

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Um Estudo Comparativo do
Comportamento das Afições Cônica e
Cônica Radial (Racon) em Brocas
Helicoidais de Aço Rápido**

Autor : Maurício Corrêa

Orientador: Olívio Novaski

08/96

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR MAURÍCIO
CORRÊA E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 07/08/96
Olívio Novaski
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

**Um Estudo Comparativo do Comportamento
das Afições Cônica e Cônica Radial (Racon)
em Brocas Helicoidais de Aço Rápido**

Autor : Maurício Corrêa

Orientador: Olívio Novaski

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Fabricação

Tese de Mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1996

S.P. - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C817e

Corrêa, Maurício

Um estudo comparativo do comportamento das
afiações cônica e cônica radial (racon) em brocas
helicoidais de aço rápido / Maurício Corrêa.--Campinas,
SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Olívio Novaski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Máquinas de furar e alargar. 2. Usinagem. I.
Novaski, Olívio. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

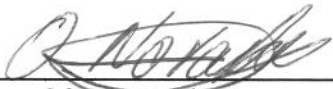
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

Dissertação de Mestrado

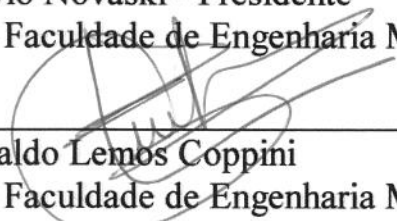
**Um Estudo Comparativo do Comportamento
das Afições Cônica e Cônica Radial (Racon)
em Brocas Helicoidais de Aço Rápido**

Autor : Maurício Corrêa

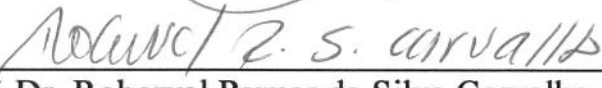
Orientador: Olívio Novaski



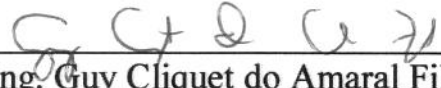
Prof. Dr. Olívio Novaski - Presidente
UNICAMP - Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini
UNICAMP - Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr. Roberval Rymer da Silva Carvalho
EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá



Eng. Guy Cliquet do Amaral Filho
Indústria e Comércio de Ferramentas TWILL S/A

Campinas, 07 de agosto de 1996

À minha filha Paula e seu sincero sorriso de estímulo.

Agradecimentos

Quero prestar minha homenagem e deixar meus sinceros agradecimentos :

Ao meu mestre e orientador Prof. Dr. Olivio Novaski, que através de sua atenção e disposição em muito auxiliou o desenvolvimento deste trabalho e por tudo o que pude aprender durante essa convivência.

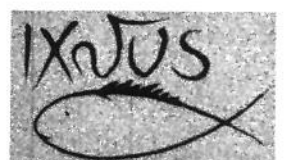
Aos meus pais Osório e Lourdes pelo carinho, incentivo e incansável disposição em ajudar. Verdadeiros modelos de conduta e retidão de vida.

À minha esposa Célia por sua imensa compreensão, paciência, dedicação e afeto demonstrado durante todo o trabalho.

À TWILL, que possibilitou a efetiva realização deste trabalho propiciando toda a infraestrutura necessária à consecução do mesmo. Representada nas pessoas do eng. Guy Cliquet do Amaral Filho, cuja experiência e conhecimento prestaram grande ajuda e ao técnico Nilson da Silva por sua solicitude e eficiência na condução dos ensaios.

Aos amigos que de alguma forma possam ter auxiliado neste trabalho e em especial ao Marcos, ao Rubens e a Sandra pela grande prestatividade e colaboração empenhadas.

E a todos àqueles que se dedicam ao ensino e pesquisa neste país.



Sumário

Sumário.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Equações.....	v
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas.....	viii
Nomenclatura.....	ix
Capítulo 1 : Introdução.....	01
Capítulo 2 : Características de Brocas Helicoidais.....	05
2.1 Generalidades.....	05
2.2 Desvios de Fabricação na Furação.....	06
2.3 Características Geométricas das Brocas Helicoidais.....	08
2.4 Afiação de Brocas Helicoidais.....	17
2.5 Vida e Desgastes em Brocas Helicoidais.....	23
2.5.1 Equações de Vida de Brocas Helicoidais.....	23

2.5.1.1 Características Geométricas Influentes na Vida de Brocas Helicoidais....	28
2.5.2 Desgastes da Ferramenta.....	29
2.5.2.1 Mecanismos de Desgastes em Brocas.....	32
2.6 Esforços de Usinagem no Processo de Furação.....	33
 Capítulo 3 : Procedimentos e Métodos Experimentais.....	42
3.1 Materiais Utilizados.....	43
3.2 Ferramentas Utilizadas.....	45
3.3 Equipamentos Utilizados.....	47
3.3.1 Medição e Controle.....	47
3.4 Fluido de Corte.....	48
3.5 Montagem dos Experimentos.....	48
3.6 Condições Operacionais dos Ensaios.....	50
3.6.1 Critérios para Medição de Esforços e Desgastes.....	52
 Capítulo 4 : Resultados e Discussões.....	54
 Capítulo 5 : Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	76
 Referências Bibliográficas.....	79
 Anexos : Planilhas geradoras das figuras 4.1 a 4.30.....	83

Resumo

Corrêa, Maurício; Um Estudo Comparativo do Comportamento das Afições Cônica e Cônica Radial (Racon) em Brocas Helicoidais de Aço Rápido; Campinas - S.P.; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas; 1996; Tese de Mestrado

O objetivo principal deste trabalho é estudar o comportamento das afiações Racon (cônica radial) e Cônica em brocas helicoidais de aço rápido e analisar a performance das mesmas, buscando correlacioná-las às suas características geométricas. Para esta finalidade, realizou-se ensaios com dois materiais de diferentes usinabilidade, o aço SAE 4340 e o aço SAE 1045 utilizando-se três diferentes velocidades de corte associadas a um avanço específico para cada material. Testaram-se as afiações, repetindo-se as condições de corte três vezes para cada ponto ensaiado, evitando-se dessa maneira, influências aleatórias inerentes aos ensaios e aumentando-se quantitativa e qualitativamente as amostragens obtidas. Através desses experimentos, monitorou-se o percurso de usinagem, os esforços de corte (momento torçor e força de avanço), a evolução do desgaste de flanco e o alargamento dos furos usinados. Com os resultados obtidos levantaram-se hipóteses para explicar o comportamento de vida da ferramenta e esforços de corte (momento torçor e força de avanço). Constatou-se a superioridade da afiação Racon em vida de ferramenta, quando aplicada ao aço SAE 4340 e vida equivalente à Cônica, quando aplicada ao aço SAE 1045. Já, os esforços de corte observados (momento torçor e força de avanço) para afiação Racon mostraram-se inferiores aos da afiação Cônica, para praticamente todos os casos à exceção da força de avanço para a terceira condição de usinagem no aço SAE 1045. A partir dessas considerações presume-se que o comportamento da afiação Racon tende a ser semelhante em performance em outras condições de usinagem para os materiais ensaiados e possivelmente também para outros materiais demonstrando sua evolução frente à afiação Cônica.

Palavras chaves : Máquinas de furar e alargar ; usinagem

Abstract

Corrêa, Maurício; A Comparative Study of Conical and Radiused Conventional Point (Racon) Behaving in High Speed Steel Twist Drill; Campinas - S.P.; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas; 1996; MSc Dissertation.

The main goal of this work is to study the behaving of Racon (radiused conventional point) and Conical (conventional) drill points in high speed steel twist drills and analyse their performance, trying to correlate them to their geometrical features. For this purpose, tests with two different machinability materials, the SAE 4340 and SAE 1045 steels, were carried out by using three different cutting speeds associated to an specific feed for each material. The drill points were tested by repeating three times the cutting conditions to each point, avoiding the random influences inherent to them and increasing the obtained samples both in quality and quantity. Cutting length, cutting forces (torque and thrust force), flank wear evolution and widening of the machined holes were supervised through out these tests. Hypotheses to explain tool life behaving and cutting forces (torque and thrust force) were generated with the obtained results. It was verified the superiority of Racon drill point in tool life when the SAE 4340 steel was used. But cutting forces in Racon drill point were inferior when compared to the conventional one in almost all cases, except the thrust force to the third cutting condition in SAE 1045 steel. Through all these considerations it's presumed that Racon drill point behaving tends to be similar in performance in other cutting conditions in the tested materials and possibly in other materials showing its evolution over the conventional drill point.

Keywords : Drill and wide machines; machining

Lista de Equações

Equação 2.3.1 - Relação entre os ângulos ortogonais de folga, cunha e saída.....	12
Equação 2.3.2 - Relação entre os ângulos laterais de folga, cunha e saída.....	12
Equação 2.3.3 - Relação entre os ângulos dorsais de folga, cunha e saída.....	12
Equação 2.3.4 - Relação entre os ângulos normais de folga, cunha e saída.....	12
Equação 2.4.1 - Determinação do ângulo de folga para afiações curvilíneas.....	22
Equação 2.4.2 - Determinação do ângulo da aresta transversal para afiações curvilíneas.....	22
Equação 2.4.3 - Determinação do ângulo de ponta para afiações curvilíneas.....	22
Equação 2.4.4 - Modelamento matemático genérico para afiações curvilíneas.....	22
Equação 2.5.1 - Determinação de vida da ferramenta por Taylor.....	25
Equação 2.5.2 - Determinação de vida da ferramenta por Kronenberg.....	25
Equação 2.5.3 - Determinação de vida da ferramenta por Gilbert.....	26
Equação 2.6.1 - Determinação de momento torçor por Ferraresi.....	34
Equação 2.6.2 - Determinação de força de avanço por Ferraresi.....	34
Equação 2.6.3 - Determinação de momento torçor por Armarego.....	36
Equação 2.6.4 - Determinação de força de avanço por Armarego.....	36
Equação 2.6.5 - Determinação de momento torçor por Shaw.....	37
Equação 2.6.6 - Determinação de força de avanço por Shaw.....	37
Equação 2.6.7 - Determinação de momento torçor por Rubenstein.....	38
Equação 2.6.8 - Determinação de força de avanço por Rubenstein.....	38

Lista de Figuras

Figura 2.3.1	- Superfícies e arestas da broca helicoidal.....	13
Figura 2.3.2	- Ângulos de brocas helicoidais.....	14
Figura 2.3.3	- Ângulos de brocas helicoidais.....	15
Figura 2.3.4	- Ângulos de brocas helicoidais.....	16
Figura 2.4.1	- Geometria da ponta da broca na afiação Racon.....	19
Figura 2.4.2	- Ilustração da afiação Racon para equacionamento de Stephenson.....	21
Figura 2.4.3	- Ilustração da afiação Racon para equacionamento de Stephenson.....	21
Figura 2.5.2.1	- Desgastes em brocas helicoidais de aço rápido.....	30
Figura 3.1.1	- Corpos de prova utilizados nos ensaios.....	45
Figura 3.2.1	- Brocas helicoidais com afiação cônica.....	46
Figura 3.5.1	- Montagem dos ensaios.....	49
Figura 4.1	- Percurso usinado em SAE 4340.....	54
Figura 4.2	- Percurso usinado em SAE 1045.....	55
Figura 4.3	- Momento torçor em SAE 1045.....	57
Figura 4.4	- Momento torçor em SAE 4340.....	57
Figura 4.5	- Força de avanço em SAE 1045.....	59
Figura 4.6	- Força de avanço em SAE 4340.....	59
Figura 4.7	- Evolução do desgaste em SAE 4340 para $V_c = 20,00$ m/min.....	61
Figura 4.8	- Evolução do desgaste em SAE 4340 para $V_c = 25,00$ m/min.....	61
Figura 4.9	- Evolução do desgaste em SAE 4340 para $V_c = 30,00$ m/min.....	62
Figura 4.10	- Evolução do desgaste em SAE 1045 para $V_c = 35,00$ m/min.....	62
Figura 4.11	- Evolução do desgaste em SAE 1045 para $V_c = 40,00$ m/min.....	63
Figura 4.12	- Evolução do desgaste em SAE 1045 para $V_c = 45,00$ m/min.....	63
Figura 4.13	- Evolução do momento torçor em SAE 4340 para $V_c = 20,00$ m/min.....	64
Figura 4.14	- Evolução do momento torçor em SAE 4340 para $V_c = 25,00$ m/min.....	64

Figura 4.15	- Evolução do momento torçor em SAE 4340 para $V_c = 30,00$ m/min.....	65
Figura 4.16	- Evolução do momento torçor em SAE 1045 para $V_c = 35,00$ m/min.....	65
Figura 4.17	- Evolução do momento torçor em SAE 1045 para $V_c = 40,00$ m/min.....	66
Figura 4.18	- Evolução do momento torçor em SAE 1045 para $V_c = 45,00$ m/min.....	66
Figura 4.19	- Evolução da força de avanço em SAE 4340 para $V_c = 20,00$ m/min.....	67
Figura 4.20	- Evolução da força de avanço em SAE 4340 para $V_c = 25,00$ m/min.....	67
Figura 4.21	- Evolução da força de avanço em SAE 4340 para $V_c = 30,00$ m/min.....	68
Figura 4.22	- Evolução da força de avanço em SAE 1045 para $V_c = 35,00$ m/min.....	68
Figura 4.23	- Evolução da força de avanço em SAE 1045 para $V_c = 40,00$ m/min.....	69
Figura 4.24	- Evolução da força de avanço em SAE 1045 para $V_c = 45,00$ m/min.....	69
Figura 4.25	- Alargamento do furo em SAE 4340 para $V_c = 20,00$ m/min.....	71
Figura 4.26	- Alargamento do furo em SAE 4340 para $V_c = 25,00$ m/min.....	71
Figura 4.27	- Alargamento do furo em SAE 4340 para $V_c = 30,00$ m/min.....	72
Figura 4.28	- Alargamento do furo em SAE 1045 para $V_c = 35,00$ m/min.....	72
Figura 4.29	- Alargamento do furo em SAE 1045 para $V_c = 40,00$ m/min.....	73
Figura 4.30	- Alargamento do furo em SAE 1045 para $V_c = 45,00$ m/min.....	73
Figura 4.31	- Tensões em brocas helicoidais.....	75

Lista de Tabela

Tabela 2.6.1 - Tabela das influências em momento torçor e força de avanço..... 36

Nomenclatura

A	área de corte de 1,0 mm ²
A _α	superfície de folga
A _γ	superfície de saída
a _p	profundidade de corte
a,b	parâmetros geométricos p/ posicionamento dos comes de geração de afiação
c	comprimento da aresta transversal
C	inclinação da curva da velocidade de corte
Cl	constante para velocidade de corte para área de 1,00 mm ²
d	diâmetro da broca
F'	força de avanço na aresta transversal
F''	força de avanço periférica
F _o	força de avanço nas arestas de corte
F _{zT}	força de avanço total
F _{zap}	força de avanço da aresta principal
F _{zat}	força de avanço da aresta transversal
F _{zc}	força de avanço devido a atritos com cavacos
F _z	força de avanço
f	avanço
HB	dureza Brinell
HRC	dureza Rockwell C
K ₁	constante levantada empiricamente para equação de Gilbert
k ₁	constante de proporcionalidade Rubenstein
k ₂	constante de proporcionalidade Rubenstein

l	área de contato entre superfície de saída e peça
L_f	percurso de usinagem
M'	momento torçor na aresta transversal
M''	momento torçor periférico
M_o	momento torçor na aresta de corte
M_{t_T}	momento torçor total
$M_{t_{ap}}$	momento torçor da aresta principal
$M_{t_{at}}$	momento torçor da aresta transversal
M_{t_c}	momento torçor devido aos atritos
M_t	momento torçor
P_f	plano admitido de trabalho
P_g	plano ortogonal à superfície de saída
P_n	plano normal à aresta de corte
P_{ne}	plano efetivo normal
P_o	plano ortogonal da ferramenta
P_p	plano dorsal da ferramenta
P_r	plano de referência da ferramenta
P_s	plano de corte da ferramenta
P'_s	plano secundário de corte
P_b	plano ortogonal à superfície de folga
r	distância radial do eixo da broca
s	parâmetro geométrico
T	vida da ferramenta
V_B	desgaste de flanco
V_c	velocidade de corte
x,y,z	sistema de coordenadas para afiação Racon
x',y',z'	constantes para equação de Gilbert
Y	inclinação da curva $\log T - \log V_c$
z	distância axial do eixo da broca para afiação Racon
z''	inclinação da curva $\log V_{c60} - \log A_{p/T=60 \text{ min}}$
w	diâmetro do núcleo da broca

α_o	ângulo de folga ortogonal da ferramenta
α_f	ângulo de folga lateral da ferramenta
α_p	ângulo de folga dorsal da ferramenta
α_n	ângulo de folga normal da ferramenta
α_b	ângulo de folga básico da ferramenta
β	ângulo de cunha da ferramenta
β_o	ângulo de cunha ortogonal da ferramenta
β_f	ângulo de cunha lateral da ferramenta
β_n	ângulo de cunha normal da ferramenta
β_p	ângulo de cunha dorsal da ferramenta
χ_r	ângulo de posição da ferramenta
ε_r	ângulo de ponta da ferramenta
γ_o	ângulo de saída ortogonal da ferramenta
γ_f	ângulo de saída lateral da ferramenta
γ_p	ângulo de saída dorsal da ferramenta
γ_n	ângulo de saída normal da ferramenta
γ_g	ângulo de saída geométrico da ferramenta
τ^c	tensão de cisalhamento do material usinado
τ_l	tensão normal atuante na aresta de corte
τ_m	tensão atuante na superfície de saída da peça
λ_s	ângulo de inclinação da ferramenta
μ	coeficiente teórico de atrito peça ferramenta
θ	ângulo do núcleo
Ψ	ângulo de posição complementar da ferramenta
ρ	ângulo de referenciamento do eixo da broca por Tsai

CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO

O contato cotidiano com os processos de fabricação mecânica mostra que, ainda hoje, a usinagem responde por grande parte dos mesmos. Dificilmente encontra-se um produto que durante alguma etapa de seu processo de fabricação não sofra nenhuma espécie de operação de usinagem.

Dentre as várias formas possíveis de usar-se uma peça pode-se afirmar que, os processos de furação são responsáveis por aproximadamente 40% de todos os processos de usinagem existentes (Nedeß, C., 1986).

De muitas maneiras os conceitos básicos dos processos de furação alteraram-se muito pouco desde o patenteamento das brocas helicoidais por Morse em 1863 (Armarego, E.J.A., 1990) até os dias atuais.

As grandes mudanças ocorridas são as novas solicitações, que sofrem quaisquer formas de fabricação existentes. Hoje, exige-se dos processos de furação alta produtividade associada à qualidade do serviço executado, ou seja, os furos usinados devem apresentar conformidade com a tolerância dimensional requerida, além de desvios de forma e acabamento dentro de um espectro de amostragem suficiente para reduzir-se ao máximo o número de operações de usinagem posteriores a que o mesmo estaria sujeito.

Entretanto, para adequar-se às novas exigências postas, as ferramentas de usinagem (no caso as brocas helicoidais de aço rápido) empregadas nos processos de usinagem devem apresentar como característica essencial a durabilidade dentro de critérios previamente estabelecidos, pois, o aumento de vida da mesma implicará em menores gastos com atividades

secundárias paralelas ao processo de usinagem não agregadoras diretas de valor ao produto obtido. Como exemplo ilustrativo têm-se as paradas de máquinas para troca de ferramenta.

Esforços no sentido de atender-se a essas novas aspirações de desempenho solicitadas pelo mercado propiciaram o desenvolvimento de brocas helicoidais constituídas de novos materiais, novas afiações, novos conceitos de construção geométrica da ferramenta, enfim mudanças na busca da otimização da vida e melhoria da qualidade do furo usinado.

Contudo, as brocas helicoidais de aço rápido dentre as ferramentas disponíveis às operações de furação são as mais comumente utilizadas para esta finalidade, chegando à ordem de 95% de todas as brocas manufaturadas anualmente (Donarski, R.R., 1995).

Em brocas helicoidais de aço rápido um dos fatores que se mostram preponderantes para determinação da vida da ferramenta é a geometria de afiação selecionada para determinada aplicação.

Por meio da geometria de afiação de uma broca pode-se reduzir os esforços de usinagem, melhorar o mecanismo de corte e formação de cavacos, trazendo dessa maneira conseqüências diretas ao acabamento do furo, além de otimizar-se as condições operacionais (velocidade de corte e avanço da máquina utilizada no processo), buscando uma vida de ferramenta compatível às exigências do processo sem dissociar-se dos demais requisitos de uma furação bem sucedida (alta produtividade e qualidade do furo usinado).

Considerando-se então, a importância da geometria de afiação de brocas helicoidais de aço rápido na determinação do comportamento de vida e esforços obtidos no processo de usinagem, bem como as tolerâncias geométricas e dimensionais obtidas pela usinagem, o desenvolvimento dessas geometrias de afiações passa a ser consideravelmente decisivo na diferenciação de performance das brocas.

Hoje virtualmente 99% da geometria de afiação empregada é a cônica que, devido ao extenso uso também é conhecida como convencional. Existem boas razões para esse fato, tal qual a grande adequação da mesma em muitas aplicações de furação e a relativa simplicidade de obtenção de sua geometria, cuja confecção já se dá por quase um século.

Todavia, a necessidade de introdução de melhorias ao processo de furação levou ao aprimoramento de novas formas de geometria de afiação considerando-se que, não existe afiação apropriada para obtenção constante do melhor resultado em todas as aplicações.

A afiação tipo Racon (“radiused conventional point” ou cônica radial) surgiu dessas necessidades, como uma variante da afiação cônica, podendo afirmar-se até ser a mesma uma evolução da anterior dado os resultados alcançados durante sua utilização. A adoção, entretanto, da afiação cônica como padrão e primeira opção de uso está solidamente estruturada no dia a dia e grande parte dessa contribuição é atribuída aos poucos estudos envolvendo as demais afiações denominadas especiais.

O presente estudo vem de encontro com essas aspirações, quais sejam, o levantamento de dados que permitam assegurar à afiação Racon condições de se colocar na posição de opção de geometria padrão de afiação para brocas helicoidais de aço rápido para o maior número possível de materiais e aplicações de usinagem.

O monitoramento dos desgastes, esforços de usinagem e percurso de usinagem obtidos com a afiação Racon em condições de ensaios idênticos à submetida à afiação cônica demonstram possuir as mesmas condições para ampliação e expansão do seu uso em escala similar à afiação cônica, além de assegurar transformações no processo de novas geometrias de afiações sem provocar rupturas com a larga utilização da afiação cônica empregada atualmente.

Os resultados obtidos nos ensaios deste trabalho visam credenciar a afiação Racon a estudos posteriores que possibilitem o aprimoramento de sua aplicabilidade em outros materiais e condições de corte não testados, buscando melhorias em seu desempenho global.

Visando facilitar-se a compreensão o presente estudo foi dividido em cinco capítulos cuja breve descrição tem-se a seguir :

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO : aborda de maneira sucinta o conteúdo da dissertação e suas propostas

Capítulo 2 - CARACTERÍSTICAS DE BROCAS HELICOIDAIS : relata as particularidades do processo de furação e suas características, explica também a importância das afiações em brocas helicoidais e apresenta as utilizadas nos ensaios. Mostra ainda, os principais desgastes que ocorrem em brocas durante o processo de furação e seus respectivos mecanismos de formação além de descrever os esforços de usinagem encontrados no processo de furação e apresenta alguns modelos matemáticos que descrevem esses esforços discutindo a aplicabilidade dos mesmos.

Capítulo 3 - METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS : trata dos procedimentos, equipamentos, materiais e critérios adotados nos ensaios de furação.

Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES : apresenta os resultados dos ensaios e as considerações sobre os mesmos.

Capítulo 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS : mostra a contribuição desta dissertação ao processo de furação e sugere futuros estudos dentro da área de usinagem com brocas helicoidais de aço rápido.

CAPÍTULO 2 : CARACTERÍSTICAS DE BROCAS HELICOIDAIS

2.1 - Generalidades

Dada a posição de destaque ocupada por processos de furação dentre os processos de usinagem existentes; somente em 1992 US\$ 1,62 bilhões foram gastos com a produção de brocas e acessórios nos Estados Unidos (U.S. Department of Commerce, 1992) ; 40% de todas as operações de usinagem na indústria aeroespacial são operações de furação (Cook, N.H. et alli, 1977), é conveniente definir o que vem a ser o mesmo.

Furação é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com o auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina (Ferraresi, D., 1977).

A furação pode subdividir-se nas seguintes operações : furação em cheio, escareamento, furação escalonada, furação de centros e trepanação. Essas subdivisões foram sugeridas por Ferraresi em 1970, porém, as mesmas podem ser aproveitadas ainda hoje.

O estudo desenvolvido nessa dissertação dedica-se à furação em cheio, mais precisamente às ferramentas utilizadas no processo, quais sejam, as brocas.

