

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**OTIMIZAÇÃO DE VARIÁVEIS DE PROCESSO PARA A FURAÇÃO DO AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO DIN 1.4541**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS ALBERTO SCHUCH BORK

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 1995

OTIMIZAÇÃO DE VARIÁVEIS DE PROCESSO PARA A FURAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO DIN 1.4541.

CARLOS ALBERTO SCHUCH BORK

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO,
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA.

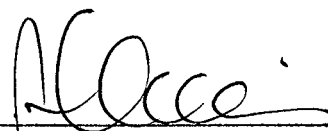


Prof. Dr.- Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador

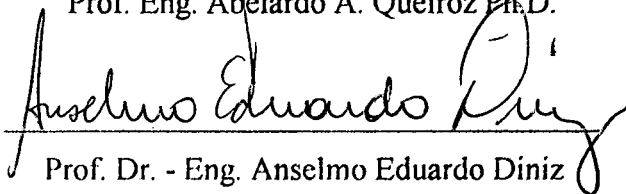


Prof. Dr - Eng. Antônio Fábio Carvalho da Silva
Coordenador do Curso

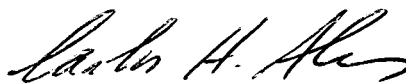
BANCA EXAMINADORA :



Prof. Eng. Abelardo A. Queiroz Ph.D.



Prof. Dr. - Eng. Anselmo Eduardo Diniz



Prof. Dr. - Eng. Carlos Henrique Ahrens

Aos meus Pais
Ruy e Herta

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ruy Bork e Herta Schuch Bork, que sempre me apoiaram e auxiliaram em todos os momentos de minha vida e que, certamente sem eles, não teria chego até o desenvolvimento de um trabalho de mestrado.

Ao Prof. Dr.- Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, por sua amizade, companheirismo, confiança, exemplo humanístico e orientação deste trabalho.

À INB pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

À ETFPeL - Escola Técnica Federal de Pelotas, pela oportunidade e fornecimento das condições necessárias para a realização do mestrado.

Ao Curso de Mecânica - ETFPeL - pelo companheirismo, confiança e préstimo de seus professores e funcionários, possibilitando a liberação para o mestrado.

À CAPES e CNPQ - Programa RHAE - Mecânica de Precisão, pela concessão de bolsas de estudo e recursos que propiciaram o andamento do trabalho.

À Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Mecânica-UFSC- pelo fornecimento de recursos financeiros para a compra de material de estudo.

Aos irmãos inestimáveis, M. Eng. Ricardo Machado Peres e Eng. Jefferson de Oliveira Gomes, pela amizade e dedicação em todas as horas do meu mestrado.

Aos amigos e colegas, Eng. Irapuan dos Santos, Eng. Durval João de Barba Jr. e M. Eng. Rodrigo L. Stoeterau, pelas suas correções e idéais na conclusão do trabalho.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente me auxiliaram e colaboraram de forma decisiva para a execução e conclusão deste trabalho, o meu mais sincero e agradecido obrigado.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	iv
ÍNDICE.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
SIMBOLOGIA.....	xiv
RESUMO.....	xvii
ZUSAMMENFASSUNG.....	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 GENERALIDADES DA FURAÇÃO.....	3
2.2 TIPOS DE FURAÇÕES.....	4
2.2.1 Furação em cheio.....	4
2.2.2 Furação com pré-furo.....	4
2.2.3 Furação escalonada.....	4
2.2.4 Furação de centros.....	4
2.2.5 Trepanação.....	4
2.2.6 Escareamento.....	5
2.3 GRANDEZAS DE CORTE.....	5
2.3.1 Velocidade de corte (v_c).....	6
2.3.2 Avanço (f).....	6
2.3.3 Profundidade de usinagem (ap).....	6

2.3.4	Largura de usinagem (b)	7
2.3.5	Espessura de usinagem (h)	7
2.3.6	Ciclos de furação	7
2.4	FERRAMENTAS EMPREGADAS NA FURAÇÃO	8
2.4.1	Brocas helicoidais	8
2.4.2	Brocas com canais de refrigeração	9
2.4.3	Brocas helicoidais com pastilhas de metal-duro	9
2.4.4	Brocas de centro	10
2.4.5	Brocas-canhão	11
2.4.6	Brocas de insertos reversíveis	11
2.4.7	Brocas helicoidais interiças de metal-duro com duas pontas	12
2.4.8	Brocas ocas	13
2.5	GENERALIDADES SOBRE BROCAS HELICOIDAIS	13
2.5.1	Geometria das brocas helicoidais	13
2.5.2	Ranhuradas helicoidais	14
2.5.3	Gumes principais	14
2.5.4	Gume transversal	15
2.5.5	Guias	16
2.5.6	Ângulos principais em um broca helicoidal	16
2.5.6.1	Ângulo de saída lateral (γ)	16
2.5.6.2	Ângulo de incidência lateral (α)	16
2.5.6.3	Ângulo de ponta (σ)	17
2.5.6.4	Ângulo de hélice (δ)	18
2.5.7	Afiações das brocas	18
2.5.7.1	Tipos de afiações	19
2.5.7.2	Recomendações para a afiação de brocas para a furação de aços inoxidáveis	23
2.5.8	Materiais para brocas helicoidais	24
2.5.8.1	Aço-rápido	24
2.5.8.2	Metal-duro	24
2.5.9	Processos de revestimento para brocas helicoidais	25
2.5.9.1	Processo por Deposição Química de Vapor (CVD)	25
2.5.9.2	Processo por Deposição Física de Vapor (PVD)	26

	2.5.9.3	Características dos revestimentos.....	26
	2.5.9.4	Tipos de revestimentos.....	27
2.6		USINABILIDADE	28
	2.6.1	Particularidades na usinabilidade do aço inoxidável austenítico.....	29
	2.6.2	Forças de usinagem na furação.....	30
	2.6.2.1	Importância das forças de usinagem	30
	2.6.2.2	Decomposição das forças na furação	31
	2.6.2.3	Forças na furação.....	31
	2.6.2.4	Medição das forças.....	33
	2.6.2.5	Influência de parâmetros de entrada sobre a força de usinagem na furação.....	35
	2.6.3	Processo de usinagem com brocas	36
	2.6.3.1	Ação de corte.....	37
	2.6.4	Formação de cavacos.....	38
	2.6.4.1	Influências sobre a formação de cavacos	38
	2.6.4.2	Tipos de cavaco	39
	2.6.4.3	Formas de cavaco	39
	2.6.5	Critério de fim de vida e tipos de desgastes em brocas.....	41
	2.6.5.1	Desgaste de flanco.....	41
	2.6.5.2	Desgaste das guias.....	43
	2.6.5.3	Outras formas de desgastes e avarias	43
	2.6.6	Cálculo da vida das ferramentas.....	45
	2.6.7	Precisão e acabamentos obtidos na furação	47
2.7		FURAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL.....	49
	2.7.1	Introdução.....	49
	2.7.2	Classificação dos aços inoxidáveis	50
	2.7.3	Parâmetros de corte para a furação de aços inoxidáveis.....	50
	2.7.4	Recomendações para o uso de fluido de corte na furação de aços inoxidáveis.....	52
	2.7.5	Recomendações gerais na usinagem do aço inoxidável.....	53
	2.7.5.1	Furação do aço inoxidável.....	54
2.8		MEIOS AUXILIARES.....	55

