”, o ângulo de cunha varia ao longo da aresta principal de corte. Esta variação pode ser observada na figura 3.3, mostrada abaixo:

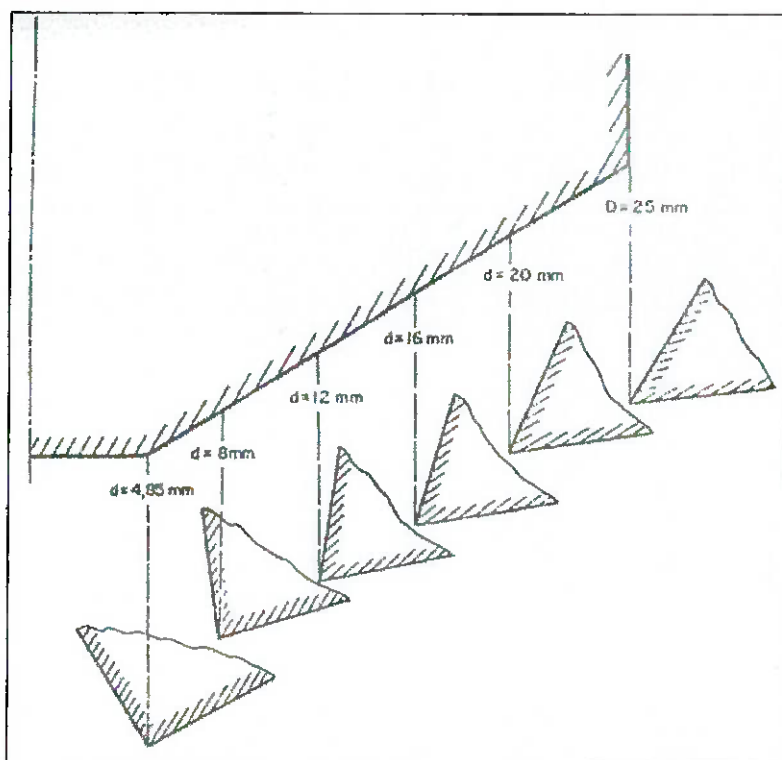


Figura 4.3 – Variação da cunha cortante ao longo da aresta principal de corte com $\sigma=118^\circ, \phi=30^\circ, \alpha_0=8^\circ$ e $D=25\text{mm}$ [11]

4.1.4.2 Ângulos medidos no plano de trabalho

Analogamente aos ângulos medidos no plano de medida, definem-se no plano de trabalho os ângulos:

- lateral de folga “ α_x ”;
- lateral de cunha “ β_x ”;
- lateral de saída “ γ_x ”;

$$\alpha_x + \beta_x + \gamma_x = 90^\circ$$

4.1.4.3 Ângulos medidos num plano perpendicular aos planos de trabalho e de referência

Em analogia, definem-se no plano perpendicular aos planos de trabalho e de referência, os ângulos:

axial de folga “ α_y ”;

axial de cunha “ β_y ”;

axial de saída “ γ_y ”;

Alguns ângulos comentados nos itens anteriores podem ser ilustrados através da figura 3.4, de acordo com a norma DIN 6581:

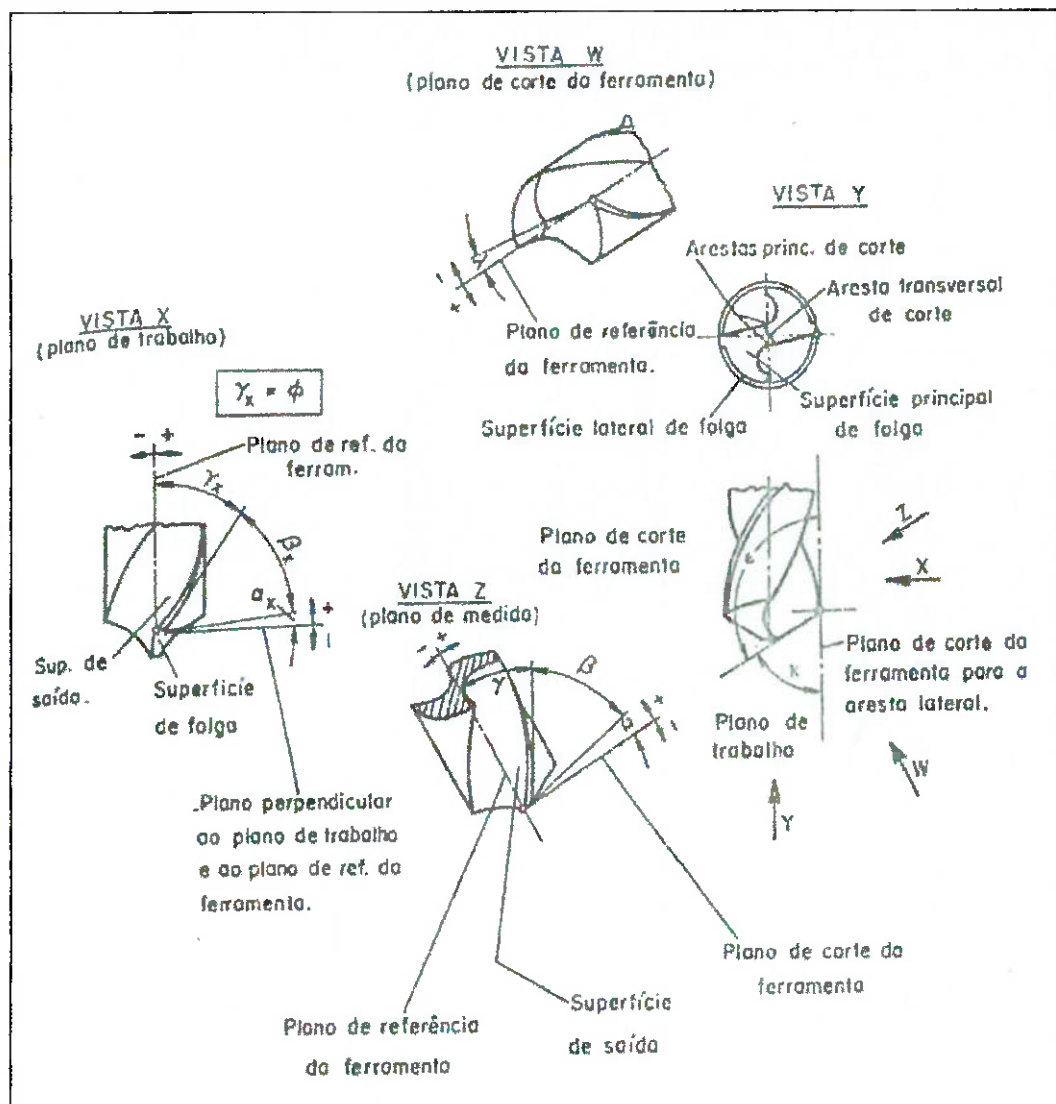


Figura 4.4 – Ângulo da broca helicoidal, segundo a norma DIN 6581 [11]

4.1.4.3.1 Ângulo de ponta “ σ ”

O ângulo de ponta corresponde à abertura da superfície cônica gerada pela broca na peça usinada.

4.1.4.3.2 Ângulo de posição “ κ ”

O ângulo de posição é formado entre o plano de corte e o plano de trabalho da broca, medido no plano de referência. Pode também ser representado pela letra grega “ χ ”.

4.1.4.3.3 Ângulo de inclinação “ λ ”

O ângulo de inclinação é formado entre a aresta principal de corte e o plano de referência, medido no plano de corte, e este varia ao longo da aresta principal de corte conforme a figura 3.5.

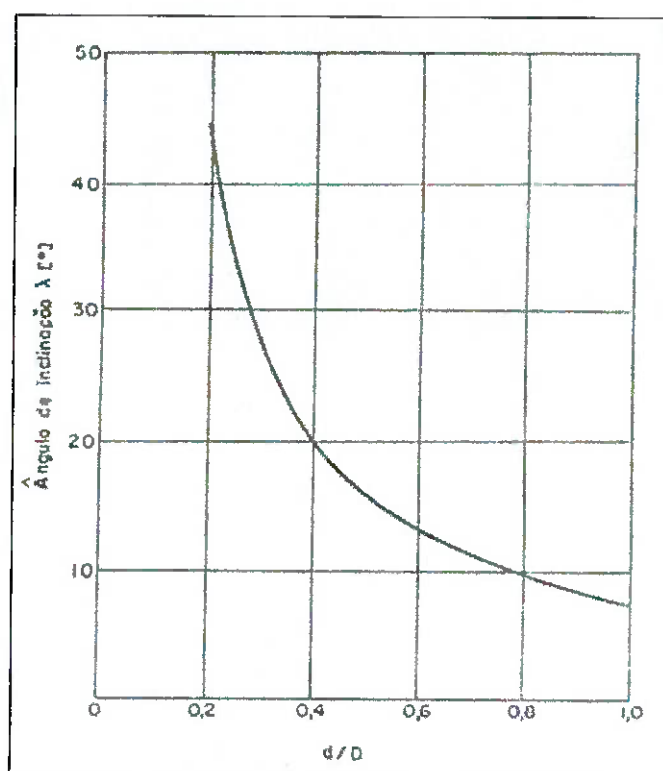


Figura 4.5– Variação do ângulo de inclinação, ao longo da aresta principal de corte, com $\sigma = 118^\circ$ e $\tau_0 = 0,16$ (τ = raio do núcleo/ distancia do centro até um ponto na aresta principal de corte) [11]

4.1.4.3.4 Ângulo de hélice “ ϕ ”

O ângulo de hélice é o ângulo entre a estria helicoidal e a direção do eixo da broca. Coincide com o ângulo lateral de saída “ γ_x ”, quando o ponto de referência for a ponta da aresta cortante. Ele pode ser classificado com:

Tipo W (do alemão Weich = mole), em geral 40°: passo curto, recomendada para materiais que formam cavacos longos, como ligas de alumínio;

Tipo N (do alemão Normal, semelhante ao português), em geral 30°: passo normal, recomendada para materiais comuns, com aços e ferro fundidos;

Tipo H (do alemão Hart = duro), em geral 15°: passo longo, recomendada para materiais que formam cavacos longos, tais como bronze.

4.1.4.3.5 Ângulo da aresta transversal de corte “ ψ ”

O ângulo da aresta transversal de corte é o ângulo agudo entre a aresta transversal e a projeção da aresta principal de corte sobre um plano perpendicular ao eixo da broca, contendo a aresta transversal de corte.

Os ângulos de hélice, de ponta e da aresta transversal de corte, podem ser encontrados na figura 4.6.

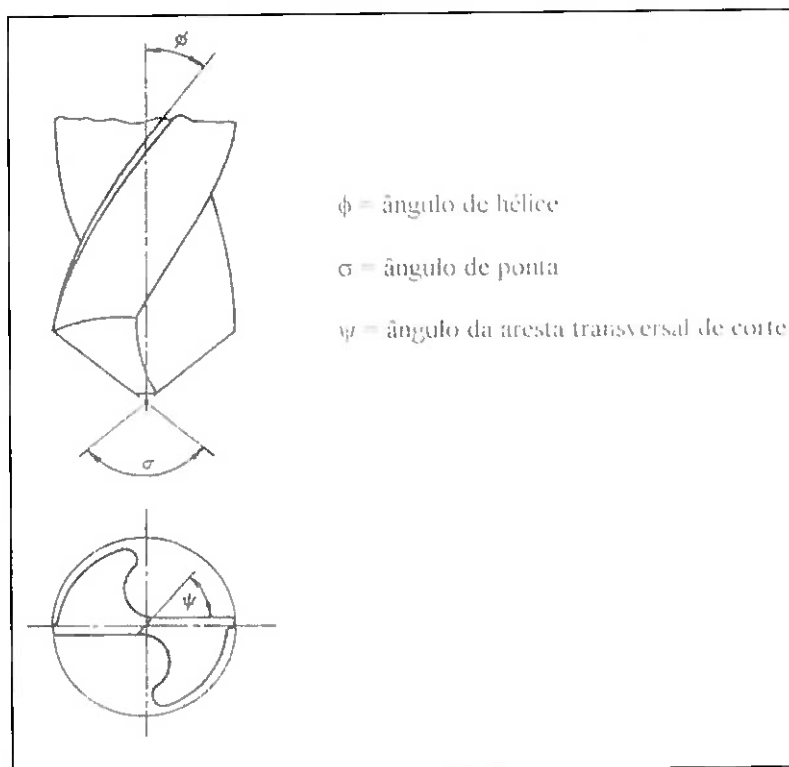


Figura 4.6 – Ângulo de hélice, de ponta e da aresta transversal de corte. [11]

4.1.5 Principais tipos de afiação

Uma das grandes vantagens da utilização de brocas helicoidais é a facilidade em alterar sua geometria, para melhorar as condições de corte de determinados materiais.

Uma afiação ideal deve satisfazer as seguintes condições:

- Originar uma orça de avanço pequena;
- Originar um momento de torção pequeno;
- Produzir furos com alargamento mínimo;
- Produzir furos com bom acabamento superficial;
- Ser aplicável na furação de todos os materiais;
- Deve ter vida longa;
- Deve ser afiado numa única fixação na máquina;
- Deve permitir a afiação manual;

- O custo de afiação deve ser pequeno;

É claro que qualquer afiação real deve sacrificar algumas das condições acima em benefício de outras, sendo que a afiação cônica satisfaz a maioria das condições anteriores, apesar de ser a mais antiga, ainda é a mais utilizada.

Na afiação cônica, a broca é colocada frente ao rebolo, de maneira que seu eixo geométrico forme um ângulo igual a metade do ângulo de ponta desejado com a face do rebolo. Uma vez encostada uma das arestas cortantes da broca na face do rebolo, esta gira em torno de um eixo, denominado eixo de rotação do aparelho. Para que o ângulo de folga seja positivo em qualquer diâmetro da broca, é necessário que este eixo não seja coplanar com o da broca, caso contrário teríamos $\alpha=0$, pois a curva obtida no plano de medida, pela interseção da superfície de folga (obtida nesta afiação) com este plano, seria uma circunferência cujo centro no eixo da broca. É necessário portanto que exista uma distância “e” entre o plano que contém o eixo da broca e o plano que contém o eixo de rotação do aparelho. Esta grandeza aparece sem escala no plano de medida. A figura 3.7, mostra os ângulos α, β e γ da broca, medidos em duas posições (plano de medida I e plano de medida II), correspondente a dois diâmetros da broca. Quanto maior o valor de “e” maior será o ângulo α . As máquinas de afiação cônicas geralmente têm um excêntrico no eixo de rotação, que permite variar a distância “e”, e este é o mecanismo das máquinas utilizadas na fabricação das brocas atualmente.

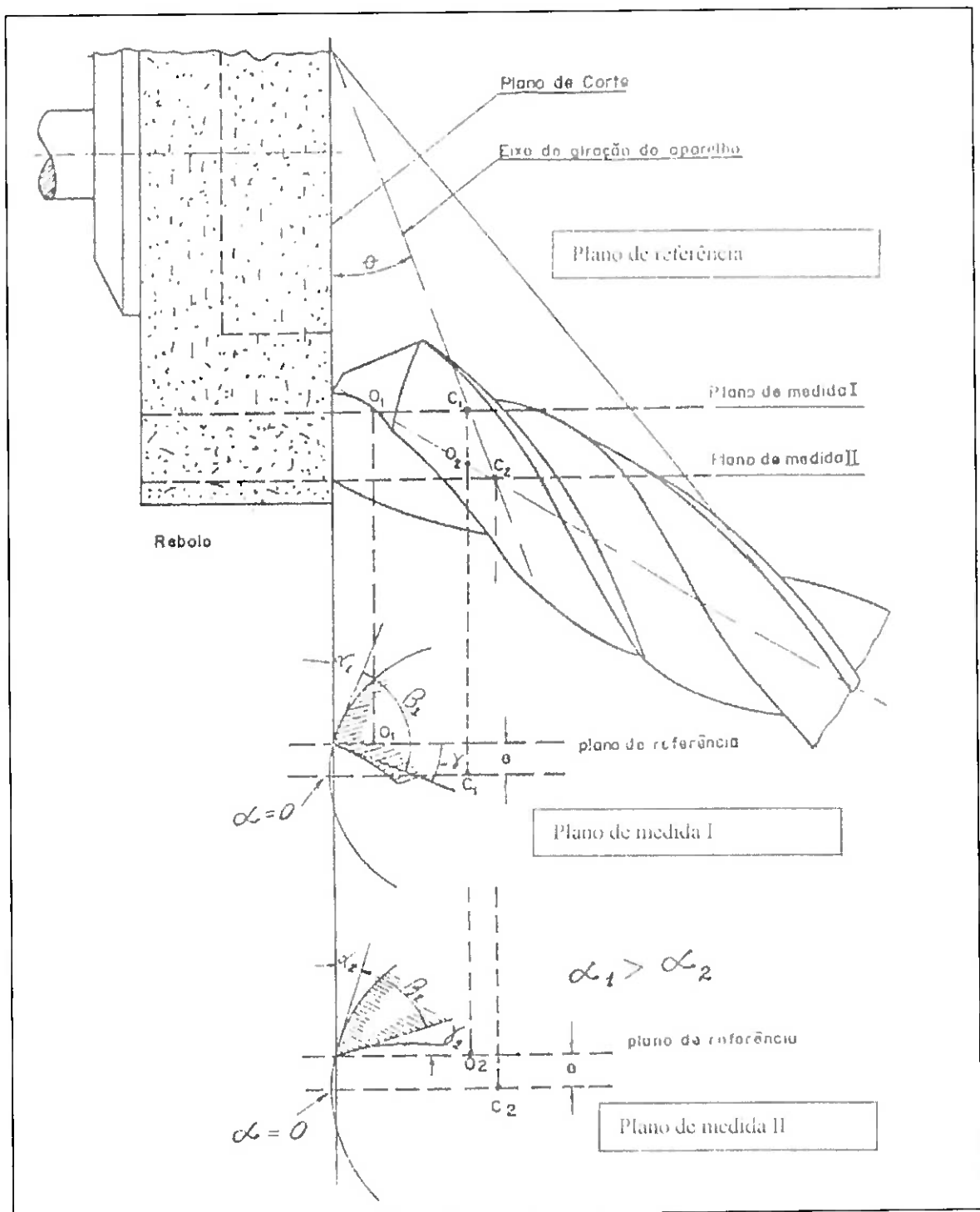


Figura 4.7 – Princípio de afiação de uma broca helicoidal por cone de revolução [6]

A seguir são mostrados cinco outros tipos de afiação segundo a norma ABNT TB-111:

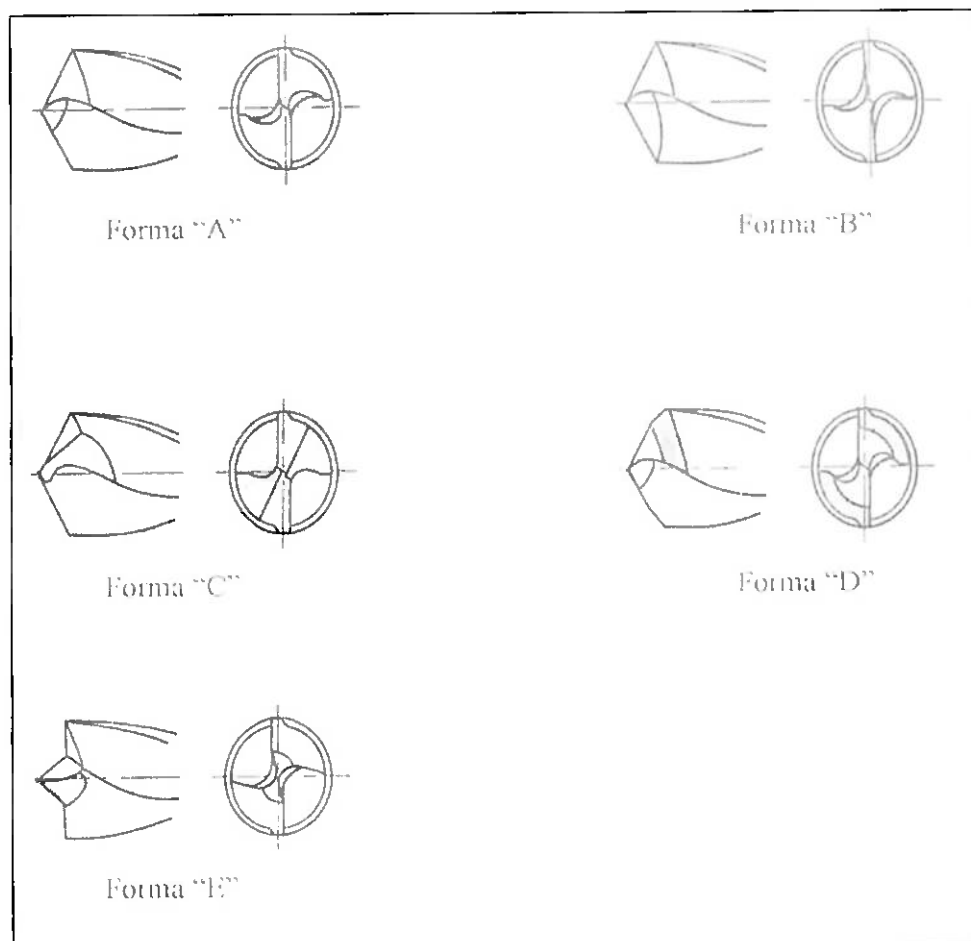


Figura 4.8 – Afiações especiais, segundo a norma ABNT TB-111[12]

Na afiação de “forma A”, ocorre o chanframento da aresta transversal de corte, e este tipo visa reduzir a força de avanço da broca, ao diminuir o comprimento da aresta transversal de corte, sendo que aproximadamente 50% da força de avanço de uma broca com afiação cônica é devido à aresta transversal de corte.