Existe grande diversidade de tipos de brocas (calibradoras, brocas para centrar, escalonadas, trepanadoras entre outras), porém, a broca de uso mais freqüente em processos de furação é a broca helicoidal (Rubenstein, C., 1991).

Os processos de furação com a utilização de brocas helicoidais de aço rápido são recomendados pelos fabricantes de ferramenta, para percursos de usinagem de até dez (10) vezes o diâmetro da broca empregada, ou até mesmo quinze vezes desde que utilizados acessórios adequados. Diâmetros acima desse valor exigem o uso de ferramentas especiais.

Para furos de até 20mm de diâmetro a recomendação usual julga ser dispensável o uso de pré-furação, tendo em vista que as qualidades dos furos obtidos nos processos de furação são geralmente da ordem de IT 11. Caso exista a necessidade de valores de IT menores, processos posteriores à furação, com brocas calibradoras por exemplo, serão necessários.

2.2 - Desvios de Fabricação na Furação

Tanto nos processos de furação como nos de usinagem de uma forma geral, a falta de rigidez da máquina ferramenta, de um dispositivo de usinagem, da perda da aresta cortante de uma ferramenta e outros inúmeros fatores influenciam diretamente na qualidade final da peça e acabam por provocar desvios dimensionais e de forma (Agostinho, O.L. et alli, 1977), (Novaski, O., 1994).

Caracterizando-os para furação, têm-se :

DESVIOS DE FORMA

São desvios macrogeométricos. Dentre os mais significativos para furação, temos :

- circularidade : as conhecidas ovalizações, ou seja, as diferenças do círculo real para o círculo teórico esperado no processo de fabricação. Normalmente a tolerância de circularidade para

furos a partir de IT 9 deve ser igual à metade da tolerância de fabricação (dimensional). Esses desvios são comuns por má fixação da peça a ser usinada.

- cilindridade : são as diferenças de circularidade através de uma seção do cilindro por um plano perpendicular à geratriz. Ocorrem quando da furação profunda, quando a superfície a ser furada está fixada inadequadamente ou existe diferença de comprimento das arestas de corte.

DESVIOS DE POSIÇÃO

São definidos como sendo o grau de variação entre as diversas superfícies reais entre si, com relação ao seu posicionamento teórico. Exemplos : perpendicularidade, paralelismo, coaxialidade entre outros.

DESVIOS MACROGEOMÉTRICOS

Mais conhecidos como rugosidade de superfícies. Definem-se como a totalidade de todas as diferenças da superfície ideal geométrica da peça em questão. Nos processos de furação convencionais a grandeza de valores esperados varia de 1,60 a 6,30 Ra (μm) (Ferraresi, D., 1977).

DESVIOS DIMENSIONAIS

São as diferenças para mais ou para menos da medida nominal de uma peça. Na verdade, devido à impossibilidade prática da obtenção seqüencial de valores nominais de medida, estabeleceu-se limites admissíveis de uma medida, com valores mínimos e máximos, as tolerâncias, como são conhecidas.

2.3 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS BROCAS

HELICOIDAIS

A broca helicoidal, como ferramenta, é normalizada de acordo com suas características construtivas e geométricas.

Em relação às características construtivas e aplicabilidade das mesmas na usinagem dos materiais, as brocas helicoidais possuem três tipos de hélice normalizados (ABNT PB-286 , 1977).

Tipo N : de passo normal, recomendada para materiais comuns, como aços e ferros fundidos.

Tipo H : de passo longo, recomendada para ligas de zinco e materiais que formam cavacos curtos.

Tipo W : de passo curto, recomendada para ligas de cobre, de alumínio, magnésio, materiais sintéticos e outros que formam cavacos longos.

Outras características construtivas são àquelas que se referem aos materiais empregados na confecção e tratamento térmico das brocas, não tratadas aqui.

A geometria das brocas helicoidais é controlada segundo a normalização adotada para tal (NB - 205, 1989).

Para a descrição dos ângulos empregados numa análise de brocas helicoidais, tratadas neste estudo, faz-se necessário a conceituação de alguns termos:

- Ponta de corte : parte ativa da ferramenta, onde estão as cunhas de corte com as respectivas arestas de corte.

- Cunha de corte : cunha formada pelas superfícies de saída e de folga da ponta de corte. Através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta, formam-se os cavacos sobre a cunha de corte.

- Superfície de saída : superfície da cunha de corte, sobre a qual o cavaco desliza.

- Superfície de Folga : superfície da cunha de corte que defronta com a superfície de usinagem.

- Superfície principal de folga : superfície de folga que contém a aresta principal de corte.

- Superfície secundária de folga : superfície de folga que contém a aresta secundária de corte.

- Aresta de corte : aresta da cunha de corte formada pelas superfícies de saída e de folga.

- Aresta principal de corte : aresta de corte, cuja cunha de corte observada no plano de trabalho e para um ângulo de direção de avanço de 90° , indica a direção e sentido de avanço. Gera na peça a superfície principal de usinagem.

- Aresta secundária de corte : aresta de corte cuja cunha de corte observada no plano de trabalho e para o ângulo da direção de avanço de 90° , indica a direção de avanço, porém, em sentido contrário. Gera na peça a superfície secundária de usinagem.

- Ponta de corte : parte relativamente pequena da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte.

- Ponto de corte escolhido : ponto destinado à determinação das superfícies e ângulos da ponta de corte.

A partir da conceituação anterior e utilizando-se o sistema de referência da ferramenta em conformidade ao recomendado pela norma NB 204, 1989, têm-se os ângulos que determinam a localização da aresta de corte em relação ao plano de referência ou ao plano admitido de trabalho, como também a posição entre si das arestas principal e secundária de corte

- Ângulo de posição da ferramenta (χ_r): ângulo entre o plano de corte da ferramenta P_s e o plano admitido de trabalho P_f , medido no plano de referência da ferramenta P_r .

- Ângulo de posição complementar da ferramenta (Ψ_r): ângulo entre o plano de corte da ferramenta P_s e o plano dorsal da ferramenta P_p , medido no plano de referência da ferramenta P_r .

- Ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s): ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta P_r , medido no plano de corte da ferramenta P_s .

- Ângulo de ponta da ferramenta (ε_r): ângulo entre os planos principal de corte P_s e o secundário de corte P'_s , medido no plano de referência da ferramenta P_r .

- Ângulo de saída da ferramenta (γ): ângulo entre a superfície de saída A_γ e o plano de referência da ferramenta P_r definido num dos planos: ortogonal da ferramenta P_o , admitido de trabalho P_f , dorsal da ferramenta P_p , normal à aresta de corte da ferramenta P_n , ou ortogonal à superfície de saída P_g .

- Ângulo de saída ortogonal da ferramenta (γ_o): ângulo entre a superfície de saída A_γ e o plano de referência da ferramenta P_r , medido no plano ortogonal da ferramenta P_o .

- Ângulo de saída lateral da ferramenta (γ_f): ângulo entre a superfície de saída A_γ e o plano de referência da ferramenta P_r , medido no plano admitido de trabalho P_f .

- Ângulo de saída dorsal da ferramenta (γ_p) : ângulo entre a superfície de saída A_γ e o plano de referência da ferramenta P_r , medido no plano dorsal da ferramenta P_p .

- Ângulo de saída normal da ferramenta (γ_n) : ângulo entre a superfície de saída A_γ e o plano de referência da ferramenta P_r , medido no plano normal à aresta de corte da ferramenta P_n .

- Ângulo de saída geométrico (γ_g) : ângulo entre a superfície de saída A_γ e o plano de referência da ferramenta P_r , medido no plano ortogonal à superfície de saída P_g .

- Ângulo de cunha da ferramenta (β) : ângulo entre as superfícies de saída A_γ e de folga A_α , definido num dos planos : ortogonal da ferramenta P_o , admitido de trabalho P_f , dorsal da ferramenta P_p , ou normal à aresta de corte da ferramenta P_n

- Ângulo de cunha ortogonal da ferramenta (β_o) : ângulo entre as superfícies de saída A_γ e de folga A_α , medido no plano ortogonal da ferramenta P_o .

- Ângulo de cunha lateral da ferramenta (β_f) : ângulo entre as superfícies de saída A_γ e de folga A_α , medido no plano admitido de trabalho P_f .

- Ângulo de cunha dorsal da ferramenta (β_p) : ângulo entre as superfícies de saída A_γ e de folga A_α , medido no plano dorsal da ferramenta P_p .

- Ângulo de cunha normal da ferramenta (β_n) : ângulo entre as superfícies de saída A_γ e de folga A_α , medido no plano normal à aresta de corte da ferramenta P_n , ou no plano efetivo normal à aresta de corte P_{ne} .

- Ângulo de folga da ferramenta (α) : ângulo entre a superfície de folga A_α e o plano de corte da ferramenta P_s , definido num dos planos : ortogonal da ferramenta P_o , admitido de trabalho P_f , dorsal da ferramenta P_p , normal à aresta de corte P_n , ou ortogonal à superfície de folga P_b .

- Ângulo de folga ortogonal da ferramenta (α_o) : ângulo entre a superfície de folga A_α e o plano de corte da ferramenta P_s , medido no plano ortogonal da ferramenta P_o .

- Ângulo de folga lateral da ferramenta (α_f) : ângulo entre a superfície de folga A_α e o plano de corte da ferramenta P_s , medido no plano admitido de trabalho P_f .

- Ângulo de folga dorsal da ferramenta (α_p) : ângulo entre a superfície de folga A_α e o plano de corte da ferramenta P_s , medido no plano dorsal da ferramenta P_p .

- Ângulo de folga normal da ferramenta (α_n) : ângulo entre a superfície de folga A_α e o plano de corte da ferramenta P_s , medido no plano normal à aresta de corte da ferramenta P_n .

- Ângulo de folga básico (α_b) : ângulo entre a superfície de folga A_α e o plano de corte da ferramenta P_s , medido no plano ortogonal à superfície de folga P_b .

Para os ângulos de folga, de cunha e de saída, definidos nos planos ortogonal da ferramenta P_o , admitido de trabalho P_f , dorsal da ferramenta P_p e normal à aresta de corte P_n valem as relações :

$$\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ ; (2.3.1)$$

$$\alpha_f + \beta_f + \gamma_f = 90^\circ ; (2.3.2)$$

$$\alpha_p + \beta_p + \gamma_p = 90^\circ ; (2.3.3)$$

$$\alpha_n + \beta_n + \gamma_n = 90^\circ ; (2.3.4)$$

A seguir temos a ilustração de alguns dos principais ângulos e superfícies da ferramenta, aqui citados :

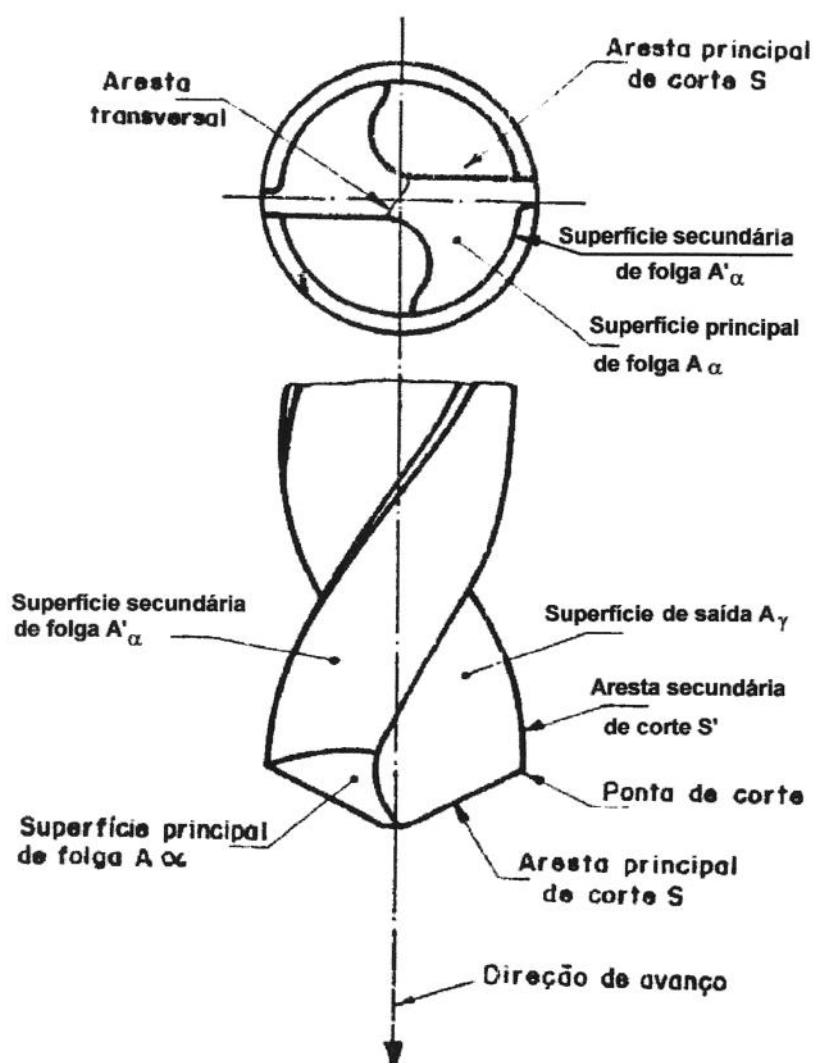


Figura 2.3.1 - Superfícies e arestas da broca helicoidal (NB 204, 1989)

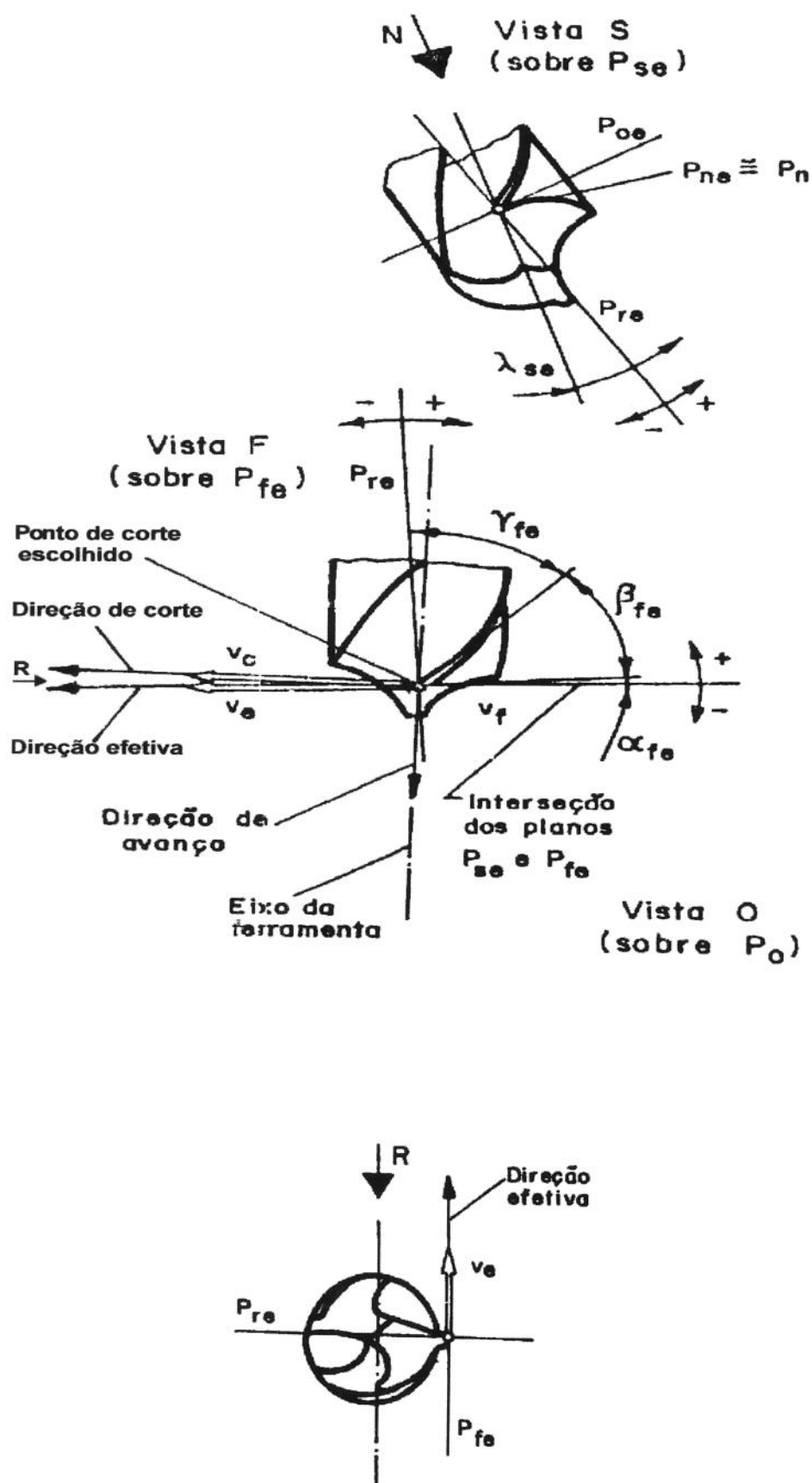


Figura 2.3.2 - Ângulos de brocas helicoidais (NB 204, 1989)

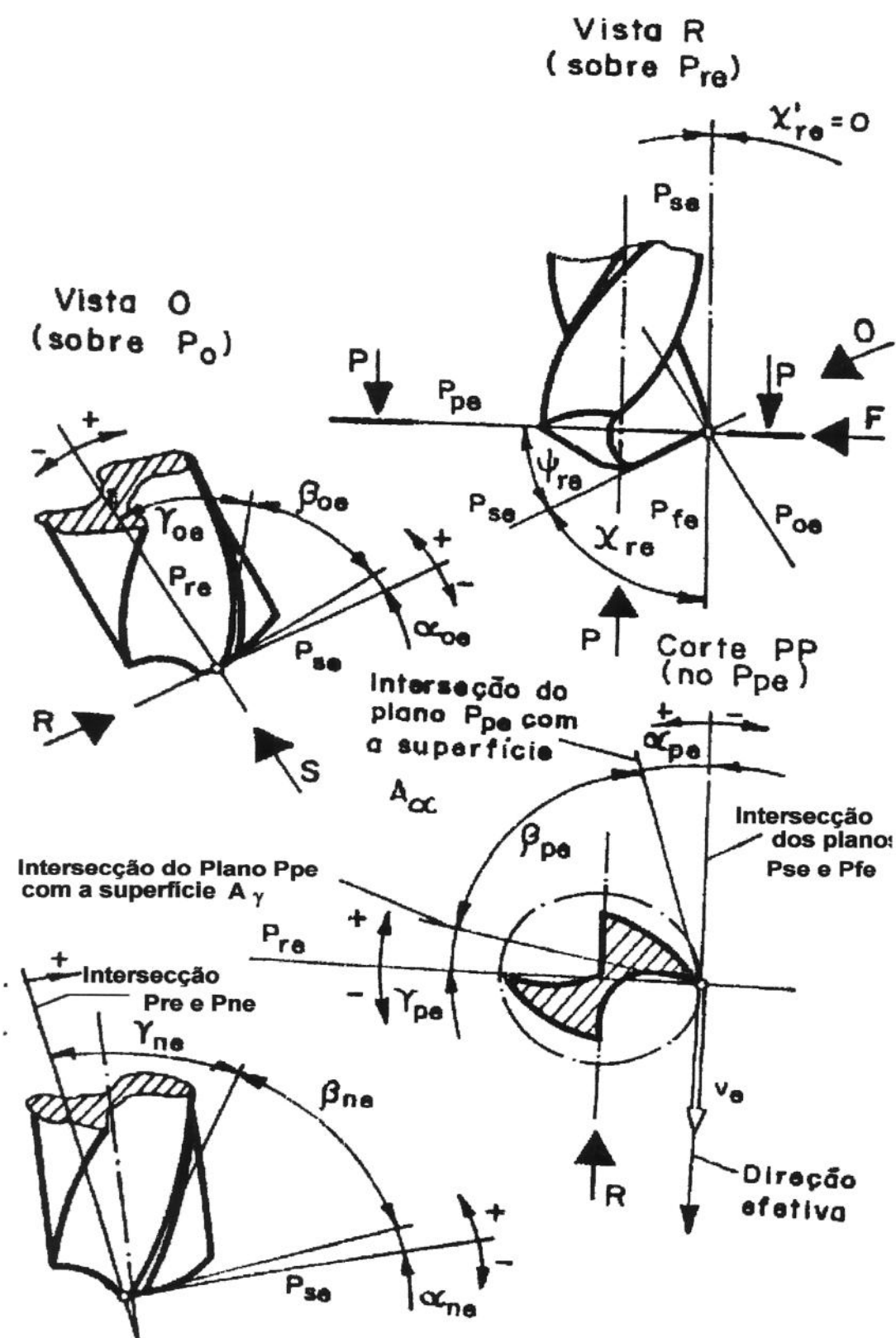


Figura 2.3.3 - Ângulos de brocas helicoidais (NB 204, 1989)

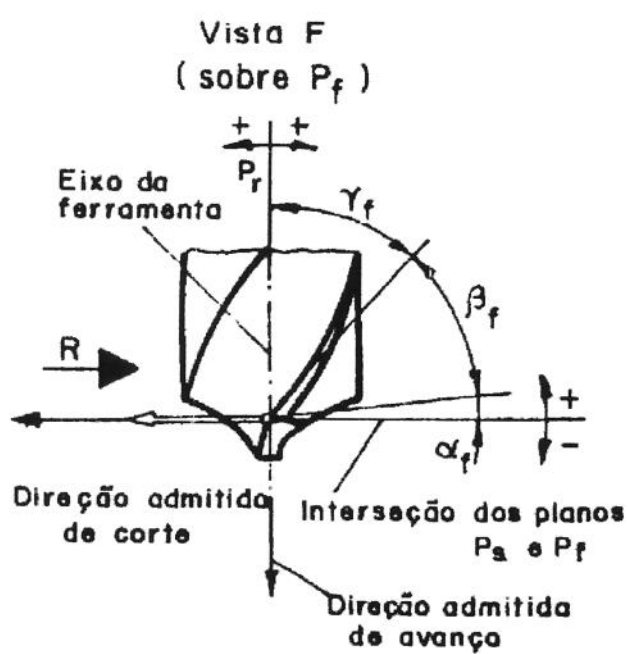
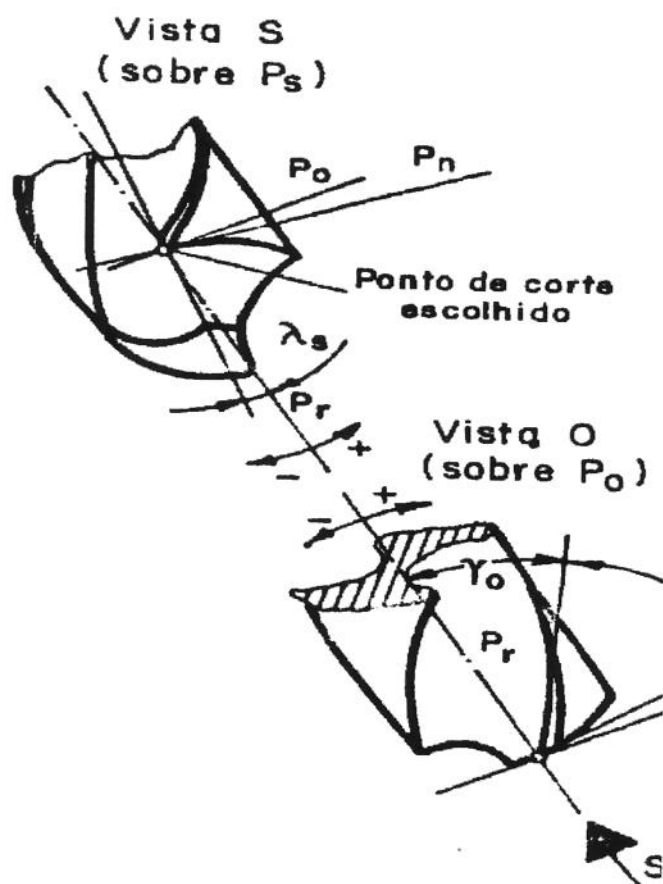


Figura 2.3.4 - Ângulos de brocas helicoidais (NB 204, 1989)

As características geométricas esquematizadas pelas figuras estão colocadas para uma broca helicoidal com afiação cônica ou convencional.

A alteração de ângulos pode possibilitar a criação de novos tipos de afiações diferenciadas da afiação convencional como será visto adiante.

2.4 - AFIAÇÃO DE BROCAS HELICOIDAIS

No processo de furação, a predominância do uso de brocas helicoidais de aço rápido é freqüente. Isso ocorre devido ao grande número de aplicações, nas quais as mesmas são empregadas com resultado bastante satisfatório (Donarski, R.R.,1984).

Em brocas helicoidais, a variação das características geométricas afetam significativamente a performance das mesmas, no que se refere à vida e esforços de trabalho na usinagem (Lorenz, G.,1979). Nesse caso, as afiações empregadas são capazes de, ao alterar a geometria, influir de forma significativa na vida da ferramenta (Satoshi, E.et alli,1988).