2.8.1	Fluidos de corte	55
2.8.1.1	Funções.....	55
2.8.1.2	Tipos de fluidos de corte	57
2.8.1.3	Seleção de fluidos de corte.....	57
2.8.1.4	Forma de aplicação dos fluidos.....	59
3.	PROPOSIÇÃO PARA O TRABALHO	61
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM ATUAL	61
3.1.1	Qualidade dos furos (exigência mínima)	62
3.1.2	Ferramentas de corte.....	62
3.1.3	Máquina-ferramenta	63
3.1.4	Fixação do corpo de prova e da ferramenta de corte	63
3.1.5	Fluido de corte.....	63
3.1.6	Condições de corte	63
3.1.7	Metodologia de furação adotada pelo usuário	64
3.2	COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL	64
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	65
3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS NAS DIFERENTES ETAPAS DO TRABALHO	68
3.4.1	Primeira etapa	68
3.4.1.1	Ferramentas de corte	68
3.4.1.2	Condições de corte.....	69
3.4.1.3	Fluido de corte	69
3.4.1.4	Metodologia do ensaio	70
3.4.1.5	Análise dos resultados	70
3.4.2	Segunda etapa	72
3.4.2.1	Ferramentas de corte	72
3.4.2.2	Condições de corte.....	73
3.4.2.3	Fluido de corte	73
3.4.2.4	Metodologia do ensaio	73
3.4.2.5	Análise dos resultados	74
3.4.3	Terceira etapa	81
3.4.3.1	Ferramentas de corte.....	82

2.8.1	Fluidos de corte	55
2.8.1.1	Funções.....	55
2.8.1.2	Tipos de fluidos de corte.....	57
2.8.1.3	Seleção de fluidos de corte.....	57
2.8.1.4	Forma de aplicação dos fluidos.....	59
3.	PROPOSIÇÃO PARA O TRABALHO	61
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM ATUAL.....	61
3.1.1	Qualidade dos furos (exigência mínima).....	62
3.1.2	Ferramentas de corte	62
3.1.3	Máquina-ferramenta.....	63
3.1.4	Fixação do corpo de prova e da ferramenta de corte	63
3.1.5	Fluido de corte.....	63
3.1.6	Condições de corte	63
3.1.7	Metodologia de furação adotada pelo usuário	64
3.2	COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL.....	64
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	65
3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS NAS DIFERENTES ETAPAS DO TRABALHO.....	68
3.4.1	Primeira etapa	68
3.4.1.1	Ferramentas de corte	68
3.4.1.2	Condições de corte	69
3.4.1.3	Fluido de corte.....	69
3.4.1.4	Metodologia do ensaio	70
3.4.1.5	Análise dos resultados.....	70
3.4.2	Segunda etapa	72
3.4.2.1	Ferramentas de corte	72
3.4.2.2	Condições de corte	73
3.4.2.3	Fluido de corte.....	73
3.4.2.4	Metodologia do ensaio	73
3.4.2.5	Análise dos resultados.....	74
3.4.3	Terceira etapa	81
3.4.3.1	Ferramenta de corte.....	82

3.4.3.2	Condições de corte	82
3.4.3.3	Fluido de corte.....	83
3.4.3.4	Metodologia do ensaio	83
3.4.3.5	Análise dos resultados	83
4.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	104
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	106
	BIBLIOGRAFIAS COMPLEMENTARES	109
	ANEXO 1.....	113
	ANEXO 2.....	115
	ANEXO 3.....	120
	ANEXO 4.....	124
	ANEXO 5.....	127

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

2.1	Tipos de furação.....	5
2.2	Largura e espessura de corte na furação	7
2.3	Ciclos de furação contínuo, pica-pau e avanço intermitente	8
2.4	Broca helicoidal	8
2.5	Broca com canais de refrigeração.....	9
2.6	Broca helicoidal com pastilha de metal-duro	10
2.7	Broca de centro [28].....	10
2.8	Broca-canhão para diâmetros de 17 a 60 mm [14]	11
2.9	Broca de insertos reversíveis.....	12
2.10	Broca interiça de metal-duro.....	12
2.11	Broca oca	13
2.12	Nomenclatura das partes da broca helicoidal	13
2.13	Ranhuradas da broca.....	14
2.14	Parte cortante de uma broca.....	14
2.15	Aumento da espessura do núcleo e do gume transversal com a reafiação da broca helicoidal [3].....	15
2.16	Principais ângulos de uma broca.....	16
2.17	Ângulos de ponta das brocas para diversos materiais.....	17
2.18	Brocas com diferentes ângulos de hélice e de ponta	18
2.19	Tipos de afiações.....	22
2.20	Geometria sugerida para brocas de aço-rápido a serem usadas em aço inoxidável	23
2.21	Influência do revestimento na remoção de cavaco	27
2.22	Forças de usinagem [14]	31
2.23	Seção de cavaco para furação em cheio (A) e com pré-furo (B).....	33
2.24	Efeitos piezoelétricos - longitudinal, transversal e cisalhamento.....	34
2.25	Esquema de medição de forças com plataforma piezoelétrica.....	35
2.26	Princípio de corte no gume [5].....	36

2.27	Diversas formas de cavaco obtidas na furação	40
2.28	Parte cortante do gume principal com desgaste V_B e $V_{Bm\acute{a}x}$	42
2.29	Desgaste de flanco	42
2.30	Desgaste das guias	43
2.31	Colapso total da broca (destruição da ponta)	43
2.32	Arredondamento da quina: A) desgaste menor que a largura da quina B) desgaste maior que a largura da quina.....	44
2.33	Desgaste de cratera em uma broca	45
2.34	Lascamentos no gume principal da broca	45
2.35	Principais erros na geometria do furo	48

CAPÍTULO 3

3.1	Forma típica de uma placa separadora de tubos do elemento combustível	61
3.2	Broca helicoidal - Afiaco tipo N	62
3.3	Corpo de prova.....	67
3.4	Forma do desgaste de flanco no gume de corte da broca	74
3.5	Desgaste de flanco $V_{Bm\acute{a}x}$ em função do comprimento usinado	75
3.6	Elementos de liga da superfie da broca de HSS com revestimento TiN A) Broca nova B) Depois de 2500 mm (100 furos) de comprimento usinado	76
3.7	Força de avanço em função do comprimento usinado	78
3.8	Momento torsor em função do comprimento usinado	79
3.9	Vista frontal da afiaco em cruz - $\sigma = 135^\circ$	82
3.10	Desgaste de flanco $V_{Bm\acute{a}x}$ com $p = 0,5$ mm, variando a velocidade de corte e o avanço	85
3.11	Desgaste de flanco $V_{Bm\acute{a}x}$ com $p = 1,0$ mm, variando a velocidade de corte e o avanço	86
3.12	Desgaste de flanco $V_{Bm\acute{a}x}$ com $p = 1,5$ mm, variando a velocidade de corte e o avanço.....	87
3.13	Desgaste de flanco $V_{Bm\acute{a}x}$ com $v_c = 15$ m/min, variando o avanço e o avanço intermitente.....	88

3.14	Desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$ com $v_c = 18$ m/min, variando o avanço e o avanço intermitente	89
3.15	Desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$ com $v_c = 20$ m/min, variando o avanço e o avanço intermitente	90
3.16	Desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$ com $f = 0,1$ mm/rot, variando o avanço intermitente e a velocidade de corte	91
3.17	Desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$ com $f = 0,125$ mm/rot, variando o avanço intermitente e a velocidade de corte	92
3.18	Desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$ com $f = 0,15$ mm/rot, variando o avanço intermitente e a velocidade de corte	93
3.19	Curvas de vida da ferramenta.....	94
3.20	Curva de força de avanço adquirida com o auxílio do programa SADA	97
3.21	Comportamento da força de avanço variando “ v_c ” e “ p ”	98
3.22	Comportamento da força de avanço variando “ f ” e “ v_c ”	100
3.23	Comportamento da força de avanço variando “ p ” e “ f ”	101