Na afiação de “forma B”, também ocorre o chanframento da aresta transversal de corte, com correção do ângulo de saída da aresta principal de corte.

Na afiação de “forma C”, também chamada de cruzada, um plano inclinado nas superfícies de incidência (flancos) é retificado, eliminando parcial ou totalmente a aresta transversal. Em lugar desta, se formam duas novas arestas que formam

um ângulo menor do que 90° com o eixo principal, provocando um efeito centrante na broca. Com a diminuição da aresta transversal de corte, a resistência ao corte que é bastante alta no centro da broca de afiação cônica, também é diminuída e ocorre a eliminação da possibilidade de formação do “fio recrescido de corte”. Este tipo de afiação oferece vantagens na execução de furos profundos e na furação de materiais duros.

Na afiação de “forma D” (afiação de ponta secundária), além da ponta principal, retifica-se uma segunda ponta, com ângulo menor, sendo aplicada principalmente na furação de ferro fundido cinzento. O objetivo desta afiação é aumentar o comprimento das arestas principais de corte na região onde a velocidade de corte é máxima, reduzindo o perigo de sobre-aquecimento e aumentando a via da broca.

A afiação de “forma E”, com ponta de centragem, é utilizada na furação de chapas. As principais vantagens deste tipo de afiação, com relação a afiação cônica são:

- Menor custo de usinagem (comprimento de entrada e saída da ferramenta pequenos), reduzido significativamente os tempos de furação em chapas;
- Evita o “enganchamento” da broca na chapa no momento da furação;
- Pouca ou nenhuma rebarba na saída da chapa;
- Melhor localização do centro do furo;
- Melhor acabamento superficial da parede do furo e aumento de 8 a 10% na capacidade de corte.

5 MECANISMOS DE FALHA DE FERRAMENTAS DE USINAGEM

Os modos de falha mais importantes de um processo de usinagem são os desgastes e as avarias da ferramenta de usinagem. O desgaste é um fenômeno que ocorre em todo processo de usinagem e não pode ser evitado. As ferramentas de usinagem se desgastam até atingir o fim da vida, onde a ferramenta atinge um nível de desgaste suficientemente grande para que não seja mais possível manter as tolerâncias exigidas para a peça ou/e devido ao nível de desgaste corre-se o risco da ferramenta quebrar podendo assim prejudicar não somente a ferramenta como também a peça usinada o que pode causar um grande prejuízo dependendo do valor da peça.

O desgaste resulta da interação entre a peça e a ferramenta e depende das condições de corte, sendo assim, produto de fatores térmicos, mecânicos, químicos e abrasivos que mudam a geometria da aresta de corte.

À medida que a ferramenta vai se desgastando, observa-se variações no processo de usinagem. A temperatura eleva-se progressivamente, a força e a potência de corte consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se alteram, e o acabamento superficial piora. Em condições extremas, ocorre o 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 de desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total da aresta.

Diversos tipos de desgaste e avarias que ocorrem em uma ferramenta de usinagem. Dentre eles os principais são:

- a) Desgaste Flanco (ou de Frontal) – ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pela abrasão mecânica entre a peça e a ferramenta. É o tipo de desgaste mais comum. Todo processo de usinagem causa desgaste de flanco. Este tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz

com que a peça mude de dimensões, podendo sair de sua faixa de tolerância. Este tipo de desgaste é incentivado pelo aumento da velocidade de corte.

- b) Desgaste de Entalhe – Ocorre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Este desgaste causa um acabamento superficial de má qualidade ou fora da tolerância e risco de quebra da aresta. Pode-se diminuir este tipo de desgaste reduzindo a velocidade de corte exceto quando se usina materiais resistentes ao calor com cerâmicas, para materiais endurecidos deve-se selecionar uma ferramenta com um ângulo de posição menor, uma classe mais resistente ao desgaste, ou com cobertura.
- c) Desgaste de Cratera – é o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causando 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 devido a 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. Este desgaste pode ser estimulado pela elevada temperatura no corte na face de topo. O desgaste de cratera pode não ocorrer em alguns tipos de usinagem, principalmente quando se utiliza ferramentas de metal duro recobertas, ferramentas cerâmicas e quando o material da peça é frágil. O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste de flanco.
- d) Deformação Plástica da aresta de corte – é um tipo de avaria da ferramenta. Muitas vezes a pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada a altas temperaturas, gera deformação plástica da aresta de corte. Tais deformações provocam deficiências do controle de cavaco e deterioração do acabamento superficial da peça. O crescimento desta deformação pode gerar a quebra da aresta de corte. Este tipo de avaria pode ser evitada pelo emprego de uma ferramenta com maior dureza a quente e maior resistência a deformação plástica, ou pela mudança das condições de usinagem e/ou geometria da ferramenta, visando a diminuição dos esforços e da temperatura de corte.

- e) Lascamento – é um tipo de avaria da ferramenta. Ao contrário dos desgastes de flanco e de cratera, que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento partículas maiores são retiradas de uma só vez. O lascamento ocorre principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Este tipo de avaria prejudica o acabamento superficial da peça e pode provocar a quebra da ferramenta em caso de crescimento.
- f) Trincas – outro tipo de avaria da ferramenta. As trincas são causadas pela variação de temperatura e/ou pela variação de esforços mecânicos. Quando as trincas são de origem térmica, elas ocorrem perpendicularmente à aresta de corte e quando são de origem mecânica são paralelas a aresta. Alguns fatores que geram variação de temperatura ou de esforços são: corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte, variação da espessura do corte e solda da pastilha no porta ferramenta. O crescimento das trincas leva a quebra da ferramenta. Para evitar a formação de trincas pode-se, dentre outros procedimentos, escolher uma ferramenta mais tenaz, diminuir o avanço por dente e para o processo de fresamento, posicionar corretamente a fresa em relação à peça.
- g) Quebra – Em todos os desgastes ou avarias já citados o crescimento pode causar a quebra da ferramenta. Porém, em alguns casos a quebra pode ocorrer inesperadamente devido a alguns fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequenos, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais de expulsão do cavaco ou dos bolsões de armazenamento do cavaco, etc. A quebra da ferramenta não ocasiona somente a perda da ferramenta, mas também no porta ferramenta e na própria peça.

A tabela abaixo apresenta a análise tipo FMEA genérica para uma ferramenta utilizada num processo de usinagem. Observa-se que a ferramenta pode falhar pela

quebra ou por um tipo de desgaste. A quebra da ferramenta é possível de ser evitada, mas o desgaste está sempre presente.

Tabela 5.1 Análise de Modos das Falhas de Ferramentas de Usinagem.[16]

FUNÇÕES	MODOS DE FALHA	CAUSAS	EFEITOS	MÉTODO DE DETECÇÃO DA FALHA
Executar o corte de uma superfície, mantendo restrições dimensionais, geométricas e acabamento superficial	Desgaste de Flanco	Velocidade de corte fora do padrão estabelecido 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 especificado.	Emissão acústica. Métodos de inspeção da superfície. Controle do processo. Verificação do aumento do torque ou potência da máquina.
	Deformação Plástica	Aumento da temperatura pelo aumento da força de usinagem, devido ao aumento das condições de corte. Material fora do especificado (mais duro).	Rugosidade superficial acima do especificado. Problemas no controle do cavaco.	Métodos de inspeção da superfície. Controle do processo. Verificação do aumento do torque ou potência da máquina.

	Desgaste de Cratera	Aumento da temperatura pelo aumento da força de usinagem, devido ao aumento das condições de corte.	Rugosidade superficial acima do especificado. Quebra da ferramenta.	Difração de Raios X
	Quebra	Aumento da força de usinagem devido ao acúmulo de cavaco ou deformação 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 do tempo de processamento.	Emissão acústica. Verificação do aumento do torque ou potência da máquina.

Os principais desgastes de uma ferramenta durante a usinagem realiza-se principalmente na superfície de saída, na superfície de folga da ferramenta são eles os desgaste de flanco e o de cratera. Para facilitar o estudo da usinagem, costuma-se padronizar os desgastes da ferramenta com os chamados desgastes convencionais.

Os desgastes convencionais são medidos no plano de medida da ferramenta. Distinguem-se os desgastes originados na superfície de saída, na superfície de folga ou incidência e o deslocamento da aresta cortante.

Os desgastes medidos na superfície de saída são:

- *Profundidade de cratera*, C_p ;
- *Largura da cratera*, C_l ;
- *Distância do centro da cratera da aresta de corte*, C_d .

A figura 5.1 mostra os desgastes convencionais na ferramenta de corte:

- *Deslocamento da aresta cortante*, D_γ , medido segundo a intersecção da superfície de saída com o plano de medida.
- *Deslocamento da aresta cortante*, D_α , medido segundo a intersecção da superfície de incidência com o plano de medida.
- *Deslocamento da aresta cortante*, D_β , medido segundo a bissetriz do ângulo de cunha β .

Além destes tipos de desgaste, é muito importante quantificar a área limitada pela curva de desgaste e o perfil original da ferramenta, medida no plano de medida. É comum representar a área pelo volume de material gasto na unidade de comprimento da aresta cortante. Tem-se os seguintes volumes específicos:

- Volume gasto na superfície de saída, V_γ .
- Volume gasto na superfície de incidência, V_α .

Em algumas literaturas encontramos também o desgaste de cratera na superfície de saída expresso pela seguinte relação:

$$k = \frac{C_p}{C_d} \quad (5.1)$$

5.1 Medidas do desgaste

A medida do desgaste I_1 da superfície de incidência é facilmente realizada por meio de uma lupa com retículo ou microscópio de oficina.

Para uma maior precisão empregasse um microscópio de oficina com mesa de avanço micrométrico permitindo a leitura em centésimos de milímetro. A ferramenta neste caso é fixada a um suporte que permite a colocação da superfície de observação em plano horizontal.

A medida de profundidade de cratera C_p da superfície da ferramenta é feita geralmente por perfilômetros registradores especiais.

Para medida de desgastes pequenos, tem-se revelado de grande utilidade o método de medida de desgaste por radioisótopos, empregado geralmente em pastilhas de metal duro.

5.2 O mecanismo de desgaste das ferramentas de metal duro

O desgaste de uma ferramenta de metal duro é resultado da ação de vários fenômenos distintos, denominados componentes do desgaste. Dependendo da natureza do material usinado e das condições de usinagem, predominará uma ou outra das componentes do desgaste sobre as demais. O comportamento do desgaste de uma ferramenta é melhor compreendido através das curvas de desgaste-velocidade de corte.

5.2.1 Curvas desgaste-velocidade de corte

A figura 5.2 apresenta um caso particular típico das curvas de desgaste de uma ferramenta em função da velocidade de corte. Observa-se que para uma dada combinação de avanço velocidade de corte existe um desgaste mínimo da ferramenta. É de se prever que o mecanismo de desgaste à esquerda do mínimo seja diferente do mecanismo à direita deste mínimo. Pode-se distinguir seis componentes diferentes para o desgaste de uma ferramenta e assim obter um diagrama que fornece informações qualitativas acerca da participação relativa de cada componente no desgaste total, em velocidades de corte crescentes.

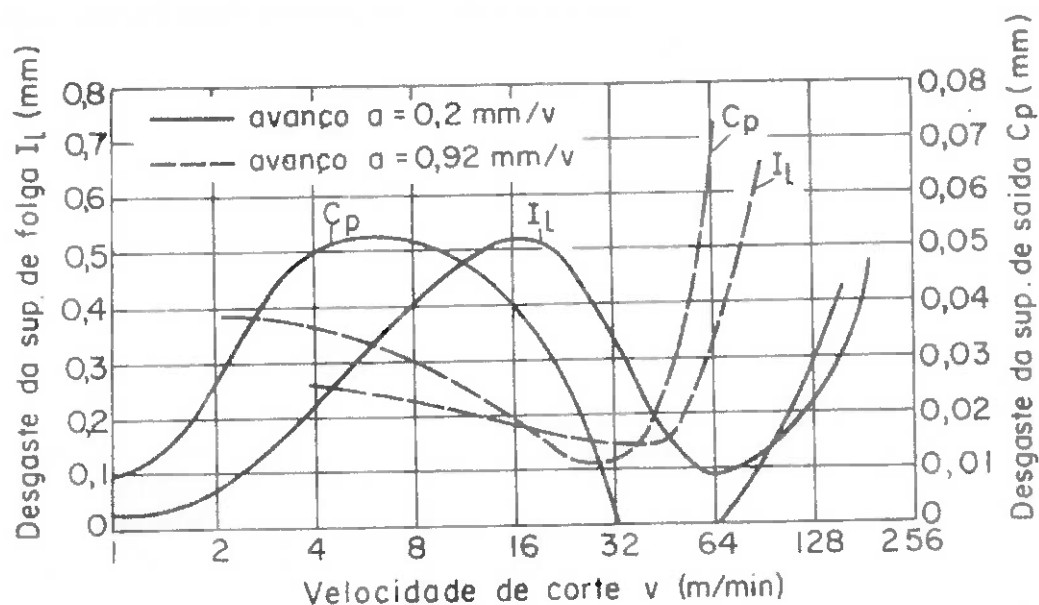


Figura 5.2 – Curvas de desgaste-velocidade de corte para o torneamento de aço ABNT 1060. [6]

A separação qualitativa das componentes do desgaste é praticamente impossível, porém o quadro qualitativo visualiza a importância de cada componente nas diferentes velocidades de corte. Assim, em velocidades de corte baixas, o desgaste das ferramentas de metal duro é relativamente elevado por causa do cisalhamento da aresta postiça de corte. Em velocidades de corte maiores, o desgaste é causado principalmente pelos fatores cuja intensidade depende da temperatura de corte, tais como abrasão mecânica, difusão intermetálica e a oxidação.

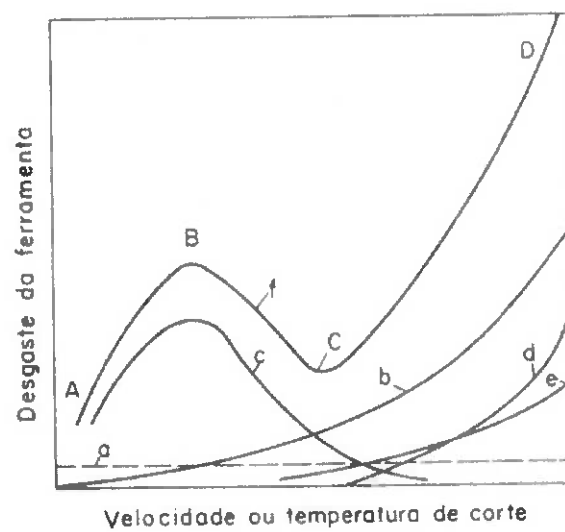


Figura 5.3 – Participação da diferentes componentes no desgaste total da ferramenta; a = deformação na aresta cortante; b = abrasão mecânica; c = cisalhamento da aresta postiça de corte; d = difusão; e = oxidação; f = resultante; [6]

5.2.2 Aresta postiça de corte

A assim chamada Aresta postiça de corte é constituída de partículas do material usinado que se acumulam na superfície de saída da ferramenta. A forma característica de uma aresta postiça de corte está indicada na figura 5.4.

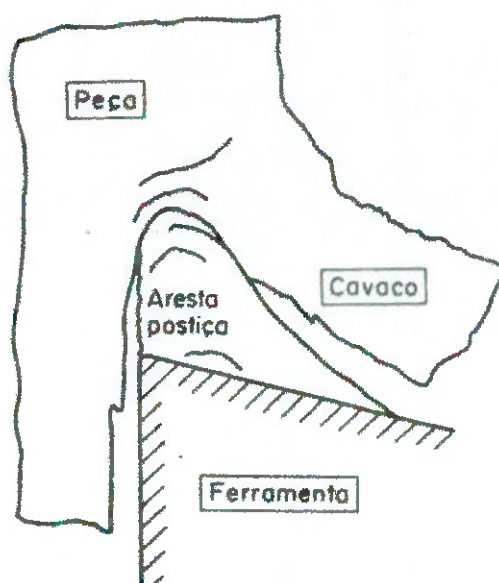


Figura 5.4 – Forma característica de uma aresta postiça de corte; material aço ABNT 1050; ferramenta de metal duro P30 [6]

A aresta postiça de corte altera as relações geométricas da formação do cavaco, desempenhando a função de aresta cortante. Isto só é possível graças ao forte encruamento das partículas do material que constituem a aresta postiça de corte.

Observa-se que as durezas presentes na aresta postiça de corte correspondem às dos materiais temperados. A origem destas durezas elevadas decorre do grau de deformação excepcionalmente elevado do material.

5.2.2.1 Aresta postiça de corte e o desgaste da ferramenta

O desgaste da superfície de folga de uma ferramenta após um tempo de usinagem constante varia em função da velocidade de corte. A figura 5.5 exemplifica esta variação para um caso particular. Observa-se que o desgaste apresenta valores máximos e mínimos associados a diferentes velocidades de corte. A figura 5.5 também indica as faixas de velocidades de corte em que a presença de aresta postiça de corte pode ser constatada. A existência da aresta postiça foi verificada apenas em velocidades de corte inferiores àquelas que correspondem ao desgaste mínimo I_1 (trecho m da figura 5.5)

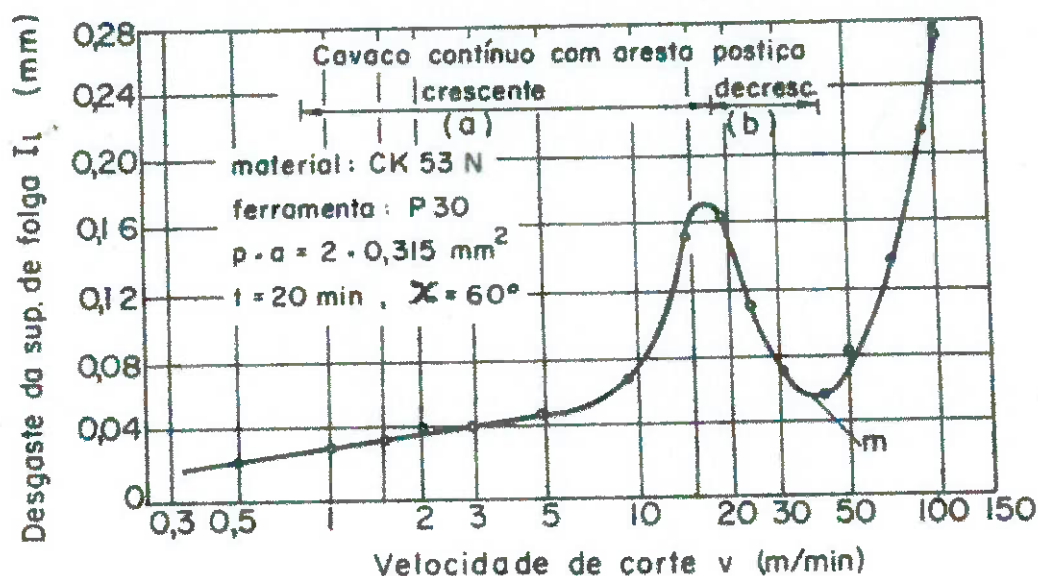


Figura 5.5 – Variação do desgaste da superfície de folga da ferramenta em função da velocidade de corte, para um tempo de usinagem constante. [6]

Distinguem-se duas regiões de formação da aresta postiça

- região na qual as dimensões da aresta postiça crescem com o aumento da velocidade de corte;
- região em que as dimensões da aresta postiça diminuem com o aumento da velocidade de corte;

Estas duas regiões distintas podem ser constatadas não somente através do desgaste da ferramenta e das dimensões da aresta postiça, como também através do aspecto do cavaco formado. No caso a, as superfícies inferiores do cavaco apresentam escamas regulares enquanto que no caso b se observam alternadamente locais brilhantes e locais com escamas.

As escamas nada mais são do que partículas da aresta postiça que saíram junto com o cavaco. Os locais brilhantes do cavaco correspondem a ausência de aresta postiça, a qual tinha sido arrancada imediatamente antes pelo cavaco, de maneira que a ferramenta, durante um pequeno intervalo de tempo, trabalhou sem aresta postiça. Logo em seguida se forma uma outra aresta postiça e assim por diante. A frequência deste fenômeno cresce com o aumento da velocidade de corte e a porcentagem de locais brilhantes também aumenta, até que toda a superfície interior do cavaco apresente um aspecto brilhante, indicando que não há mais aresta postiça de corte.

A transição do tipo de aresta postiça, com aderência relativamente forte na superfície de saída da ferramenta, ao tipo de existência transitória ocorre a uma velocidade de corte bem determinada. Enquanto que nas baixas velocidades de corte as arestas postiças são estáveis, nas velocidades de corte maiores desaparecem e aparecem periodicamente. A velocidade de transição situa-se em torno da velocidade que corresponde ao desgaste máximo na figura 5.5. Observa-se que no caso particular da figura 5.5, o desgaste cresce até uma velocidade de 18m/min que corresponde as dimensões máximas da aresta postiça de corte. Acima desta velocidade, as dimensões da aresta postiça diminuem até seu desaparecimento completo acima de 40m/min. Pode-se constatar que, entre o aparecimento da aresta postiça de corte e o desgaste da superfície de folga da ferramenta existe uma correspondência bem definida. *Quanto maior for a aresta postiça de corte, maior será o desgaste da superfície de folga.*

A forma do desgaste da superfície de folga, quanto à formação da aresta postiça de corte, é diferente da forma do desgaste que se observa normalmente, quando não existe a aresta postiça. Enquanto que nas velocidades de corte maiores, onde não há uma aresta postiça, a marca do desgaste é aproximadamente paralela à direção da velocidade de corte, esta marca é inclinada em relação à direção da velocidade de corte, quando a usinagem se processa na presença de uma aresta postiça.