Quando se produz pequenas alterações na geometria da afiação da ferramenta, nota-se variações para mais ou para menos na vida da ferramenta, no acabamento do furo usinado e na magnitude dos esforços cortantes (Galloway, D.F.,1957) (Kaldor, S. et all,1980). A partir dessas observações vários estudos têm sido conduzidos no sentido de aprimorar a geometria das afiações existentes.

A afiação utilizada com maior freqüência para broca helicoidal é a cônica que,de tão freqüente também é denominada convencional (Ernest, H. et all,1958). Os resultados obtidos com o emprego da afiação cônica abrangem uma larga escala de aplicações, tanto condições

operacionais, quanto características de desempenho e resultado final, além de ser utilizada na usinagem de praticamente todos os materiais (Thornley, R.H.,1987).

Vários estudos visam elaborar propostas de geometria para afiações em brocas helicoidais de aço rápido, citando como exemplo a afiação com quatro superfícies de folga (Armarego, E.J.A. et alli,1990), afiação com três superfícies de folga (Sultanov, T.A.,1984) e outras tantas que têm sido estudadas (Armarego, E.J.A. et all,1973),(Agapiou, J.S.,1992).

Esta dissertação se propõe a discutir a geometria de afiação Racon (cônica radial) frente à tradicional afiação Cônica (convencional) em critérios de vida de ferramenta, análise de esforços de usinagem e alargamento dos furos usinados e traçar um quadro comparativo entre as mesmas, buscando identificar os benefícios da utilização da afiação Racon comparativamente à cônica e propor a mesma como primeira alternativa de afiação à uma broca helicoidal de aço rápido.

A afiação Racon é atualmente muito empregada em indústrias automobilísticas, onde a vida da ferramenta é uma condição importantíssima devido a quantidade de trabalho requerido e o exíguo tempo disponível para troca de ferramentas. Ressalta-se que, nessas indústrias, as brocas com afiação Racon são normalmente utilizadas em centros de usinagem, devido a rapidez do mesmo em executar operações anteriores e posteriores à furação principal. A mesma, ainda é objeto de estudos por parte dos fabricantes de ferramentas visando adaptá-la à utilização em larga escala.

Na maioria dos casos relatados de uso da afiação Racon, os resultados indicaram vidas de ferramenta de oito a dez vezes maiores que as encontradas quando da adoção da afiação convencional na usinagem de aços carbono (Donarski, R.R., 1984).

Como vantagens da afiação Racon sobre a convencional, têm-se (Donarski, R.R.,1984):

- a facilidade de obtenção de sua geometria a partir da afiação cônica apenas dressando corretamente o rebolo gerador do cone de afiação;
- a melhor dissipação de calor durante o processo de furação, devido à distribuição de temperaturas em suas arestas de corte;
- a baixa pressão de corte por área nas arestas de corte;
- a eliminação de “rebarbas” nos furos.

A representação da afiação tipo Racon com as variações dos ângulos de ponta pode ser observada na figura 2.4.1 :

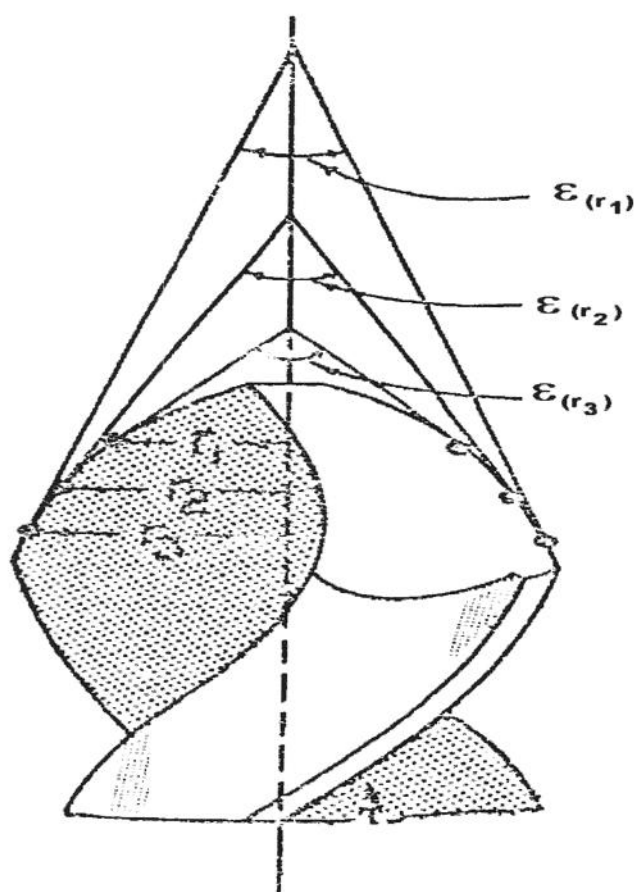


Figura 2.4.1 - Geometria da ponta da broca na afiação Racon

O modelamento geométrico da mesma se mostra bastante complexo porque os ângulos de referência da ferramenta passam a variar em função da inclinação dos segmentos das arestas da mesma, sendo que essa inclinação descreve uma função hiperbólica, elipsoidal ou parabólica ou mesmo parte das três em cada segmento ou ainda as três conjuntamente.

Modelamentos para se criar uma referência padrão para esses casos foram tentados anteriormente (Bhattacharyya, A. et alli, 1973), porém só recentemente um equacionamento satisfatório foi obtido (Stephenson, D.A. et all, 1991) utilizando-se coordenadas polares.

Segundo Stephenson, apesar das aparências substancialmente diferentes das afiações, pode-se considerar que as arestas principais de corte das mesmas são formadas pela composição de segmentos correspondentes às superfícies de saída e folga da ferramenta, diferenciando-se uma das outras pelo arranjo, orientação e tamanho de seus segmentos ao formar os ângulos que definem a sua geometria. A partir dessa observação e da utilização de métodos de parametrização é possível descrever genericamente a geometria das afiações para brocas de arestas curvilíneas.

Para tanto, os parâmetros utilizados nesse modelamento são :

- ângulos da ferramenta (ângulos de saída, de folga, etc.);
- a quantidade de superfícies de folga e arestas de corte;
- as dimensões desses segmentos e arestas;
- a forma geométrica desses segmentos (retos, radiais curvilíneos, etc.);
- e parâmetros adicionais para cada caso específico para a determinação do ângulo do núcleo.

Em cima dessas considerações o modelo geométrico apresentado para afiações curvilíneas proposto por Stephenson, é descrito através do equacionamento do ângulo de folga lateral da ferramenta, em função do ângulo de saída lateral e do ângulo do núcleo (não definido pela NB 204, 1989), utilizando-se de coordenadas polares, referentes às arestas curvilíneas da broca. Dessa forma, temos as seguintes equações :

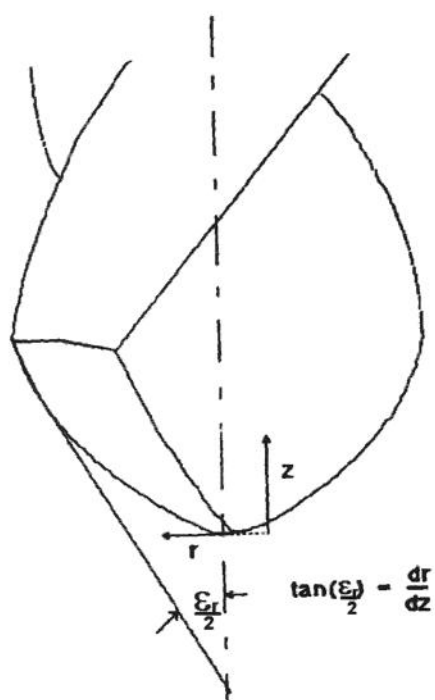


Figura 2.4.2 - Ilustração da afiação Racon para equacionamento de Stephenson

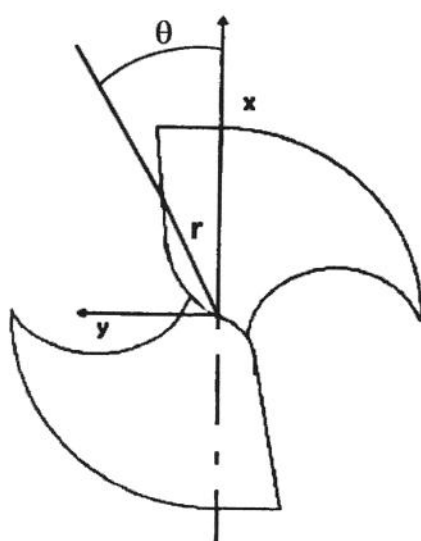


Figura 2.4.3 - Ilustração da afiação Racon para equacionamento de Stephenson

$$\alpha_f = \tan^{-1} \left[\frac{\tan(\gamma_f(r)) \cdot \cos(\theta(r))}{\sin(\epsilon_r/2) - \tan(\gamma_n) \cdot \cos(\epsilon_r/2) \cdot \sin(\theta(r))} \right] \quad (2.4.1)$$

$$\theta(r) = \sin^{-1}(w/2r) \quad (2.4.2)$$

$$\epsilon_r/2(r) = \tan^{-1}[dr/dz] \quad (2.4.3)$$

onde :

α_f = ângulo de folga lateral da broca;

γ_f = ângulo de saída lateral da broca;

θ = ângulo do núcleo;

$\epsilon_r/2$ = metade do ângulo de ponta da broca;

γ_n = ângulo de saída normal da broca;

$w/2$ = metade da espessura do núcleo da broca;

r = distância radial do eixo da broca;

z = distância axial em relação ao eixo da broca.

Além de Stephenson, Tsai (Tsai, W.D. et al, 1979) também desenvolveu um modelo genérico para descrição das afiações curvilíneas através do equacionamento e parametrização das características geométricas das brocas. A aproximação utilizada é a elipsoidal desenvolvida para o plano de corte da broca sendo equacionada da seguinte maneira :

$$1/a^2[(x \cos p + z \sin p) + (a^2/2 - 2s^2)^{0,5}]^2 + 1/a^2(y - s)^2 + 1/b^2(2 \cos p - x \sin p + b/2^{0,5})^2 = 1 \quad (2.4.4)$$

onde :

a, b = parâmetros geométricos para posicionamento dos cames de geração da afiação;

x, y, z = coordenadas do sistema definidas a partir da origem do sistema de referência escolhido arbitrariamente;

s = deslocamento medido a partir do centro da ponta da broca em relação ao centro da elipse a partir do eixo y .

ρ = ângulo de referenciamento do eixo da broca para o modelo de Tsai

Nota-se a diferenciação dos modelos propostos para caracterização da afiação Racon quanto ao seu enfoque. Enquanto Stephenson opta por uma abordagem geométrica centrada em características construtivas de geração da geometria, Tsai procura a generalização obtida pelo uso de modelamento matemático.

A contribuição mais significativa dessas tentativas de generalização dos parâmetros para confecção da afiação cônica radial é a possibilidade de utilização de variantes geométricas de geração da geometria de afiação cônica, para obtenção de arestas curvilíneas sem se alterar as características construtivas das brocas .

2.5 - VIDA E DESGASTES EM BROCAS HELICOIDAIS HSS :

2.5.1 - EQUAÇÕES DE VIDA DE BROCAS HELICOIDAIS :

Geralmente classifica-se como sendo vida da ferramenta o tempo que a mesma trabalha usinando até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido (Ferrores, D.,1977).

Porém, várias dificuldades são encontradas ao se estudar o grande número de variáveis envolvidas no processo de usinagem e devido a isso, muitos pesquisadores realizam estudos para se determinar quais são as variáveis, que devem ser consideradas na análise de vida da ferramenta.

Taylor,(Taylor, F.W.,1907), afirmava que doze variáveis estão envolvidas no processo mas, estudos posteriores conduzidos por Kronenberg (Kronenberg, M.,1966) sugere que, existam muito mais variáveis envolvidas no estudo da vida da ferramenta.

Muitos estudos recentemente conduzidos mostram que, a vida da ferramenta e as forças envolvidas nos processos de furação dependem basicamente da peça a ser usinada (tipo de material, forma geométrica, etc...), da máquina ferramenta na qual se fixará a ferramenta (rigidez, dispositivos de fixação, etc...) e das variáveis de corte empregadas.

Existem vários critérios, que podem ser utilizados para definição do fim de vida da ferramenta. Boulger (Boulger, F.W.,1978) menciona três critérios para caracterização do final da vida da ferramenta : destruição completa da aresta de corte, desgaste da ferramenta de tal modo que a qualidade da superfície de trabalho usinada torne-se incompatível com a qualidade requerida e desgaste da superfície de saída da ferramenta até um nível previamente estabelecido.

Singpurwalla e Kuebler (Singpurwalla, N.D. et all, 1966) sugerem um critério bastante incomum baseado na variação da gama de cores observada na ponta da ferramenta, que ocorre devido à perda do tratamento térmico, o qual a mesma já se submetera anteriormente, associado à mudança no ruído provocado pelo atrito peça/ferramenta/cavaco durante o processo de usinagem. Além desses critérios ainda é sugerido um terceiro critério centrado na destruição total da ferramenta através da fratura da mesma.

O critério de fim de colapso total da ferramenta também já foi sugerido por Soderberg (Soderberg, S., 1979), o qual, afirma que, o final de vida da ferramenta sempre é definido pelo momento de sua fratura e outros critérios como desgastes de superfícies de saída ou folga , aumento de esforços de usinagem, como o momento torçor por exemplo, mostram-se falhos e não confiáveis para caracterização de final de vida da ferramenta.

Kronenberg (Kronenberg, M., 1966) comparou os resultados de seu trabalho à Taylor (Taylor, F.W., 1907) para as relações entre a vida da ferramenta e velocidade de corte e notou que a equação (2.5.1) para o cálculo de vida da ferramenta proposta por Taylor ,

$$V_c \cdot T^Y = C \quad (2.5.1)$$

onde :

V_c = velocidade de corte;

T = vida da ferramenta;

Y = inclinação da curva $\log T - \log V_c$;

C = velocidade de corte para vida de 1 minuto.

não considerava outros fatores variáveis de corte, nem tampouco a geometria da ferramenta. Além disso, a mesma não apresentava linearidade quando da usinagem de materiais de elevada resistência mecânica e resistentes ao calor em condições de elevada taxa de remoção de material ou condições de corte amenas, que propiciem elevada vida da ferramenta.

Considerando esses fatores Kronenberg (Kronenberg, M.,1966) desenvolveu um novo equacionamento para cálculo de vida da ferramenta,

$$V_{c60} = C1 / A^{z''} \quad (2.5.2),$$

onde :

$C1$ = velocidade de corte para uma área A ;

A = área de corte igual à $1,0 \text{ mm}^2$;

z'' = inclinação da curva $\log V_{c60} - \log A$, para uma vida T de sessenta minutos.

Essa equação considera em seus cálculos o avanço e a profundidade de corte, não consideradas na equação de Taylor.

Atualmente emprega-se o valor de 15 minutos ou 7,5 minutos no cálculo de vida de ferramenta (Sandvik, 1995). Essa mudança deve-se a complexidade de elaboração do custo mínimo de fabricação atualmente, tendo em vista as alterações ocorridas nos modos de produção (geralmente lotes pequenos e produção descontínua) e às bruscas variações de custos de equipamentos (devido a avanços tecnológicos e fatores financeiros) e principalmente a fatores que envolvem a dinâmica dos capitais que financiam a produção como um todo, de tal forma que a vida da ferramenta passa a ser um fator de importância igual aos demais e não mais o principal fator a se considerar como custos diretos da produção e custos marginais (Novaski, O ; 1991)

Gilbert (Gilbert, W.W., 1950) sugeriu uma equacionamento onde utiliza-se conjuntamente às variáveis avanço, profundidade de corte e velocidade de corte, conforme mostrado a seguir

$$T \cdot V_c^{x'} \cdot f^{y'} \cdot a_p^{z'} = K_1 \quad (2.5.3)$$

onde, K_1 , x' , y' e z' são constantes.

Es
ta expressão é conhecida como “Equação Expandida de Taylor”, sendo utilizada com frequência, mesmo com as dificuldades impostas pela necessidade de levantar-se os valores dos expoentes constantes x' , y' e z' através de uma grande quantidade de ensaios.

Ainda na determinação de vida, Shaw e Oxford (Shaw, M.C.; Oxford, C.J., 1957) utilizaram-se de análise dimensional no processo de furação e relacionaram os esforços de corte (momento torçor e força de avanço) com a dureza Brinell da peça, com o tamanho da aresta transversal e comprimento da broca e em cima dessas observações correlacionaram essas variáveis à vida da broca.

Koenigsberger (Koenigsberger, F., 1964) estudou as relações entre as forças de corte e avanço para brocas de diferentes diâmetros e seus impactos na vida da ferramenta, não chegando a nenhum resultado definitivo dessa interação.

Willians e Mc Gilchrist (Willians, R.A.et all, 1972) utilizaram-se de metodologia experimental através de longa série de ensaios para desenvolvimento de equações de vida onde considera-se os efeitos da alteração do avanço, velocidade de corte e ângulo de ponta da ferramenta.

Cook e Subramaniam (Cook, N.H. et all, 1977) estudaram as relações entre vida da ferramenta e consumo de energia, momento torçor, força de avanço e desgaste na superfície de folga , quando da usinagem de aços liga com brocas helicoidais de aço rápido.

Mills e Redford (Mills, B. et all, 1983), mostraram que a vida da ferramenta é também afetada por mudanças no material da peça , como inclusões, e no material da ferramenta como zonas com tratamento térmico mal sucedido.

Roadinger e Townsend (Roadinger, T.J. et all, 1980) também seguiram a linha proposta por Shaw e Oxford para se chegar a um equacionamento satisfatório que mostre a vida da ferramenta.

Nota-se que as tentativas de equacionamento analítico para levantamento de vida de ferramenta contribuíram ao desenvolvimento do estudo da usinagem mas, de forma prática essas equações somente podem ser aproveitadas para casos bem particulares. Além disso, dentre as várias linhas de pesquisas existentes e desenvolvidas até o presente instante, nota-se a não uniformidade de abordagem das variáveis envolvidas no processo de furação de forma que, a determinação de vida passa por critérios essencialmente empíricos e que possam ser monitorados ao longo da usinagem dos materiais. E têm-se ainda as aleatoriedades presentes em todos os processos de fabricação existentes.

O monitoramento de esforços de corte, como o momento torçor e força de avanço, tendo como objetivo relacionar os aumentos de intensidade observados e estabelecer um critério para final de vida da ferramenta a partir dos mesmos mostra-se falho, pois, para mesmos materiais encontram-se valores bastante diferentes em relação à grandeza medida. Isso pode ocorrer devido a fatores aleatórios relacionados às microestruturas metalúrgicas do material (Jalali, S.A.et all, 1991).

Em termos de adoção de critérios para fim de vida de ferramenta, quando da realização de ensaios práticos sem o uso de equacionamento analítico, o desgaste de flanco V_B , que ocorre na superfície de folga da ferramenta mostra-se como um dos critérios mais confiáveis (Brinksmeier, E., 1990).

Faz-se necessário portanto o esclarecimento do que vem a ser desgaste da ferramenta e como são classificados.

2.5.1.1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS INFLUENTES NA VIDA DAS BROCAS HELICOIDAIS :

Algumas características geométricas influenciam significativamente a vida da ferramenta (Diniz, A.E.;1989). A seguir algumas delas serão apresentadas:

ÂNGULO ORTOGONAL DE FOLGA (α_o) : o aumento do ângulo ortogonal de folga provoca a diminuição do desgaste de flanco da ferramenta aumentando dessa forma sua vida, porém, seu aumento excessivo fragiliza a cunha cortante da ferramenta.

ÂNGULO DE PONTA (ϵ_r) : normalmente a ponta da ferramenta é submetida a pressões de corte intensas logo, se o ângulo de ponta crescer o contato da ferramenta com a peça será maior aumentando dessa forma a área disponível à dissipação do calor gerado durante a usinagem podendo favorecer ao aumento de vida da ferramenta.

ÂNGULO DE POSIÇÃO (χ_r) : está diretamente relacionado aos mecanismos de formação do cavaco e uma diminuição no mesmo pode permitir uma redução da espessura de corte com aumento da largura de corte, influenciando dessa forma os mecanismos de distribuição de calor gerado no processo de usinagem.

ÂNGULO ORTOGONAL DE SAÍDA (γ_0) : também diretamente relacionado ao processo de formação do cavaco, quanto maior o seu valor menor tende a ser o trabalho de separação do cavaco da peça, reduzindo então a pressão de corte e influenciando diretamente no desgaste da ferramenta. O fator limitante nesse caso é a fragilização da cunha da ferramenta com o aumento do valor do ângulo de saída.

Outras características de grande influência na vida da ferramenta são as condições operacionais durante o processo de usinagem, particularmente os valores de velocidade de corte e avanço.

Sabe-se que, o aumento exagerado do avanço pode ocasionar trepidações maiores ao processo de usinagem e portanto comprometer a vida da ferramenta. Caso esse aumento esteja associado a um também aumento da velocidade de corte, as possibilidades dos esforços de corte se tornarem grandes a ponto de superar os limites de resistência do material da ferramenta e provocar o colapso da mesma serão muito grandes.

Porém recomenda-se que o inverso também não ocorra, ou seja, velocidades de corte muito baixas podem provocar fenômenos indesejáveis, tais como a formação de arestas de corte postiças, comprometendo dessa maneira a vida da ferramenta.

2.5.2 - DESGASTES DA FERRAMENTA :

Os esforços mecânicos presentes durante o processo de usinagem, os atritos entre peça e ferramenta e cavaco e ferramenta e as vibrações do conjunto máquina ferramenta, ferramenta e peça de trabalho ocasionam desgastes, que levam ao fim da vida da ferramenta através da quebra ou lascamento da aresta de corte.

Alguns fenômenos de desgaste (Novaski, O. 1983) são :

DESGASTE DE FLANCO : também conhecido como frontal. Acontece na superfície de folga principal da ferramenta. É originado pelo atrito entre ferramenta peça na zona primária de corte e normalmente ocorre em todas as condições de usinagem. Pode-se observar pela figura 2.5.2.1 o parâmetro utilizado para mensurar esse desgaste (Cook, N.H.; 1973)

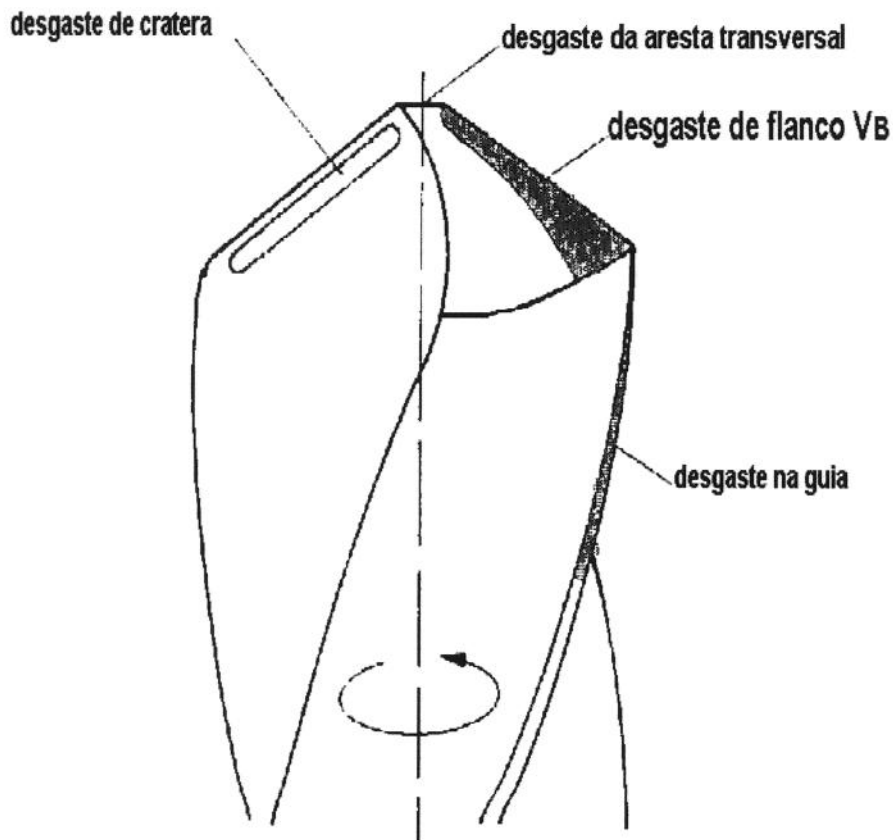


Figura 2.5.2.1 - Desgastes em brocas helicoidais de aço rápido (Brinksmeier,E., 1990)

DESGASTE DE CRATERA : ocorre na superfície de saída principal da ferramenta zona secundária de corte, tendo como origem o atrito cavaco / ferramenta. Pode provocar o enfraquecimento da aresta de corte da ferramenta e rompimento da mesma, ocasionando o fim de vida da ferramenta.