ANEXO 2

4.0	Dimensões e ângulos das brocas.....	119
-----	-------------------------------------	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

2.1	Tabela de ângulos principais de uma broca helicoidal com afiação em cruz	23
2.2	Parâmetros de furação recomendados para aços inoxidáveis [31]	51
2.3	Parâmetros de usinagem recomendados para a furação com broca-canhão [31].....	51
2.4	Parâmetros de usinagem recomendados para a furação com brocas helicoidais [31].....	52
2.5	Parâmetros de usinagem recomendados para a furação com brocas curtas [31].....	52

CAPÍTULO 3

3.1	Dimensões e ângulos das brocas utilizadas pela INB	62
3.2	Parâmetros de corte utilizado pelo usuário	63
3.3	Composição química dos materiais do ensaio	66
3.4	Parâmetros de corte.....	69
3.5	Dimensões e erros de forma com furação de centro prévia.....	70
3.6	Dimensões e erros de forma sem furação de centro prévia	71
3.7	Parâmetros de corte constantes	73
3.8	Elementos de liga na superfície da broca antes e depois da usinagem	77
3.9	Tolerância dimensional e erros de forma dos furos	80
3.10	Valores de parâmetros de corte para o ensaio de otimização	82
3.11	Ordem das combinações de parâmetros.....	83
3.12	Comprimento usinado em cada combinação de parâmetros de corte	84
3.13	Equação de Taylor	95
3.14	Combinação de parâmetros que foram atingidos no máximo 3 furos	95
3.15	Tempos teóricos para a execução de um furo [min].....	96
3.16	Tempo real para a execução de um furo [min].....	96
3.17	Tolerâncias dimensionais e erros de forma para cada combinação de parâmetros.....	102

SIMBOLOGIA

ap	mm	Profundidade de corte
b	mm	Largura de usinagem
d	mm	Diâmetro do pré-furo
dn	mm	Diâmetro do núcleo da broca
d ₁	mm	Diâmetro da ponta da broca de centro
d ₂	mm	Diâmetro total da broca de centro
d ₃	mm	Diâmetro da parte cônica da broca de centro
f	mm/rot	Avanço por rotação
h	mm	Espessura de usinagem
kc	N/mm	Força específica de corte referente a uma seção de corte qualquer
kf	N/mm	Força específica de avanço referente a uma seção de corte qualquer
kc _{1,1}	N/mm	Força específica de corte referente a uma seção de corte de 1x1 mm
kf _{1,1}	N/mm	Força específica de avanço referente a uma seção de corte de 1x1 mm
kM	mm	Distância do gume ao centro da cratera
l ₁	mm	Comprimento total da broca
l ₂	mm	Comprimento da ponta da broca de centro
p	mm	Ciclo com avanço intermitente
pi	mm	Profundidade do ciclo pica-pau / avanço intermitente
pt	mm	Profundidade total
r	mm	Afastamento do ponto de atuação da força de corte do centro da broca
v _c	m/min	Velocidade de corte
x ₁	mm	Distância da marca de referência "A" à marca de desgaste V _B
x ₂	mm	Distância da marca de referência "A" à posição original do gume
AR		Aço-rápido
At	mm	Comprimento do gume transversal
Ag _x	mm	Altura da guia
Ax _a	mm	Comprimento do gume "a"
Ax _b	mm	Comprimento do gume "b"
Aα _x	graus	Ângulo entre os gumes transversal e secundário
CNC		Controle Numérico Computadorizado

D	mm	Diâmetro da broca
EP		Extrema pressão
F	N	Força de usinagem
F _c	N	Força de corte
F _f	N	Força de avanço
F _p	N	Força passiva
F _r	N	Força normal ao gume principal
F _l	N	Força normal de cisalhamento
H	mm	Comprimento médio do desgaste das guias
HB		Dureza brinell
HM		Metal-duro
HV		Dureza vickers
HSS		Aço-rápido
H _{xx}		Posição do campo de tolerância e qualidade do furo
K _b	mm	Distância entre a posição original do gume e a borda da cratera do lado oposto ao gume
L	mm	Vida da broca
L _{g_x}	mm	Largura da guia
M _t	N.mm	Momento torsor
P _m	mm	Largura dos lascamentos do gume
P _t	mm	Profundidade dos lascamentos do gume
Q	V	Carga elétrica
T	min	Vida da broca
TiC		Carboneto de titânio
TiN		Nitreto de titânio
TiCN		Carbonitreto de titânio
V _B	mm	Largura média do desgaste do flanco
V _{Bmáx}	mm	Largura máxima do desgaste do flanco
W	mm	Largura da marca de desgaste
α _e	graus	Ângulo de incidência lateral efetivo
α	graus	Ângulo de incidência lateral
β	graus	Ângulo de cunha

χ	graus	Ângulo de posição
δ	graus	Ângulo de hélice
ε	graus	Ângulo de quina
γ_e	graus	Ângulo de saída lateral efetivo
γ	graus	Ângulo de saída lateral
η	graus	Ângulo da direção efetiva de corte
σ	graus	Ângulo de ponta
ψ	graus	Ângulo do gume transversal
ψ_x	graus	Ângulo entre o gume de corte “a” e “b”
(1-mc)		Expoente para o cálculo da força de corte

RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de conhecer e desenvolver a tecnologia do processo de furação, otimizando a afiação da ponta e parâmetros de corte do par ferramenta/material de corte, para a usinagem do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541. Para isto, estudou-se profundamente o processo de furação, materiais e tipos de ferramentas, parâmetros de corte, lubrificação e suas características, forças que envolvem o corte na furação, formas de cavacos, etc., colhendo dados importantes para a otimização do processo.

Na primeira etapa de estudo, analisou-se a metodologia utilizada por um fabricante nacional (INB) para o corte do aço DIN 1.4541. De posse destes dados, estudou-se a influência do ciclo pica-pau recomendado por literatura técnica, comparando-o com o ciclo utilizado pela INB, bem como a possibilidade de não utilizar a furação de centro no processo.

Na segunda etapa, verificou-se a influência da variação da afiação da ponta das brocas helicoidais, em relação à vida da ferramenta. Adquiriu-se dados com relação a desgastes, forças de usinagem e erros de forma ao longo do comprimento usinado pela ferramenta, mantendo-se as outras variáveis constantes. Com esta análise, pôde-se chegar à melhor afiação de ponta de brocas helicoidais, em função de exigências mínimas de comprimentos de furação e qualidade dos furos produzidos.

Na terceira etapa, estudou-se a influência da variação de parâmetros de corte com relação ao desgaste de flanco da ferramenta, forças de corte e erros de forma, considerando-se também limites mínimos exigidos com relação ao comprimento usinado e à qualidade dos furos. Nesta etapa calculou-se a equação de Taylor para a vida da ferramenta (broca helicoidal, afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$), para o corte do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541.

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war die Technologie des verfahrens "Bohren mit Wendelbohrern" auf die Bearbeitung des rostfreien Stahles DIN 1.4541 anzupassen und in Bezug auf die Bohrspitzenanschliffsform, Werkzeugstoff, Werkzeugform, Werkstückstoff, Kühlschmierstoff, Einstellparametern und das Bebearbeitungsergebnis zu optimieren.

In der ersten Phase dieser Arbeit, wurden die von einem Anwender eingesetzten Schnittdaten untersucht, und mit denen der bei Werkzeughersteller und in der Literatur angegebenen Werte verglichen. Überwiegend wurden hier die Bohrzyklen und die Notwendigkeit der Zentrierbohrung in Betracht genommen.

In der zweiten Phase wurde der Einfluss der Bohreranschliffform auf das Bearbeitungsergebnis untersucht.