A figura 5.6 mostra a variação do desgaste da superfície de folga, com aresta postiça de corte, em função do tempo de usinagem. Observa-se que nos primeiros minutos, o desgaste cresce rapidamente e que após um tempo determinado, o aumento do desgaste é menos acentuado.

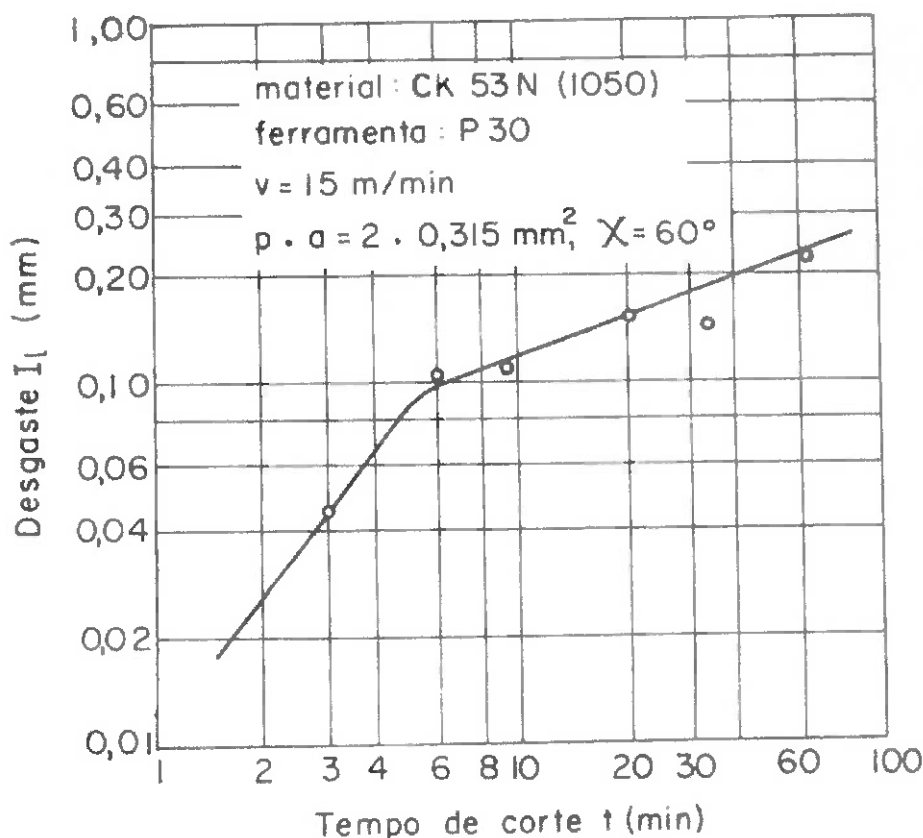


Figura 5.6 – Desgaste da superfície de folga na usinagem com aresta postiça de corte[6]

O mecanismo de desgaste da superfície de saída, quando houver aresta postiça, é diferente do mecanismo de desgaste da superfície de folga. Medindo as profundidades da cratera que se forma na superfície de saída após um percurso de corte constante e com velocidades de corte variáveis observa-se que numa faixa determinada de velocidades de corte a profundidade da cratera de desgaste C_p diminui com o aumento da velocidade de corte. Portanto, a aresta postiça de corte protege a superfície de saída da ferramenta contra o desgaste, ao contrário do que se dá com relação ao desgaste da superfície de folga.

5.2.2.2 Mecanismos de desgaste da ferramenta na presença de aresta postiça de corte

Foi visto anteriormente que a aresta postiça provoca o aumento do desgaste na superfície de folga e exerce uma ação protetora contra o desgaste da superfície de saída. Assim, é apresentado aqui uma descrição do mecanismo de desgaste na superfície de folga.

A altura, H , da aresta cortante praticamente independe da velocidade de corte, razão pela qual o desgaste será afetado principalmente pelo comprimento L da aresta postiça. O Comprimento L em si não constitui, porém, uma explicação do desgaste mas este pode alterar o mecanismo de formação do cavaco, alteração esta responsável pelo desgaste.

Provou-se experimentalmente que, uma vez alcançadas determinadas dimensões críticas da aresta postiça, esta sofre um cisalhamento da sua parte dianteira, cisalhamento este que se dá a 30° com a direção de corte.

Durante o cisalhamento da parte dianteira da aresta postiça esfrega a superfície de folga. Simultaneamente, pequenas partículas da ferramenta arrancadas pelo destacamento dos pontos de micro-soldagem podem aderir a aresta postiça. Através da saída periódica de partículas duras da aresta postiça, o desgaste da superfície de folga aumenta progressivamente. (figura 5.7). *quanto maior for a frequência de saída destas partículas, maior será o desgaste por unidade de tempo.*

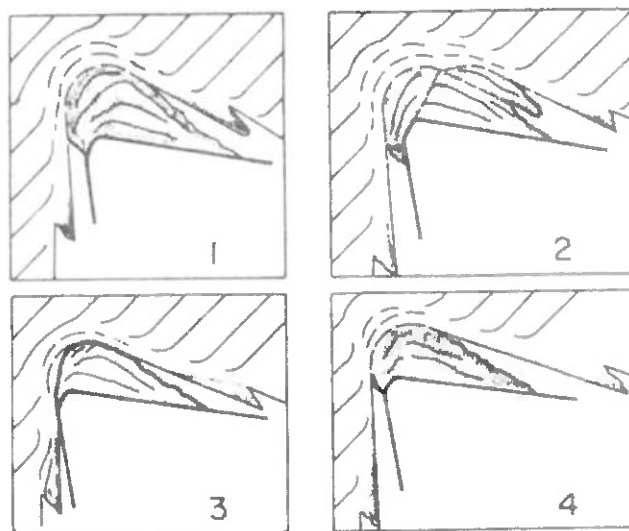


Figura 5.7 – Saída de partículas da resta postiza junto a superfície inferior do cavaco e à superfície da peça; [6]

5.2.3 Mecanismos de desgaste na superfície de saída da ferramenta, segundo Trigger e Chao

Segundo estes autores, há dois mecanismos de desgaste na ferramenta:

- a) um desgaste do tipo adesão e transferência das micro-asperezas, no qual a ruptura das micro-asperezas ocorre numa camada delgada da superfície da ferramenta, próxima a superfície de contato com o cavaco. Seria a consequência do enfraquecimento do material da ferramenta devido a difusão intermetálica e a formação de ligas. Para uma dada composição química e uma dada porcentagem de microconstituintes do material usinado e da ferramenta, a distribuição das temperaturas na superfície de contato seria o fator principal que rege o fenômeno. A transferência do metal da ferramenta ao cavaco se processa de maneira descontínua, na forma de partículas microscópicas;
- b) um desgaste do tipo abrasivo. O endentamento das superfícies em contato não só aumenta a resistência ao deslizamento, como também origina desgaste de natureza mecânica. Este tipo de desgaste depende principalmente da relação das

durezas da ferramenta e do material em dadas condições de usinagem, da quantidade e da distribuição das micro-impurezas duras do material usinado, do seu estado de encruamento e outros.

5.2.4 Mecanismos de desgaste na superfície de folga da ferramenta, segundo Takeyama e Murata

O volume total do desgaste de folga da ferramenta pode ser considerado como sendo o resultado de três mecanismos de desgaste distintos, a saber: as avarias mecânicas, a abrasão mecânica e as reações físico químicas (difusão, formação de ligas, oxidação).

A equação geral do volume de desgaste pode ser expressa como:

$$V = V_m(n, \sigma_m) + V_a(l, \sigma_a) + V_r(\theta, t) + V_i \quad (5.2)$$

onde

- V = desgaste total da superfície de folga;
- V_m = desgaste devido as avarias mecânicas;
- V_a = desgaste devido a abrasão mecânica;
- V_r = desgaste devido às reações físico-químicas;
- V_i = desgaste devido a outros fatores;
- σ_m = resistência da ferramenta aos choques;
- σ_a = resistência da ferramenta a abrasão;
- n = número de choques;
- l = comprimento do corte;
- θ = temperatura absoluta da aresta de corte;
- t = tempo de usinagem;

Nas operações de usinagem continua, o termo V_m pode ser desprezado. Abandonando também o termo V_i , a relação se simplifica para:

$$V = V_a(l, \sigma_a) + V_r(\theta, t) \quad (5.2)$$

Tendo em vista que a abrasão mecânica da ferramenta é realizada pelas partículas duras do material da peça, e admitindo uma distribuição uniforme de tais partículas, o termo V_a será proporcional ao comprimento de corte. O termo V_r pode ser admitido como proporcional à expressão $e^{-E/K.\theta}$, onde E é denominado de energia de ativação e K uma constante. Assim, o desgaste total da superfície de folga, por unidade de tempo, será:

$$\frac{dV}{dt} = A.v(\theta, a) + B.e^{-E/K.\theta} \quad (5.3)$$

supondo que a resistência da ferramenta à abrasão, σ_a , seja função da temperatura θ ; v é a velocidade de corte, e a o avanço, enquanto que A e B são constantes empíricas.

O peso do desgaste específico por unidade de comprimento de corte é:

$$\frac{dG}{dl} = A + \frac{B}{v}.e^{-E/K.\theta} \quad (5.4)$$

Para a determinação das constantes foram realizados por Takeyama e Murata ensaios de usinagem com um aço liga (G 18 B da norma japonesa), com $\sigma_r = 70\text{kg/mm}^2$; a ferramenta era de metal duro p 10; a velocidade de corte variava de 15 a 900 fpm e o avanço variava de 0,004 a 0,024 ipr; a profundidade de corte estava compreendida entre 0,02 e 0,1 polegada. A temperatura de corte foi medida através do efeito termoeletrico. Os resultados obtidos são resumidos nas figuras 5.8 e 5.9. Observa-se no exemplo da figura 5.8 que até a temperatura de corte da ordem de 1200 K (927 °C) o desgaste específico praticamente independe da temperatura. Isto significa que até esta temperatura o desgaste da superfície de folga é de natureza abrasiva, ou seja, é proporcional ao comprimento de corte. A constante A da expressão anterior será, então:

$$\frac{dG}{dl} = A = 8,6 \times 10^{-10} \text{ lb/ft.in},$$

obtida no gráfico da figura 5.8.

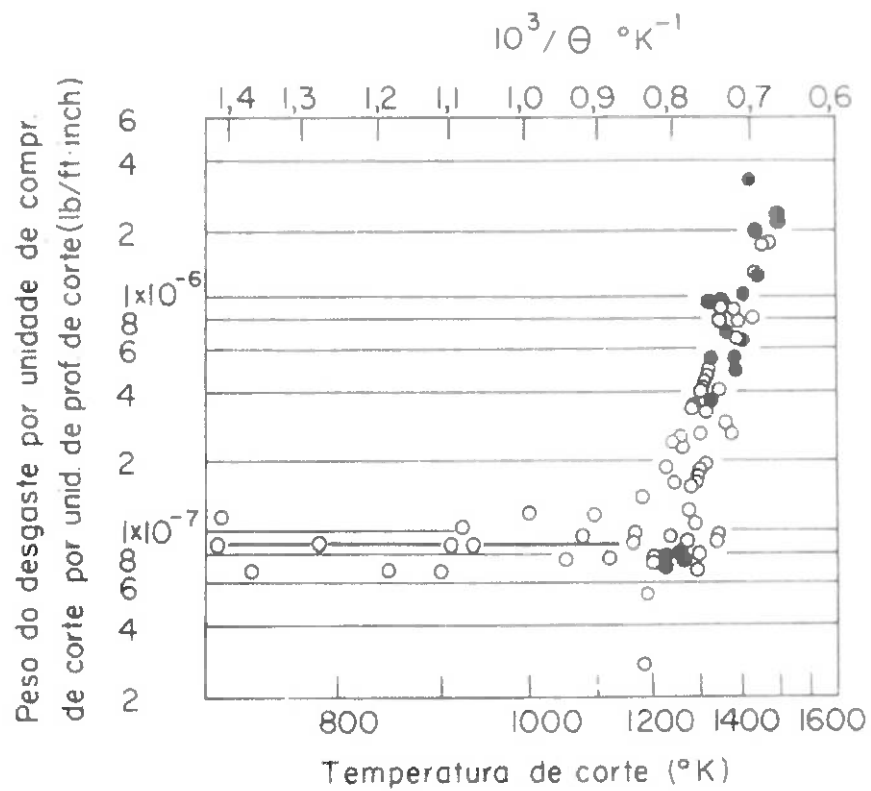


Figura 5.8 – Relação entre a temperatura de corte e o peso do desgaste por unidade de comprimento de corte; [6]

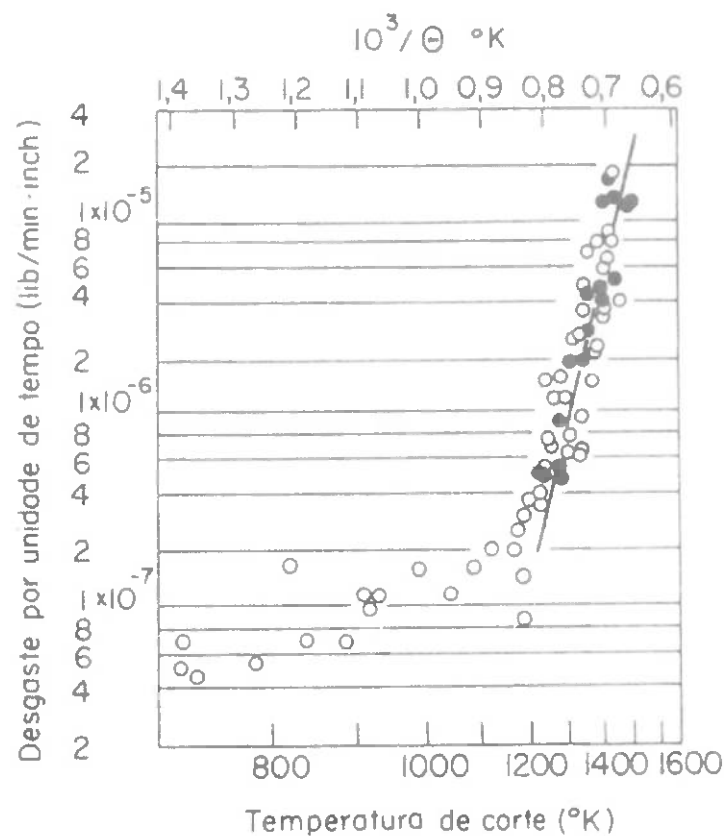


Figura 5.9 – Relação entre o desgaste por unidade de tempo e a temperatura absoluta de corte.

[6]

A figura 5.9 apresenta o desgaste por unidade de tempo em função da temperatura absoluta de corte, para as mesmas condições da figura 5.8. Observa-se que na região correspondentes a temperaturas de corte superiores a 1200K o desgaste dependerá principalmente da temperatura:

$$\frac{dG}{dl} \cong \frac{B}{v} \cdot e^{-E/K\theta} \quad (5.5)$$

e

$$\ln \frac{dG}{dt} = \ln \frac{B}{v} - \frac{E}{K\theta} \quad (5.6)$$

No diagrama dilogarítmico da figura 5.9, a energia de ativação E/K é o coeficiente angular da reta. Seu valor é:

$$\frac{E}{K} = 310 \text{ BTU} / \text{mol} .$$

Para o caso particular em apreço, o peso do desgaste da superfície de folga da ferramenta na unidade de tempo pode ser calculado por:

$$\frac{dG}{dt} = 8,6.10^{-10} . v + 2,1.10^{-7} . e^{-38.10^4 / \theta} ,$$

onde

$$\frac{dG}{dt} = \text{desgaste por unidade de tempo (lb/min.inch);}$$

v = velocidade de corte (ft/min)

θ = temperatura de corte (K)

Analisemos agora a relação existente entre a vida da ferramenta e a temperatura de corte. Seja G_0 o peso do desgaste correspondente à vida T da ferramenta:

$$G_0 = \int_0^T \left(\frac{dG}{dt} \right) dt. \quad (5.7)$$

Em condições de usinagem tais que a temperatura de corte se mantém baixa tem-se:

$$\frac{dG}{dt} = B . e^{-E/K . \theta} \quad (5.8)$$

Nestas condições, o desgaste G_0 é dado por:

$$G_0 = B \int_0^T e^{-E/K . \theta} dt \quad (5.10)$$

Admitindo a temperatura θ constante para dadas condições de usinagem, igual a θ_0 , obtém-se:

$$G_0 = B.e^{-E/K\theta}.T \quad (5.11)$$

ou

$$T = \frac{G_0}{B} e^{-E/K\theta} \text{ (min.)} \quad (5.12)$$

Em seu trabalhos, Takeyama e Murata concluem que a vida da ferramenta, tomando por critério o desgaste da superfície de folga, varia exponencialmente com a temperatura de corte, a qual por sua vez depende das condições de usinagem.

5.3 Mecanismos de desgaste das ferramentas de aço rápido

As definições e ensaios apresentados a seguir foram baseadas na referencia [6], Ferraresi.

O aço rápido é um material muito empregado na construção das ferramentas de usinagem que requerem uma elevada tenacidade da cunha cortante.

Na usinagem de aços rápidos aparecem velocidades de corte usuais na faixa de ($V_c = 1...45 \text{ m/min}$).

Os tipos de cavaco na usinagem com este tipo de ferramenta são:

- Cavaco de cisalhamento;
- Cavaco contínuo com aresta postiça de corte;
- Cavaco contínuo sem aresta postiça de corte.

Estes tipos de cavaco se distinguem através dos graus de deformação do material usinado, assim espera-se condições diferentes nas zonas de contato e, portanto, mecanismos de desgaste distintos.

5.3.1 Influência da velocidade de corte

A figura 5.10 apresenta um exemplo de uma curva desgaste-velocidade de corte. Observado-se dois pontos de desgaste máximo nas velocidades de 4 e 18 m/min. Estes pontos de desgaste máximo podem ser relacionados ao tipo de cavaco formado. Na faixa de velocidades correspondentes ao cavaco de cisalhamento o desgaste cresce com o aumento da velocidade de corte até um máximo, que coincide com o início do aparecimento da aresta postiça de corte.

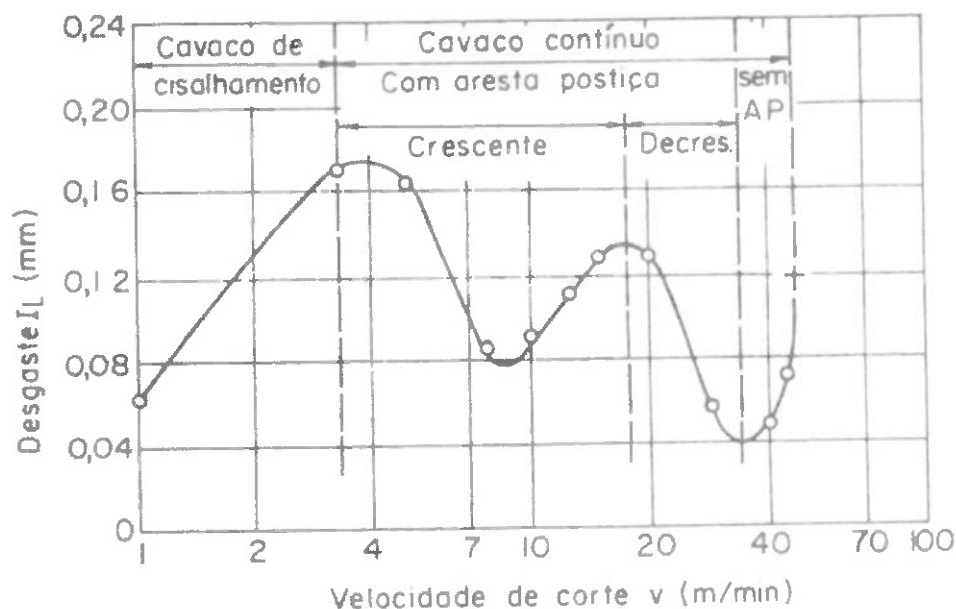


Figura 5.10 – Desgaste da superfície de folga em função da velocidade de corte; material aço Ck 53 N; ferramenta de aço rápido EV 4 Co, sem fluido de corte; $a_p = 0,25.2 \text{ mm}^2$; $T = 30 \text{ min}$; $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = -4^\circ$; $\epsilon = 90^\circ$; $\chi = 60^\circ$; $r = 1 \text{ mm}$. [6]

Enquanto o segundo ponto máximo pode ser igualmente constatado nos metais duros, o primeiro ponto de desgaste aparece somente após um tempo de usinagem relativamente grande, dada a maior resistência a abrasão dos metais duros. Portanto, não existe uma diferença fundamental entre as curvas de desgaste do metal duro e do aço rápido na faixa de velocidades de corte baixas.

A figura 5.11 mostra a variação do desgaste da superfície de saída, medido através da relação de cratera $k = C_p / C_d$. A distancia da aresta cortante ao centro da cratera de desgaste era praticamente constante, $C_d \approx 960 \mu\text{m}$. Também aqui se observa um ponto de desgaste máximo numa velocidade que corresponde à transição do cavaco de cisalhamento ao cavaco contínuo, porém esta máximo é pouco acentuado.