DESGASTE EM FORMA DE ENTALHE : um sulco ocorre na extremidade da superfície principal de incidência ou vários entalhes formam-se na superfície secundária de incidência. Esse tipo de desgaste é prejudicial ao acabamento superficial da peça.

SULCOS DISTRIBUÍDOS EM FORMA DE PENTE : ocorre normalmente em cortes interrompidos ou devido à usinagem com avanços variáveis ou ainda devido à deficiência no fluxo do refrigerante de corte. Essas situações provocam grande variação de temperatura de corte (Ferraresi, D. 1977), que ocasionam a formação de sulcos. O mecanismo de formação dos mesmos se deve ao aparecimento de trincas superficiais que, sob a ação da peça e do cavaco em movimento originam pequenos sulcos, tanto na superfície de saída como na superfície de folga da ferramenta. Podem conduzir à uma quebra da aresta de corte após algum tempo de usinagem sob essas condições.

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DA ARESTA DE CORTE : a deformação plástica na aresta deve-se à pressão de corte aplicada à ponta da ferramenta associada à alta temperatura. Esse tipo de desgaste provoca uma deterioração no acabamento superficial da peça devido à deficiência do controle de cavacos. A repetição contínua desse processo leva à quebra da aresta de corte.

LASCAMENTO : pedaços de ordem macroscópica são retirados de uma única vez da ferramenta. Acontece principalmente devido à fragilidade da aresta de corte da ferramenta e ao material da mesma.

TRINCAS : são originadas por variações bruscas na temperatura ou variação dos esforços mecânicos. O calor gerado no processo de corte é em parte dissipado pela ferramenta. A desigualdade da temperatura entre a região da ferramenta, que está em contato com o cavaco e as regiões mais distantes, provocam a deformação da ferramenta de maneira não uniforme devido à sua dilatação e isso ocasiona a formação de trincas.

QUEBRA : ruptura total da ponta da ferramenta ou aresta de corte de forma abrupta. Alguns fatores que podem levar a isso são cargas excessivas sob a ferramenta, corte interrompido e características geométricas inadequadas, tais como ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequenos.

2.5.2.1 - MECANISMOS DE DESGASTES EM BROCAS :

O desgaste de uma ferramenta é resultado da ação de vários fenômenos distintos denominados componentes do desgaste e muito raramente as situações de desgaste envolvem somente um tipo predominante de desgaste sendo que na maioria dos casos ocorre uma importante interação entre eles (Ferrores, D., 1977), (Trent, E.M., 1977) Pode-se mencionar entre os mesmos :

ARESTA POSTIÇA DE CORTE : ocorre em materiais cuja usinagem resulta em cavacos descontínuos e contínuos, aparecendo na zona secundária de corte em condições de escoamento do material (Shaw, M.C.; 1986), onde o escoamento do material é transferido da superfície da ferramenta para a camada superior do cavaco. A sua formação mostra que estão presentes condições para “adesão” do material devido ao movimento relativo de escoamento imediatamente adjacente à interface ferramenta - peça, ou seja, o material do cavaco preenche todos os espaços de contato com a ferramenta (uma espécie de “difusão” intermetálica) não se limitando aos picos da superfície e impossibilitando dessa forma o escorregamento sob a mesma. Esse fenômeno contraria a teoria do atrito proposta por Coloumb e Amonton segundo a qual o atrito independe da área de contato.

A aresta postiça é uma estrutura dinâmica onde elevadas tensões e temperaturas estão presentes impedindo o seu crescimento indefinidamente. Ao aumento das tensões a ruptura da aresta postiça torna-se inevitável, porém o surgimento de uma nova aresta postiça no local é quase certo. Costuma ocorrer em velocidades de corte inferiores a 10,00 m/min.

ABRASÃO TÉRMICA : é causada pelo atrito da superfície de folga com a peça e da superfície de saída com o cavaco. Seu aparecimento dá-se em regiões de baixa temperatura onde a deformação plástica e a difusão não ocorrem. O escoamento do metal é irregular e

pode ocorrer a retirada de fragmentos macro e microscópicos da ferramenta de forma intermitente. É uma das principais causas da formação de desgastes de flanco e de cratera. Surge em velocidades acima de 10,00 m/min, geralmente. Deve-se salientar, que o aumento do teor de carbono aumenta o mecanismo de desgaste por abrasão.

RUPTURA DE MICROSOLDA POR PRESSÃO : ocorre devido à elevação da temperatura ocasionando uma espécie de solda entre cavaco / ferramenta. As superfícies aproximam-se perto o suficiente para formar pontos de contato rígidos na zona de deformação plástica entre as mesmas e nesse instante ocorre a transferência de partículas entre as superfícies. Após esse fato, em algumas situações existe a perda de fragmentos sob a forma de partículas de desgastes, onde as partículas formadas são retiradas levando consigo material da peça e da ferramenta. Sua presença é mais marcante em temperaturas elevadas (Rubenstein, C., 1976).

OXIDAÇÃO : ocorre devido ao aquecimento da ferramenta junto à aresta de corte, através da formação de uma película de óxido na superfície de saída e próximo à aresta secundária de corte. Causa a deterioração da aresta lateral de corte, prejudicando o acabamento superficial das peças usinadas e levando ao fim da vida da ferramenta.

2.6 - ESFORÇOS DE USINAGEM NO PROCESSO DE FURAÇÃO

O equacionamento dos esforços atuantes em brocas helicoidais está intimamente ligado à geometria das mesmas e às condições de usinagem adotadas no processo, destacando-se dentre elas as variáveis de corte como o avanço, velocidade de corte e rigidez do conjunto peça / máquina ferramenta .

Dessa maneira o equacionamento analítico desses esforços serve mais a um exercício de referenciamento de parâmetros para análise de resultados empiricamente obtidos do que uma forma segura de prever os mesmos. Isso decorre do fato dos resultados encontrados por

meio dessas análises diferirem dos modelos experimentais encontrados usualmente nos ensaios. A diferenciação dos resultados obtidos por meio da análise teórica através desses modelos desenvolvidos para o cálculo dos esforços de usinagem é intrinsecamente ligada ao fato desses modelos não levarem em conta as particularidades existentes em cada processo, onde desde fatores geométricos como o tipo de construção geométrica da peça influenciam, por exemplo, até fatores completamente aleatórios como a quebra da ferramenta devido a uma inclusão no material.

Nos modelos analíticos para cálculos de esforços em brocas helicoidais de aço rápido consideram-se as principais grandezas atuantes as que se referem a força de avanço (F_z) e ao momento torçor (M_t) (Ferraresi, D.,1977), compostos de componentes parciais, segundo equação 2.6.1 e 2.6.2 cuja contribuição é devida a :

- atritos entre superfície de saída e cavaco e entre a peça usinada e a ferramenta de corte;
- tensões provocadas pelo corte propriamente dito e pela deformação plástica do material na aresta transversal;
- tensões inerentes ao próprio processo de corte.

Equacionando-se esses fatores, têm-se as seguintes expressões para momento torçor e força de avanço :

$$M_t = M_{t_{ap}} + M_{t_{at}} + M_{t_c} \quad (2.6.1)$$

$$F_z = F_{z_{ap}} + F_{z_{at}} + F_{z_c} \quad (2.6.2)$$

onde,

$M_{t_{ap}}$ = momento torçor devido à aresta principal;

$M_{t_{at}}$ = momento torçor devido à aresta transversal;

Mt_c = momento torçor devido aos atritos com os cavacos;

Fz_{ap} = força de avanço devido à aresta principal

Fz_{at} = força de avanço devido à aresta transversal

Fz_c = força de avanço devido aos atritos com os cavacos

A contribuição em valores percentuais de cada componente é alvo de grande discussão ainda hoje, porém, as diferenças e dispersões existentes em cada abordagem que se propõe a analisar o tema pode ser considerada pequena.

Segundo Rincon (Rincon, D.M. et al, 1994) a contribuição da aresta principal de corte para a força de avanço e para o momento torçor é de aproximadamente 40 e 80% respectivamente, isso no modelamento teórico, já que nos ensaios práticos observa-se valores de contribuição entre 25 a 60% para força de avanço e valores acima de 80 % para o momento torçor.

Ainda segundo Rincon, o fenômeno que ocorre na aresta transversal, durante o processo de usinagem, pode ser compreendido dividindo-se a aresta transversal em duas regiões distintas, a seção externa, em suas extremidades, onde se produz o cavaco e a interna, mais ao centro, onde ocorre uma espécie de deformação plástica do material. A contribuição significativa provém da seção externa respondendo por até 57% de contribuição à força de avanço e até 8 % de contribuição ao momento torçor. Já a aresta secundária de corte contribui de forma insignificante para a força de avanço e com até 12% para o torque.

Esses valores aproximam-se dos propostos por Ferraresi (Ferraresi, D., 1977), segundo o qual, a contribuição da aresta principal de corte responde por cerca de 77 à 90% de contribuição para o momento torçor e de 39 à 59% para a força de avanço, enquanto que a aresta transversal participa com 3 à 10% de contribuição para o momento torçor e 40 à 58% para a força de avanço e considera efeitos dos atritos (não especificando quais) contribuindo com 3 à 13% para o momento torçor e 2 à 5% para a força de avanço.

Nota-se que os valores propostos por Ferraresi em 1977 e por Rincon em 1994 não se distanciam grandemente como se observa na tabela 2.6.1.

FERRARESI		RINCON		
Mt	Fz	Mt	Fz	Fatores
77 - 90	39 - 59	> 80	25 - 60	Aresta de Corte
03 - 10	40 - 58	> 08	> 57	Aresta Transv.
03 - 13	02 - 05	12	-	Atritos

Tabela 2.6.1 - Tabela de comparação de valores de influência em momento e força de avanço

Existem ainda pesquisadores que procuram estimar o efeito da espessura do núcleo da broca na força de avanço (De Vries, M.F. et alli; 1988), chegando a afirmar ser o diâmetro do núcleo fator preponderante de influência no momento de torção (Kuang-Hua, F. et all, 1995), (Kaldor, S. et all, 1980).

Outras linhas de pesquisa tentam caracterizar como sendo às condições do processo às de maior influência no aumento ou diminuição dos esforços, colocando em segundo nível de influência as características geométricas e de construção da ferramenta (Watson, A.R.; 1985)

Além dos estudos teóricos analíticos, os modelos empíricos para cálculo de força parecem representar com maior fidelidade o que ocorre com momento torçor e força de avanço, como dito anteriormente. É nesse campo que se encontram muitos estudos de broca helicoidais de aço rápido.

Armarego (Armarego, E.J.A., 1979) desenvolveu modelos para brocas helicoidais de aço rápido em ensaios com aço SAE 1020. Nesses ensaios procurou-se analisar distintamente as contribuições da aresta transversal e das arestas principais de corte da broca, chegando-se a uma expressão conveniente para o cálculo das grandezas envolvidas. As expressões para o momento torçor e força de avanço são :

$$Mt = 1,821 \cdot 10^5 \cdot f^{0,661} \cdot d^{2,004} \cdot (w/d)^{0,113} \cdot \epsilon_r^{-0,226} \cdot \gamma_f^{-0,263} \cdot \chi_r^{-0,177} \text{ [N cm]} \quad (2.6.3)$$

$$Fz = 3,635 \cdot 10^3 \cdot f^{0,546} \cdot d^{1,027} \cdot (w/d)^{0,279} \cdot \epsilon_r^{0,518} \cdot \gamma_f^{-0,210} \cdot \chi_r^{0,050} \text{ [N]} \quad (2.6.4)$$

onde,

f = avanço da ferramenta;

d = diâmetro nominal da broca;

w = diâmetro do núcleo da broca;

ϵ_r = ângulo de ponta da broca;

γ_f = ângulo de saída lateral da broca;

χ_r = ângulo de posição da ferramenta

Observa-se nessa formulação a colocação de um componente do processo (avanço) além, das características geométricas. Segundo os ensaios realizados pelo autor o modelo correspondeu ao esperado, sendo necessário desenvolvê-lo para outros materiais.

A complexidade da expressão obtida por Armarego é similar às primeiras expressões obtidas por Shaw e Oxford :

$$Mt/d^3 HB = 0,082 \cdot [f^{0,8}/d^{1,2}] \cdot \{ [1 - (c/d)^2] / [1 + (c/d)^{0,2}] + 3,2 \cdot (c/d)^{1,8} \} [N \text{ cm}] \quad (2.6.5)$$

$$Fz/d^2 HB = 0,15 \cdot [f^{0,8}/d^{1,2}] \cdot \{ [1 - (c/d) / 1 + (c/d)^{0,2}] + 2,2 \cdot (c/d)^{0,8} \} + 0,068 \cdot (c/d)^2 [N] \quad (2.6.6)$$

onde,

d = diâmetro da broca;

HB = dureza Brinell;

f = avanço;

c = comprimento da aresta transversal.

Trabalhos recentes de Rubenstein (Rubenstein, C.; 1991) propuseram nova forma de se calcular o momento torçor e a força de avanço em brocas helicoidais de aço rápido. Suas conclusões reiteram a importância da geometria da broca como fator preponderante na determinação dos esforços de usinagem em detrimento às condições de corte adotadas.

Suas formulações envolvem a abordagem dos esforços nas arestas principais de corte, aresta transversal e periferia da ferramenta. Envolve ainda características do material a ser usinado e material da broca em uso para o processo. Dentre as variáveis envolvidas nas suas formulações estão ainda, a pressão na região da superfície de saída da ferramenta em contato com a peça, as tensões de cisalhamento do material da peça, o coeficiente de atrito teórico entre peça e ferramenta e o ângulo de escoamento do cavaco sobre a broca.

Ressalta-se, em suas formulações, o caráter essencialmente empírico das mesmas e a dificuldade de aplicação tendo em vista o grande número de coeficientes a determinar-se experimentalmente.

Os resultados obtidos por Rubenstein ao comparar momentos calculados pela maneira analítica e os captados em ensaios não apresentaram repetitividade suficiente para assegurar o emprego de suas fórmulas para cálculos aproximados dos valores esperados para momento torçor e força de avanço.

O cálculo analítico dos esforços proposto por Rubenstein é dado pelas seguintes equações :

$$M_{tT} = M_o + M' + M'' \text{ [N cm]} \quad (2.6.7)$$

$$F_{zT} = F_o + F' + F'' \text{ [N]} \quad (2.6.8)$$

onde :

M_{tT} = momento torçor total;

M_o = momento torçor nas arestas de corte;

M' = momento torçor na aresta transversal;

M'' = momento torçor periférico.

FzT = força de avanço total;

F_o = força de avanço nas arestas de corte;

F' = força de avanço na aresta transversal;

F'' = força de avanço periférico;

e os membros da equação :

$$M_o = 0,25 (d^2 - c^2) [(\mu \iota_m l / \text{sen} \epsilon_r) + 0,5 \iota' f (\cot \psi_r + 1)]$$

$$F_o = 0,5 (d-c) [2\iota_l + \iota_l f (\cot \psi_r - 1) \text{sen} \epsilon_r]$$

$$M' = 0,25 c^2 [\mu_c \iota_m l_c + 0,5 \iota' f (\cot \psi_r + 1)]$$

$$F' = 0,5 c [2\iota_m l_c + (\iota_l)_c f (\cot \psi_r - 1)]$$

$$M'' = k_1 d + k_1 d f$$

$$F'' = k_2 + k_2 f$$

onde :

c = comprimento da aresta transversal;

d = diâmetro da broca;

f = avanço;

k_1 = constante de proporcionalidade;

k_2 = constante de proporcionalidade;

l = área de contato entre superfície de saída e peça;

τ' = tensão de cisalhamento do material a ser usinado;

μ = coeficiente teórico de atrito peça ferramenta;

τ_1 = tensão normal atuante na aresta de corte;

τ_m = tensão atuante na superfície de saída da peça;

ϵ_r = ângulo de ponta da ferramenta;

ψ_r = ângulo de posição complementar da ferramenta.

Outras expressões de relevância apresentadas para cálculo de esforços foram elaboradas por Kronenberg e Kienzle e caracterizam-se pela presença de poucos expoentes a se levantar experimentalmente mas, como os demais modelos conhecidos para cálculo de esforços têm acentuado enfoque geométrico.

Devido ao fato de não se ter os expoentes adequados aos materiais em estudo, neste trabalho, bem como não se ter segurança das expressões apresentadas, optou-se, para os levantamentos experimentais, medir os esforços atuantes com dinamômetros e não calculá-los. Portanto uma vez que a revisão bibliográfica não conduziu a uma expressão segura, mediu-se os esforços diretamente através dos ensaios.

CAPÍTULO 3 : PROCEDIMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios de furação foram realizados no Centro de Pesquisa da TWILL INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE FERRAMENTAS S/A, a qual cedeu todos os materiais, máquinas e ferramentas necessários aos testes.

Os ensaios dividiram-se em duas etapas :

- ensaios preliminares, para levantamento aproximado das condições de corte propícias a uma vida da ferramenta dentro do tempo disponível à conclusão desse estudo;
- ensaios para levantamento de vida da ferramenta, esforços de usinagem, desgastes da ferramenta e dimensões finais da superfície usinada.

Considerando as duas etapas foram utilizadas 46 brocas helicoidais de aço rápido, 30 corpos de prova para coleta de dados de esforços de usinagem e 16 placas de aço SAE 1045 e 4340 para complementação de usinagem totalizando 1472 furos usinados ou 32384 mm.

A seguir têm-se a descrição detalhada dos ensaios.

3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS

Selecionou-se dois materiais distintos para confecção dos corpos de provas adotados, o aço SAE 1045 e o aço SAE 4340. Essa escolha deveu-se a grande aplicabilidade desses dois materiais na indústria de uma forma geral, além de possibilitar a comparação do comportamento da ferramenta usinando um aço carbono comum e um aço liga.

Os aços usinados apresentam a seguinte composição química e características mecânicas, segundo seu fornecedor (AÇO VILLARES S/A) :

SAE 4340 :

Composição química :

C = 0,40% ; Si = 0,25 % ; Mn = 0,70% ; Cr = 0,80% ; Ni = 1,80% ; Mo = 0,25%

Como contribuição dos elementos formadores de liga SAE 4340 pode-se citar que o cromo (Cr), níquel (Ni) e molibidênio (Mo) trazem ao aço a elevação da sua dureza a altas temperaturas e maior resistência à corrosão. Cabe ressaltar ainda que esses elementos são insolúveis em ferrita, à exceção do níquel (Ni). A solubilidade de elementos liga em ferrita tornam o material mais frágil. Durante a usinagem, aços SAE 4340 tendem a produzir cavacos médios.

Características mecânicas :

- Limite de resistência à tração : 95,00 kgf/mm²;
 - Limite de escoamento : 85,00 kgf/mm²;
 - Dureza : 290 HB;
 - Alongamento : 28%;
-

- Estricção : 65%

SAE 1045 :

Composição química :

C = 0,45% ; Si = 0,37% ; Mn = 0,67% ; P = 0,035% ; S = 0,030%

Como característica peculiar do aço SAE 1045, destaca-se a presença de elementos (fósforo e enxofre) formadores de carbeto provocando um comportamento de elevação de temperatura de forma exponencial durante a usinagem do metal. Os cavacos produzidos na usinagem de aços SAE 1045 são na maioria das vezes longos.

Características mecânicas :

- Limite de resistência à tração : 66,00 kgf/mm²;
- Limite de escoamento : 58,00 kgf/mm²;
- Dureza : 190 HB;
- Alongamento : 12%;
- Estricção : 35%

Os corpos de prova e placas utilizados possuem as características geométricas ilustradas na figura 3.1.1.

Observa-se dois tipos de corpos de prova. Utiliza-se o corpo de prova número 1 para a furação sem medição de esforços, ou seja, sem a utilização do dinamômetro e o corpo de prova número 2 quando da utilização do dinamômetro para medição dos esforços da

usinagem. Ambos os corpos de prova possuem percurso de usinagem de 22 mm, como observa-se na figura 3.1.1.

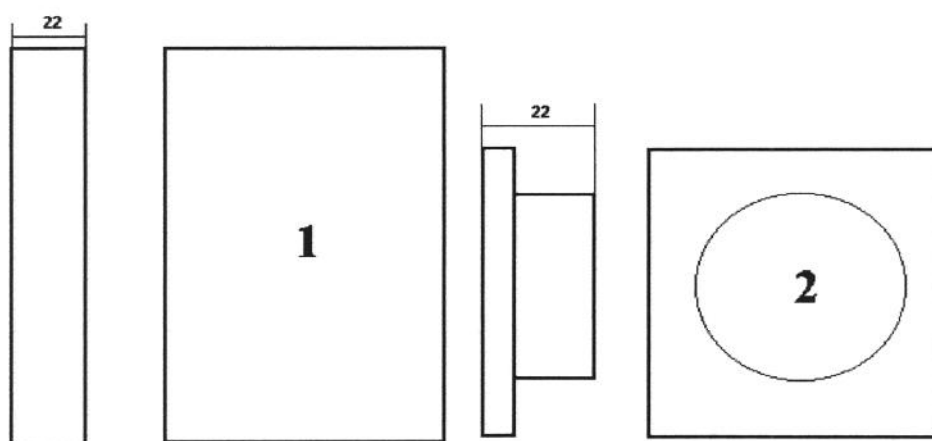


Figura 3.1.1 - Corpos de prova utilizados nos ensaios

3.2 - FERRAMENTAS UTILIZADAS :

As ferramentas escolhidas para os ensaios de furação deste trabalho são brocas helicoidais de aço rápido, cuja características construtivas adequam-se a NB 204, 1989.

Selecionou-se as geometrias de afiações Cônica e Racon para os ensaios e os diâmetros das brocas para ambas as geometrias selecionadas corresponde a 9,525 mm, o diâmetro do núcleo para ambas afiações situou-se em torno de 1,50 mm, o ângulo de ponta para afiação Cônica apresentou-se com 120° e entre 110° e 120° para afiação Racon. Além disso a dureza para todas as ferramentas situou-se aproximadamente em 65 HRC (correspondente a 757 HB). A seguir as brocas encontram-se ilustradas conforme mostra a figura 3.2.1.

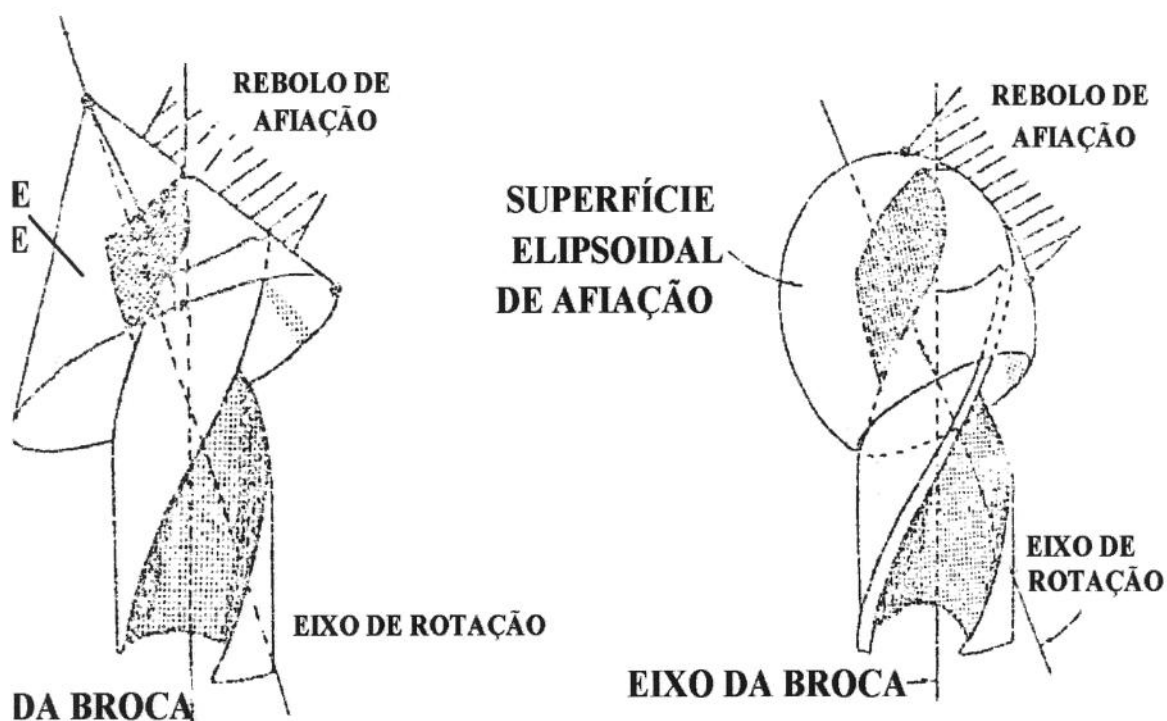


Figura 3.2.1 - Brocas helicoidais com afiação cônica e racon

A escolha das afiações deve-se ao fato da afiação cônica ser usualmente a primeira escolha de afiação para uma broca helicoidal de aço rápido e a afiação Racon ser uma variante da cônica com propriedades que, imagina-se, possibilitem uma redução dos esforços durante a usinagem associada ao fato de propiciar uma maior vida de ferramenta.