In der dritten Phase wurden die Zerspanbarkeitsuntersuchungen für die optimierte Bohreranschliffform auf die Variation der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubes sowie der Vorschubunterbrechung erweitert.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A furação é um dos processos mais comuns no trabalho de metais e, provavelmente, uma das primeiras operações de usinagem executadas na história [1, 2, 3, 4].

Para execução de furos, a ferramenta até hoje mais utilizada é a broca helicoidal, devido principalmente à sua aplicação universal. Além disso, apresenta diversas possibilidades de variação na forma construtiva, a um preço relativamente baixo, com reafiação econômica das brocas desgastadas e possibilidade de grandes relações entre profundidade do furo e diâmetro da broca (L/D até 45) [5]. As brocas helicoidais, ao contrário da maioria das ferramentas e máquinas-ferramentas, cujo progresso nos últimos 150 anos foi considerável, não sofreram muitas alterações desde o seu surgimento, por volta de 1820, até os dias atuais [6]. A broca "standard" helicoidal, com afiação de duplo tronco de cone e gume transversal reto, originalmente desenhada no ano de 1870, é ainda o tipo mais utilizado de broca. Assim mesmo, ao longo dos anos ocorreram inovações no projeto de brocas helicoidais, como a otimização da afiação da ponta, a introdução de canais de lubrificação e a melhoria na qualidade dos materiais utilizados na sua fabricação, sendo significativo o advento das brocas de metal-duro e revestidas [7].

Apesar dos esforços para melhorar o rendimento da operação de furação, as brocas helicoidais constituem normalmente o gargalo das operações de usinagem; freqüentemente o tempo de circulação de uma peça numa fabricação em série é limitado pela furação. Também porque nesse processo ainda se trabalha primordialmente com ferramentas de aço-rápido, revestidas e não revestidas.

Uma das possibilidades para melhorar o rendimento da furação é a modificação da geometria da broca [6]. Um dos fatores que mais afetam o desempenho deste tipo de ferramenta é a forma da ponta da mesma. A ponta de uma broca é a sua parte mais crítica e pequenas variações em sua geometria ou simetria podem ter forte influência no seu desempenho [1].

Muitas variações na geometria da broca foram propostas com vistas a reduzir as forças de usinagem e aumentar a vida da ferramenta. Um fator de influência no desempenho da broca é a espessura do seu núcleo. Com o aumento na espessura desse, ocorre um aumento no gume

transversal e aumenta, conseqüentemente, a parcela de remoção por extrusão, resultando maiores forças de avanço [1].

A remoção de cavacos é outro problema nas brocas helicoidais convencionais. Os cavacos em forma espiral-cônica tendem a se tornar muito longos antes de quebrarem. Assim, enrolam-se em volta da broca ou dos acessórios da máquina, prejudicando a operação e tornando-a até perigosa. Para diminuir este problema, pode-se interromper a operação de furação para a remoção dos cavacos (ciclo pica-pau e avanço intermitente).

Atualmente, a tendência de desenvolvimento do processo de furação é direcionada, como nos outros processos de fabricação, a um aumento na produtividade e à extensão da automação. Para isto, são necessários ensaios sistemáticos com novas geometrias de brocas e com novos materiais de ferramenta e revestimentos, de modo a conhecer os limites tecnológicos do processo.

No estudo desse processo, a INB (Indústrias Nucleares do Brasil) firmou convênio com o LMP (Laboratório de Mecânica de Precisão - UFSC) para produzir tecnologia de usinagem no processo de furação, para o corte do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541, material de difícil usinagem. Para tanto, foi estudado o processo utilizado pela INB para a furação do aço inoxidável austenítico. Neste estudo, colheram-se dados sobre tipos e materiais de ferramentas utilizados, características do material de corte, condições de usinagem, fluidos de corte, ou seja, informações que possibilitassem a obtenção de conhecimentos sobre a usinagem do aço inoxidável DIN 1.4541. Otimizaram-se a afiação da ponta da broca helicoidal e os parâmetros de corte, aumentando a produtividade, em relação à geometria anteriormente utilizada pela INB, garantindo a qualidade dos furos. Com a nova afiação de ponta, foram verificadas as forças de usinagem, erros de forma (circularidade e cilindridade) e tolerância dimensional dos furos usinados, comparando-os com as exigências estabelecidas pela INB.

Teve-se como objetivo principal neste trabalho, modificar a afiação da ponta das brocas utilizadas pela INB, e com isto, assegurar a qualidade dos furos produzidos e aumentar, no mínimo três vezes a produção de furos.

Com isto, produziu-se conhecimentos amplos a respeito do corte do aço inoxidável austenítico, possibilitando determinar suas limitações e possíveis otimizações no processo de corte, fornecendo dados que possibilitaram um aumento de produtividade em cerca de 200 % com relação ao processo anterior, somente modificando a afiação da ponta da ferramenta e parâmetros de corte.

Com este passo inicial da pesquisa sobre o processo de furação realizado pelo LMP, a INB espera tornar-se competitiva no mercado internacional, investindo em tecnologia de usinagem de seus materiais.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 GENERALIDADES DE FURAÇÃO

Por definição, na usinagem com ferramentas de corte de geometria definida, a **furação** é um processo mecânico destinado à obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, com auxílio de uma ferramenta multicortante. Para tanto, a ferramenta ou peça possui um movimento rotativo principal, aliado à um movimento de avanço no sentido do eixo de rotação, seguindo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina-ferramenta [3, 6, 8, 9].

A furação com brocas é uma operação de desbaste, sendo necessárias, às vezes, operações subseqüentes para dar ao furo características operacionais, tais como maior precisão dimensional, maior precisão de forma e alinhamento e melhor acabamento superficial [6].

Como particularidades do processo de furação tem-se que:

- A velocidade de corte varia de um máximo na periferia até zero no centro da ferramenta, variando os esforços ao longo das parcelas do gume principal e os mecanismos formadores de cavacos;
- O transporte de cavacos para fora e a entrada de fluido de corte na região de trabalho são difíceis;
- Com o aumento da profundidade do furo tem-se um aumento pronunciado do atrito das guias da ferramenta contra a parede do furo [10];
- A distribuição de calor não é adequada na região de corte [8];
- A quina da broca com canto vivo é muito susceptível ao desgaste [8].

2.2 TIPOS DE FURAÇÕES

2.2.1 Furação em cheio

A furação em cheio é um processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça, removendo todo o material compreendido no volume final na forma de cavaco. No caso de furos profundos há a necessidade de ferramentas especiais (fig. 2.1 A e E) [11].

2.2.2 Furação com pré-furo

A furação com pré-furo é um processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça, removendo o volume de material entre a parte compreendida entre o furo já existente e o diâmetro da broca, na forma de cavaco (fig. 2.1 B) [11].

2.2.3 Furação escalonada

A furação escalonada é um processo de furação destinado à obtenção de um furo com dois ou mais diâmetros diferentes (fig. 2.1 C) [11].

2.2.4 Furação de centros

A furação de centros é um processo de furação destinado à obtenção de furos de centro. Este furo de centro visa a uma operação posterior na peça ou como encaixe para a fixação do ponto, bem como servir de guia da ferramenta de furar na operação posterior (fig. 2.1 D) [11].

2.2.5 Trepanação

A trepanação é um processo de furação em que apenas parte do material compreendido no volume final é retirado, permanecendo um núcleo maciço (fig 2.1 F) [11]. Este núcleo maciço pode ser aproveitado como matéria-prima para a fabricação de uma peça qualquer.

2.2.6 Escareamento

O escareamento é um processo de furação destinado à remoção de rebarbas ou confecção de um chanfro em furos cilíndricos [11].