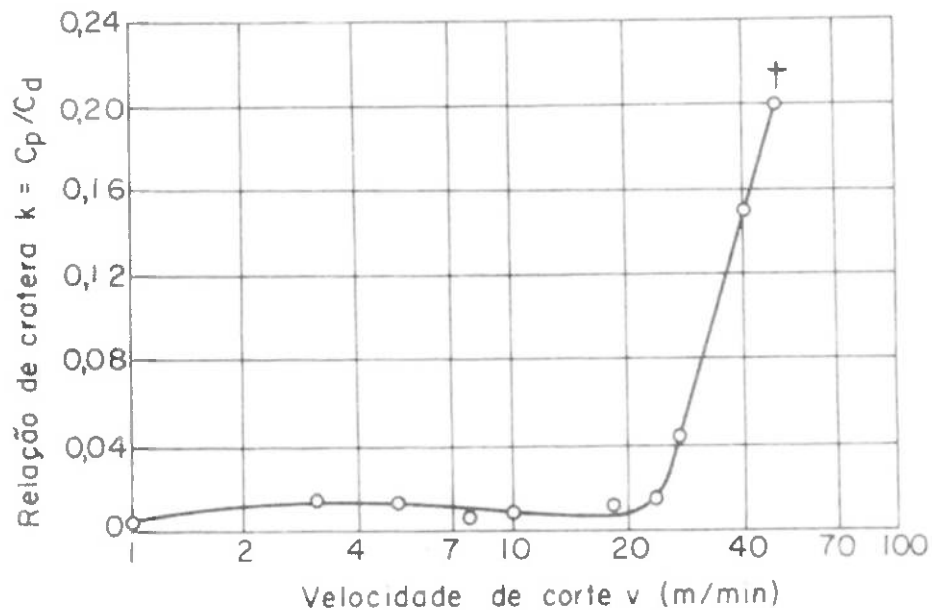


Figura 5.11 – Desgaste na superfície de saída em função da velocidade de corte; nas mesmas condições de ensaio da figura 5.10. [6]

5.3.2 Influencia do avanço

A figura 5.12 representa a influencia do avanço sobre o desgaste da superfície de folga. Observa-se que com o aumento do avanço os valores máximos e mínimos do desgaste se deslocam para velocidades de corte mais baixas. Além disso, os valores máximos do desgaste crescem com o avanço, pois a aresta postiça de corte é afetada pelo avanço.

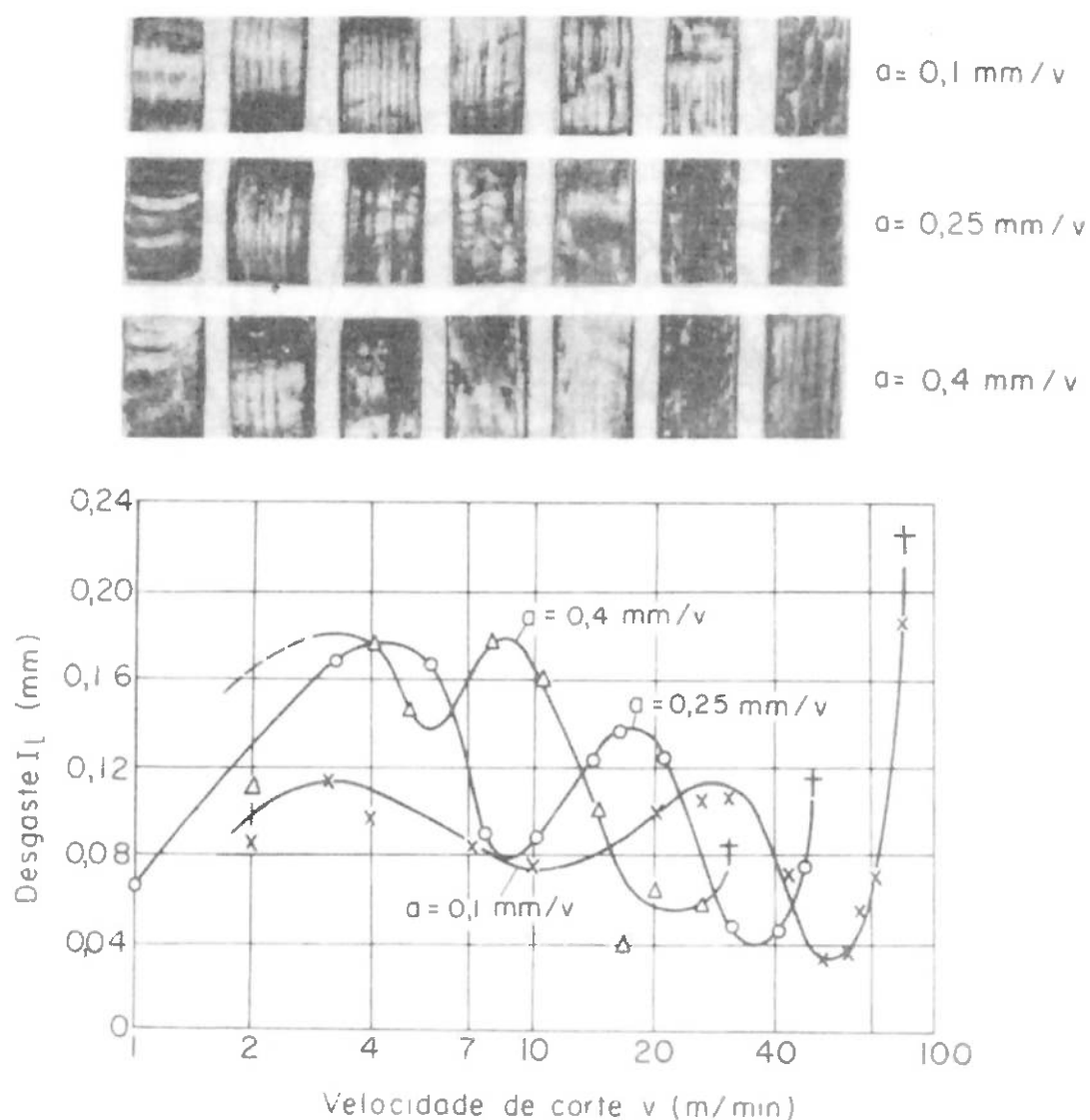


Figura 5.12 – Influência do avanço sobre o desgaste da superfície de folga; condições de ensaio idênticas às da figura 5.10. [6]

5.3.3 Influência da geometria da ferramenta

O formato da cunha cortante da ferramenta exerce influência decisiva sobre as deformações e as forças de atrito originadas na formação do cavaco, bem como influi na transmissão do calor gerado na aresta cortante

Empregando-se um ângulo de saída negativo, a ferramenta se deteriora antes de alcançar o segundo ponto de máximo, devido as solicitações térmicas e mecânicas elevadas.

O ângulo de folga não exerce influência apreciável sobre o desgaste da ferramenta.

5.3.4 Influência dos materiais da peça e da ferramenta

A figura 5.13 apresenta as curvas de vida de 5 tipos de aço rápido na usinagem do aço Ck 53 N. Nota-se que os aços rápidos com teores de tungstênio mais elevados apresentam vidas maiores. O critério de vida adotado foi a queima da ferramenta. Em geral os aços rápidos com teores elevados a médios de tungstênio e de cobalto, resistem melhor a solicitações térmicas, enquanto que os aços rápidos à base de tungstênio e molibdênio com adições de vanádio resistem melhor ao desgaste por abrasão, a temperaturas relativamente baixas.

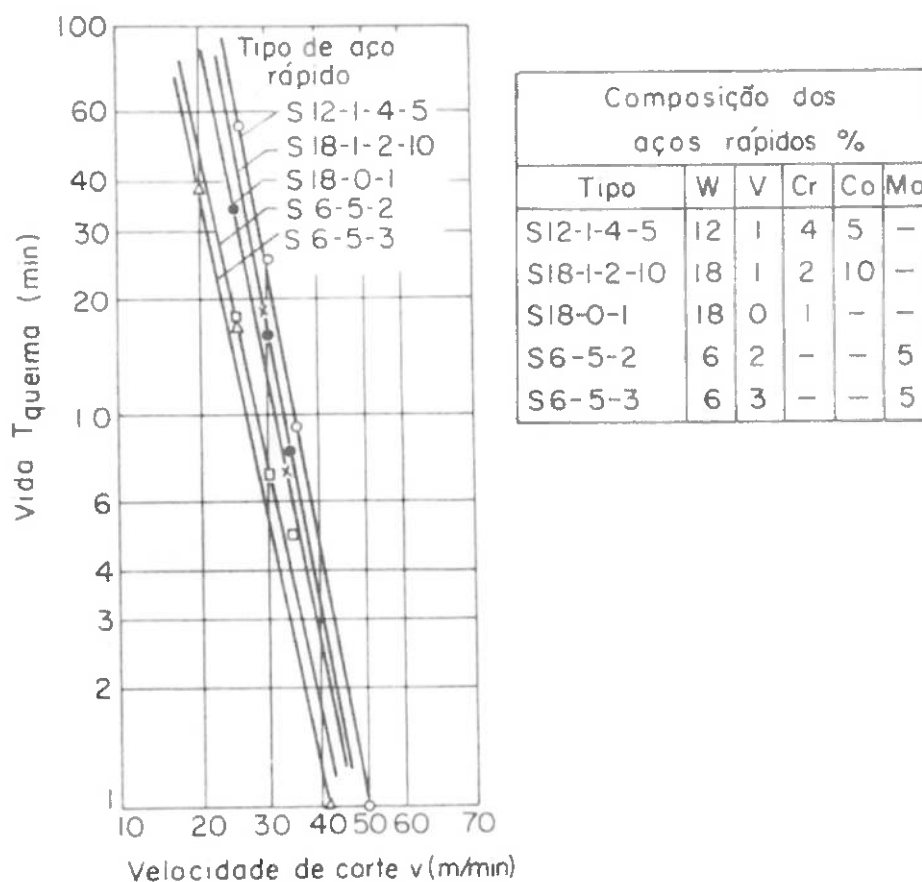


Figura 5.13 – Curvas de vida de 5 tipos de aço rápido (critério da queima); condições de ensaio idênticas às da figura 5.10. [6]

A influência do material usinado sobre o desgaste foi estudada por Ferraresi através de ensaios com aço Ck 53 em três tratamentos térmicos diferentes. Beneficiado (B) - $\sigma_t = 90 \text{ kg/mm}^2$, recozido (R) - $\sigma_t = 56 \text{ kg/mm}^2$ e normalizado (N) - $\sigma_t = 71 \text{ kg/mm}^2$. A figura 5.14 apresenta os resultados obtidos. O aço beneficiado apresenta, em geral, os desgastes mais elevados, causados pela temperatura de corte maior. A aresta postiça de corte deixa de existir em velocidades superiores a 20 m/min. É interessante notar que na usinagem do aço recozido falta completamente o segundo ponto de desgaste máximo. Acima de uma velocidade de 10 m/min, o desgaste mantém praticamente constante, até uma velocidade de 40 m/min. A explicação deste fato está na diferença estrutural das arestas postiças de corte. Até uma velocidade de 10 m/min, a aresta postiça do aço recozido se assemelha à aresta postiça do aço

normalizado. Em velocidades maiores, as dimensões da aresta postiça diminuem e a partir de 20 m/min existe apenas um acúmulo de material sobre a ferramenta, cuja dureza é sensivelmente menor que a da aresta postiça do aço normalizado. Tal acúmulo, que já na apresenta a forma característica de uma aresta postiça, protege a superfície de folga contra o desgaste. Este acúmulo de material é observado até 40 m/min.

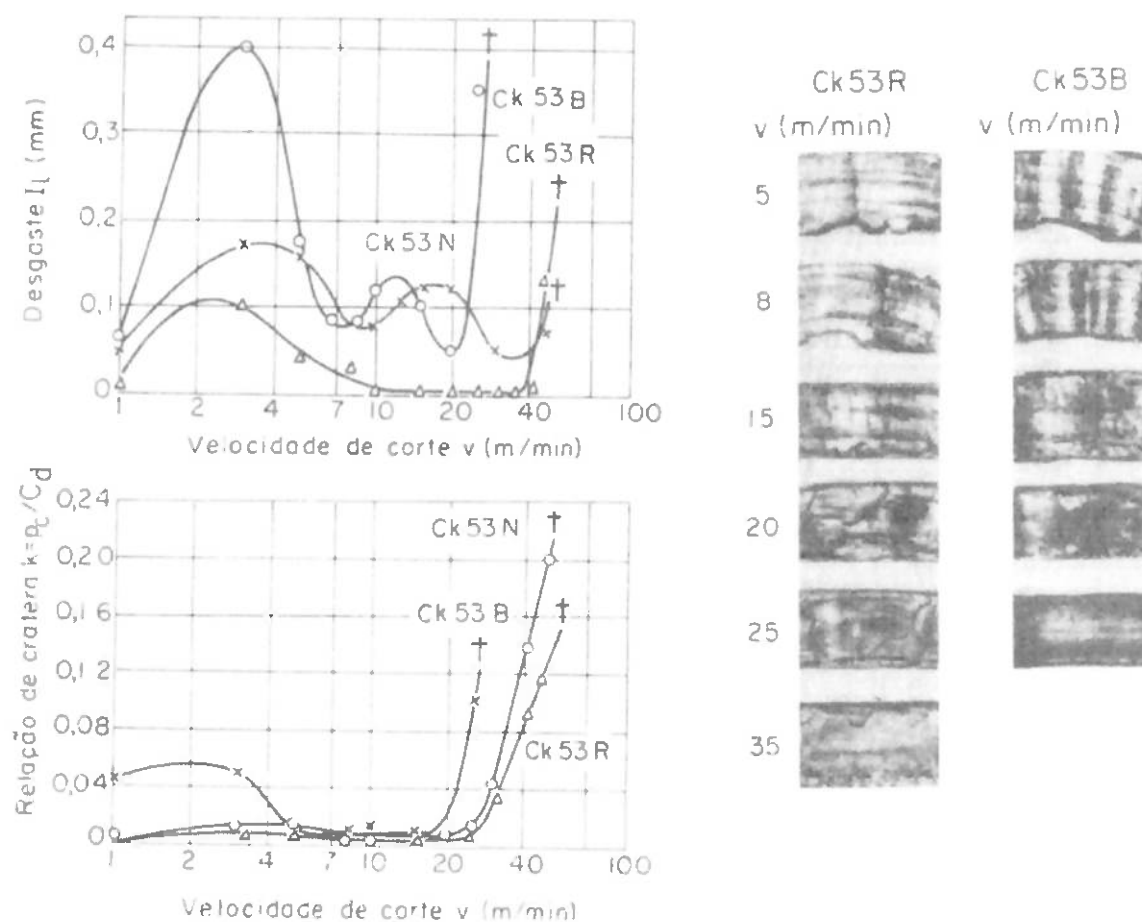


Figura 5.14 – Curvas de desgaste para diferentes tratamentos térmicos; condições de ensaio idênticas às da figura 5.10. [6]

Medindo-se as microdurezas no centro das arestas postiças, observou-se que estas alcançavam 800 kg/mm² no aço beneficiado, 700 kg/mm² no aço normalizado e apenas 600 kg/mm² no aço recozido, insuficiente para resistir às forças de usinagem.

5.3.5 Os fenômenos físico-químico responsáveis pelo desgaste das ferramentas de aço rápido

A figura 5.15 apresenta a variação das condições físicas na ponta da ferramenta em função da velocidade de corte. Tem-se a variação da temperatura de corte, das forças de corte, das dimensões da aresta postiça e da frequência do deslocamento da aresta postiça.

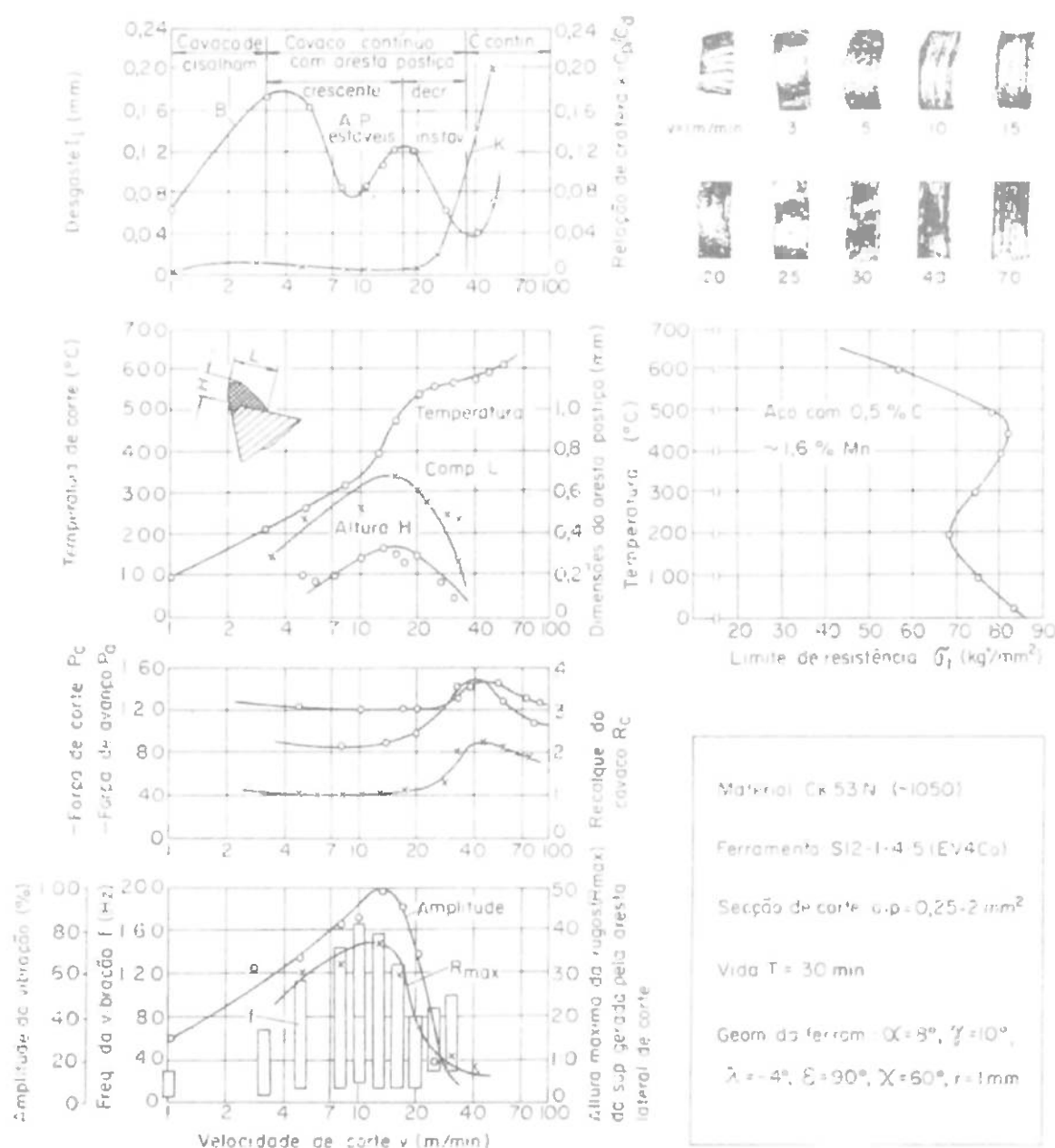


Figura 5.15– Influência da velocidade de corte sobre as grandezas características do processo de usinagem[6]

A curva de variação da temperatura de corte em função da velocidade caracteriza-se por duas retas de coeficientes angulares distintos, provocadas pela passagem do regime de arestas postiça estáveis (V_c até aproximadamente 12 m/min) ao regime de arestas postiças instáveis. A curva a direita apresenta variação da resistência

mecânica do aço Ck 53 N em função da temperatura. Observa-se que a resistência aumenta na faixa de temperaturas de 200-450 °C, o que constitui a condição imprescindível para a formação das arestas postiças.

As forças de corte diminuem com o início da formação da aresta postiça e atingem o seu valor mínimo a uma velocidade que corresponde às dimensões máximas da aresta postiça. Com a diminuição das arestas postiças, as forças de corte aumentam até um valor máximo, que corresponde ao término das arestas postiças.

A saída das arestas postiças conduz a vibrações mais pronunciadas, piorando o acabamento superficial.

Tendo em vista as condições reinantes junto à aresta cortante, os mecanismos que determinam os desgastes nas diferentes velocidades de corte serão os seguintes:

Em baixas velocidades de corte, com formação do cavaco de cisalhamento o material é recalcado frente à aresta cortante, até ser ultrapassado seu limite de resistência e o cavaco fissura sobre o efeito das tensões de tração. A pressão normal é elevada e a temperatura de corte é baixa, de maneira que o desgaste será devido à abrasão mecânica. Com a passagem do cavaco de cisalhamento ao cavaco contínuo, numa velocidade de corte em torno de 3m/min, começa a formação das arestas postiças, que inicialmente reduzem o desgaste. A figura 5.16 mostra a variação da forma geométrica da aresta postiça em diferentes velocidades de corte. As arestas postiças altas e esbeltas existem nas velocidades de corte baixas e são fortemente salientes, protegendo tanto a superfície de saída como também a superfície de folga contra o contato direto. Estas variações da forma geométrica da aresta postiça são conseqüências da alteração das propriedades mecânicas em função da temperatura. Na faixa de velocidades compreendidas entre os dois pontos de máximo desgaste, as arestas postiças, isto é, saem periodicamente apenas as pontas da aresta postiça, enquanto que o núcleo permanece estável. Em velocidades maiores, as arestas postiças tornam-se instáveis, isto é, toda a aresta postiça sai periodicamente. A figura 5.16 mostra a freqüência destas saídas periódicas da aresta postiça.