3.3 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.3.1 - MEDIÇÃO E CONTROLE

Os equipamentos utilizados na condução dos ensaios foram :

- Centro de Usinagem BREVET modelo CV 286, com CNC da CMS, três eixos de programação e 13,6 kW de potência;
 - Dinamômetro piezelétrico KISTLER modelo 9273, com possibilidade de captar quatro componentes de esforços (Fx, Fy, Fz e Mt);
 - Amplificadores de carga KISTLER modelos 5001 e 5007;
 - Placa de aquisição de dados LYNX modelo CAD 12/36;
 - Microcomputador Microtec PC 286;
 - Software para tratamento de dados AQDADOS - LYNX;
 - Microscópio ótico DSV modelo 10077;
 - Microdurômetro ZWICH modelo 3211;
 - Projetor de perfil MITUTOYO modelo PH 350;
 - Relógio comparador CARL MAHR modelo 372780, leitura 0,01mm;
 - Paquímetros e micrômetros MITUTOYO;
-

- Dispositivos de fixação de corpos prova, segundo ABNT 1040;

Os instrumentos de medição e controle utilizados se encontravam aferidos pelo IPEN.

3.4 - FLUIDO DE CORTE

Segundo alguns pesquisadores, (Astakhov, V.P. et alli, 1995), (Chalil, G.S. et all, 1979) o fluido de corte têm grande influência no processo de furação devido à distribuição de pressão nas arestas de corte e superfícies de saída e folga da ferramenta, atuando de forma direta no mecanismo de formação e remoção do cavaco.

Entretanto, neste estudo não observou-se a influência da variação do gradiente de pressão do fluido de corte nas arestas e superfícies das brocas, alterando-se apenas a vazão do mesmo durante os testes preliminares, onde nenhuma alteração nos resultados foi constatada.

O fluido escolhido para utilização durante os ensaios foi HOCUT 728, com características de aplicabilidade para alta pressão EP e condições de furação severas em aços liga. Seu fabricante é a E. F. HOUGHTON do Brasil S/A.

3.5 - MONTAGEM DOS EXPERIMENTOS

A representação da figura 3.5.1 mostra aproximadamente o sistema montado para a realização dos ensaios.

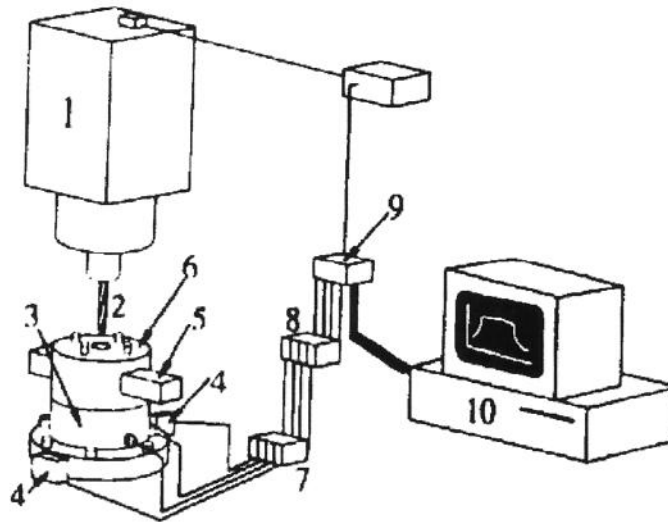


Figura 3.5.1 - Montagem dos ensaios

onde :

- 1 - centro de usinagem;
- 2 - broca utilizada no ensaio;
- 3 - dinamômetro para medição dos esforços;
- 4 - elementos piezelétricos de tensão (internos ao dinamômetro);
- 5 - fixação do corpo de prova;
- 6 - corpo de prova;
- 7 - amplificadores de carga;
- 8 - filtros de sinais;
- 9 - placa de aquisição de dados;
- 10 - microcomputador para aquisição e acondicionamento dos dados.

Ao iniciar-se os ensaios deve-se observar uma série de procedimentos :

- verificação do estado da geometria da afiação da broca helicoidal a ser utilizada, observando se a mesma não possui lascamentos nas arestas ou qualquer defeito superficial devido ao manuseio inadequado. Também se verifica a conformidade da geometria da broca;
- acoplamento do microcomputador com placa de aquisição de dados aos amplificadores de carga provenientes do dinamômetro;
- verificação do funcionamento de todo o sistema de usinagem e controle, através de ensaios preliminares;
- fixação dos corpos de prova 1 a se usinar na morsa sob a mesa do centro de usinagem e dos corpos de prova 2 no dinamômetro;
- fixação da broca no porta ferramenta do centro de usinagem;
- início do ensaio, propriamente dito.

A seqüência de operações durante o experimento, deve possibilitar a coleta de dados como esforços de corte, desgastes de flanco da ferramenta e alargamento dos furos. Para tanto adotou-se seqüências de medição de esforços e desgastes de cinco em cinco furos, à exceção do primeiro e do quinto furo, onde retira-se a broca do centro de usinagem e mede-se seus desgastes utilizando-se um microscópio ótico.

3.6 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS DOS ENSAIOS

O objetivo principal do estudo é comparar o desempenho das brocas envolvidas no mesmo, quais sejam, brocas helicoidais de aço rápido com afiação Cônica e com afiação Racon.

Para a consecução do mesmo, estabeleceu-se três condições de corte distintas para cada material associadas a um avanço específico, utilizando-se três repetições para cada condição e para cada afiação individualmente.

Estabeleceu-se os valores de velocidade de corte e avanço em função dos testes preliminares, buscando-se provocar um desgaste rápido da ferramenta, para efetivação do estudo, no tempo proposto, sem estendê-lo de forma intensa a ponto de inviabilizá-lo economicamente. Mesmo estando algumas dessas condições em situações superiores em termos de solicitações às normalmente encontradas verificou-se a longevidade dos ensaios (1472 furos usinados ou 32384 mm). Ressalta-se ainda, que algumas das condições de corte adotadas se aproximaram bastante das recomendadas pelo fabricante das ferramentas e situações encontradas no dia a dia das indústrias.

Segundo o fabricante das ferramentas, as condições máximas de corte (velocidades e avanços) recomendados para brocas helicoidais de aço rápido para as condições previstas nos ensaios são :

- SAE 1045 : $V_c = 25,00 \text{ m/min}$; $f = 0,16 \text{ mm/rot}$;

- SAE 4340 : $V_c = 15,00 \text{ m/min}$; $f = 0,13 \text{ mm/rot}$;

Os valores aplicados aos ensaios foram :

- SAE 1045

$V_{c1} = 35,00 \text{ m/min}$ $f = 0,30 \text{ mm/rot}$;

$V_{c2} = 40,00 \text{ m/min}$ $f = 0,30 \text{ mm/rot}$;

$V_{c3} = 45,00 \text{ m/min}$ $f = 0,30 \text{ mm/rot}$;

- SAE 4340

$V_{c1} = 20,00 \text{ m/min}$ $f = 0,14 \text{ mm/rot}$;

$V_{c2} = 25,00 \text{ m/min}$ $f = 0,14 \text{ mm/rot}$;

$V_{c3} = 30,00 \text{ m/min}$ $f = 0,14 \text{ mm/rot}$;

A determinação dos valores utilizados para os avanços se deu através dos ensaios preliminares, onde o critério de escolha para obtenção do mesmo, indica a manutenção da faixa de desgaste na aresta transversal da broca em no máximo 30 % do valor do desgaste de flanco, preservando dessa maneira os critérios para fim de vida da ferramenta adotados no ensaio e provocando um desgaste rápido da ferramenta.

Com os valores estabelecidos inicia-se os ensaios propriamente dito e captam-se os sinais para determinação dos esforços de usinagem através do dinamômetro. Os mesmos são enviados aos amplificadores e posteriormente são transmitidos à placa de aquisição de dados colocada no microcomputador e tratados pelo software específico (AQDADOS).

3.6.1. - CRITÉRIOS PARA MEDIÇÃO DE ESFORÇOS E DESGASTES

Para efeito de análise comparativa entre as afiações, um critério objetivo que possa quantificar e qualificar essa comparação deve ser escolhido.

Analisando-se os estudos sobre furação realizados até o presente momento, para avaliação de desempenho de vida da ferramenta nota-se que, a maioria de pesquisas na área adota como parâmetros de comparação de performance de brocas, além da vida da ferramenta propriamente dita, os esforços resultantes da usinagem dos furos (Watson, A.R., 1985), (Pande, S.S., 1986).

Os esforços podem mostrar a influência da aresta transversal, aresta principal de corte e outros fatores de natureza geométrica ligados à afiação da ferramenta, criando uma referência segura de comparação.

A escolha do critério para fim de ensaio está intrinsecamente ligada ao tipo de ensaio realizado e às características a se observar nas ferramentas que dele participam.

No caso deste estudo o critério escolhido foi um determinado nível máximo aceitável para o desgaste de flanco (V_B). O valor estabelecido para o desgaste de flanco foi de 0,200 mm no máximo, mostrando-se adequado ao tipo de ensaio realizado (Boulger, F.W., 1978), (Brinksmeier, E., 1990). Este valor permite um tempo de reafiação e quantidade de remoção de material da broca em condições economicamente vantajosas.

Os resultados dos ensaios e a discussão sobre os resultados obtidos estão colocados à seguir.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conduziu-se os ensaios pontualmente para cada tipo de material distintamente (aços SAE 1045 e SAE 4340) associados a cada condição de corte escolhida, ou seja, avanço e velocidade de corte com três repetições para cada ponto, para cada afiação escolhida. Os valores apresentados são as médias para cada uma das três repetições. Os valores ponto a ponto para cada característica monitorada nos ensaios encontram-se nos anexos desta dissertação.

Observando-se as figuras 4.1 e 4.2 têm-se os resultados obtidos pelas afiações Racon e Cônica em função do percurso total usinado versus velocidade de corte empregadas, tendo-se como critério de fim de vida o desgaste $V_B = 0,200$ mm.

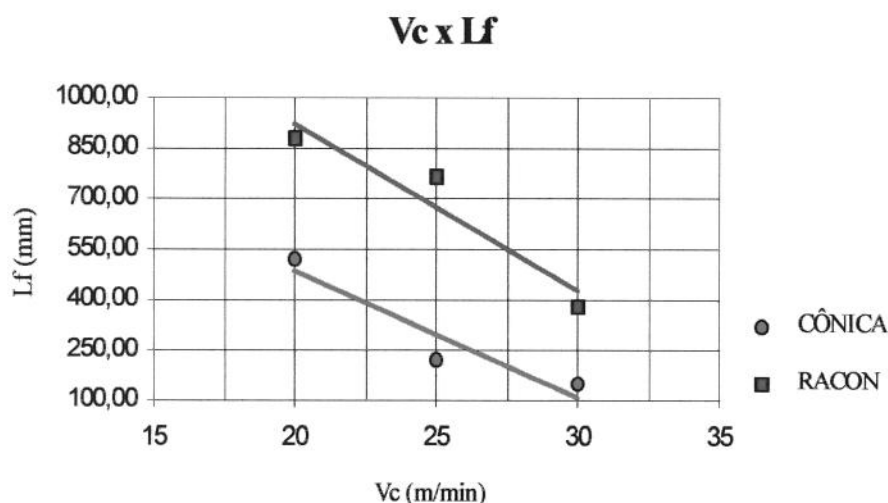


Figura 4.1 - Percurso usinado em função da velocidade de corte em aço SAE 4340; $f = 0,14$ mm/rot.

Analisando-se a figura 4.1 nota-se a vida de broca nitidamente superior da ferramenta com afiação Racon comparativamente à geometria de afiação cônica.

A melhor performance da broca com a geometria Racon pode estar associada ao fato da mesma ter arestas principais de corte maiores nas quais, a dissipação de calor e a carga por área são melhores do que a broca com a geometria Cônica, com arestas principais de corte menores que à Racon.

Além dessa característica, os esforços durante a usinagem, fatores metalúrgicos como composição e estrutura química dos materiais e ferramentas, tratamento térmico e tamanho de grão na recristalização podem influenciar na vida da ferramenta.

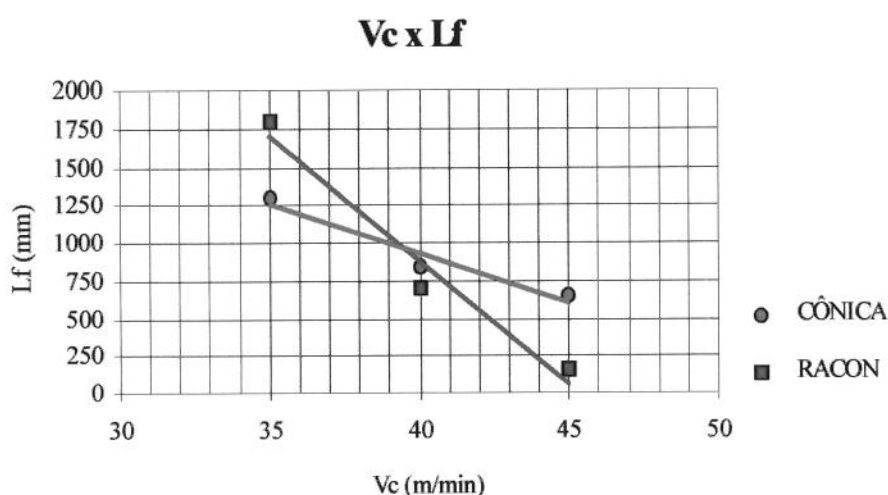


Figura 4.2 - Percurso usinado em função da velocidade de corte em aço SAE 1045; $f = 0,30$ mm/rot.

Em relação ao comportamento das ferramentas durante a usinagem do aço SAE 1045 observa-se na figura 4.2, que as brocas mudam seu comportamento ao aumento da velocidade de corte durante os ensaios. A vida da afiação Racon mostra-se superior até aproximadamente $V_c = 40,00$ m/min, onde uma tendência de queda inicia-se acentuando-se com o aumento da velocidade.

Uma possível hipótese para explicar esse fato é o aumento exponencial da temperatura na superfície de saída da ferramenta e arestas de corte (Trent, E.M.; 1977) características

inerentes a aços SAE 1045, somado ao fato do aumento da temperatura na aresta de corte da afiação Racon ser maior devido a somatória dos gradientes de temperatura ao longo do comprimento da aresta ser maior que a somatória do gradiente de temperatura da afiação Cônica (Agapiou, J.S. et al, 1990). Como na geometria de afiação Racon as arestas de corte curvilíneas possuem uma área de contato maior com o furo usinado o cavaco gerado origina um desgaste maior.

A distribuição de forças nas arestas de corte e transversal, o mecanismo de formação dos cavacos, o mecanismo de remoção dos cavacos, o mecanismo de formação do desgaste e a distribuição da pressão do fluido de corte dentro do furo na usinagem podem influir significativamente na variação dos esforços de usinagem e consequentemente afetar o desempenho da broca, alterando a vida de ferramenta e resultado do furo usinado.

O comportamento dos esforços durante a usinagem pode ser observado a seguir :

Considerando que as brocas, para efeitos comparativos usinaram os mesmos materiais e têm o mesmo diâmetro nominal, pode-se passar a análise da geometria da ferramenta como o fator de maior influência no desempenho das mesmas.

Nota-se que a fiação Racon mostrou-se com um desempenho superior à afiação Cônica no aço SAE 4340 e um pouco inferior à mesma no aço SAE 1045, sempre observando-se o critério definido para fim de vida de ferramenta.

Uma das possíveis explicações para esse comportamento obtêm-se pela análise dos esforços exercidos durante a usinagem do furo e sua significativa variação de intensidade. Isso em grande parte ocorre devido a geometria das afiações. Outro ponto a considerar-se são os aspectos metalúrgicos dos materiais usinados, onde muitas vezes pequenas inclusões provocam desgastes prematuros das ferramentas.

Nesse caso, o comportamento dos esforços de corte para os ensaios com dois materiais (aço SAE 1045 e SAE 4340) pode ser observado nas figuras 4.3 e 4.4, onde estão registrados os resultados obtidos para o momento torçor para as duas afiações, dentro das condições previstas nos ensaios.

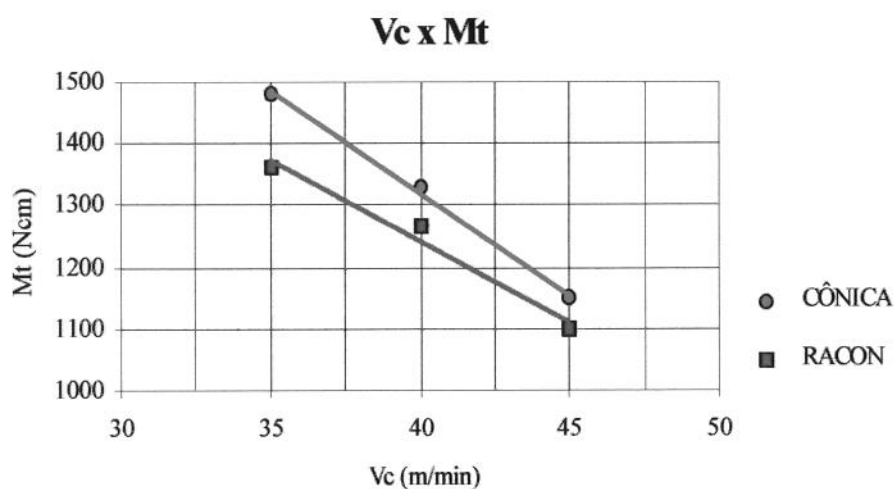


Figura 4.3 - Momento torçor em função da velocidade de corte em aço SAE 1045; $f = 0,30$ mm/rot.

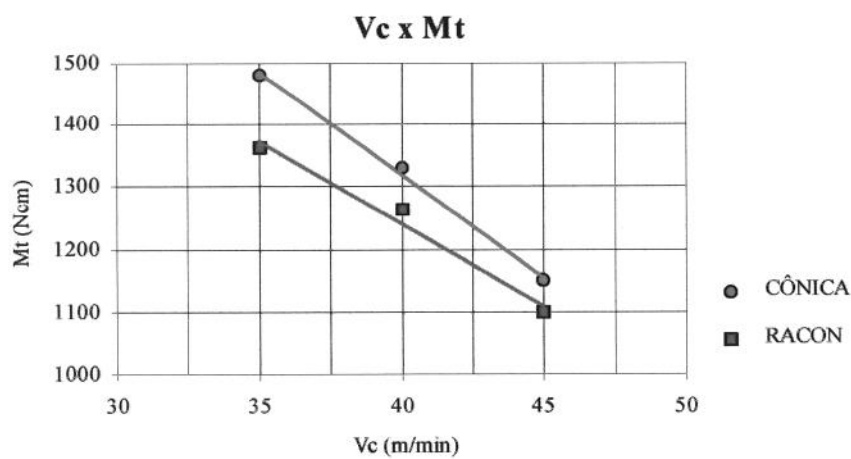


Figura 4.4 - Momento torçor em função da velocidade de corte em aço SAE 4340; $f = 0,14$ mm/rot.

A broca helicoidal com afiação Racon tem como característica geométrica de construção, arestas principais de corte curvilíneas conforme modelamento visto no capítulo 2.4 e são portanto maiores em comprimento efetivo que as arestas principais de corte das brocas

helicoidais com afiação cônica. Essa característica apresenta como consequência o aumento da área de contato das arestas de corte da broca com a peça usinada. O aumento da área de contato da aresta de corte com o material a ser usinado torna mais eficiente o processo (Shaw, M.C. et al, 1957) reduzindo os esforços de corte (Bhattacharyya, A. et al, 1973).

A redução dos esforços de usinagem em brocas com arestas curvilíneas pode ser explicada em parte pelo fato das mesmas apresentarem na maioria dos casos um ângulo efetivo de saída variável ao longo da aresta, com tendência ao aumento de seu valor, influenciando diretamente na energia de corte específica (Shaw, M.C. et al, 1957) interagindo, portanto diretamente no momento torçor e força de avanço durante a furação. Mais recentemente Kuang-Hua (Kuang-Hua, F. et al, 1995) em seus estudos aborda esse fato e sugere que a variação do ângulo de saída ao longo das arestas da broca com afiação de arestas curvilíneas provoca uma melhor distribuição de esforços e dissipação de calor, chegando a resultados que apontam a redução do momento torçor em 8,5% na furação normal e 11,0% ao utilizar-se guias.

Nos ensaios realizados, a redução de momento torçor para brocas com afiação Racon foi de aproximadamente 23% em relação à brocas com afiação cônica no aço SAE 4340 e 6% no aço SAE 1045.

Monitorou-se também durante os ensaios a força de avanço, para as afiações nos dois materiais usinados (SAE 4340 e SAE 1045). Os resultados obtidos são apresentados a seguir nas figuras 4.5 e 4.6.

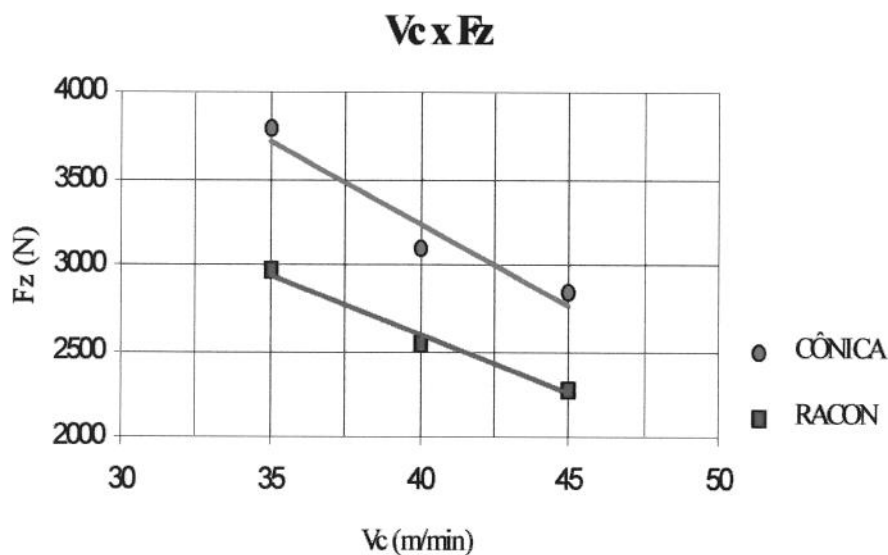


Figura 4.5 - Força de avanço em função da velocidade de corte em aço SAE 1045; $f = 0,30$ mm/rot.

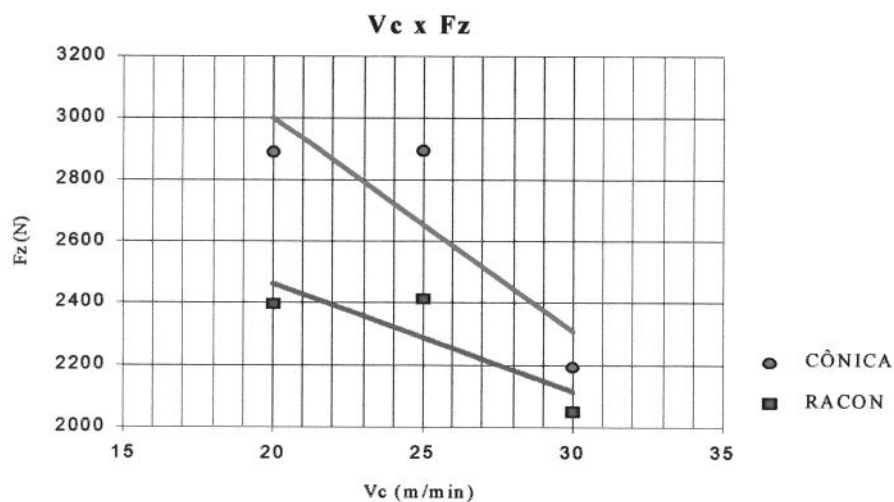


Figura 4.6 - Força de avanço em função da velocidade de corte em aço SAE 4340; $f = 0,14$ mm/rot.

A força de avanço é principalmente afetada pela ação da aresta transversal da broca helicoidal (Rincon, D.M. et al, 1994) e os fenômenos que ali ocorrem durante o processo de furação. Além desse fato é na aresta transversal que ocorre um mini processo de conformação do material (Shaw, M.C. et al, 1957), influenciando significativamente a formação do cavaco e

distribuição de temperatura na ponta da broca (Astakhov, V.P. et alli, 1995). Nas brocas com afiação Racon a presença reduzida da aresta transversal ocasiona a redução da força de avanço, visto que a mesma possui uma grande parcela (57% segundo Rincon) devido à aresta transversal.

Em seus estudos Kuang-Hua observou reduções de 7,0 % e 19,4 % para força de avanço em brocas com arestas curvilíneas em furação comum e com guia, respectivamente.

Os resultados dos ensaios realizados apresentam reduções na força de avanço para afiação Racon de 20% no aço SAE 1045 e de 14% no aço SAE 4340.