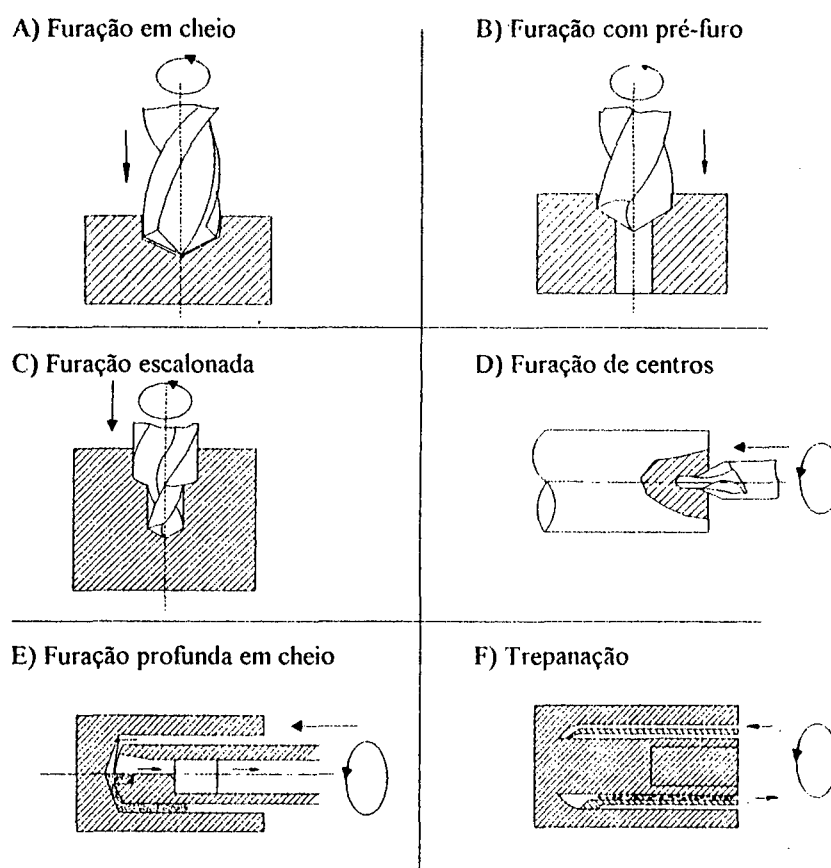


Figura 2.1. - Tipos de Furação.

2.3 GRANDEZAS DE CORTE

As grandezas de corte são aquelas que devem ser ajustadas na máquina direta ou indiretamente, para ocorrer a usinagem, com posterior formação e retirada do cavaco.

2.3.1 Velocidade de corte (v_c)

A velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea no ponto de referência do gume cortante, segundo uma direção e sentido de corte [32]. A velocidade de corte está relacionada diretamente com o diâmetro do furo e com a rotação da ferramenta. Mantém uma dependência direta com a vida da ferramenta, material a ser usinado, tempo de usinagem, acabamento superficial e a potência consumida pela máquina-ferramenta. Em velocidades de corte elevadas, a geração de calor é demasiada, fazendo com que a temperatura do gume de corte ultrapasse a permitida pelo material da ferramenta, ocasionando uma perda da capacidade de corte do gume. Em velocidades muito baixas, a ponta da broca pode quebrar, devido a instabilidade do processo de corte [12].

2.3.2 Avanço (f)

O avanço (f) é o percurso linear em cada rotação, numa direção paralela ou coincidente com o eixo do furo [11]. Com a elevação da velocidade de avanço são obtidos cavacos de maior espessura. Ocorre aumento da deformação além do limite de resistência, provocando sua ruptura e diminuindo a possibilidade de um enrolamento sobre os canais da broca. Contudo, o avanço é limitado pela resistência estrutural da ferramenta e pela capacidade da máquina-ferramenta. É necessário, portanto, que se faça um estudo prévio sobre o avanço a ser utilizado, pois com avanços demasiadamente elevados temos uma maior probabilidade de ruptura do gume e do corpo da broca. Para avanços pequenos a ferramenta "patina" e vibra, aumentando a geração de calor [13].

2.3.3 Profundidade de usinagem (a_p)

A profundidade de usinagem (a_p) é a profundidade de penetração do gume principal, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho (Fig 2.2). Na furação em cheio, corresponde à metade do diâmetro da broca ($a_p = D/2$) [11]. Com relação à profundidade de corte (p_t), os furos classificam-se em [28]:

- a) Curtos - $p_t \leq 3 \times D$
- b) Profundos - $p_t \geq 3 \times D$

2.3.4 Largura de usinagem (b)

A largura de usinagem (b) é a largura de cavaco a ser retirado, medido na superfície de corte, segundo a direção normal à direção de corte (fig. 2.2). É medida na intersecção da superfície de corte com o plano normal à velocidade de corte, passando pelo ponto de referência do gume [11].

2.3.5 Espessura de usinagem (h)

A espessura de usinagem (h) é a espessura do cavaco a ser retirado, mensurada normalmente na superfície de corte (Fig. 2.2) [11].

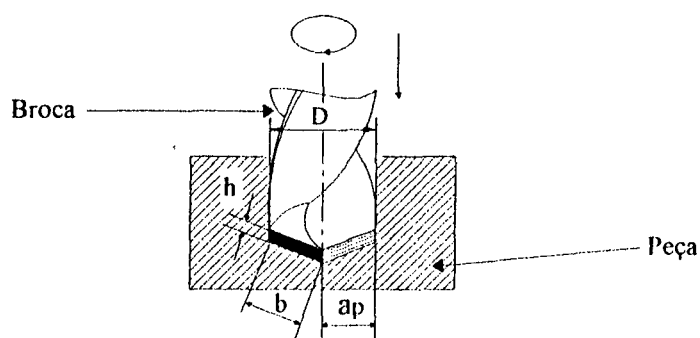


Figura 2.2 - Largura e espessura de corte na furação.

2.3.6 Ciclos de furação

Existem três tipos de ciclos de furação: ciclo contínuo, pica-pau e avanço intermitente.

a) Ciclo contínuo: Neste ciclo a ferramenta avança com velocidade de avanço constante do começo ao fim do comprimento do furo (Fig. 2.3).

b) Ciclo pica-pau: No ciclo pica-pau a profundidade de furação é subdividida em trechos (p_i), menores que o comprimento total do furo. A ferramenta avança por um valor p_i , retorna à posição inicial em avanço rápido (G00), penetra no furo até a profundidade ($p_i + p_{i+1}$) e retorna à posição inicial, repetindo este ciclo o número de vezes necessário para atingir a profundidade total do furo (Fig 2.3). Para profundidades totais até $10 \times D$, a literatura sugere um ciclo pica-pau com profundidades (p_i) igual a $5 \times D$, $3 \times D$, $1 \times D$ e $1 \times D$ e para profundidades até $3 \times D$, recomenda a

seqüência de $1 \times D$, $1 \times D$ e $1 \times D$ [14]. Normalmente, as máquinas-ferramenta CNC possuem sub-rotinas com este tipo de ciclo de usinagem integrado no comando.

c) Ciclo com avanço intermitente* (p): Neste ciclo, a profundidade de furação é subdividida em trechos (p_i), sendo estes menores que o comprimento total do furo. A ferramenta avança por um valor (p_i), pára, avançando novamente o valor pré-estabelecido, até completar toda a profundidade desejada (Fig. 2.3). É usado em materiais de baixa usinabilidade como os aços inoxidáveis, para facilitar a quebra dos cavacos e dissipação do calor.