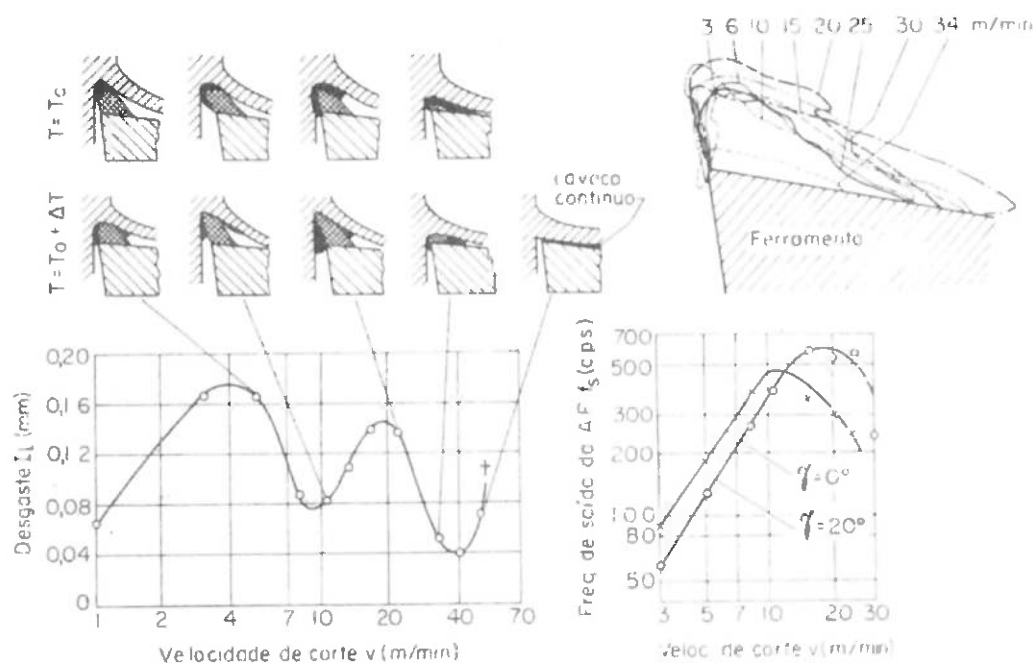


Figura 5.16– Mecanismo de saída e variação da forma geométrica da aresta postiça em diferentes velocidades de corte[6]

O desgaste da superfície de saída é praticamente impedido pela presença da aresta postiça. Somente com o início das arestas postiças instáveis começa a haver o contato direto entre o cavaco e a superfície de saída, dando origem ao desgaste de cratera. De fato de acordo com figura 5.16 as arestas postiças começam a se tornar instáveis a partir de 20m/mim, velocidade esta que coincide com o início do aumento do desgaste da superfície de saída. As causas físicas do desgaste são a brasão mecânica e o cisalhamento dos pontos de micro-soldagem.

Em velocidades de corte superiores a correspondente ao segundo ponto de desgaste mínimo, as temperaturas são tais que a aresta postiça deixa de existir. Nestas condições verifica-se o contato direto entre o cavaco ou a peça e a ferramenta. Além da abrasão mecânica, deve-se contar agora com um aumento das micro-soldagens. Acrescenta-se ainda o aumento das deformações plásticas na zona de contato do aço rápido que se estende até uma determinada profundidade da ferramenta. Acima de uma determinada temperatura, a dureza do aço rápido diminui consideravelmente e a abrasão do material nas zonas de contato deformadas plasticamente conduz a um aumento progressivo do desgaste. Tendo em vistas as

forças normais maiores na superfície de saída da ferramenta, o desgaste de cratera será o critério de vida nas altas velocidades de corte.

6 VIDA DA FERRAMENTA

Vida de uma ferramenta pode ser definido como o tempo que a ferramenta trabalha efetivamente, até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo este tempo a ferramenta deve ser reafiada ou substituída.

A perda da capacidade de corte é avaliada geralmente através de um determinado grau de desgaste. Para tanto, utilizam-se os desgastes convencionais vistos anteriormente.

Os fatores que determinam a fixação de um determinado desgaste são vários. Assim, a ferramenta deve ser retirada da máquina quando:

- O desgaste da superfície de saída da ferramenta atinge proporções tão elevadas, que se receia uma quebra do gume cortante.
- Os desgastes chegam a valores, cuja temperatura do gume cortante se aproxima da temperatura, na qual a ferramenta perde o fio de corte.
- Devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta, não é mais possível manter as tolerâncias exigidas na peça.
- O acabamento superficial da peça usinada não é mais satisfatório.
- O aumento da força de usinagem provenientes dos desgastes elevados da ferramenta interfere no funcionamento da máquina.

A vida da ferramenta é geralmente expressa em minutos, põem em certos casos prefere-se defini-las pelo percurso de corte ou percurso de avanço correspondente. O percurso de corte é dado geralmente em quilômetros,

$$L = V_c T, \frac{1}{1000}, \quad (6.1)$$

e o percurso de avanço é dado em milímetros,

$$L = a.n.T, \quad (6.2)$$

onde:

- T = vida da ferramenta, em minutos,
- V_c = velocidade de corte em m/minuto,
- a = avanço, em mm/volta,

- n = rotação, em r.p.m.

O percurso de avanço é muito mais usado na furação com broca helicoidal.

Deve-se distinguir de certa forma o procedimento do desgaste das ferramentas com pastilhas de metal duro do das ferramentas de aço rápido. Nas primeiras o desgaste é progressivo e chega a valores que causam finalmente a quebra do gume cortante; nas ferramentas de aço rápido, porém antes do desgaste chegar a estes valores, tem-se a destruição da aresta cortante, devido a diminuição da dureza da aresta com o aumento da temperatura de corte.

6.1 Curvas de vida da ferramenta

Para o estudo das condições econômicas de usinagem, é necessária a execução de ábacos que fornecem a vida da ferramenta em função da velocidade de corte. Tais ábacos nos dão as chamadas curvas de vida da ferramenta ou simplesmente curvas T-v, quando a vida for expressa pelo percurso de corte L , ou pelo percurso de avanço L_a da ferramenta, tem-se respectivamente as curvas de vida $L-v$ e L_a-v .

Para execução das curvas de vida, deve-se inicialmente construir gráficos auxiliares, que nos dão o desgaste da ferramenta para diferentes velocidades de corte e tempos de trabalho, em determinadas condições de usinagem do par peça-ferramenta. Os desgastes empregados para este fim são aqueles mais significativos para a vida da ferramenta. Muitas vezes somente os desgastes I_1 , C_p , k ou D_γ não bastam para definir a vida da ferramenta com uma precisão aceitável. Neste caso empregam-se geralmente dois desgastes em conjunto.

A figura 6.1a apresenta a variação do desgaste I_1 em função do tempo de usinagem com pastilhas de metal duro, para diferentes velocidades de corte. De posse destas curvas, pode-se fixar o valor do desgaste que definirá a vida da ferramenta, nas condições de usinagem desejadas. A fixação de $I_1 = 0,8$ mm, por exemplo, nos informa que este é o limite do desgaste, ou seja, quando o desgaste atingir este valor a ferramenta deve ser substituída ou reafiada para evitar uma possível quebra e garantir a manutenção das condições de acabamento especificadas. Obtém-se assim na figura 6.1a para $I_1 = 0,8$ mm, os pontos, m , n e o das curvas de velocidade, os

quais forneceram os tempos de trabalho, ou sejam, as vidas da ferramenta para velocidades de corte $v = 180$, $v = 144$ e $v = 128$ m/min. Constrói-se, desta forma, a curva de vida T-v para $I_1 = 0,8$ mm, nas condições de usinagem prefixadas.

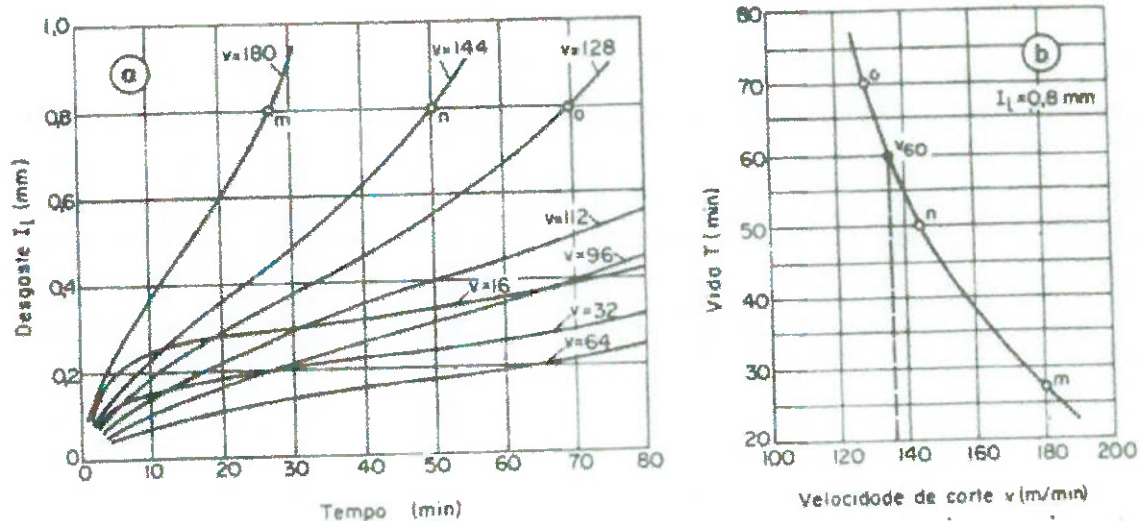


Figura 6.1– Determinação da curva de vida de uma ferramenta tomando-se o desgaste I_1 como parâmetro, a) Curvas de desgaste em função do tempo de usinagem. b) Curva de vida da ferramenta para o desgaste $I_1 = 0,8$ mm, obtida através das curvas de desgaste. [6]

Pode-se construir também curvas que fornecem o desgaste da ferramenta em função da velocidade de corte, para um determinado tempo de usinagem (figura 6.2). Tais gráficos permitem melhor visualização das condições técnicas, enquanto as curvas de vida constituem o fundamento das condições econômicas.

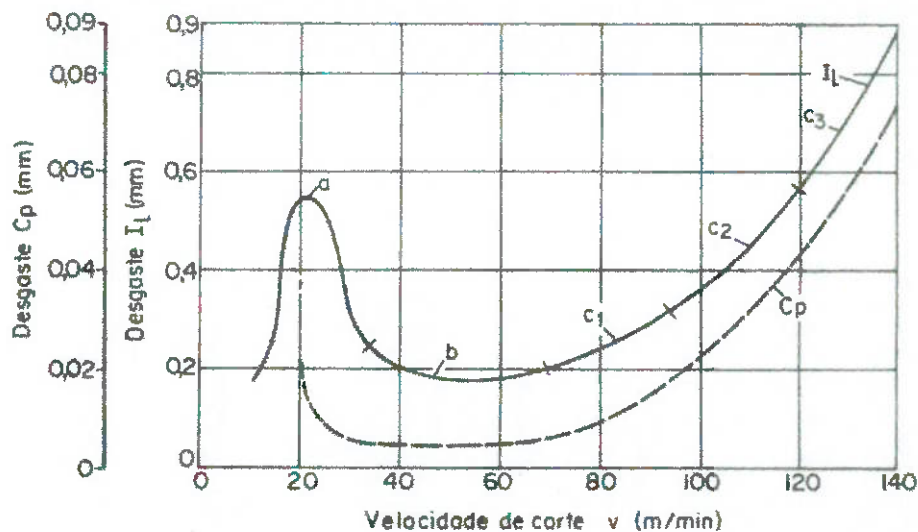


Figura 6.2– Desgastes I_l e C_p da ferramenta em função da velocidade de corte para um tempo de usinagem de 60 minutos. A curva $I_l=f(v)$ foi obtida através da figura 6.2[6]

Na figura 6.2 encontrasse três regiões distintas: o trecho a, de baixa velocidade de corte, onde o desgaste é grande; a região b de desgaste mínimo, com velocidades de corte maiores; a região c de altas velocidades e desgaste maior.

A região c da curva é economicamente a mais interessante, apesar do desgaste ser maior que na região b. Na região c tem-se uma velocidade de corte maior, permitindo maior produção, e um percurso de corte L com valores bem mais altos, como pode ser observado no diagrama da figura 6.2. Este diagrama foi obtido a partir da figura 6.1a, colocando-se no eixo das ordenadas o produto $L = v \cdot T$ e no eixo das abscissas as velocidades de corte. A parte c_1 da curva $L = v \cdot T$ apresenta grande percurso de corte, com velocidades bem maiores que no trecho b da curva; a parte c_3 permite velocidades de corte muito alta, porém um percurso de corte menor e menor vida da ferramenta. O percurso de corte sendo maior tem-se um maior número de peças usinadas para uma determinada vida da ferramenta.

A representação em papel dilogarítmico da função $T = f(v)$ – curva de vida da ferramenta – para o trecho c das curvas da figura 6.2, se aproxima de uma reta (figura 6.3) neste caso tem-se a expressão (figura 6.4):

$$\log T = \log K - x \cdot \log v \quad (6.3)$$

ou ainda

$$T = K.v^{-x} \quad (6.4)$$

deduzida pela primeira vez por TAYLOR. O expoente x é o coeficiente angular da reta $T-v$ no diagrama dilogarítmico (figura 6.3) e a constante K pode ser interpretada como a vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1 m/min.

A equação de Taylor pode ser aplicada tanto para ferramentas de metal duro quanto para outros materiais.

Outra forma da equação de Taylor muito encontrada na literatura é seguinte:

$$v.T^y = C \quad (6.5)$$

Os parâmetros y e C variam com o material da peça, material da ferramenta, área e forma da secção de corte, ângulos da ferramenta e fluido de corte.

As velocidades de corte dadas por equações deste tipo, isto é, definidas para uma determinada vida da ferramenta, são denominadas velocidades de corte ótimas.

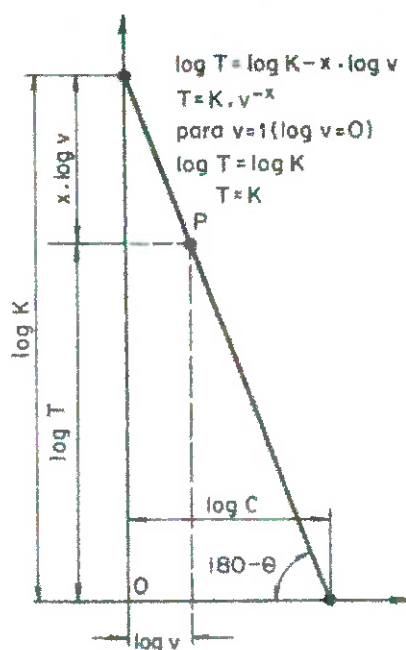


Figura 6.3– Representação em escala logarítmica da curva de vida da ferramenta[6]

A figura 6.4 mostra a curva de vida do aço rápido para usinagem de aço C 68. A linha cheia reforçada representa a curva de vida para o caso de amolecimento da aresta de corte (critério de destruição da aresta cortante); a linha traço-ponto representa a curva de vida para o caso do desgaste de cratera e a linha tracejada para o desgaste da superfície de folga. Verifica-se ainda uma deformação plástica do gume cortante em velocidades superiores a 26 m/min. Tal ocorrência se constata na figura através da curvatura da linha de desgaste $I_1 = 0,3$ mm e da curva da própria linha de amolecimento da aresta cortante. Em velocidades de corte inferiores a 18 m/min houve formação da aresta postiça de corte, além da passagem do cavaco contínuo ao de cisalhamento.

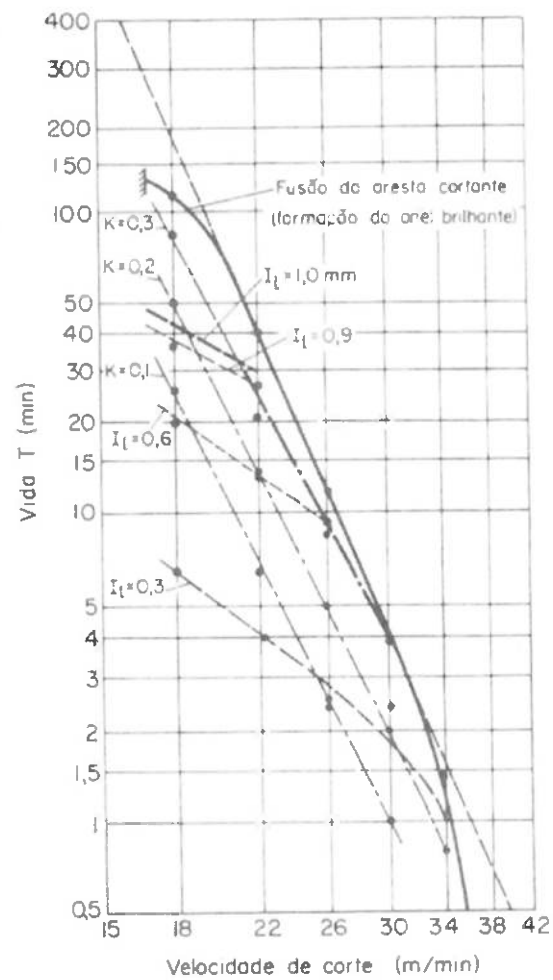


Figura 6.4— Curvas de Vida do aço rápido (18% W) para diferentes desgastes I_t , C_p e amolecimento da aresta cortante; material da peça aço C68; $a.p = 0,4.3,0\text{mm}^2$; $\chi = 45^\circ$. [6]

7 CONFIABILIDADE DE FERRAMENTAS DE USINAGEM

Como o principal modo de falha das ferramentas de usinagem é o desgaste, pode-se afirmar que a taxa de falhas de uma ferramenta tem uma ocorrência crescente no tempo.

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 do desgaste da ferramenta atinja um nível de desgaste $V_B^*[X]$.

Como o desgaste da ferramenta é um mecanismo a cumulativo, a confiabilidade da mesma deve ser representada por uma função de probabilidade que simule taxas de falha crescentes no tempo, sendo as mais representativas as distribuições Normal, Weibull e Lognormal.

Nos seus estudos experimentais Hitomi [13], Wardany [14] e Wang [15] mostram que uma das distribuições que melhor modela o desgaste da ferramenta, V_B é a distribuição Lognormal.

Segundo Wardany [14] o fator que mais influencia na vida da ferramenta é o desgaste de flanco.

A seguir será apresentado o cálculo da confiabilidade da ferramenta desenvolvido por Hitomi [13].

Seja V_B uma variável aleatória que representa o desgaste da ferramenta e é uma função das condições de corte e do erro estatístico e quando se trabalha em furação e fresamento também será função da geometria da ferramenta. Assim o desgaste da ferramenta pode ser representado pela equação 7.1 que representa o desgaste V_B pelo produto entre a função de Taylor ψ e a função que relaciona os erros estatísticos $\theta(\xi)$.

$$V_B = \psi(f, v, d, t, \gamma, r) \cdot \theta(\xi) \quad (7.1)$$

onde:

- f = taxa de avanço;
- v = velocidade de corte;
- d = profundidade de corte;

- t = tempo de corte;
- γ = ângulo de saída da ferramenta
- r = raio da ferramenta ("tool nose radius").

Tomando o logaritmo natural na equação 7.1, obtém-se:

$$\ln(V_B) = \ln[\psi(f, v, d, t, \gamma, r)] + \varepsilon, \quad (7.2)$$

onde $\varepsilon = \ln[\theta(\xi)]$ representa o logaritmo da função erro estatístico.

Assumindo que o desgaste da ferramenta segue uma distribuição Lognormal, a média da distribuição é definida pela equação 7.3 que corresponde ao desgaste de flanco médio sofrido pela ferramenta e será representado por VB_0 .

$$V_{b0} = E[\ln(V_B)] = E\{\ln[\psi(f, v, d, t, \gamma, r)]\} + E[\varepsilon] \quad (7.3)$$

A variância do desgaste será dada pelo quadrado da diferença existente entre o valor esperado (correspondente ao valor resultante da equação que relaciona as variáveis) e o valor real. Daí que o segundo parâmetro da distribuição representa a variância σ^2 e é definido por:

$$Var[\ln(V_B)] = E\{\ln[(V_B - V_{B0})^2]\} = E[\varepsilon] = \sigma^2 \quad (7.4)$$

Pelas características da distribuição Lognormal o logaritmo do desgaste pode ser definido como uma distribuição normal com média V_{B0} e variância σ^2 , conforme mostrado na equação 7.5:

$$\ln(V_B) \rightarrow N(V_{B0}, \sigma^2) \quad (7.5)$$

Na equação 7.6 é aplicada a equação de Taylor estendida, encontrando assim, a relação matemática entre o desgaste da ferramenta e os parâmetros já mencionados.

$$\begin{aligned}\psi(f, v, d, t, \gamma, r) &= C_0 \cdot f^{\beta_1} \cdot v^{\beta_2} \cdot d^{\beta_3} \cdot \gamma^{\beta_4} \cdot r^{\beta_5} \cdot t^{\beta_6} \Rightarrow \\ \hat{V}_B &= C_0 \cdot f^{b_1} \cdot v^{b_2} \cdot d^{b_3} \cdot \gamma^{b_4} \cdot r^{b_5} \cdot t^{b_6}\end{aligned}\quad (7.6)$$

Onde $C_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ são constantes que dependem das condições do ensaio e $\hat{V}_B$ é a estimativa do valor do desgaste para um dado tempo de usinagem, que corresponde ao valor médio do modelo que para este caso é a equação de Taylor.