Outros fatores influenciam a força de avanço, são eles : ângulo lateral de saída, ângulo de ponta e espessura do núcleo da broca (Galloway, D.F.; 1957).

O aumento do ângulo lateral de saída e a redução do ângulo de ponta também diminui a força de avanço (Rubenstein, C.; 1991), porém no caso deste estudo esse fator não pode ser observado, pois não existiu alteração das características construtivas da broca.

Um outro fator também não observado foi a influência do diâmetro do núcleo que ao variar afeta a rigidez da broca helicoidal, pois, o momento polar de inércia da broca será afetado influenciando diretamente nos esforços incidentes sob a mesma (Kuang-Hua, F., 1995). No presente caso, o diâmetro do núcleo foi o mesmo para ambas as geometrias, se alterando apenas a aresta transversal.

Nos ensaios considerados a geometria da afiação da ferramenta demonstrou ser fator preponderante de influência nos resultados dos esforços encontrados, principalmente devido ao formato da aresta da ferramenta na afiação Racon.

A evolução do desgaste de flanco das brocas também foi monitorada. Pode-se através das figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 acompanhar o desgaste em função dos esforços e do comprimento usinado.

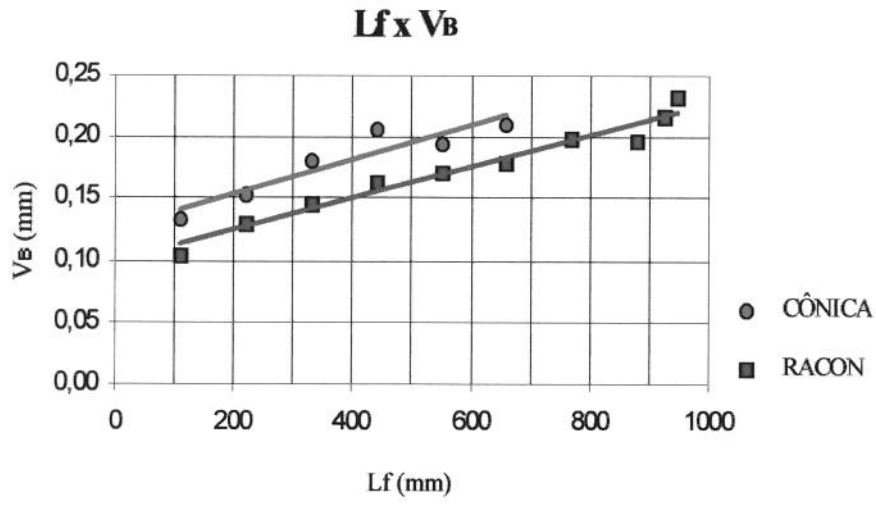


Figura 4.7 - Evolução do desgaste em SAE 4340; $V_c = 20,00$ m/min; $f = 0,14$ mm/rot.

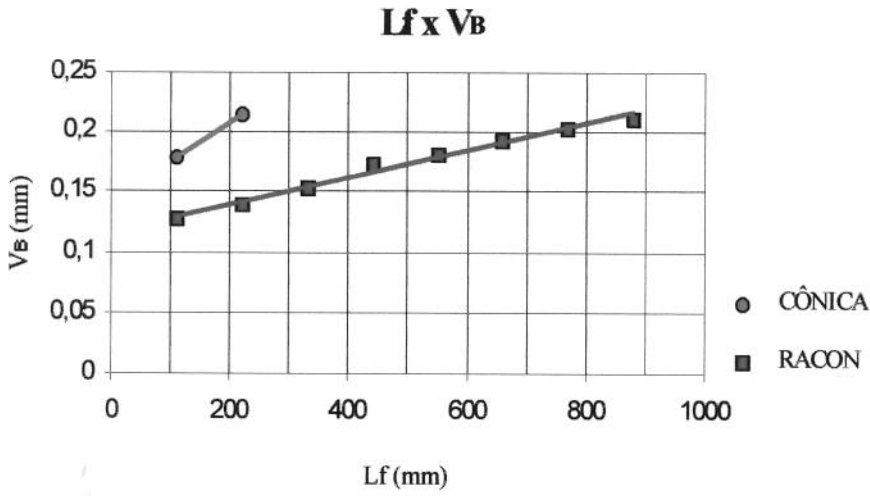


Figura 4.8 - Evolução do desgaste em SAE 4340; $V_c = 25,00$ m/min; $f = 0,14$ mm/rot.

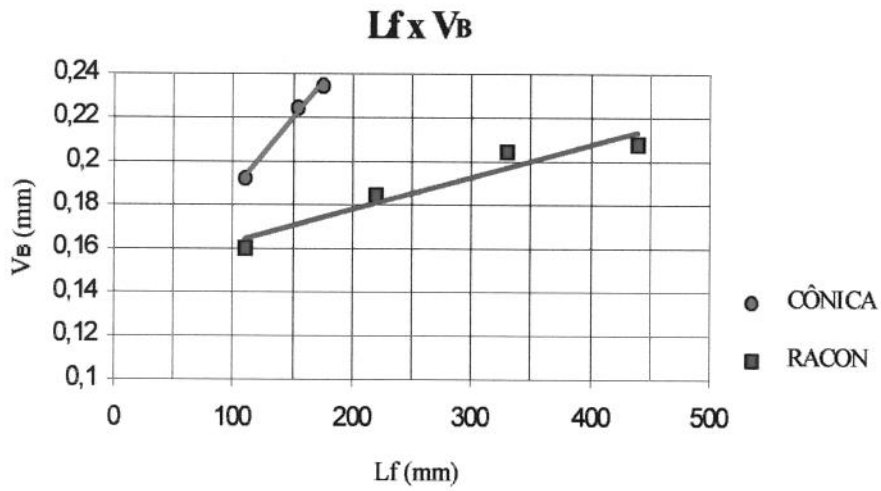


Figura 4.9 - Evolução do desgaste em SAE 4340; $V_c = 30,00$ m/min; $f = 0,14$ mm/rot.

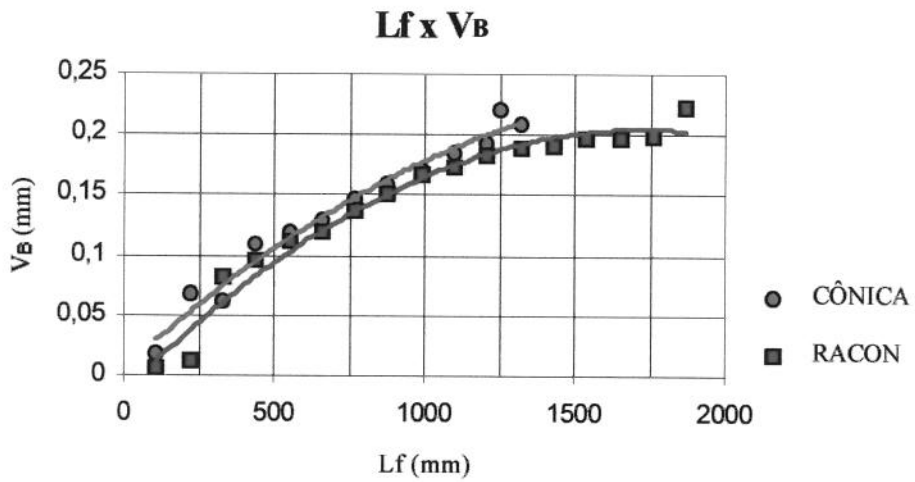
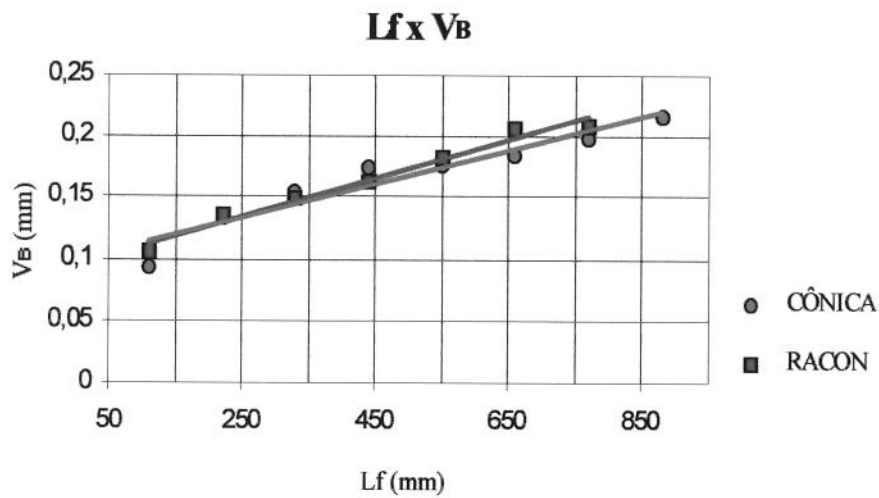


Figura 4.10 - Evolução do desgaste em SAE 1045; $V_c = 35,00$ m/min; $f = 0,30$ mm/rot.



Figura

4.11 - Evolução do desgaste em SAE 1045; $V_c = 40,00$ m/min; $f = 0,30$ mm/rot.

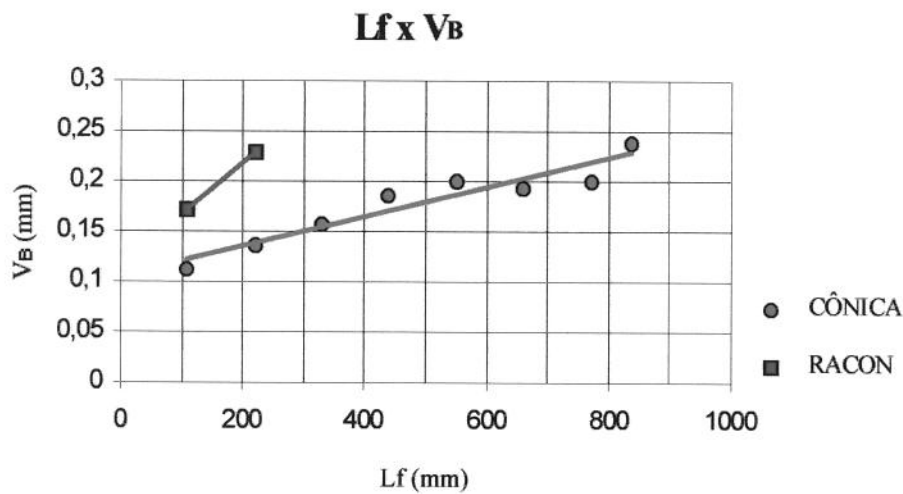


Figura 4.12 - Evolução do desgaste em SAE 1045; $V_c = 45,00$ m/min; $f = 0,30$ mm/rot.

Acompanhou-se também a evolução dos esforços de corte (momento torçor e força de avanço) ao longo dos ensaios, em função do percurso de usinagem. Pode-se acompanhar essa ocorrência através das figuras 4.13 à 4.24, colocadas a seguir.

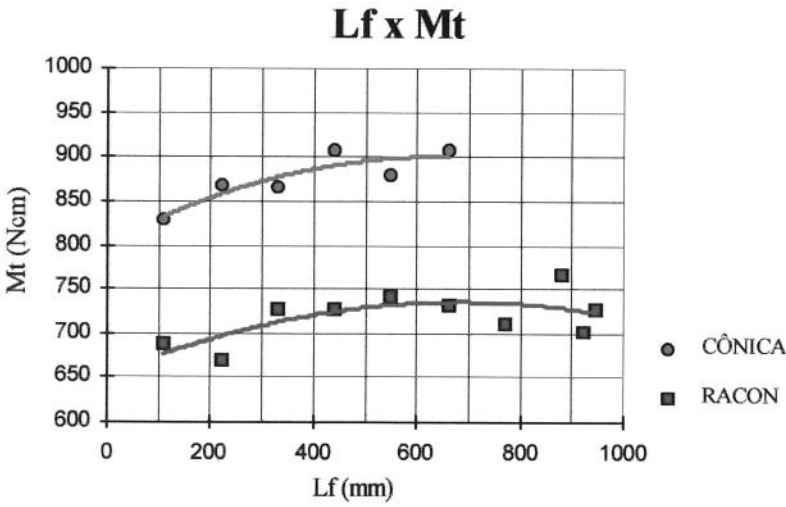


Figura 4.13 - Evolução do momento torçor em SAE 4340; Vc = 20,00 m/min; f = 0,14 mm/rot.

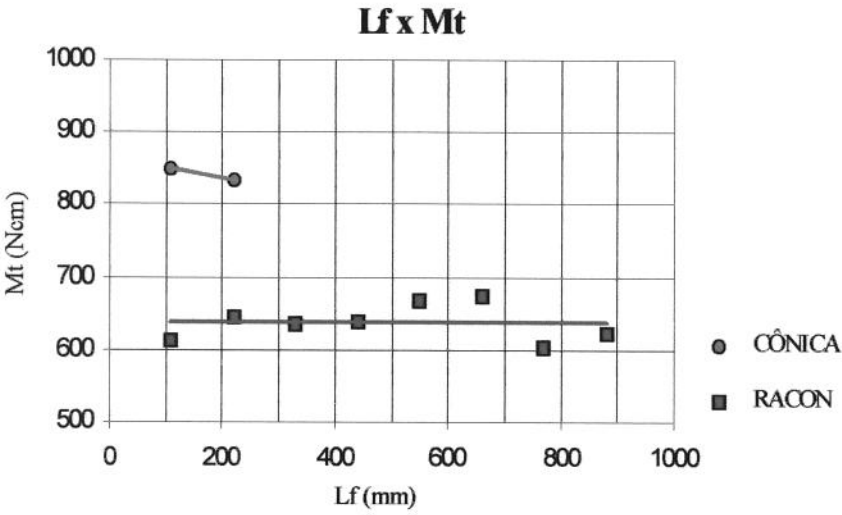


Figura 4.14 - Evolução do momento torçor em SAE 4340; Vc = 25,00 m/min; f = 0,14 mm/rot.

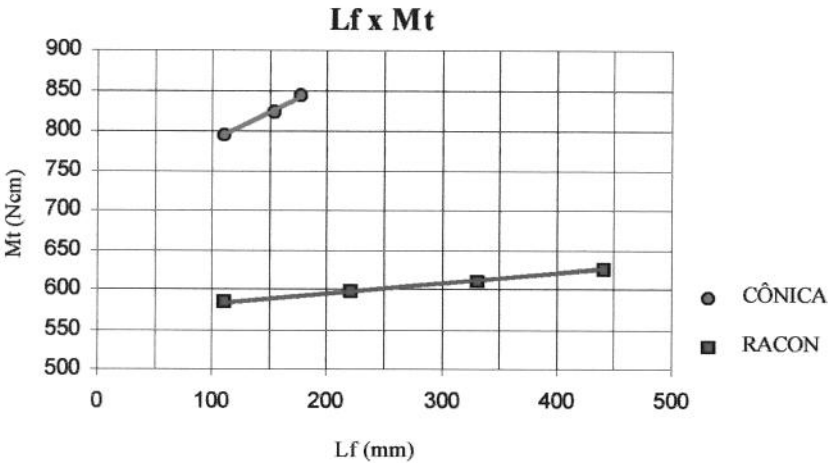


Figura 4.15 - Evolução do momento torçor em SAE 4340; Vc = 30,00 m/min; f = 0,14 mm/rot.

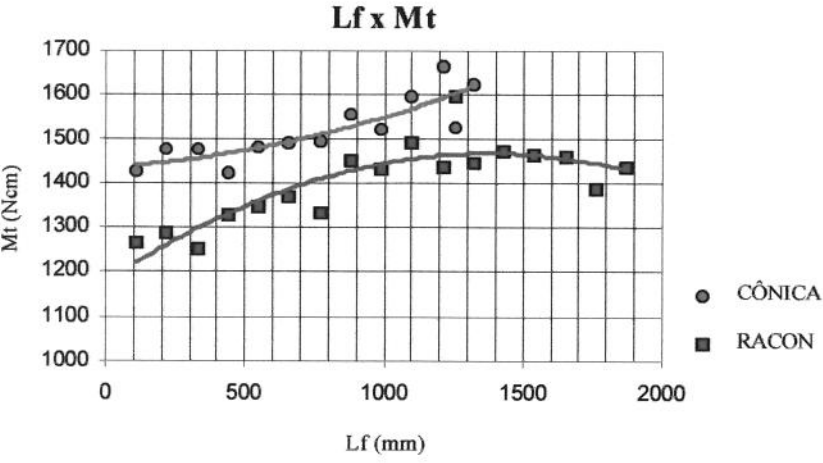


Figura 4.16 - Evolução do momento torçor em SAE 1045; Vc = 35,00 m/min; f = 0,30 mm/rot.

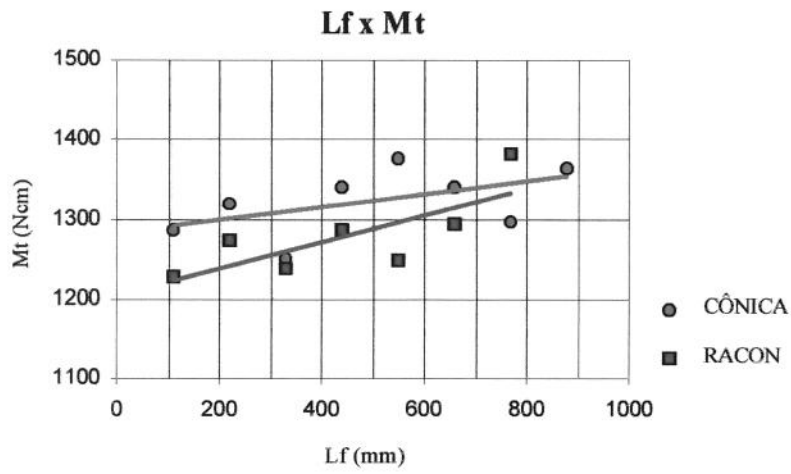


Figura 4.17 - Evolução do momento torçor em SAE 1045; $V_c = 40,00$ m/min; $f = 0,30$ mm/rot.

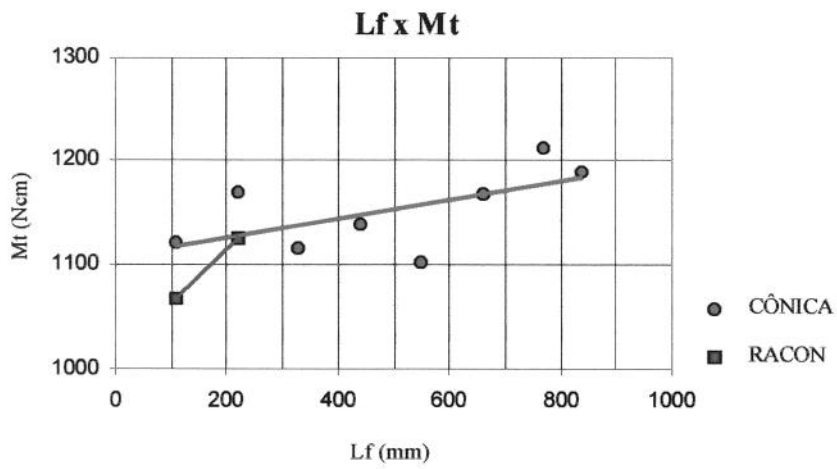


Figura 4.18 - Evolução do momento torçor em SAE 1045; $V_c = 45,00$ m/min; $f = 0,30$ mm/rot.

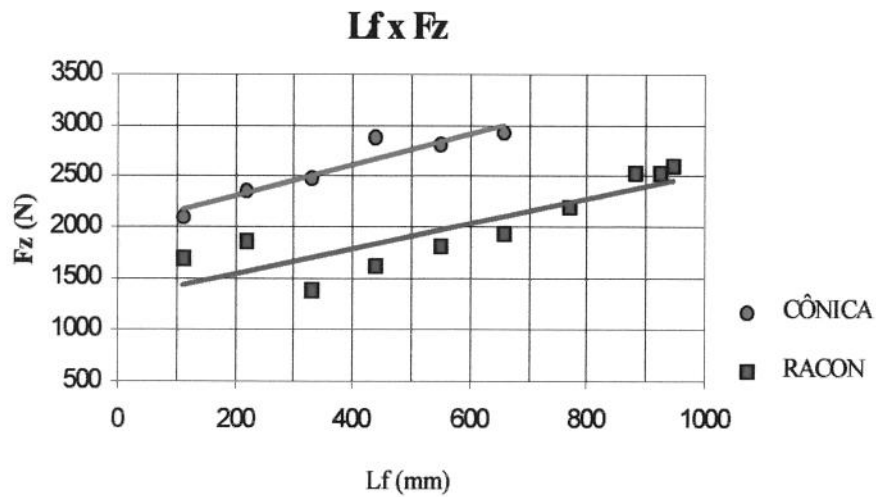


Figura 4.19 - Evolução da força de avanço em SAE 4340; $V_c = 20,00$ m/min; $f = 0,14$ mm/rot.

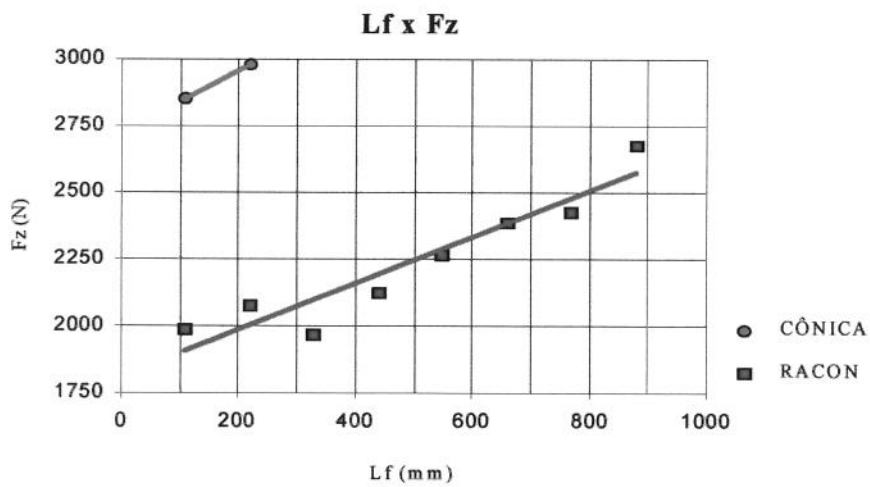


Figura 4.20 - Evolução da força de avanço em SAE 4340; $V_c = 25,00$ m/min; $f = 0,14$ mm/rot.

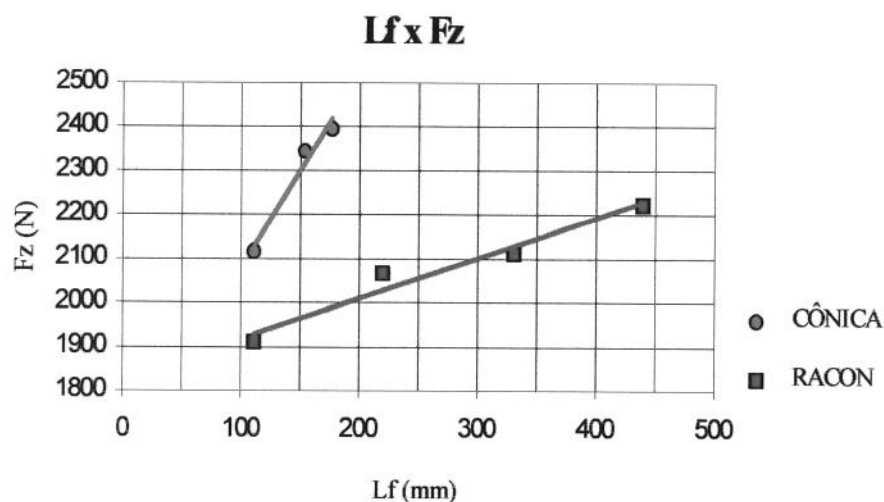


Figura 4.21 - Evolução da força de avanço em SAE 4340; $V_c = 30,00$ m/min; $f = 0,14$ mm/rot.

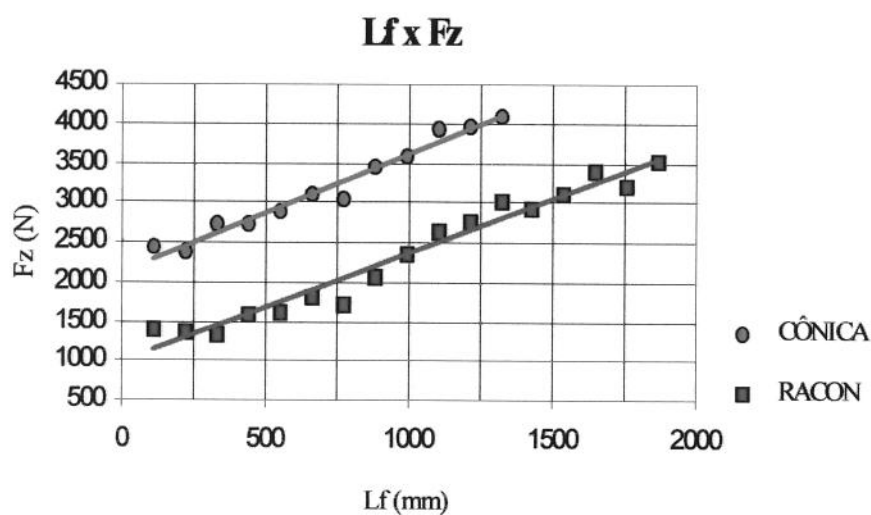


Figura 4.22 - Evolução da força de avanço em SAE 1045; $V_c = 35,00$ m/min; $f = 0,30$ mm/rot.