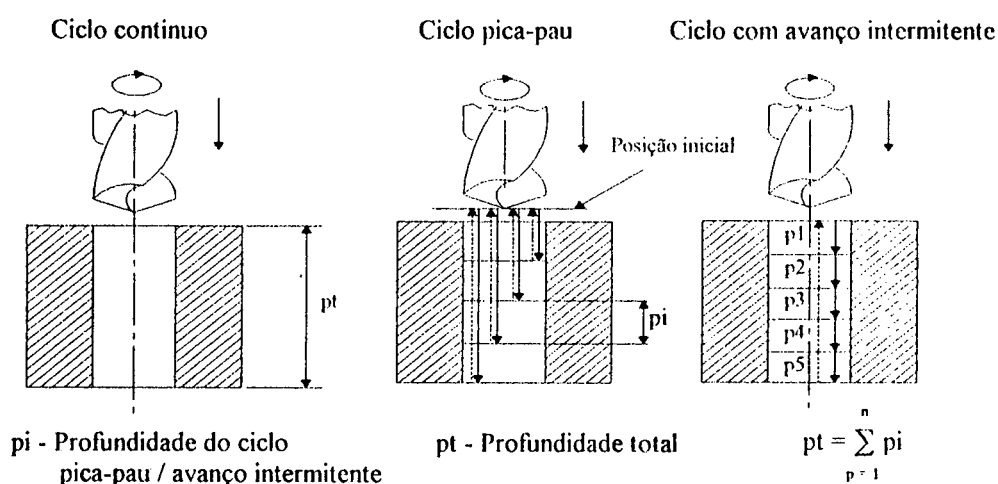


Figura 2.3 - Ciclos de furação contínuo, pica-pau e avanço intermitente.

2.4 FERRAMENTAS EMPREGADAS NA FURAÇÃO

2.4.1 Brocas helicoidais

A ferramenta mais empregada para a produção de furos cilíndricos é a broca helicoidal (fig. 2.4), sendo que cerca de 20% das máquinas-ferramentas existentes são furadeiras. As brocas helicoidais são projetadas para furação em cheio e para peças com pré-furos. São classificadas de acordo com o tipo de material do qual são fabricadas, forma da haste, número de canais, sentido de corte, comprimento, diâmetro e a afiação da ponta [8, 10].

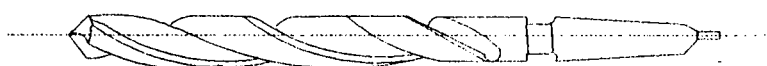


Figura 2.4 - Broca helicoidal

* No transcórrer deste trabalho, a letra "p" identificará a utilização do ciclo com avanço intermitente e seu referido valor.

2.4.2 Brocas com canais de refrigeração

As brocas com canais de refrigeração (Fig. 2.5) são usadas especialmente para furação profunda, em que se faz necessária a construção de canais de injeção do fluido de corte no núcleo da broca, que desembocam nos flancos da broca. Estes canais levam o fluido de corte até próximo aos gumes, refrigerando-os, ao mesmo tempo em que os cavacos são arrastados pelo fluido no seu retorno pelas ranhuras helicoidais [6, 9].

A entrada do fluido sob pressão pode se dar axialmente, quando a broca permanece parada e a peça gira, como acontece na furação em tornos revólver. No caso da broca girar, o fluido atravessa pela ranhura feita na haste, através de um dispositivo com duas gaxetas de vedação (Fig. 2.5) [6].

Os canais de refrigeração são geralmente construídos colocando-se tubos de cobre ou de aço em canais previamente fresados na broca [6], ou executados diretamente no corpo da broca.

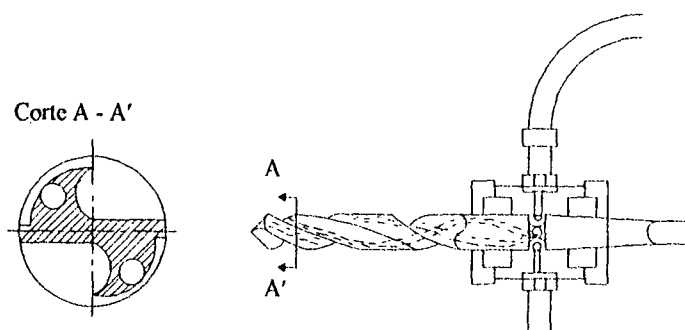


Figura 2.5 - Broca com canais de refrigeração.

2.4.3 Brocas helicoidais com pastilhas de metal-duro

As brocas helicoidais com pastilhas de metal-duro são utilizadas na execução de furos em materiais abrasivos como concreto, cerâmica e não metálicos, ferro fundidos duros, etc. (fig. 2.6). Na usinagem de aços são normalmente empregadas em tipos de difícil usinabilidade, quando a vida das brocas de aço-rápido se torna pequena [9].

A condição para uso destas brocas é o emprego de furadeiras de alta potência, grande rigidez e elevada rotação e condições de corte, com velocidade de corte duas a três vezes maior que a recomendada para brocas de HSS [9].

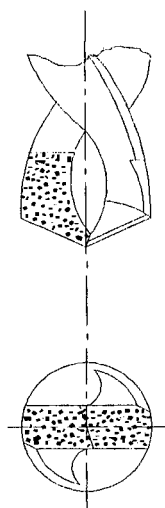


Figura 2.6 - Broca helicoidal com pastilha de metal-duro.

2.4.4 Brocas de centro

As brocas de centro são usadas para marcação de centro de furos, especialmente em peças que deverão ser usinadas entre pontas (fig. 2.7). As brocas são padronizadas segundo as normas DIN 320 e DIN 333 A ou B [14]. Trata-se, na realidade, de ferramentas de furar e escarear. Para melhor aproveitamento do material, estas brocas em geral são duplas, isto é, preparadas para serem usadas nos dois extremos [9].

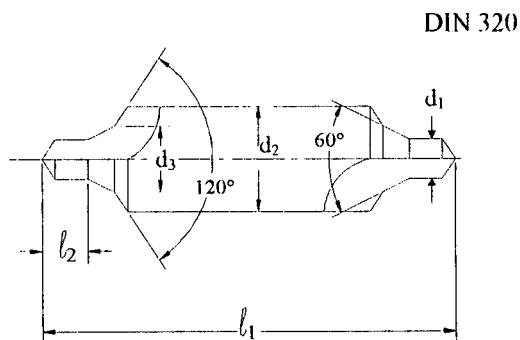


Figura 2.7 - Broca de centro [28].

2.4.5 Brocas-canhão

As brocas-canhão são usadas para furação profunda nos diâmetros de 3 a 60 mm. A furação é feita com a peça girando e a broca parada, ou ainda, com a broca girando em sentido contrário à peça. Estas brocas são guiadas com muita precisão pelo próprio furo, e apresentam apenas um gume sobre a metade do diâmetro. A lubrificação é feita por fluido de corte sob alta pressão ($> 30 \text{ Kgf/cm}^2$), através dos furos que saem no flanco e arrastam os cavacos no seu retorno pela ranhura da broca (fig. 2.8) [6].

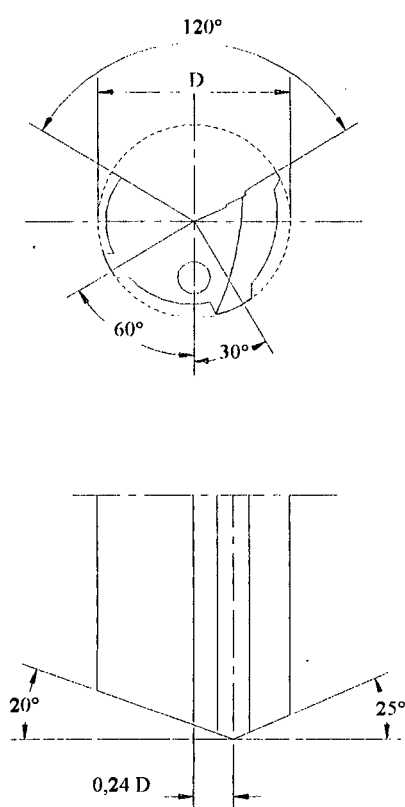


Figura 2.8 - Broca-canhão para diâmetros de 17 a 60 mm [14].