Assim a função de densidade de probabilidade para a distribuição do desgaste da ferramenta é representada pela função Lognormal (equação 7.5) e é expressa pela equação 4.7:

$$f(V_B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot V_B} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln V_B - \ln V_{B0})^2 \right]}\quad (7.7)$$

Supondo que a ferramenta começa a operar a partir de $t = 0$ e que a falha da ferramenta ocorre no tempo $t = T$, então a probabilidade de falha e a confiabilidade da ferramenta são definidas pelo tempo de falha e estão dadas pelas equações 7.8 e 7.9, respectivamente:

$$F(t) = P(t \leq T) = \int_0^t f(T) dT\quad (7.8)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(T) dT\quad (7.9)$$

Por outro lado pode-se afirmar que a confiabilidade da ferramenta é a chance de que esta sobreviva até um tempo t específico sem que o desgaste, neste intervalo de tempo, atinja o VB^* , esta definição é apresentada na equação 7.11.

$$R(V_B) = P\{V_B > V_B^*\} = 1 - F(V_B) \quad (7.10)$$

$$R(V_B) = 1 - \int_0^{V_B^*} f(V_B) dV_B \quad (7.11)$$

A relação entre o tempo t , correspondente ao tempo de uso da ferramenta, e o desgaste da ferramenta, após este tempo de uso, ser representado pelo gráfico apresentado na figura 7.1.

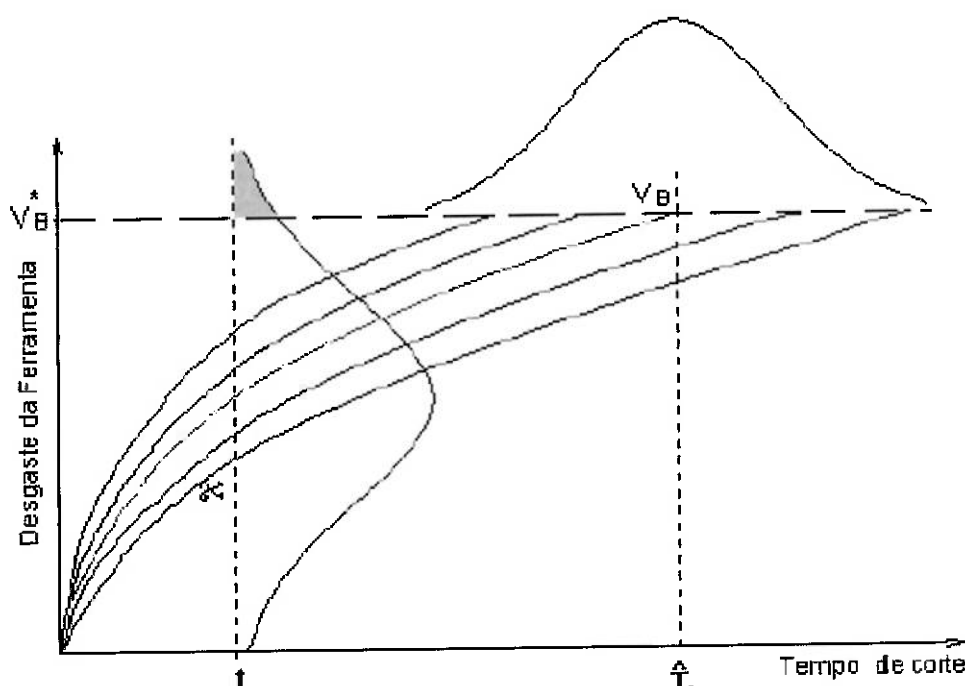


Figura 7.1 - Relação entre o desgaste da ferramenta de corte [13]

Na figura 7.1 pode-se ver o tempo para que a ferramenta atinja um desgaste VB^* tem uma distribuição, assim como para tempo t existe uma distribuição de probabilidade para o desgaste da ferramenta e por isso, para cada tempo t , existe a distribuição de

probabilidade de que a ferramenta atinja o desgaste VB^* . O desgaste médio dá origem a curva de desgaste (VB) ao longo do tempo, correspondendo aos resultados da equação de Taylor. Da figura 7.1 se conclui que equação 7.9 e 7.11 são iguais, ou seja:

$$R(t) = 1 - \int_0^{V_B^*} f(V_B) dV_B \quad (7.12)$$

Substituindo a equação 7.7 na equação 7.12 se tem:

$$R(t) = 1 - \int_{-\infty}^{\ln V_B^* - \ln V_{B0}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2}(V_B)^2\right]} dV_B \quad (7.13)$$

Resolvendo a equação 7.13 se tem que a confiabilidade da ferramenta no tempo t , determinada em função do desgaste da mesma é:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln V_B^* - \ln V_{B0}}{\sigma}\right) \quad (7.14)$$

Define-se vida da ferramenta, $\hat{T}_1$, como o tempo no qual a ferramenta atinge um certo valor de desgaste VB^* . Substituindo o valor $\hat{T}_1$, na equação 7.6 se tem:

$$\hat{T}_1 = \left[\frac{V_B^*}{C_0 \cdot f^{b1} \cdot v^{b2} \cdot d^{b3} \cdot \gamma^{b4} \cdot r^{b5}} \right]^{1/b_6} \quad (7.15)$$

Substituindo equação 7.15 na equação 7.14 a confiabilidade da ferramenta em função do tempo de corte t e o tempo para que ela atinja um desgaste $V_B^*(\hat{T}_1)$ é definido pela equação:

$$R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{\ln(t) - \ln(\hat{T}_1)}{\sigma / b_6} \right) \quad (7.16)$$

8 ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONFIABILIDADE DE BROCAS HELICOIDAIS NO PROCESSO DE FURAÇÃO

Este capítulo visa a aplicação dos conceitos de confiabilidade para determinar a distribuição do desgaste de uma broca helicoidal de aço rápido. Para isso foram realizados ensaios acelerados de vida com duas taxas diferentes de aceleração. Além das duas taxas ensaios serão utilizados dados referentes a uma terceira taxa de aceleração obtidos por Rodriguez[16]. Serão repetidas nos ensaios as condições estabelecidas nos ensaios do trabalho referido.

Com estas três condições de aceleração será estabelecido uma extrapolação de modo a estabelecer a distribuição de desgaste da broca para condições normais de utilização.

Previamente será definido qual é o principal modo de falha para a broca helicoidal e qual a variável que deve ser acelerada para realização dos testes acelerados de vida.

8.1 Modos de Falha no processo de furação

A análise dos modos de falha no processo de furação visa definir quais são as principais variáveis 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.

A seguir é apresentada na Tabela 8.1 a análise de Modos e Efeitos de Falhas para o Processo de furação:

Tabela 8.1 - Análise de Modos e Efeitos de Falhas para o Processo de Furação[16]

FUNÇÕES	MODOS DE FALHA	CAUSAS	EFEITOS	MÉTODOS 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 desejada. Flambagem eixo-arvore. Fixação incorreta da broca. Condições de corte incorretas. Refrigeração inadequada. Escolha incorreta da broca.	Retrabalho. Perda de capacidade de processo. Refugos.	Inspeção dimensional do furo. Observação de ruídos e vibrações excessivas no processo. Monitoramento dos esforços de corte.
	Falta de retilidade da linha de centro.	Nivelção 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.	Problema nas montagem das peças. Rejeição das peças. Perda de capacidade do processo. Retrabalho.	Inspeção geométrica no furo. Monitoramento da vibração no início do corte.
	Defeitos de superfície.	Vibração 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.	Vibração 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 das peças. Perda de capacidade do processo.	Inspeção do furo.

Para analisar a confiabilidade do processo de furação como um todo, seria necessária a análise das falhas introduzidas no processo pelo operador, porém vamos admitir neste trabalho que o operador é bem treinado e que as falhas introduzidas no processo por este podem ser controladas e minimizadas. Outro elemento que seria de fundamental importância seria a máquina operatriz que gera o furo, mas será admitido que a máquina recebe a manutenção adequada de modo que as falhas introduzidas por este elemento tem magnitude reduzida. Desta forma, podemos considerar que a ferramenta é o elemento principal na introdução de falhas na execução de furos de acordo com as especificações de projeto. Dentre as falhas na obtenção de um furo os defeitos de superfície são os mais comuns e os que mais prejudicam a qualidade do furo produzido, a principal causa deste tipo de falha é a avaria ou desgaste da ferramenta.

8.2 Análise do desgaste da Broca Helicoidal

Dentre os principais desgastes e avarias da ferramenta discutidos no capítulo 5 destacam-se especialmente o desgaste de flanco e o desgaste de cratera, a figura 8.1 mostra a definição deste desgastes identificados por (V_B) e (K_B) respectivamente. Conforme apresentado no capítulo 5 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.

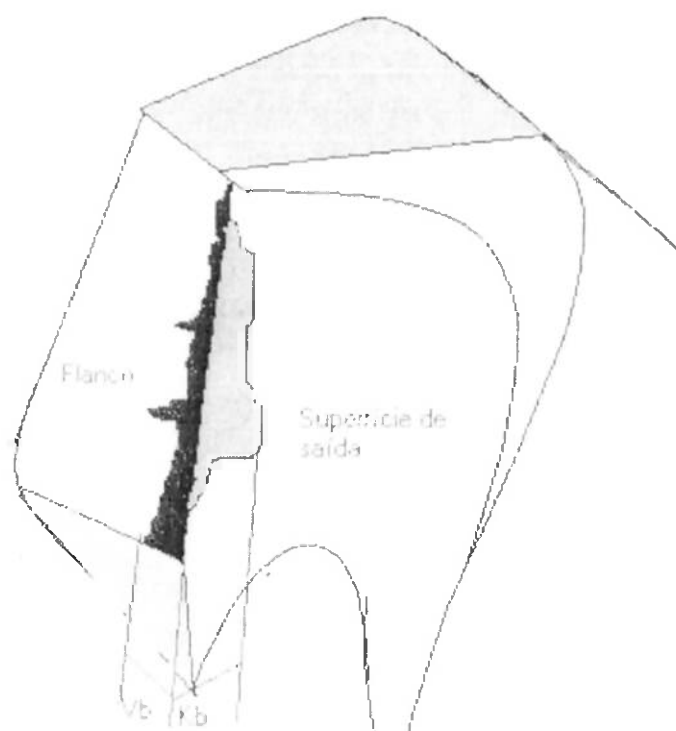


Figura 8.1 - Definição do desgaste de cratera e de flanco em brocas[12]

Pode-se observar que a variação do desgaste de flanco é alto 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 8.1 para o processo de furação 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 de modos de falha para o desgaste da broca indicada pela Tabela 8.2.

Tabela 8.2- Análise de Modos e Efeitos das Falhas para o desgaste da broca.[16]

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 direcionamento 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 especificado.

Nos ensaios realizados foi utilizado um avanço dentro dos limites indicados pelo fabricante. O material utilizado como corpo de prova também está de acordo com o indicado pelo fabricante das brocas. Os ensaios foram executados sem lubrificação. Optou-se por esse procedimento, pois a presença de lubrificante causaria a necessidade de controle de mais uma variável no ensaio, havendo, em informações obtidas na literatura, uma série de discussões sobre o efeito da lubrificação no desgaste da ferramenta. Adicionalmente, a ausência de lubrificação acelera o processo de desgaste, corroborando com o objetivo de um ensaio acelerado.

Para a caracterização de um ensaio acelerado optou-se pela utilização de velocidades de corte maiores que a indicada pelo fabricante dado que o aumento deste fator provoca um aumento substancial no desgaste conforme visto no capítulo 5.

8.3 Equipamentos e materiais utilizados

As ferramentas utilizadas para os experimentos são brocas helicoidais de aço-rápido ABNT M2. Devido à combinação dos elementos de liga, o aço-rápido ABNT M2 apresenta alta resistência ao amolecimento decorrente das elevadas temperaturas. Sua dureza máxima é aproximadamente de 65 HRC. Os principais elementos constituintes da liga de aço-rápido ABNT M2 são apresentados na Tabela 8.3 juntamente com os intervalos de valores para os teores dos elementos de liga.

Tabela 8.3 - Teores dos elementos químicos nos aços M2[16]

<i>Carbono</i>	<i>Vanádio</i>	<i>Molibdênio</i>	<i>Tungstênio</i>	<i>Cromo</i>	<i>Manganês</i>	<i>Silício</i>	<i>Níquel</i>
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 realizados foram executados em corpos de prova com forma de paralelepípedos. 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 de prova. O material usinado nos testes foi de aço ABNT 1020 cuja composição química é apresentada na tabela 8.4.

Tabela 8.4 -Composição química ABNT 1020 [16]

<i>Ferro</i>	<i>Carbono</i>	<i>Manganês</i>
99,03-99,53	0,17-0,23	0,3-0,6

Os furos foram realizados em um centro de usinagem Deckel DMC 63 V de 3 eixos cujos dados são apresentados na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 - Especificações do centro de usinagem DECKEL MAHO[16]

Acionamento Principal	Potencia do Motor[KW]	12,5
	Velocidade Max. [min^{-1}]	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 EPUSP. EPUSP. 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 que possui um furo interior a 59° .

8.4 Procedimento Experimental

Foram utilizados 20 corpos de prova para cada velocidade de corte diferente ensaiada. Estes corpos foram numerados de 1 a 20, e para cada dois corpos de prova utilizou-se uma broca de 5mm de diâmetro. Inicialmente foram determinadas as duas velocidades de corte a serem ensaiadas. Rodrigues [16] realizou seus ensaios com uma rotação do eixo-árvore de 4000 rpm, que corresponde a uma velocidade de corte 63m/min, foram utilizados nos experimentos velocidades de corte um pouco menores para garantir que o modo de falha seja o mesmo dos ensaios citados. Assim, as

rotações do eixo-árvore escolhidas foram de 3500 rpm e 3750 rpm, que corresponde a 55 m/min e 59 m/min, respectivamente.

Inicialmente foram realizados os ensaios para uma rotação de 3500 rpm. Nestes ensaios foram realizados inicialmente 50 furos, já que em uma fase preliminar de ensaios se encontrou que antes deste número de furos o desgaste era muito baixo e não era possível estabelecer um valor para o desgaste. Após a primeira sequência de 50 furos para cada broca, foram realizadas sequências de 15 furos até completar 125 furos por broca, desde que a broca não tenha falhado antes do término dos 125 furos. Todas as condições de furação, exceto a velocidade de corte, foram mantidas durante as sequências de furos e estas são apresentadas na Tabela 8.6, abaixo.

Tabela 8.6- Condições de operação

<i>Diâmetro [mm]</i>	5
Profundidade [mm]	25
Taxa de Avanço [mm/rev.]	0,025

Para a rotação de 3750 rpm, foram feitos inicialmente 40 furos, em seguida foram realizados mais 30 furos e finalmente sequências de 5 em 5 furos até completar 90 furos por broca.

Na medição dos desgastes apresentados pelas brocas utilizou-se a lupa estereoscópica com um aumento de 25 vezes. Foram fotografadas as duas arestas de corte de cada uma das 10 brocas para cada rotação ensaiada. As fotografias foram tiradas antes de começar os ensaios e ao término de cada uma das sequências de furos, obtendo assim para cada broca, informações sobre o desgaste de flanco após a execução de 0, 50, 65, 80, 95, 110 e 125 furos para rotação de 3500 rpm e após a execução de 0, 40, 70, 75, 80, 85, 90 furos para rotação de 3750 rpm.

A Figura 8.2 apresenta as imagens que indicam a evolução do desgaste para a broca de número 1, de umas das arestas. Esta evolução foi obtida para as duas arestas de corte de todas as brocas ensaiadas. Nesta sequência pode-se observar como o

desgaste vai evoluindo, alterando todas as superfícies da broca, tornado 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 numero de furos, executa-se uma análise comparativa entre a imagem da superfície da broca desgastada e a imagem da mesma broca sem desgaste, ou seja, na condição de “nova”.

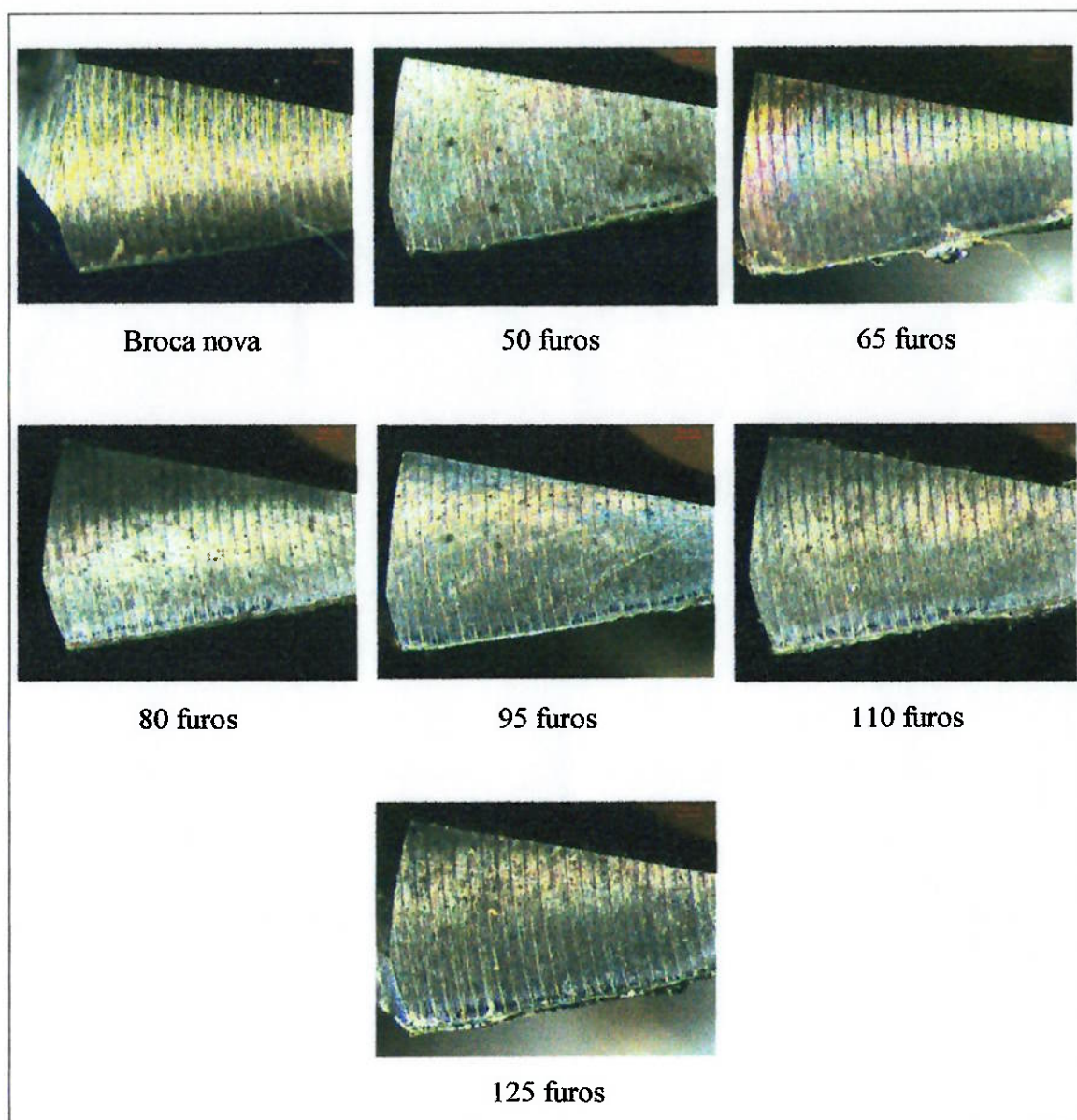


Figura 8.2 - Evolução do desgaste de flanco da broca 1

As medições do desgaste foram feitas medindo-se a diferença entre a posição da aresta de corte na broca nova e a posição desta aresta, na mesma broca depois de efetuados um certo número de furos. Para fazer esta comparação, a imagem da broca após executados um certo número de furos é sobreposta a imagem da broca nova obtendo assim uma nova imagem onde são estabelecidas linhas de referência que representam a aresta de corte da broca nova e da broca usada. Após a obtenção destas

linhas é utilizado um programa de análise de imagem (LEICA QWIN) para calcular a distância perpendicular entre as duas arestas de corte no extremo da broca onde o desgaste é maior. Esta distância representa o desgaste de flanco após a execução de um certo número de furos. Será realizado este procedimento de análise para cada uma das duas aresta de corte das 10 brocas utilizadas para cada velocidade de corte. Desta 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. A Figura 8.3 mostra a sobreposição da imagem da broca após a execução de 35 furos sobre a broca nova, para a rotação de 4000 rpm.