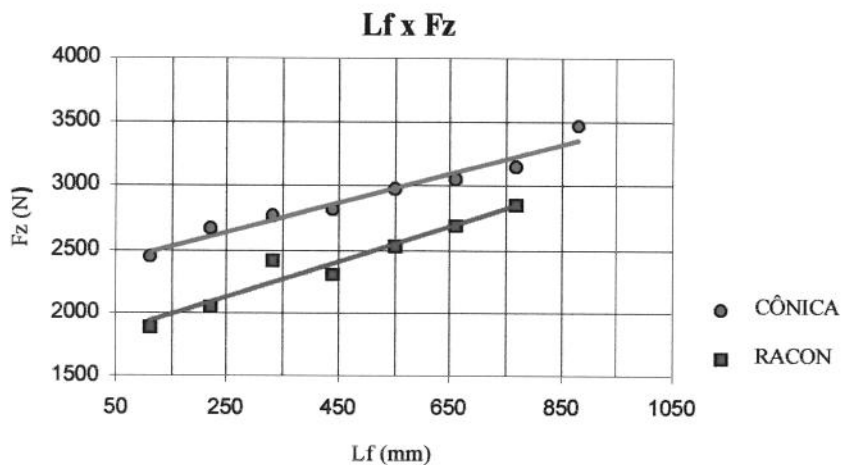


Figura 4.23 - Evolução da força de avanço em SAE 1045; $V_c = 40,00 \text{ m/min}$; $f = 0,30 \text{ mm/rot.}$

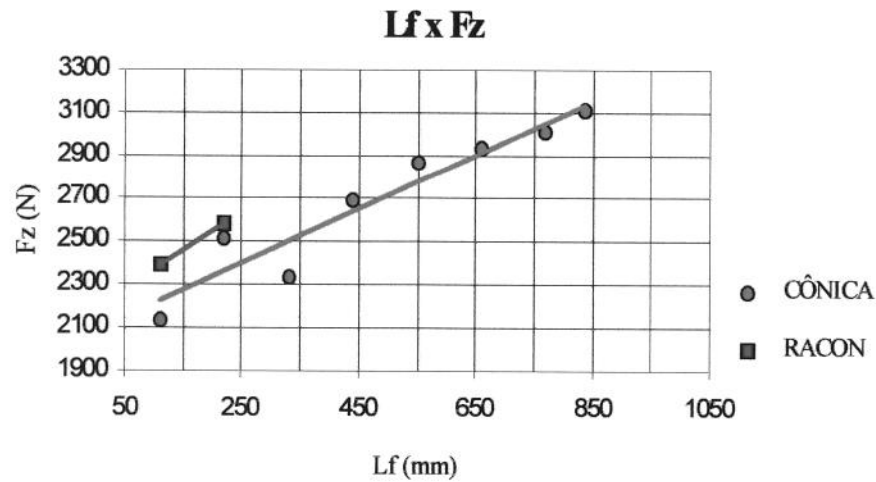


Figura 4.24 - Evolução da força de avanço em SAE 1045; $V_c = 45,00 \text{ m/min}$; $f = 0,30 \text{ mm/rot.}$

Pode-se observar o aumento do desgaste proporcionalmente ao aumento do número de furos usinados para ambas as brocas e materiais e nas três velocidades de corte empregadas. Uma hipótese para explicar esse fato deve levar em consideração o deterioramento da capacidade de corte das arestas de corte das ferramentas.

O deterioramento das arestas de corte das brocas com afiação Racon e Cônica deve-se ao mecanismo de abrasão das mesmas durante a usinagem dos furos. O processo de abrasão ao desgastar as arestas de corte atua diretamente no mecanismo de formação do cavaco da ferramenta, além de também afetar a distribuição de pressão do fluido de corte responsável pela remoção dos cavacos aumentando dessa maneira os atritos e consequentemente os desgastes de flanco. Uma explicação que segue uma linha bastante parecida é dada por Chalil (Chalil, G.S., 1979), porém destacando-se muito mais a importância da distribuição de pressão do fluido de corte que, nos ensaios conduzidos não sofreu nenhuma abordagem.

Em relação aos esforços de corte observou-se a tendência dos mesmos aumentarem à medida que aumenta o desgaste de flanco. Esse comportamento já foi observado por Cisternas (Cisternas, M.H.H., 1989).

Para a geometria de afiação Racon nota-se uma clara tendência de aumento dos esforços de usinagem à medida que aumentam os desgastes de flanco, porém sem nenhuma grande descontinuidade. Já a afiação Cônica, mostra a curva de evolução dos desgastes com alguns pontos de descontinuidade ocorrendo abruptamente. Isso pode ser explicado pela possível presença de inclusões nos materiais dos corpos de prova ou zonas de transição de tratamento térmico onde a ferramenta atuou.

A seguir apresenta-se as figuras 4.25 a 4.30 onde é abordada as variações das medidas nominais dos furos usinados :

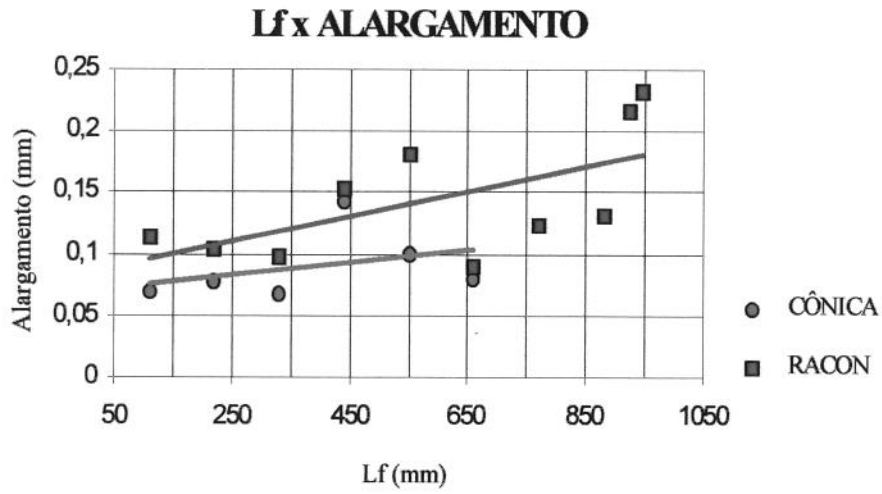


Figura 4.25 - Alargamento do furo em SAE 4340; $V_c = 20,00$ m/min; $f = 0,14$ mm/rot.

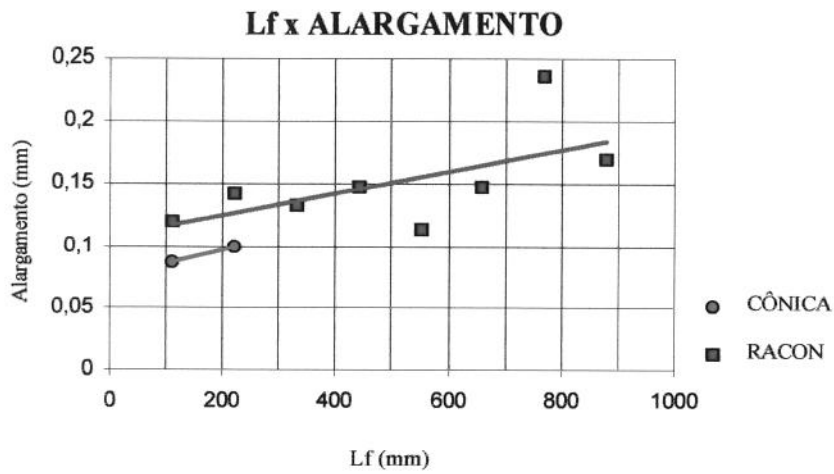


Figura 4.26 - Alargamento do furo em SAE 4340; $V_c = 25,00$ m/min; $f = 0,14$ mm/rot.

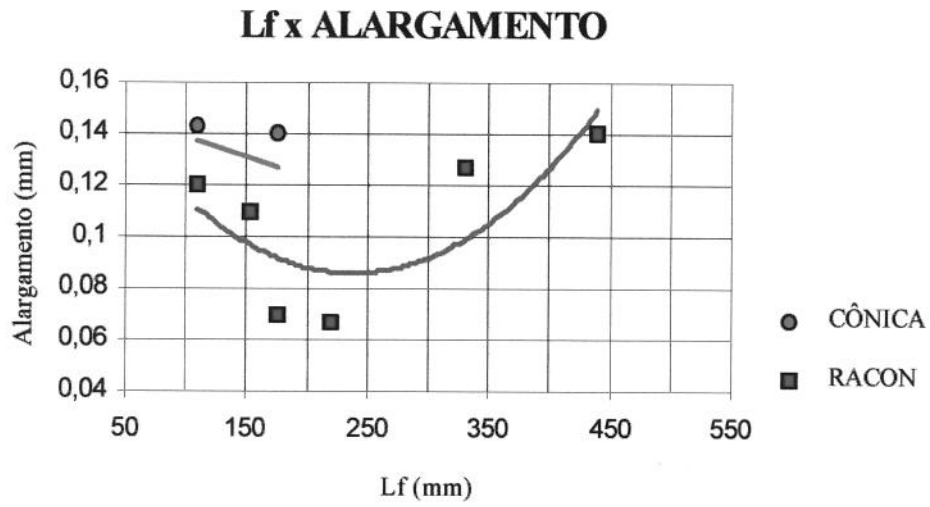


Figura 4.27 - Alargamento do furo em SAE 4340; $V_c = 30,00$ m/min; $f = 0,14$ mm/rot.

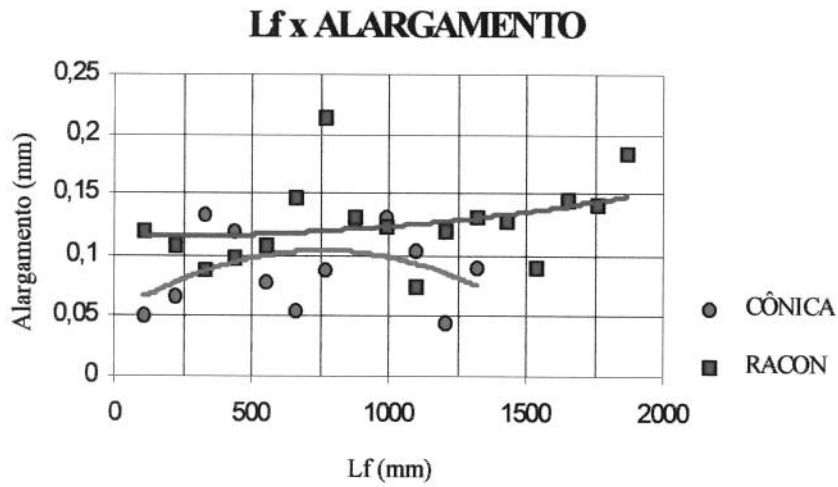


Figura 4.28 - Alargamento do furo em SAE 1045; $V_c = 35,00$ m/min; $f = 0,30$ mm/rot.

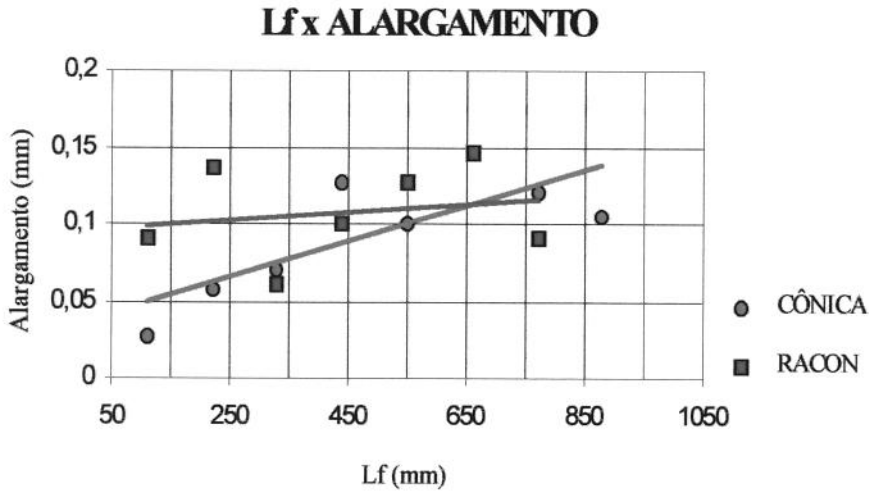


Figura 4.29 - Alargamento do furo em SAE 1045; $V_c = 40,00$ m/min; $f = 0,30$ mm/rot.

Figura 4.30 - Alargamento do furo em SAE 1045; $V_c = 45,00$ m/min; $f = 0,30$ mm/rot.

Observa-se nos gráficos de alargamento dos furos a inconstância dos mesmos em relação a um determinado prevalecimento de um fator de influência qualquer.

Nota-se pelos resultados obtidos, que o alargamento do furo não mostrou uma correlação segura com os parâmetros existentes, como velocidades de corte maiores ou menores e materiais de natureza distinta.

A afirmação possível de se fazer pelos gráficos observados é o maior valor de alargamento ocorrido nos furos usinados pelas brocas helicoidais com geometria de afiação Racon. De certa maneira esse comportamento da afiação Racon frente à Cônica ao considerar-se os alargamentos não é surpresa, visto que devido ao fato dessa geometria possuir arestas curvilíneas a mesma não é autocentrante, sendo inclusive o seu emprego aconselhado com a utilização de guias durante a furação ou a precedência de uma furação de centralização anterior ao início da furação com brocas de geometria de afiação Racon. A incapacidade de autocentralização da mesma a torna mais sujeita aos nocivos efeitos das vibrações transversais

que atingem a broca na entrada da ferramenta na peça (Satoshi, E. et alli 1988), (Astakhov, V.P. et alli, 1995), grande causadora de alargamentos de furos.

Em relação às brocas fraturadas durante o processo de usinagem (uma broca para velocidade de corte de 30,00 m/min no aço SAE 4340 e outra para velocidade de 45,00m/min no aço SAE 1045, ambas com geometria de afiação Cônica) nos ensaios existem duas hipóteses a se considerar :

O primeiro modelo sugere que à medida que o desgaste avança o atrito do cavaco com a broca eleva os valores de temperatura na aresta da broca facilitando a adesão do material da peça na ferramenta, aumentando dessa forma as vibrações do processo até a ocorrência da fratura. Ressalta-se que todo esse mecanismo dura apenas alguns segundos. Brinksmeier (Brinksmeier, E., 1990) tentou em seus estudos monitorar o mecanismo de ocorrência da fratura baseado em um modelo muito parecido com o proposto

Outro modelo utilizado na explicação de fraturas de ferramentas segue a mesma linha do anterior, associando ao mesmo uma análise de elementos finitos onde se constata tensões de compressão nas regiões marginais das arestas de corte e fortes tensões de tração no centro da broca, levando esse conflito à ruptura das mesmas (Webb, P.M.; 1993). A figura 4.31 ilustra esse modelo.

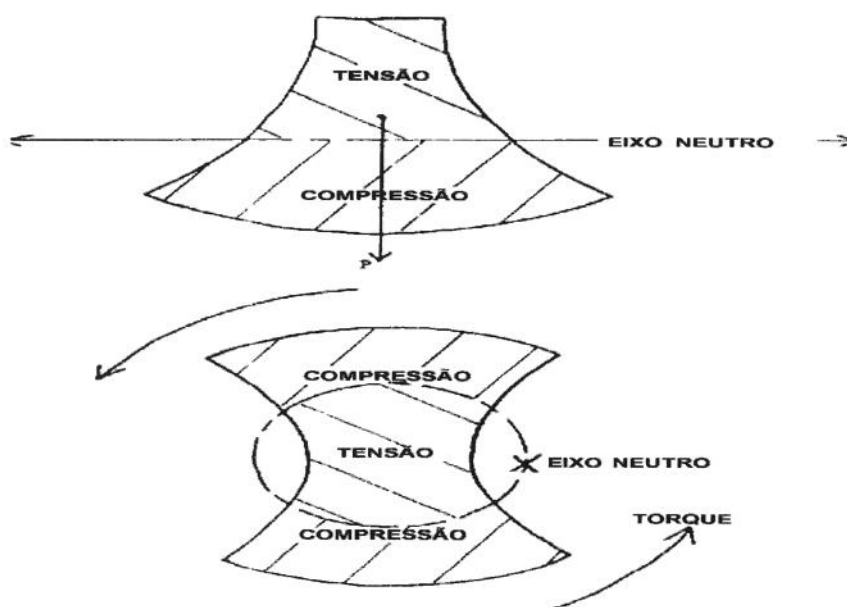


Figura 4.31 - Tensões em atuantes em brocas helicoidais (Webb, P.M., 1993)

Finalizando os comentários sobre os resultados alcançados é relevante dizer que nos ensaios as forças laterais não foram monitoradas, portanto a influência das mesmas não pode ser dimensionada no processo de fratura da ferramenta. Contudo, o momento torçor e a força de avanço monitorados apresentaram uma elevação repentina em seus valores por curtíssimo período de tempo anterior ao rompimento da broca.

Alguma outra explicação sobre os mecanismos que levam a fratura da ferramenta poderia ainda abordar aspectos metalúrgicos do processo, todavia nesse estudo não foi realizada essa análise.

CAPÍTULO 5 : CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função dos resultados obtidos nos ensaios e os aspectos de interação da geometria da afiação das brocas helicoidais de aço rápido e seus respectivos desempenhos, algumas conclusões podem ser relatadas e futuros trabalhos de complementação deste estudo são sugeridos.

A performance das brocas utilizadas nos ensaios foi claramente afetada pela geometria de afiação empregada nas ferramentas, visto que todos os testes foram absolutamente coincidentes em materiais dos corpos de provas usinados, condições de corte adotadas e características mecânicas de construção das brocas helicoidais utilizadas, diferenciando-se somente as geometrias das afiações presentes em cada broca.

A eficácia da geometria de afiação tipo Racon foi demonstrada quando analisou-se os dados para vida de ferramenta obtidos, onde a mesma se mostra superior à geometria de afiação cônica em comprimento usinado (número de furos) e retardamento na evolução dos desgastes de flanco, um critério muito difundido para caracterizar-se fim de vida de ferramentas. A vida da broca com afiação Racon apresentou-se 27% maior que a afiação Cônica quando analisado o percurso de usinagem para os dois materiais. Porém ressalva-se que essas considerações se fazem válidas para as condições dos ensaios realizados, não podendo generalizá-la com segurança sem a realização de um número maior de experimentos para outras condições de usinagem e outros materiais.

Todavia é de se esperar que o comportamento da afiação Racon apresente-se melhor que a afiação Cônica em outros experimentos, considerando os resultados neste trabalho obtidos.

Em relação aos esforços de corte monitorados durante os ensaios de usinagem, momento de torção e força de avanço, brocas com geometria de afiação Racon provaram que de fato, arestas curvilíneas reduzem os esforços presentes na furação e produzem dessa forma condições propícias para possibilitar o aumento da vida da ferramenta.

Os alargamentos apresentados pela afiação Racon apesar de maiores que os apresentados pela afiação cônica são perfeitamente contornáveis pelo uso de guias durante a furação ou operações de furação de centro anterior à utilização da broca com afiação Racon, sendo nesse caso seria recomendável o emprego de centros de usinagem, para se reduzir o tempo de troca da ferramenta, visto que os mesmos trabalham simultaneamente com várias ferramentas.

Enfim, as tendências das curvas de vida apresentadas para as condições operacionais de grande solicitação de esforços e velocidades de corte, nos ensaios considerados podem representar uma indicação de que em situações mais amenas de solicitação, durante a usinagem, a vantagem de performance da afiação Racon sobre a cônica poderia ser ainda maior.

Dentre várias sugestões para continuidade das pesquisas nesse campo com o uso de afiações de arestas curvas, em particular a afiação RACON, pode-se citar :

- levantamento das curvas de desgastes das brocas com afiação Racon comparativamente à cônicas utilizando-se três velocidades de corte e avanços(os valores recomendados pelo fabricante da ferramenta, um abaixo e um superior);
- a determinação de um modelamento geométrico genérico que permita saber a influência da variação dos ângulos das brocas com arestas curvilíneas em sua performance;

- o dimensionamento da real contribuição das arestas transversal e de corte, além dos atritos nos esforços de corte em geometria de afiação com arestas curvilíneas;
- o estudo da relevância das afiações e sua relação custo benefício dentro de um ambiente de alta produção;
- o desenvolvimento de um software para determinação das condições ótimas de usinagem em função das características geométricas das brocas com arestas curvilíneas e suas respectivas variações em função dos materiais usinados;
- o estudo do impacto da diferença de altura entre as arestas principais de corte no desempenho da broca.

Estes e outros estudos podem ser conduzidos sempre tendo em mente a importância do processo de furação dentre todos os processos de usinagem existentes e a grande carência de informação referente aos mesmos, onde quase sempre os ensaios e resultados empíricos acabam prevalecendo sobre hipóteses analíticas e teóricas, devido a complexidade de elaboração das mesmas sem ensaios para referenciamento das formulações.

.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1977, PB 286.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989, NB 205.

Agapiou, J.S. et al, 1990, "On The Determination of Thermal Phenomena During Drilling - Analytical Models of Twist Drill Temperature Distributions", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 30, pp 203-215.

Agapiou, J.S., 1993, "Design Characteristics of New Types of Drill and Evaluation of Their Performance Drilling Cast Iron - Drills with Three Major Cutting Edges", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol. 33 pp 343-365.

Agostinho, O.L. et al, 1977, "Princípios de Engenharia de Fabricação Mecânica".

Armarego, E.J.A. et al, 1973, "An Investigation of Drill Point Sharpening by Straight Lip - Conical Grinding Method, I - Basic Analysis", International Journal of Machine and Tool Design Research, Vol 13, pp 155-164.

Armarego, E.J.A. et al, 1973, "An Investigation of Drill Point Sharpening by Straight Lip - Conical Grinding Method, II - A Criterion for Selecting a Solution", International Journal of Machine and Tool Design Research, Vol 13, pp 165-182.

Armarego, E.A.J. et al, 1973, "An Investigation of Drill Point Sharpening by Straight Lip - Conical Grinding Method, III - Drill Point Grinder Design Features", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 13, pp 233-241.

Armarego, E.J.A. et al, 1979, "Thrust and Torque Prediction From a Cutting Mechanics Approach", Annals of the CIRP, Vol 28, pp 87-91.

Armarego, E.J.A. et al, 1990, "Four Plane Facet Point Drills - Basic Design and Cutting Model Prediction", Annals of the CIRP, Vol 39, pp 41-45.