2.4.6 Brocas de insertos reversíveis

As brocas de insertos reversíveis são utilizadas para furação curta e possuem entre outras características de projeto, a eliminação do gume transversal devido ao posicionamento dos gumes, o que permite um corte até o eixo da ferramenta e a simples troca de insertos em lugar de operações de reafiação, quando é alcançado o máximo desgaste admissível (fig. 2.9) [9].

Em relação às brocas helicoidais, é possível alcançar-se velocidades de corte significativamente mais altas. Devido à maior resistência a quente e ao menor desgaste dos insertos, são alcançadas vidas úteis mais longas e um resultado de operação mais homogêneo [6, 9, 10].

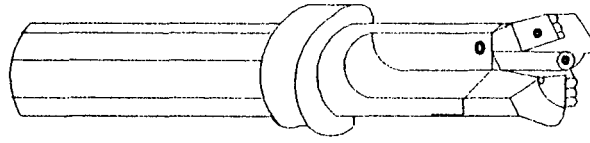


Figura 2.9 - Broca de insertos reversíveis.

2.4.7 Brocas helicoidais inteiriças de metal-duro com duas pontas

A broca helicoidal inteiriça de metal-duro com duas pontas tem como característica principal a presença de dois gumes de corte transversais positivos, resultando em pontas duplas. Essas pontas duplas são responsáveis pela melhor centragem, tendo menor possibilidade de escape, eliminando portanto a utilização de buchas de guia (fig. 2.10).

Esta geometria é responsável pela produção de cavacos estreitos e mais fragmentados, facilitando o seu transporte, diminuindo os ciclos e o tempo de usinagem e provocando um desgaste menor da ferramenta. Todas essas características são adaptadas para máquinas CNC de elevada potência e rigidez, com apurada precisão de giro [15].

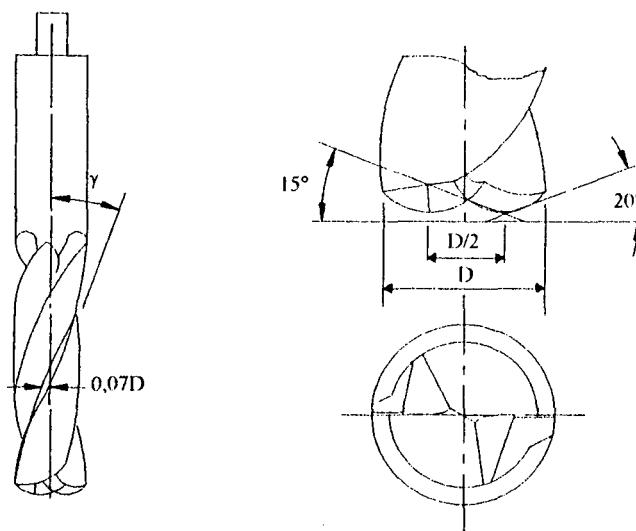


Figura 2.10 - Broca inteiriça de metal-duro.

2.4.8 Brocas ocas

As brocas ocas são utilizadas em diâmetros acima de 60 mm para operações de trepanação. Nessas brocas reduz-se o trabalho de produção de cavacos e tem-se ainda como resultado um núcleo aproveitável. A broca oca se compõe de duas partes: um cabeçote composto de 2 a 16 gumes de larguras variáveis, para produzir cavacos miúdos, fáceis de serem removidos pelo fluido de corte e uma haste composta de um tubo retificado de comprimento adequado (fig. 2.11).

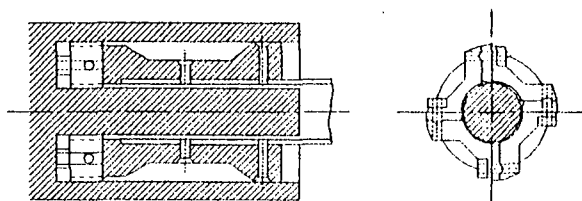


Figura 2.11 - Broca oca.

2.5 GENERALIDADES SOBRE BROCAS HELICOIDAIS

2.5.1 Geometria das brocas helicoidais

As brocas helicoidais são as mais utilizadas na execução de furos, sendo que suas partes são definidas pela norma DIN 1412 (fig. 2.12) [13].

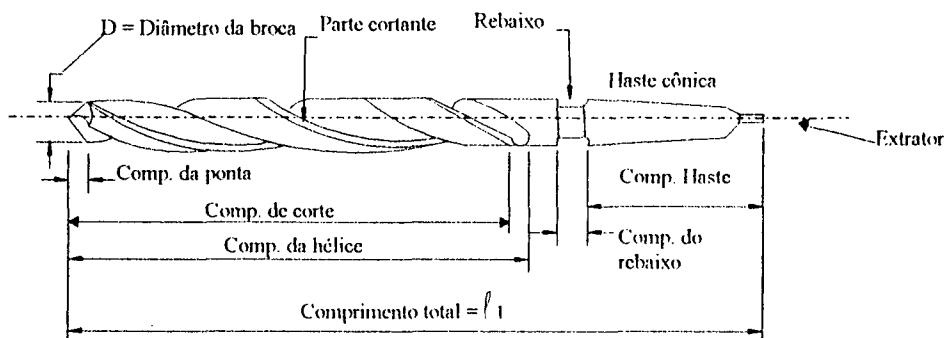


Figura 2.12 - Nomenclatura das partes da broca helicoidal.

2.5.2 Ranhuras helicoidais

As ranhuras helicoidais são canais executados nas brocas destinados a criar espaço para remoção de cavacos (fig. 2.13) [9].

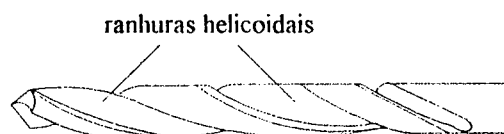


Figura 2.13 - Ranhuras da broca.

2.5.3 Gumes principais

O gume principal por definição é a parcela do gume que está localizada na parte da ferramenta que aponta no sentido de corte. Na broca ele é composto pelas parcelas cortantes e pelo gume transversal (Fig. 2.14). Os ângulos são definidos pela norma ABNT NBR - 6163, sendo de particular importância os ângulos medidos no plano de trabalho e no plano ortogonal [6, 9].

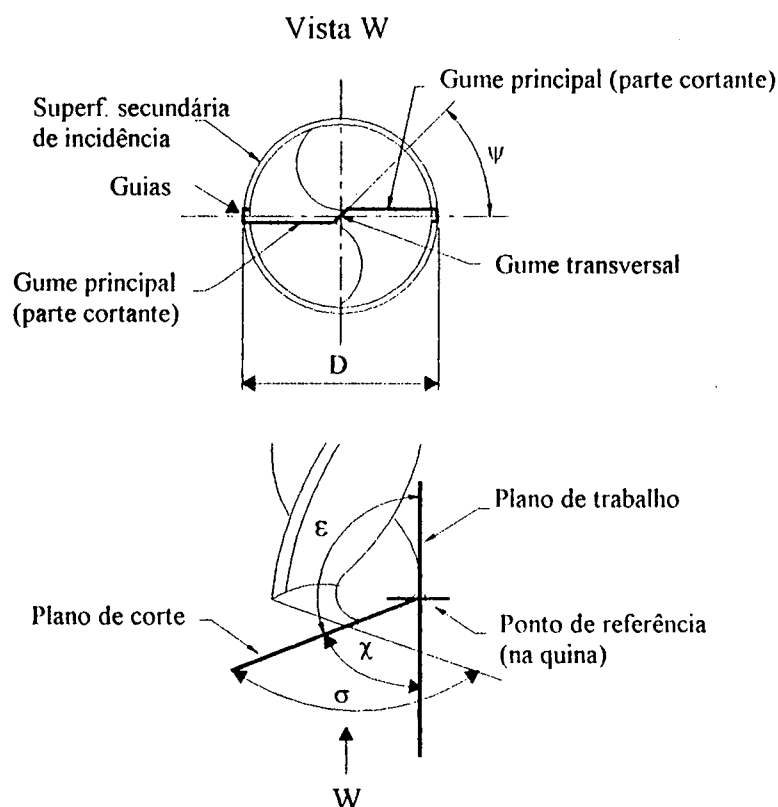


Figura 2.14 - Parte cortante de uma broca.