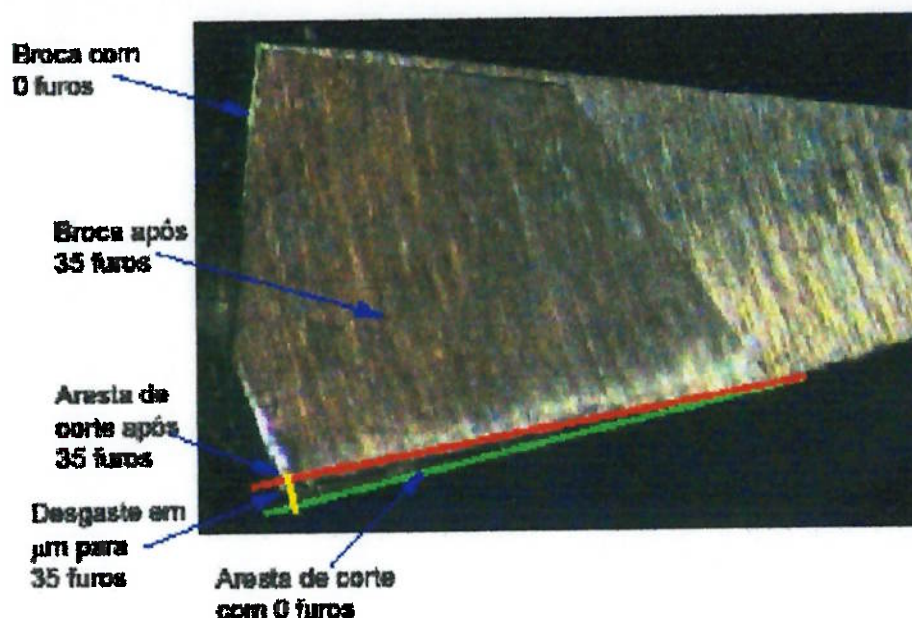


Figura 8.3 - Procedimento para estabelecer o desgaste de Flanco da broca 9 após a execução de 35 furos a 4000 rpm [16]

Como ao longo dos ensaios foram obtidas seis medições de desgaste de flanco para cada aresta de corte, 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.

8.5 Resultados Experimentais

Após as medições do desgaste conforme o procedimento apresentado anteriormente, foram estabelecidos valores de desgaste para as rotações de 3500 rpm e 3750 rpm que são apresentados na Tabela 8.7 e na Tabela 8.8, respectivamente e adicionalmente são apresentados os valores de desgaste para 4000 rpm obtidos por Rodrigues[16] na Tabela 8.9. Os valores apresentados são dados em micrômetros.

Nota-se que algumas brocas tiveram falhas catastróficas antes da finalização de todas as seqüências de furos programadas, assim não foi possível levantar valores de desgaste para os intervalos de medição que ocorreriam depois da falha, a ausência destes valores é representada nas tabelas de valores de desgaste por células na cor preta.

Tabela 8.7 - Valores de desgaste, em mm, para uma rotação de 3500 rpm

Broca	Aresta	Número de furos					
		50	65	80	95	110	125
1	A	54,61	100,20	115,40	137,70	145,80	172,40
	B	57,16	74,04	126,90	148,10	160,00	183,60
2	A	61,85	107,02	127,90	150,80	160,20	169,10
	B	67,53	121,40	128,60	144,20	165,60	176,70
3	A	68,26	94,17	117,60	147,50	165,60	184,50
	B	70,78	79,74	110,10	124,70	137,70	151,30
4	A	71,47	98,05	117,10			
	B	73,52	104,50	127,90			
5	A	75,50	87,66	111,00	126,10	138,30	161,70
	B	76,44	83,83	98,05	114,90	124,70	132,50
6	A	76,80	106,60	128,30	154,60	170,40	194,30
	B	77,30	89,95	117,10	140,60	165,00	184,00
7	A	79,60	96,53	116,60	137,20	162,30	186,90
	B	81,91	101,30	120,80	143,00	156,50	176,70
8	A	86,91	107,20	120,80	134,40	169,70	184,00
	B	86,91	106,80	127,90	154,60	175,80	193,10
9	A	90,44	71,32	111,10	140,50	156,10	
	B	98,78	95,60	124,80	148,00	176,70	
10	A	130,60	153,20				
	B	141,00	179,20				

Tabela 8.8 - Valores de desgaste, em mm, para uma rotação de 3750 rpm

Broca	Aresta	Número de furos					
		40	70	75	80	85	90
1	A	61,85		124,10	143,40	155,50	181,30
	B	50,43		100,90	130,40	147,00	176,70
2	A	69,61		143,30			
	B	73,52		152,60			
3	A	56,88	103,50	124,70	142,70	160,30	178,00
	B	60,30	110,50	130,90	152,70	170,60	182,70
4	A			139,00	155,20	166,60	189,60
	B			124,50	137,20	159,80	170,90
5	A	70,50	169,50				
	B	81,30	196,10				
6	A		142,90	154,30	167,90	190,30	200,70
	B		150,80	169,10	170,50	185,70	197,40
7	A			163,40	172,50	172,50	190,10
	B			160,80	168,30	168,30	187,80
8	A		125,90	159,80	176,30	176,30	189,50
	B		118,70	165,70	186,40	186,40	199,30
9	A	69,50	133,50	145,20	163,40	174,70	189,00
	B	73,60	139,00	150,10	170,30	183,40	195,50
10	A	59,69	102,80	140,70	159,70	167,20	176,60
	B	64,29	111,70	146,60	168,30	178,30	185,50

Tabela 8.9 - Valores de desgaste, em mm, para uma rotação de 4000rpm[16]

Broca	Aresta	Número de furos					
		20	25	30	35	40	45
1	A	63,28	72,16	86,27	141,90		
	B	56,90	70,80	91,58	152,60		
2	a	59,25	65,93	73,78	87,66	108,28	122,66
	b	53,08	69,92	75,15	89,45	112,46	125,78
3	a	69,79	75,00	86,66	109,74	127,60	
	b	66,44	75,00	89,55	112,80	136,10	
4	a	45,95	76,80	123,00			
	b	36,31	79,85	129,40			
5	a	69,37	90,78	92,95	131,19	156,11	159,39
	b	65,48	94,75	100,97	136,17	141,69	153,34
6	a	82,30	88,46	103,90	112,62	125,20	129,20
	b	79,31	83,83	90,56	106,17	117,30	148,50
7	a	53,49	78,70	98,78	114,40	133,50	136,40
	b	49,22	62,47	96,26	107,80	117,40	131,00
8	a	70,05	72,62	75,65	96,91	98,45	
	b	71,45	76,24	81,29	98,25	103,87	
9	a	43,77	63,93	66,82	87,30	97,66	99,23
	b	39,38	63,49	76,78	84,70	86,44	87,79
10	a	61,05	98,56	100,56	112,43	115,57	148,10
	b	68,26	75,65	89,15	106,01	139,98	161,50

Na tabela 8.8 observa-se lacunas nos valores de desgaste para 40 e 70 furos, representadas pela cor amarela, estas lacunas devem-se a problemas computacionais que levaram a perda de algumas fotos, com isso não pude medir estes desgastes, mas este fato não compromete a análise já que ainda assim possuem-se dados para 6 brocas, ou seja, 12 valores de desgaste, o que é suficiente para levantar a função densidade de probabilidade para estes números de furos.

A Tabela 8.10 apresenta os valores médios (μ) e o coeficiente de variação (cv) obtidos para a magnitude do desgaste, após a execução de um pré-determinado número de furos, para cada uma das rotações estudadas; definidos pela distribuição Lognormal. Esta distribuição é a que melhor modela o processo de desgaste, conforme foi discutido no capítulo 7. Adicionalmente nesta mesma tabela apresenta-se o coeficiente de correlação, representado por ρ , que representa o quanto uma dada distribuição explica a variação dos dados experimentais.

Tabela 8.10 - Parâmetros da distribuição lognormal

Rotação	Número de furos	μ	$CV=\mu/\sigma$	ρ
3500rpm	50	81,34807	0,2368	0,9545
	65	102,8584	0,2175	0,9479
	80	119,3538	0,072	0,9391
	95	140,4841	0,0836	0,9569
	110	158,229	0,0974	0,9441
	125	175,12	0,1017	0,9126
3750 rpm	40	66,06696	0,1412	0,9846
	70	134,1905	0,211	0,9783
	75	144,3544	0,1332	0,9556
	80	160,4404	0,1022	0,9692
	85	171,4536	0,075	0,9894
	90	186,1998	0,0494	0,9874
4000 rpm	20	60,60874	0,2447	0,9802
	25	76,88989	0,1391	0,9857
	30	92,13024	0,1738	0,9805
	35	111,3736	0,1805	0,9766
	40	121,2168	0,169	0,9893
	45	138,7904	0,1324	0,985

De posse dos parâmetros da distribuição lognormal, pode-se determinar a função densidade de probabilidade do desgaste de flanco da broca, após um número de furos pré-determinados. 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 utilizado o programa Weibull 6 ++ desenvolvido pela ReliaSoft, com este, pode-se traçar as curvas da função densidade de probabilidade para cada uma das velocidades de corte e correspondentes números de furos, totalizando seis distribuições para cada velocidade de corte. As funções densidade de probabilidade para 3500, 3750 e 4000 rpm são mostradas nas Figuras 8.4, 8.5 e 8.6, respectivamente.

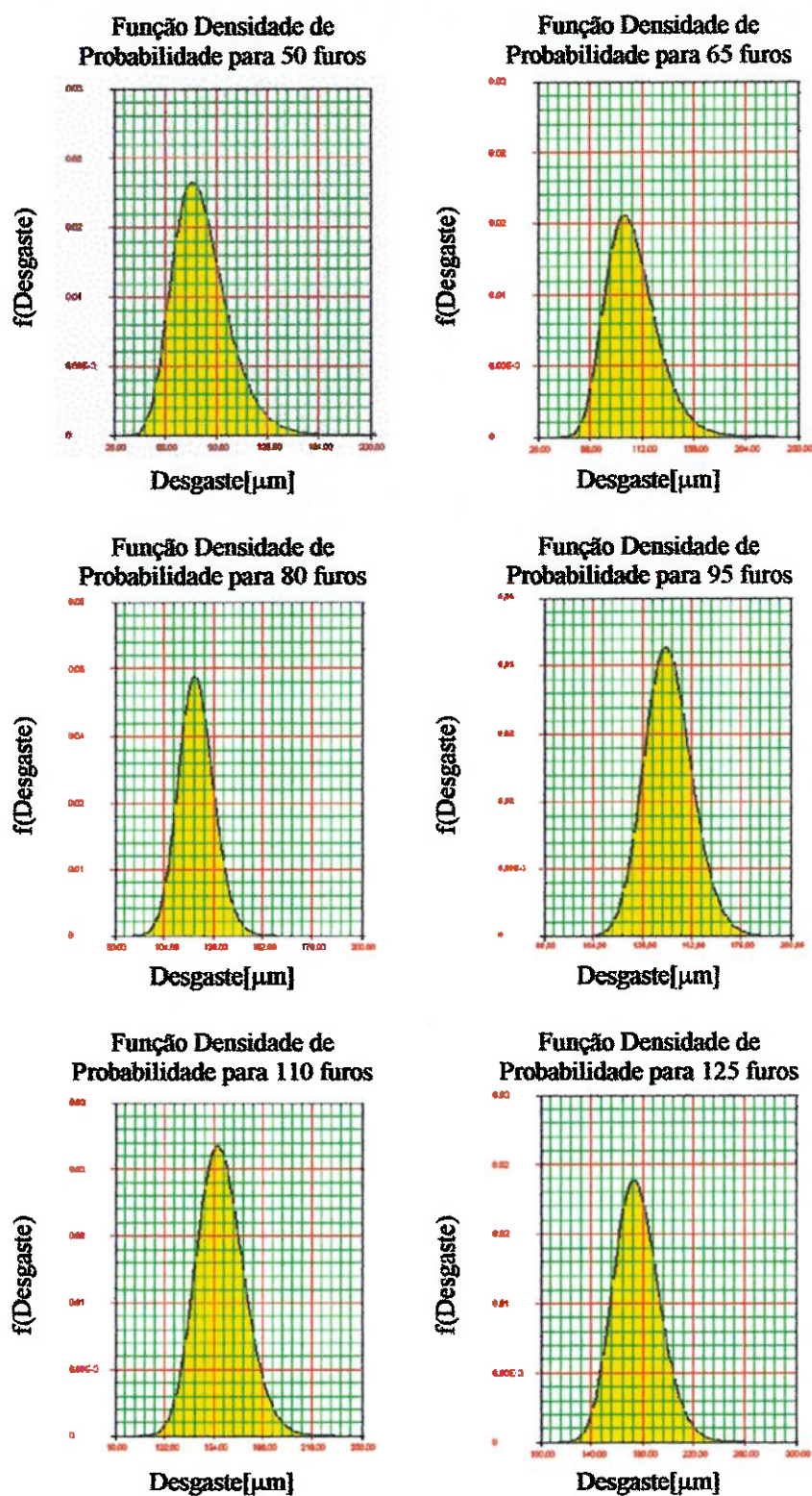


Figura 8.4 - Distribuição densidade de probabilidade para 3500 rpm

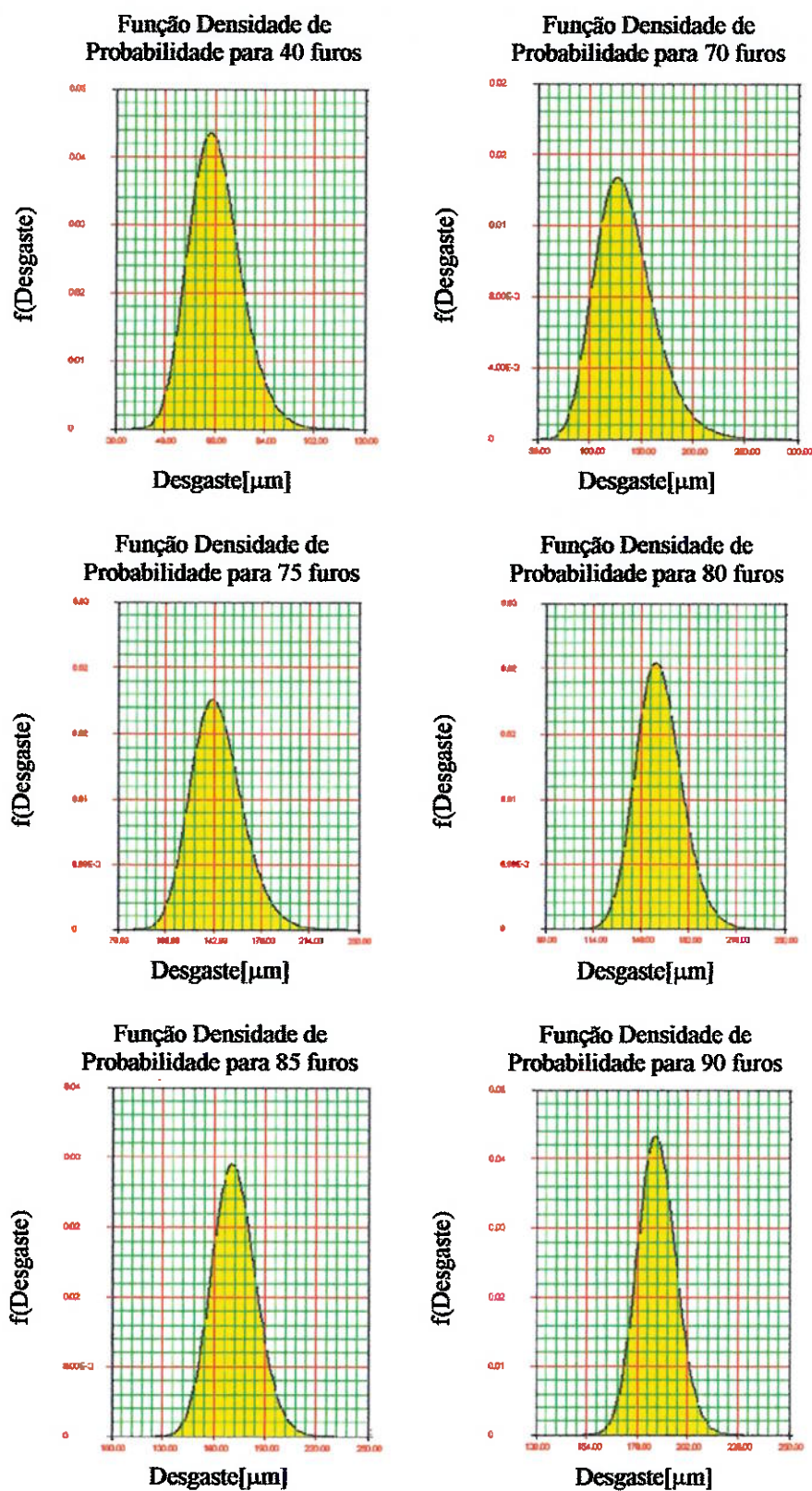


Figura 8.5 - Distribuição densidade de probabilidade para 3750 rpm

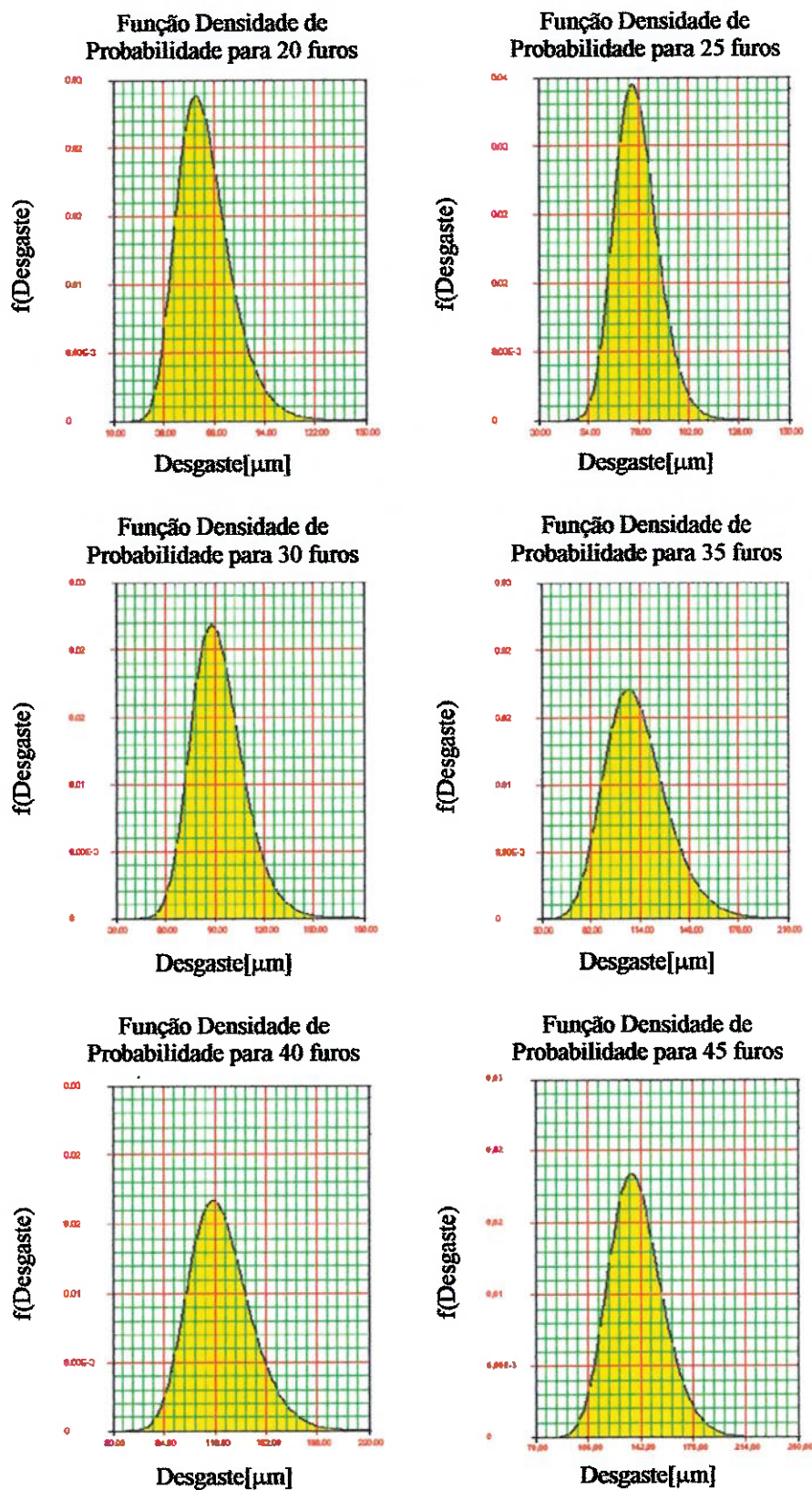


Figura 8.6 - Distribuição densidade de probabilidade para 4000 rpm

A Figura 8.7 apresenta-se a evolução do desgaste da ferramenta em função do tempo de trabalho da broca, que é um parâmetro usualmente empregado na atividade industrial para caracterizar o período operacional da ferramenta. Para uma rotação de 4000 rpm o tempo para execução de um furo é 15 segundos, sendo este o valor empregado na transformação do número de furos executados para o 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 para 4000 rpm. 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

Para a obtenção das curvas que relacionam o tempo e o desgaste para cada porcentagem indicada na figura 8.7 foram utilizados polinômios. O grau destes polinômios foram atribuídos para cada curva de modo se ter a melhor representação dos dados experimentais. Como exemplo é apresentado na equação 8.1 o polinômio de terceiro grau para a curva de 50%..

$$V_B = 0,0714T^3 - 1,9102T^2 + 28,748T - 46,246 \quad (8.1)$$

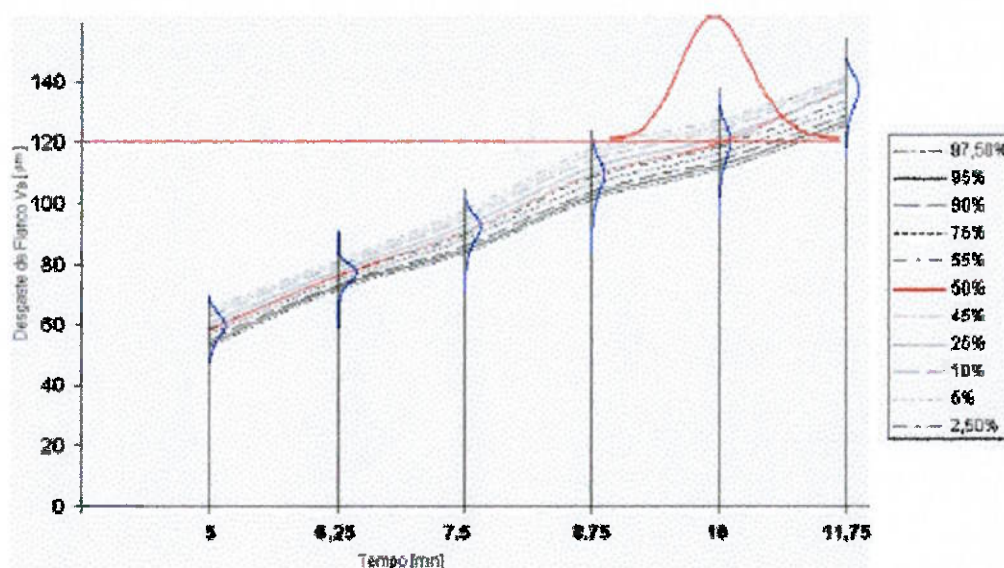


Figura 8.7 - Curvas de densidade de probabilidade para distribuição do desgaste de flanco em função do tempo de operação da broca para 4000rpm

Fixando-se um valor máximo admissível para o desgaste, tem-se que o tempo de operação da broca associado a este valor máximo também é uma variável aleatória, pois a evolução do desgaste para diferentes brocas não é constante, tal como indicado na Figura 8.7.