-
- Astakhov, V.P. et alli, 1995,"An Investigation of The Static Stability in Selfpiloting Drilling", International Journal of Production Research, Vol 33, pp1617-1634.
- Bhattacharyya, A. et alli, 1973,"Geometry and Performance of Multi-Cone and Curved-Lip Twist Drills", Annals of the CIRP, Vol 22, pp 27-28.
- Boulger, F.W., 1978,"Machining Characteristics of Steels", Metals Handbook, Vol 1, 9th ed.
- Brinksmeier, E.,1990,"Prediction of Tool Fracture in Drilling", Annals of the CIRP, Vol 39, pp 97-100.
- Chalil, G.S. et all, 1979,"A Theoretical and Experimental Investigation of Coolant Flow in Gundrilling", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 19, pp 143-155.
- Cisternas, M.H.H., 1989,"Contribuição a Determinação das Características de Usinagem em Brocas Helicoidais", Tese de Mestrado, UNICAMP.
- Cook, N.H.,1973," Tool Wear and Tool Life", Journal of Engineering for Industry, pp 931-938.
- Cook, N.H. et all, 1977," Sensing of Drill Wear and Prediction of Drill Life", Transaction of American Society of Mechanical Engineering, Vol 39, pp 295-301.
- De Vries, M.F. et alli, 1988, "An Investigation of The Cutting Mechanisms of The New Point Drill", Annals of the CIRP, Vol 37, pp 73-78.
- Diniz, A.E.,1989,"A Rugosidade Superficial da Peça em Processos de Torneamento : Critério de Fim de Vida e Fatores de Influência", Tese de Doutorado, UNICAMP.
- Donarski, R.R., 1984, "New Geometries for Wide Web Drills", American Machinist, 11.
- Donarski, R.R., 1995,"Get the Right Point for Drilling", Modern Machine Shop, 09.
- Ernest, H. et all, 1958,"The Spiral Point Drill, a New Concept in Drill Point Geometry", Transaction of American Society of Mechanical Engineering, Vol 80, pp 1059-1060.
- Ferraresi, D., 1977," Fundamentos da Usinagem dos Metais", 7 ed.
- Galloway, D.F., 1957,"Some Experiments on The Influence of Various Factors on Drill Performance", Transaction of the American Society of Mechanical Engineering, Vol 79, pp 191-231.
- Gilbert, W.W.,1950, American Society of Metals, Vol 13, pp 468-476.
- Jalali, S.A. et all, 1991,"Tool Life and Machinability Models for Drilling Steels", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 31, pp 273-282.
-

-
- Kaldor, S. et al, 1980,"Drill Point Geometry and Optimization, Transaction of the American Society of Mechanical Engineering, Vol 104, pp 84-90.
- Kaldor, S. et al, 1980,"Investigation in Tool Life of Twist Drill", Annals of the CIRP, Vol 29 pp 23-27.
- Koenigsberger, F., 1964,"Design Principles of Metal Cutting Machine Tools".
- Kronenberg, M., 1966,"Machining Science and Application", 1ra ed.
- Kuang - Hua, F. et al, 1995,"Cutting Performance of Thick Web Drills with Curved Primary Cutting Edges", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 35, pp 975-991.
- Lorenz, G., 1979,"Helix Angle and Drill Performance", Annals of the CIRP, Vol 28, pp 83-86.
- Mills,B. et al, 1983,"Machinability of Engineering Materials". 8 ed.
- Nedeß, C. et al, 1986,"Automatisierte Überwachung des Bohrens", Vol 128, pp 651-657.
- Novaski, O.,1983,"Uma contribuição ao Estudo das Condições Econômicas de Usinagem", Tese de Mestrado, UNICAMP.
- Novaski, O.,1991,"Custos de Usinagem" 1ra ed.
- Novaski, O., 1994,"Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica", 1ra. ed.
- Pande, S.S. et al, 1986,"Investigation on Reducing Burr Formation in Drilling", International Journal of Material Tool and Design Research, Vol 26, pp 339-349.
- Rincon, D.M. et al,1994,"Effects of Drill Vibration on Cutting Forces and Torque", Annals of the CIRP, Vol 43, pp 59-62.
- Rodinger, T.J. et al, 1980, Transaction of the American Society of Mechanical Engineering, pp 37-44.
- Rubenstein, C.,1976,"An Analysis of Tool Life Based on Flank Face Wear", Journal of Engineering for Industry, pp 221-226.
- Rubenstein, C., 1991,"The Torque and Thrust Force in Twist Drilling, I - Theory, II - Comparison of Experimental Observations with Deductions From Theory", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 31, pp 481-504.
- Sandvik Coromant,1995,"Herramientas de Tornear".
- Satoshi, E. et al, 1988, "New Type Drill with Three Major Cutting Edges", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 28, pp 461-473.
-

-
- Shaw, M.C. et al, 1957, "On The Drilling of Metals 2 - The Torque and Thrust in Drilling", Transaction of the American Society of Mechanical Engineering, Vol 79, pp 139
- Shaw, M.C., 1986, "Metal Cutting Principles".
- Singpurwalla, N.D. et al, 1966, "The iron age".
- Soderberg, S., 1979, "Tool Prediction", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 45, pp 99-104.
- Stephenson, D. A. et al, 1992, "Calculation of Main Cutting Edge Forces and Torque for Drills with Arbitrary Point Geometries", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 32, pp 521-538.
- Sultanov, T.A., 1984, "Grinding Twist Drills in Three Planes", Soviet Engineering Research, Vol 4, pp 62-64.
- Taylor, F.W., 1907, "On The Art of Cutting Metals", Transaction of the American Society of Mechanical Engineering, Vol , pp 31-38.
- Thornley, R.H. et al, 1987, "A New Approach to Eliminate Twist Drill Chisel Edge - Asymmetric Configuration", International Journal of Production Research, Vol 25, pp 585-602.
- Trent, E.M., 1977, "Metal Cutting"
- Tsai, W.D. et al, 1979, "A Mathematical Model for Drill Point Design and Grinding", Journal of Engineering for Industry, Vol 101, pp 333-340.
- US Department of Commerce, 1992, "US Industrial Outlook 1992 - Business Forecasts for 350 Industries".
- Watson, A.R., 1985, "Geometry of Drill Point Elements", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 25, pp 209-227.
- Watson, A.R., 1985, "Drilling Model for Cutting Lip and Chisel Edge and Comparison of Experimental and Predicted Result I - Initial Cutting Lip Model; II - Revised Cutting Lip Model; III - Drilling Model for Chisel Edge", International Journal of Machine Tool and Design Research, Vol 25, pp 347-392.
- Webb, P.M., 1993, "Dynamics of The Twist Drilling Process", International Journal of Production Research, Vol 31, pp 823-828.
- Willians, R.A. et al, 1972, International Journal of Production Research, pp 175-191.
-

ANEXOS

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Vc (m/min)	CÔNICA	RACON	Vc (m/min)	CÔNICA	RACON
20	660	946	20	520	880
20	462	924	25	220	762
20	440	770	30	146	381
25	220	770			
25	220	858			
25	220	660			
30	176	440			
30	110	440			
30	154	264			

Anexo 01 - Gerador da figura 4.1

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Vc (m/min)	CÔNICA	RACON	Vc (m/min)	CÔNICA	RACON
35	1320	1650	35	1298	1797
35	1320	1870	40	843	697
35	1254	1870	45	645	161
40	880	660			
40	770	660			
40	880	770			
45	550	220			
45	550	220			
45	836	44			

Anexo 02 - Gerador da figura 4.2

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Vc (m/min)	CÔNICA	RACON	Vc (m/min)	CÔNICA	RACON
35	1477	1342	35	1481	1362
35	1455	1358	40	1330	1264
35	1510	1385	45	1150	1098
40	1311	1212			
40	1329	1280			
40	1349	1301			
45	1135	1085			
45	1147	1100			
45	1169	1110			

Anexo 03 - Gerador da figura 4.3

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Vc (m/min)	CÔNICA	RACON	Vc (m/min)	CÔNICA	RACON
20	873	667	20	889	698
20	910	708	25	856	658
20	885	720	30	817	598
25	840	677			
25	863	658			
25	865	639			
30	817	571			
30	833	606			
30	800	616			

Anexo 04 - Gerador da figura 4.4

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Vc (m/min)	CÔNICA	RACON	Vc (m/min)	CÔNICA	RACON
35	3683	2959	35	3788	2972
35	3690	2977	40	3097	2533
35	3990	2981	45	2837	2277
40	3091	2389			
40	3011	2600			
40	3189	2610			
45	2829	2339			
45	2835	2129			
45	2848	2362			

Anexo 05 - Gerador da figura 4.5

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Vc (m/min)	CÔNICA	RACON	Vc (m/min)	CÔNICA	RACON
20	2868	2387	20	2886	2399
20	2890	2400	25	2894	2411
20	2899	2410	30	2191	2048
25	2990	2398			
25	2805	2412			
25	2888	2423			
30	2109	2079			
30	2225	2000			
30	2239	2065			

Anexo 06 - Gerador da figura 4.6

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,125	0,11	110	0,13	0,10
110	0,13	0,115	220	0,15	0,13
110	0,145	0,087	330	0,18	0,15
220	0,148	0,135	440	0,21	0,16
220	0,154	0,131	550	0,20	0,17
220	0,155	0,121	660	0,21	0,18
330	0,17	0,143	770		0,198
330	0,191	0,15	880		0,197
330	0,181	0,144	924		0,217
440	0,18	0,157	946		0,232
440	0,205	0,162			
440	0,233	0,169			
550	0,195	0,166			
550		0,176			
550		0,17			
660	0,21	0,179			
660		0,175			
660		0,18			
770		0,183			
770		0,188			
770		0,222			
880		0,195			
880		0,199			
880					
924		0,217			
946		0,232			
990					

Anexo 07 - Gerador da figura 4.7

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,176	0,125	110	0,178	0,127
110	0,188	0,13	220	0,214	0,138
110	0,17	0,127	330		0,153
220	0,203	0,134	440		0,171
220	0,21	0,139	550		0,180
220	0,229	0,141	660		0,193
330		0,149	770		0,203
330		0,152	880		0,211
330		0,159			
440		0,168			
440		0,177			
440		0,17			
550		0,177			
550		0,181			
550		0,184			
660		0,185			
660		0,192			
660		0,203			
770		0,196			
770		0,21			
770					
880		0,211			
880					
880					

Anexo 08 - Gerador da figura 4.8

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,21	0,156	110	0,19	0,16
110	0,181	0,16	154	0,23	
110	0,185	0,165	176	0,23	
154	0,225		220		0,18
176	0,234		330		0,20
220		0,187	440		0,21
220		0,186			
220		0,18			
330		0,198			
330		0,195			
330		0,22			
440		0,21			
440		0,205			
440					

Anexo 09 - Gerador da figura 4.9

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,01	0,003	110	0,017	0,005
110	0,018	0,008	220	0,066	0,011
110	0,024	0,005	330	0,062	0,082
220	0,078	0,014	440	0,109	0,095
220	0,06	0,01	550	0,120	0,110
220	0,062	0,011	660	0,128	0,119
330	0,0092	0,086	770	0,146	0,137
330	0,085	0,082	880	0,158	0,150
330	0,093	0,079	990	0,171	0,166
440	0,107	0,089	1100	0,185	0,173
440	0,108	0,101	1210	0,192	0,183
440	0,114	0,095	1254	0,221	
550	0,11	0,092	1320	0,208	0,188
550	0,118	0,121	1430		0,191
550	0,132	0,118	1540		0,196
660	0,114	0,099	1650		0,195
660	0,129	0,13	1760		0,198
660	0,141	0,129	1870		0,222
770	0,139	0,13			
770	0,134	0,138			
770	0,167	0,143			
880	0,158	0,143			
880	0,146	0,151			
880	0,171	0,157			
990	0,168	0,16			
990	0,158	0,166			
990	0,188	0,172			
1100	0,195	0,165			
1100	0,163	0,175			
1100	0,197	0,179			
1210	0,196	0,18			
1210	0,189	0,187			
1254	0,221	0,188			
1320	0,211	0,182			
1320	0,206	0,19			
1320		0,192			
1430		0,185			
1430		0,193			
1430		0,196			
1540		0,189			
1540		0,196			
1540		0,204			
1650		0,193			
1650		0,198			
1650					
1760		0,197			
1760		0,199			
1760					
1870		0,216			
1870		0,229			

Anexo 10 - Gerador da figura 4.10

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,099	0,101	110	0,093	0,105
110	0,093	0,11	220	0,132	0,134
110	0,089	0,104	330	0,155	0,148
220	0,133	0,127	440	0,174	0,163
220	0,129	0,135	550	0,177	0,183
220	0,135	0,141	660	0,184	0,206
330	0,16	0,139	770	0,199	0,209
330	0,157	0,147	880	0,215	
330	0,148	0,158			
440	0,18	0,15			
440	0,175	0,163			
440	0,169	0,177			
550	0,185	0,183			
550	0,177	0,179			
550	0,17	0,188			
660	0,195	0,208			
660	0,181	0,213			
660	0,177	0,197			
770	0,214	0,209			
770	0,193				
770	0,19				
880	0,208				
880	0,223				

Anexo 11 - Gerador da figura 4.11

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,101	0,163	110	0,112	0,172
110	0,115	0,181	220	0,135	0,229
110	0,12		330	0,158	
220	0,129	0,224	440	0,186	
220	0,137	0,235	550	0,2	
220	0,141		660	0,193	
330	0,158		770	0,199	
330	0,151		836	0,239	
330	0,165				
440	0,187				
440	0,192				
440	0,179				
550	0,21				
550	0,221				
550	0,186				
660	0,193				
660					
660					
770	0,199				
770					
770					
836	0,239				

Anexo 12 - Gerador da figura 4.12

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	841	641	110	828,66	687
110	855	730	220	868	669,33
110	790	690	330	865,33	726,66
220	850	713	440	907,33	726,66
220	893	677	550	880	741
220	861	618	660	777	731,66
330	845	760	770		711
330	878	705	880		767
330	873	715	924		701
440	875	766	946		727
440	932	699	990		
440	915	715			
550	880	778			
550		723			
550		722			
660	777	705			
660		734			
660		756			
770		780			
770		657			
770		696			
880		790			
880		744			
880					
924		701			
946		727			
990					

Anexo 13 - Gerador da figura 4.13

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	890	610	110	849,33	612
110	845	635	220	834,66	645,33
110	813	591	330		634
220	892	615	440		638,33
220	899	644	550		667,33
220	713	677	660		673,33
330		577	770		603,5
330		644	880		622
330		681			
440		595			
440		698			
440		622			
550		610			
550		723			
550		669			
660		655			
660		688			
660		677			
770		607			
770		600			
770					
880		622			
880		622			
880					

Anexo 14 - Gerador da figura 4.14

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	790	580	110	794,66	584
110	795	595	154	823	
110	799	577	176	844	
154	823		220		596,33
176	844		330		610
220		596	440		626,5
220		610			
220		583			
330		600			
330		615			
330		615			
440		633			
440		620			
440					

Anexo 15 - Gerador da figura 4.15

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	1555	1320	110	1425,33	1263
110	1410	1214	220	1474	1285,33
110	1311	1255	330	1474,33	1251
220	1589	1297	440	1421,66	1325,33
220	1456	1244	550	1482,33	1347
220	1377	1315	660	1487	1366,33
330	1533	1199	770	1494	1330
330	1490	1255	880	1555,33	1448
330	1400	1299	990	1521,66	1430,33
440	1435	1310	1100	1598,66	1490,33
440	1500	1300	1210	1665	1435
440	1330	1366	1254	1527	1599
550	1600	1377	1320	1621,5	1444
550	1449	1315	1430		1471,66
550	1398	1349	1540		1464,33
660	1475	1388	1650		1456,5
660	1486	1310	1760		1387
660	1500	1401	1870		1437
770	1635	1393			
770	1447	1285			
770	1400	1312			
880	1675	1449			
880	1481	1407			
880	1510	1488			
990	1699	1394			
990	1411	1444			
990	1455	1453			
1100	1723	1518			
1100	1559	1487			
1100	1514	1466			
1210	1730	1422			
1210	1600	1448			
1254	1527	1599			
1320	1720	1512			
1320	1523	1392			
1320		1428			
1430		1600			
1430		1403			
1430		1412			
1540		1460			
1540		1433			
1540		1500			
1650		1491			
1650		1422			
1650					
1760		1376			
1760		1398			
1760					
1870		1426			
1870		1448			

Anexo 16 - Gerador da figura 4.16

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	1290	1256	110	1286,66	1227
110	1300	1200	220	1321,66	1273,66
110	1270	1225	330	1252	1239,33
220	1310	1315	440	1341,66	1286,33
220	1355	1268	550	1378	1250
220	1300	1238	660	1341,33	1294,66
330	1223	1188	770	1297	1381
330	1244	1243	880	1364,33	
330	1289	1287			
440	1327	1214			
440	1376	1366			
440	1322	1279			
550	1333	1199			
550	1412	1263			
550	1389	1288			
660	1313	1301			
660	1345	1269			
660	1366	1314			
770	1299	1381			
770	1315				
770	1277				
880	1365				
880	1364				
880	1364				

Anexo 17 - Gerador da figura 4.17

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	1105	1085	110	1122	1067,5
110	1128	1050	220	1169,33	1125
110	1133		330	1114,66	
220	1127	1100	440	1138,33	
220	1182	1150	550	1101,33	
220	1199		660	1167	
330	1008		770	1212	
330	1124		836	1189	
330	1212				
440	1111				
440	1101				
440	1203				
550	1121				
550	1190				
550	993				
660	1167				
660	1167				
660					
770	1212				
770					
770					
836	1189				

Anexo 18 - Gerador da figura 4.18

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	2123	1678	110	2096	1694,33
110	2055	1723	220	2353,33	1858,66
110	2110	1682	330	2470,33	1374
220	2284	1967	440	2888,66	1611,66
220	2366	1854	550	2799	1801,66
220	2410	1755	660	2923	1932,33
330	2555	1321	770		2184
330	2314	1346	880		2532,5
330	2542	1455	924		2533
440	2897	1678	946		2601
440	2954	1559	990		
440	2815	1598			
550	2799	1767			
550		1749			
550		1889			
660	2923	1916			
660		1953			
660		1928			
770		2099			
770		2267			
770		2186			
880		2576			
880		2489			
880					
924		2533			
946		2601			
990					

Anexo 19 - Gerador da figura 4.19

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	2866	1996	110	2852	1985,66
110	2799	2022	220	2976,66	2073,33
110	2891	1939	330		1966,66
220	2995	2087	440		2122,33
220	3012	2132	550		2263,33
220	2923	2001	660		2384
330		1878	770		2429
330		1991	880		2676,5
330		2031			
440		2157			
440		2111			
440		2099			
550		2216			
550		2298			
550		2276			
660		2396			
660		2387			
660		2369			
770		2445			
770		2413			
770					
880		2555			
880		2798			

Anexo 20 - Gerador da figura 4.20

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	2084	1945	110	2116,66	1908,66
110	2112	1769	154	2344	
110	2154	2012	176	2397	
154	2344		220		2067,66
176	2397		330		2112
220		1997	440		2224,5
220		2132			
220		2074			
330		2221			
330		2004			
330		2111			
440		2212			
440		2237			

Anexo 21 - Gerador da figura 4.21

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	2333	1523	110	2436,66	1401,66
110	2478	1238	220	2357,66	1373
110	2499	1444	330	2737	1329
220	2265	1599	440	2712,33	1571
220	2587	1187	550	2894	1596,33
220	2221	1333	660	3089,66	1803
330	2667	1622	770	3055,33	1714,66
330	2801	1010	880	3465	2061,33
330	2743	1355	990	3578,33	2340,33
440	2777	1698	1100	3914	2636,66
440	2582	1539	1210	3954,33	2743,33
440	2778	1476	1320	4075	2998,66
550	2999	1572	1430		2927,66
550	2883	1666	1540		3113,66
550	2800	1551	1650		3387
660	3112	1992	1760		3186,5
660	2923	1729	1870		3524
660	3234	1688			
770	3119	1375			
770	2999	1882			
770	3048	1887			
880	3393	2120			
880	3555	2088			
880	3447	1976			
990	3778	2233			
990	3123	2345			
990	3834	2443			
1100	3743	2558			
1100	3997	2598			
1100	4002	2754			
1210	3965	2888			
1210	3888	2349			
1254	4010	2993			
1320	3992	3124			
1320	4158	2999			
1320		2873			
1430		2921			
1430		2867			
1430		2995			
1540		3010			
1540		3086			
1540		3245			
1650		3453			
1650		3321			
1650					
1760		3026			
1760		3347			
1760					
1870		3457			
1870		3591			

Anexo 22 - Gerador da figura 4.22

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	2456	1993	110	2444,66	1880,33
110	2567	1772	220	2662,33	2051,66
110	2311	1876	330	2767	2418,33
220	2765	1989	440	2814	2302,66
220	2554	1999	550	2968,33	2518
220	2668	2167	660	3047,66	2678,33
330	2876	2289	770	3143,33	2845
330	2771	2312	880	3466,33	
330	2654	2654			
440	2897	2421			
440	2976	2010			
440	2569	2477			
550	3019	2358			
550	2997	2559			
550	2889	2637			
660	3129	2773			
660	3010	2533			
660	3004	2729			
770	2998	2845			
770	3187				
770	3245				
880	3432				
880	3412				
880	3555				

Anexo 23 - Gerador da figura 4.23

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	2213	2333	110	2134,66	2384,5
110	2100	2436	220	2511	2577,5
110	2091		330	2338,66	
220	2334	2543	440	2693,33	
220	2434	2612	550	2869	
220	2765		660	2932	
330	2498		770	3012	
330	2419		836	3110	
330	2099				
440	2553				
440	2656				
440	2871				
550	2811				
550	2896				
550	2900				
660	2987				
660	2877				
660					
770	3012				
770					
770					
836	3110				

Anexo 24 - Gerador da figura 4.24

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,04	0,12	110	0,07	0,11
110	0,08	0,09	220	0,07	0,10
110	0,09	0,13	330	0,06	0,09
220	0,12	0,11	440	0,14	0,15
220	0,05	0,08	550	0,1	0,18
220	0,06	0,12	660	0,08	0,09
330	0,04	0,12	770		0,12
330	0,06	0,07	880		0,13
330	0,1	0,1	924		0,21
440	0,08	0,09	946		0,23
440	0,12	0,22			
440	0,23	0,15			
550	0,1	0,18			
550		0,15			
550		0,21			
660	0,08	0,1			
660		0,06			
660		0,11			
770		0,18			
770		0,11			
770		0,08			
880		0,09			
880		0,17			
880					
924		0,21			
946		0,25			

Anexo 25 - Gerador da figura 4.25

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,11	0,18	110	0,08	0,12
110	0,06	0,13	220	0,1	0,14
110	0,09	0,05	330		0,13
220	0,09	0,21	440		0,14
220	0,12	0,13	550		0,11
220	0,09	0,09	660		0,14
330		0,11	770		0,23
330		0,07	880		0,17
330		0,22			
440		0,18			
440		0,19			
440		0,07			
550		0,04			
550		0,19			
550		0,11			
660		0,1			
660		0,09			
660		0,25			
770		0,26			
770		0,21			
770					
880		0,17			

Anexo 26 - Gerador da figura 4.26

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,21	0,15	110	0,14	0,12
110	0,09	0,12	154	0,11	0,11
110	0,13	0,09	176	0,14	0,07
154	0,11	0,11	220		0,06
176	0,14	0,07	330		0,12
220		0,04	440		0,14
220		0,05			
220		0,11			
330		0,07			
330		0,13			
330		0,18			
440		0,09			
440		0,19			

Anexo 27 - Gerador 4.27

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,01	0,03	110	0,05	0,12
110	0,08	0,16	220	0,06	0,10
110	0,06	0,17	330	0,13	0,17
220	0,07	0,11	440	0,12	0,09
220	0,06	0,12	550	0,07	0,10
220	0,1	0,09	660	0,05	0,14
330	0,19	0,1	770	0,08	0,21
330	0,08	0,07	880	0,12	0,13
330	0,13	0,09	990	0,13	0,12
440	0,11	0,09	1100	0,10	0,07
440	0,11	0,07	1210	0,04	0,12
440	0,14	0,13	1320	0,09	0,13
550	0,11	0,14	1430		0,12
550	0,05	0,15	1540		0,09
550	0,07	0,03	1650		0,14
660	0,04	0,18	1760		0,14
660	0,03	0,22	1870		0,18
660	0,09	0,04			
770	0,11	0,21			
770	0,07	0,21			
770	0,08	0,22			
880	0,09	0,16			
880	0,09	0,15			
880	0,2	0,08			
990	0,17	0,04			
990	0,16	0,16			
990	0,06	0,17			
1100	0,13	0,09			
1100	0,1	0,08			
1100	0,08	0,05			
1210	0,04	0,18			
1210	0,03	0,09			
1254	0,06	0,09			
1320	0,09	0,17			
1320		0,19			
1320		0,03			
1430		0,2			
1430		0,11			
1430		0,07			
1540		0,05			
1540		0,13			
1540		0,09			
1650		0,11			
1650		0,18			
1650					
1760		0,17			
1760		0,11			
1760					
1870		0,08			
1870		0,29			

Anexo 28 - Gerador da figura 4.28

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,02	0,08	110	0,02	0,09
110	0,03	0,07	220	0,05	0,13
110	0,03	0,12	330	0,07	0,06
220	0,02	0,16	440	0,12	0,1
220	0,07	0,09	550	0,1	0,12
220	0,08	0,16	660	0,14	0,14
330	0,11	0,04	770	0,12	0,09
330	0,07	0,07	880	0,105	
330	0,03	0,07			
440	0,18	0,05			
440	0,11	0,11			
440	0,09	0,14			
550	0,06	0,12			
550	0,05	0,17			
550	0,19	0,09			
660	0,06	0,2			
660	0,21	0,13			
660	0,17	0,11			
770	0,08	0,09			
770	0,09				
770	0,19				
880	0,18				
880	0,03				

Anexo 29 - Gerador da figura 4.29

TODOS OS PONTOS			VALORES MÉDIOS		
Lf (mm)	CÔNICA	RACON	Lf (mm)	CÔNICA	RACON
110	0,11	0,16	110	0,09	0,17
110	0,05	0,18	220	0,06	0,08
110	0,12		330	0,13	
220	0,09	0,08	440	0,18	
220	0,07	0,09	550	0,17	
220	0,04		660	0,09	
330	0,08		770	0,09	
330	0,15		836	0,23	
330	0,16				
440	0,18				
440	0,19				
440	0,17				
550	0,21				
550	0,12				
550	0,18				
660	0,09				
660					
660					
770	0,09				
770					
770					
836	0,23				

Anexo 30 - Gerador da figura 4.30