Empregando-se o procedimento proposto por Hitomi [13], 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 para cada rotação, define-se a distribuição dos tempos 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, para cada rotação, os tempos de operação para as brocas empregadas neste estudo. Estes valores de tempo são apresentados na Tabela 8.12. Utilizando-se o programa Weibull 6 ++ define-se as funções densidade de probabilidade associada ao tempo de operação para cada rotação até atingir um desgaste $V_B^* = 120 \mu\text{m}$. Estas funções são apresentadas na Figura 8.8.

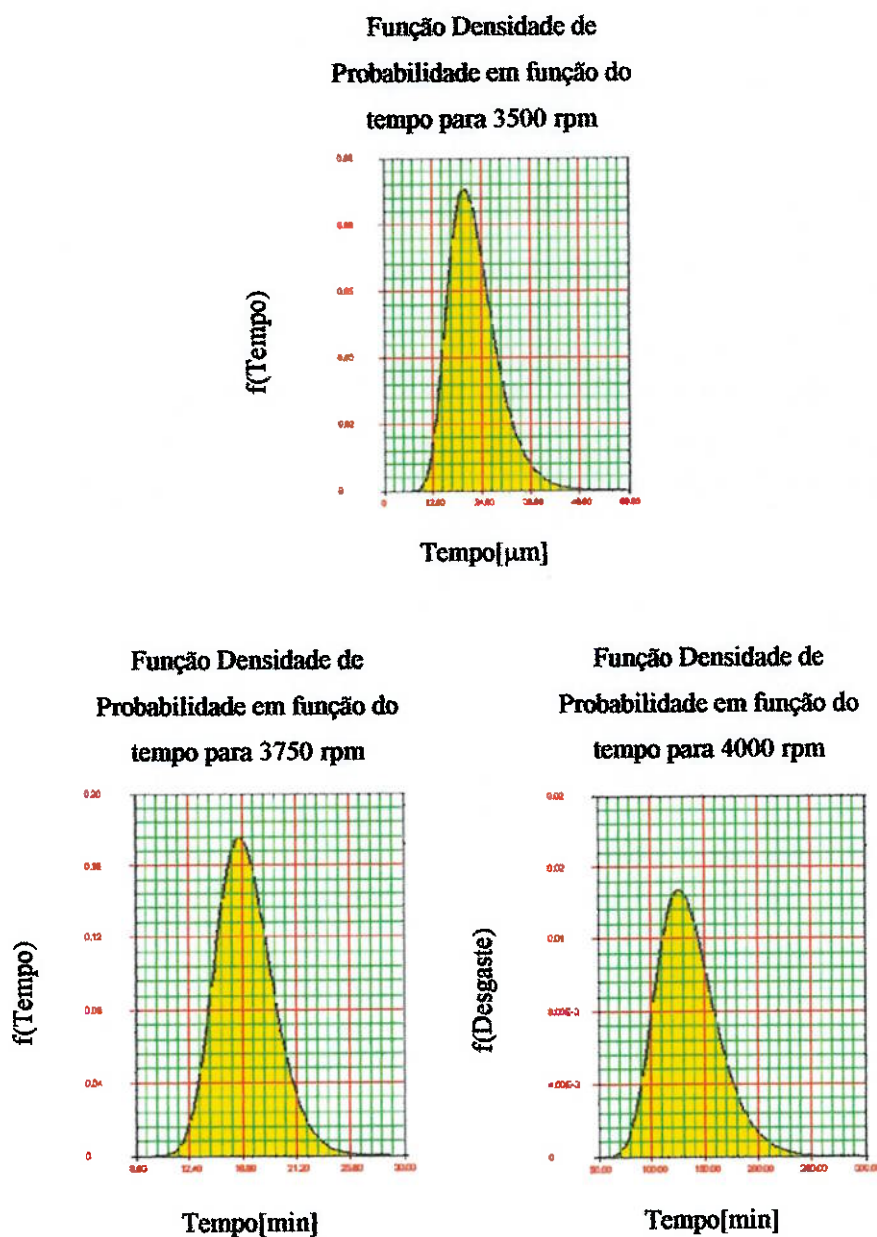


Figura 8.8 - Função densidade de probabilidade em função do tempo de usinagem para 3500, 3750 e 4000 rpm

A Tabela 8.11 apresenta os valores de média, coeficiente de variação e coeficiente de correlação para a distribuição do tempo para as rotações estudadas.

Tabela 8.11 - Parâmetros das distribuições do tempo, em minutos, para atingir 120 μm

Rotação(rpm)	μ	$CV=\mu/\sigma$	ρ
3500	81,35	0,2368	0,9545
3750	102,86	0,2175	0,9479
4000	119,35	0,0720	0,9391

A partir das distribuições apresentadas na figura 8.5 e dos parâmetros apresentados na Tabela 8.12, define-se valores de tempo em que a probabilidade de falha atinja um certo valor desejado. A Tabela 8.12 apresenta valores de tempo, em minutos, até atingir $V_B=120 \mu\text{m}$ para alguns valores de probabilidade de falha para as três rotações estudadas.

Tabela 8.12 - Valores de tempo, em minutos, para atingir $V_B=120 \mu\text{m}$

Rotação (rpm)	Probabilidade de Falha										
	2,50%	5%	10%	25%	45%	50%	55%	75%	90%	95%	97,50%
3500	13,52	14,99	16,76	19,62	21,96	22,46	22,95	24,92	26,87	27,94	28,81
3750	13,85	14,23	14,77	15,82	16,81	17,03	17,25	18,18	19,10	19,61	20,02
4000	7,00	7,44	7,96	8,84	9,65	9,83	10,02	10,84	11,76	12,31	12,80

A Tabela 8.12 apresenta valores de tempo para atingir um nível de desgaste a partir do qual a ferramenta perde sua capacidade de gerar furos conforme as especificações, estes valores de tempo são definidos então com valores de vida da ferramenta conforme apresentado no Capítulo 6, assim podemos estabelecer curvas de vida baseado em dados probabilísticos. A curva de vida é representada pela equação de Taylor, representada pela equação 6.4. A Figura 8.9, mostra a curva de Vida para uma probabilidade de Falha de 50%.

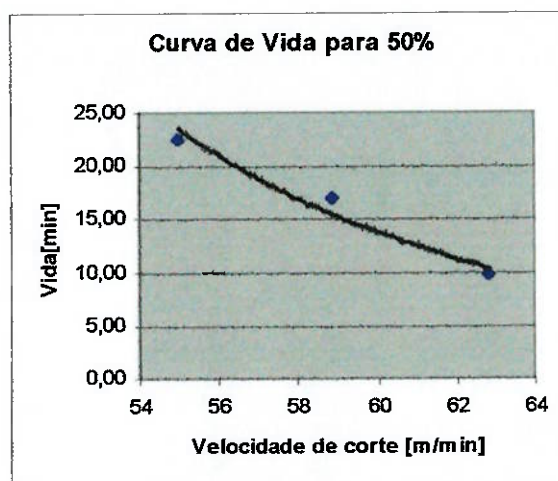


Figura 8.9 - Curva de vida para 50%

A Tabela 8.13 mostra os parâmetros K e x da equação de Taylor para as probabilidades de falha mostradas na Tabela 8.12.

Tabela 8.13 - Parâmetros de Taylor

Probabilidade de Falha	Parâmetros de Taylor	
	K	x
2,50%	1,06E+12	4,8723
5%	1,30E+12	5,1984
10%	1,54E+12	5,5369
25%	1,70E+12	5,9388
45%	1,37E+12	6,1341
50%	1,24E+12	6,1606
55%	1,09E+12	6,1813
75%	4,52E+11	6,2158
90%	7,87E+10	6,1752
95%	1,84E+10	6,1240
97,50%	4,58E+09	6,0678

A partir das curvas levantadas com os parâmetros de Taylor podemos extrapolar os valores de tempo até a falha para as probabilidades de falha citadas para as condições usuais de operação. Utilizando o programa DORMER Selector 2004 entrou-se uma velocidade de corte recomendada de aproximadamente 30 m/min que corresponde a uma rotação de 2000rpm, assim utilizando os parâmetros de Taylor extrapolar os tempos de vida para a condição usual. Os valores de vida são apresentados na Tabela 8.14.

Tabela 8.14 - Valores de tempo até a falha, em minutos, para as condições usuais

2,50%	5%	10%	25%	45%	50%	55%	75%	90%	95%	97,50%
232,34	303,87	403,81	580,09	715,28	740,68	763,79	838,13	875,21	879,26	882,08

Os valores encontrados mostram o tempo de troca da ferramenta para baseado na probabilidade da broca atingir um desgaste de 120 μm .

Com os valores de tempo encontrados pode-se traçar a distribuição temporal dos tempos até a falha para as condições usuais de operação. A Figura 8.10 mostra a curvas de vida para cada uma das probabilidades de falha discutidas, bem com a distribuição do desgaste para as três velocidades de corte estudadas.

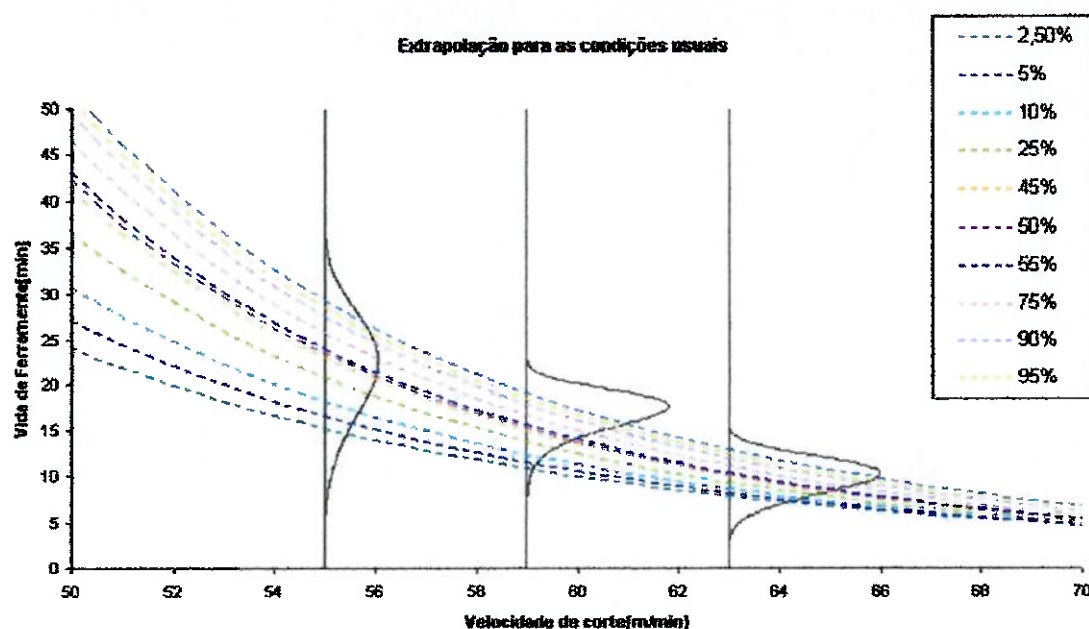


Figura 8.10 - Curvas de vida e distribuições de probabilidade

A Figura 8.11 apresenta a extrapolação para as condições reais de utilização. Note que nesta figura as distribuições apresentadas na figura 8.10 ficam muito reduzidas. Na figura 8.11 a altura da distribuição nas condições usuais foi ampliada para melhor visualização.

Extrapolação para as condições usuais

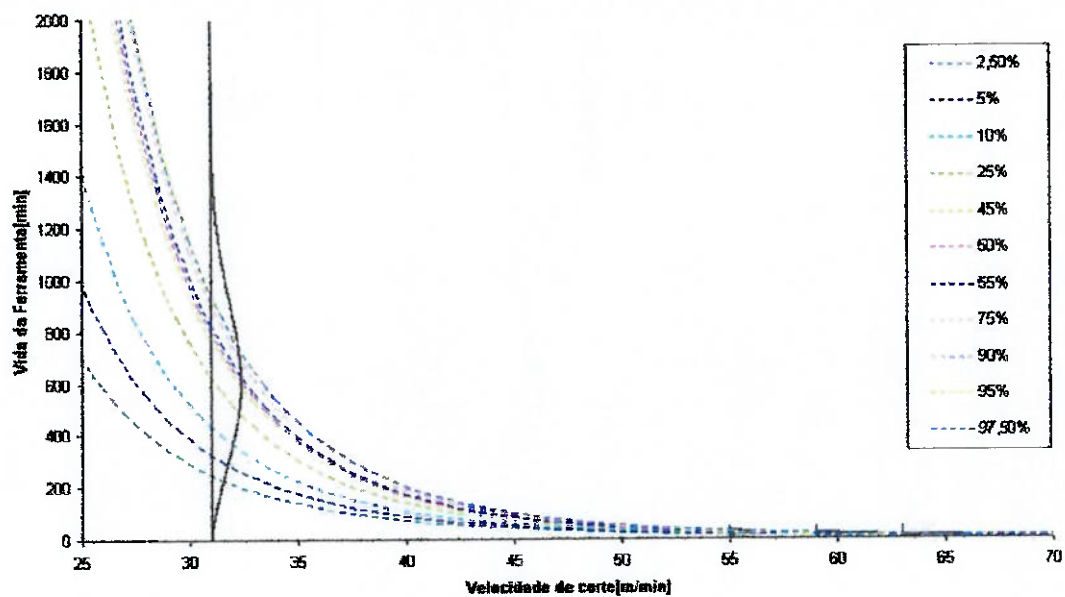


Figura 8.11 - Extrapolação para as condições usuais

A Figura 8.12, mostra a função densidade de probabilidade para uma rotação de 2000rpm, obtida através das curvas de vida mostradas nas figuras 8.10 e 8.11. Nota-se que a figura 8.10 é uma ampliação da figura 8.11 que visa mostrar com mais clareza as distribuições do tempo até a falha para as condições ensaiadas.

Função Densidade de Probabilidade em
função do tempo para 2000 rpm

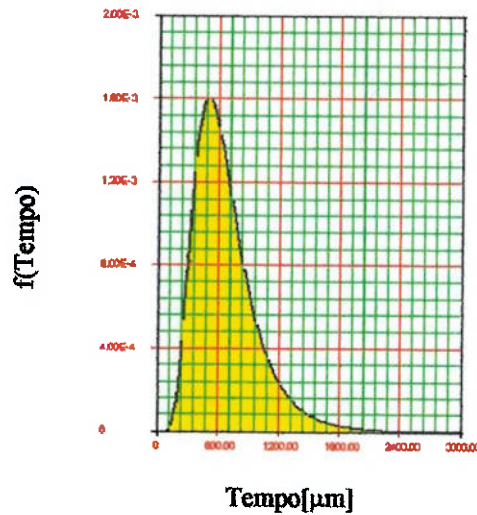


Figura 8.12 - Função Densidade de Probabilidade para 2000rpm

A aplicação do metodologia para obtenção do tempo de troca da 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.

9 CONCLUSÕES

Neste estudo procurou-se analisar, de uma forma qualitativa, o processo de usinagem por furação com brocas helicoidais de aço rápido, apresentando os conceitos teóricos do mesmo. A partir deste conhecimento teórico procurou-se planejar experimentos que destinam-se a avaliar a confiabilidade do processo. Para tal análise foi necessário um estudo das teorias de confiabilidade, bem como das principais distribuições estatísticas que auxiliam esta análise.

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

Verificou-se também a importância do uso de testes acelerados de vida, já que para o processo em estudo o tempo de ensaio para as condições normais de utilização é demasiadamente grande comparado com o tempo hábil para realização dos ensaios. Por outro lado, foi necessário um estudo detalhado dos mecanismos de falha das brocas helicoidais de aço rápido, especialmente nas falhas por desgaste. Neste sentido foram identificados os principais mecanismos de desgaste da ferramenta. Assim, podemos concluir que, para o caso das brocas helicoidais e para as condições de usinagem que serão ensaiadas, o principal mecanismo de desgaste é o desgaste de flanco que ocorre na superfície de folga da ferramenta. Este desgaste tem como consequência uma perda progressiva da qualidade no acabamento superficial e nas tolerâncias da peça fabricada sendo, assim, de suma importância para estabelecer a confiabilidade do processo.

Analisando o desgaste da ferramenta foi visto que é possível estabelecer um tempo de troca para ferramenta baseado nas curvas de vida. Estas curvas de vida seguem o modelo de Taylor que caracteriza a vida da ferramenta em função da sua velocidade de corte. Neste sentido foi visto que quanto maior a velocidade de corte maior o desgaste de flanco da ferramenta, desde que este aumento não altere os mecanismos de falha da mesma. Assim, o aumento da velocidade de corte foi utilizado como o método de aceleração do desgaste.

O desgaste obtido para uma velocidade acelerada foi então usado para estabelecer um critério de tempo para troca da ferramenta nas condições normais de uso. Este critério foi obtido com o auxílio dos métodos estatísticos discutidos neste texto.

Sugere-se então 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 a 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 uma metodologia que permite estabelecer o tempo de substituição da ferramenta de modo que a confiabilidade do processo seja superior a confiabilidade mínima requerida por este, e conseqüentemente seja evitado o aumento do número de peças defeituosas.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA

- 1) TOMAZ, D. M. **Análise de Confiabilidade de Processos de Manufatura – Aplicação para um Processo de Furação de Precisão** – Dissertação de Mestrado, São Paulo 2002.
- 2) BORDINASSI, E. C. **Estudo do Processo de Furação em Brocas de Aço Rápido** – Dissertação de Mestrado, São Paulo 2002.
- 3) JURAN, J. M. **Juran's Quality Control Handbook**, 5th ed. Frank M. Gryna, associate editor, VI pp. 2.1 – 2.2; 48.1 – 48.28.
- 4) O'CONNOR, Patrick D. T. **Practical Reliability Engineering**, 2nd ed. Chichester; New York: Wiley, c19985.
- 5) Diniz, A. M.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L.. **Tecnologia da Usinagem dos Metais** 2^a ed. – Artliber Editora LTDA, 2000.
- 6) Ferraressi, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**: Edgar Blucher, 1995.
- 7) Wayne, Nelson. **Accelerates testing: statistical model, test plans and data analyses**. New York : Wiley, c1990.
- 8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, TB-111. **Broca helicoidal: Terminologia**. Rio de janeiro, 1977.
- 9) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-7432. **Broca helicoidal de aço rápido: Especificação**. 1982.

- 10) STIPKOVIC, M. F^o. **Usinagem**. Apostila do curso de máquinas ferramentas da escola de engenharia Mauá, 1985.
- 11) DAAR, H. A. **Uma contribuição ao conhecimento do processo de furação dos aços com brocas helicoidais**. São Carlos, 1967. 233p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 12) S.A. SANDVIK, DORMER TOOLS. **Catálogo Técnico**. 2001.
- 13) HITOMI, K. NAKAMURA, N. INOUE, S. **Reliability Analysis of cutting tools**. Journal of engineering for industry, v. 101, No 2 p.185-190, 1979.
- 14) WARDANY, T.; ELBESTAWI, M. **Prediction of tool rate in turning hardened steels**. Advanced Manufacturing Technology, v.13, No 1, p.1-16, 1997.
- 15) WANG, K.; UN, 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.
- 16) RODRIGUEZ, CARMEN E. P. **Confiabilidade Aplicada ao Processo de Manufatura de Sistemas Mecânicas** – Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo 2004.
- 17) SOUZA, GILBERTO F. M. **Análise de Confiabilidade Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos** – Apostila do Curso, São Paulo, 2003.