2.5.4 Gume transversal

O gume transversal (fig. 2.15) está situado na ponta da broca e liga as duas partes cortantes do gume principal. Seu comprimento está relacionado ao diâmetro do núcleo da broca (d_n) e corresponde à distância, vista de frente, entre os gumes principais [14]. Seus valores, geralmente são:

$d_n (0,12-0,20)$: diâmetros > 10 mm

$d_n (0,20-0,30)$: diâmetros < 10 mm

Em decorrência do ângulo de saída negativo e da velocidade de corte muito baixa, este gume não apresenta ação de corte eficiente, sendo responsável por metade da força axial necessária à furação com brocas helicoidais "standard" e por até 75% da força necessária, quando a broca possui o núcleo reforçado [7]. Por isto, deve ser mantido tão pequeno quanto possível. A maioria das brocas é fabricada com diâmetro de núcleo crescente na direção da haste (fig. 2.15).

Assim, uma reafiação da broca desgastada aumenta o comprimento do gume transversal, resultando num aumento das forças axiais, uma geração de calor adicional e uma diminuição da vida útil da ferramenta, após a reafiação. Para reduzir o atrito no furo, as brocas são retificadas no diâmetro externo com uma leve conicidade, diminuindo o seu diâmetro da ponta em direção à haste entre 0,02 e 0,08 mm a cada 100 mm de comprimento [3]. O núcleo confere a maior parte da rigidez necessária para a broca.

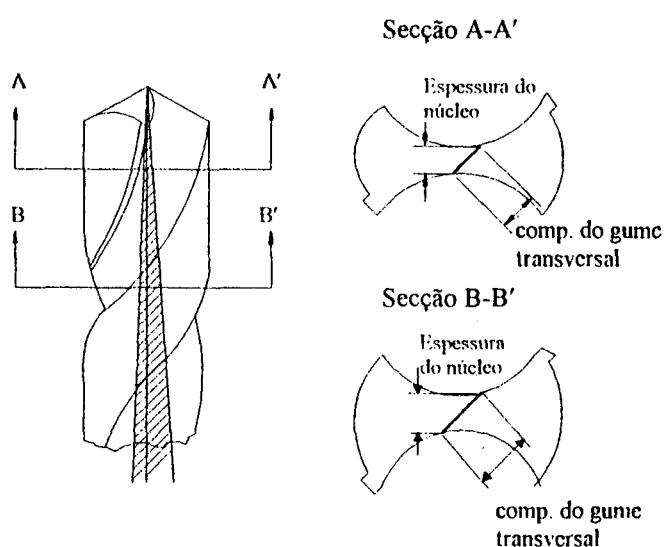


Figura 2.15 - Aumento da espessura do núcleo e do gume transversal com a reafiação da broca helicoidal [3].

2.5.5 Guias

As guias têm como função reduzir o atrito da ferramenta com as paredes do furo e direcionar o trabalho da broca (Fig 2.14) [9].

2.5.6 Ângulos principais em uma broca helicoidal

2.5.6.1 Ângulo de saída lateral (γ)

Este ângulo varia desde um valor negativo no centro da broca, a um valor igual ao ângulo de hélice na periferia (fig. 2.16), o que produz diferentes condições de remoção de cavacos ao longo do gume [9]. É importante ressaltar que ângulos de saída lateral negativos e velocidades de corte muito baixas na parte central da broca diminuem a ação de corte, levando à extrusão lateral do material [13].

2.5.6.2 Ângulo de incidência lateral (α)

O ângulo de incidência é obtido pelo rebaixamento da superfície de incidência (fig. 2.16). Um ângulo de incidência lateral grande evita o esmagamento do material pelo flanco da broca e, se o valor do ângulo for excessivo, ocorre uma perda de resistência da cunha da ferramenta [13].

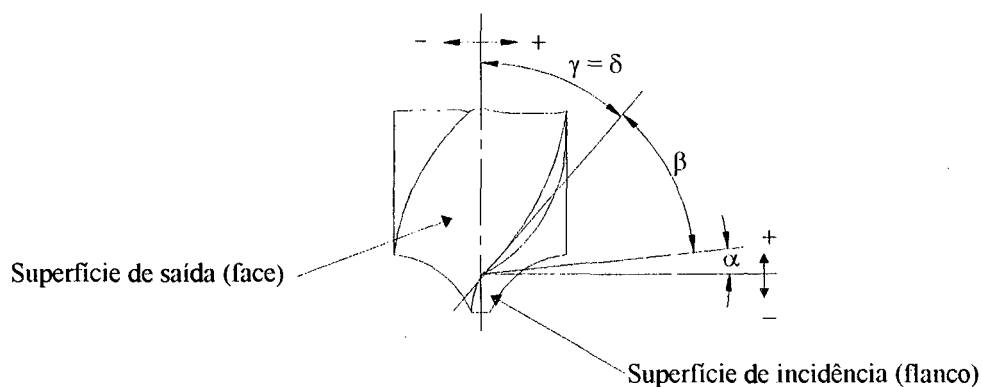


Figura 2.16 - Principais ângulos de uma broca.

Para materiais normais é recomendado um ângulo de incidência lateral de 12 a 15°. A verificação é feita pela observação transversal da broca e, também, pelo ângulo do gume transv-

versal com o principal (ψ), sendo neste caso de 45 a 55°. Para materiais extremamente duros e difíceis de usinar reduz-se o ângulo de incidência lateral para 5 a 7°. É importante perceber que o ângulo de incidência lateral depende diretamente do avanço, ou seja, do ângulo de hélice que cada ponto descreve durante a usinagem [9].

2.5.6.3 Ângulo de ponta (σ)

As duas partes cortantes do gume principal, vistas de frente, são paralelas entre si e vistos de lado formam entre si o ângulo de ponta, cujo valor depende do material a ser furado e das condições de trabalho. Para furação de aço o valor usual é de $\sigma = 118^\circ$. Uma possível limitação em relação ao ângulo de ponta é que a utilização de um ângulo de 118° contribui na imprecisão de posicionamento da ponta da broca sobre a peça, sendo necessário o uso de uma broca de centro [9, 10].

Ângulos de ponta maiores que 118° são recomendados para materiais duros ou profundidades de furos maiores (fig. 2.17). Ângulos de ponta grandes geram cavacos com maiores espessuras de usinagem (h) e menor largura de cavaco (b) para um dado avanço, os quais trazem benefícios na furação de materiais com forte tendência ao encruamento. O efeito negativo é a concentração de desgaste abrasivo na quina dos gumes [10].

Ângulos de ponta mais agudos produzem efeitos contrários, ou seja, cavacos com menor espessura de usinagem (h) e redução do desgaste abrasivo nas quinas. Eles são recomendados para materiais não-ferrosos e plásticos.

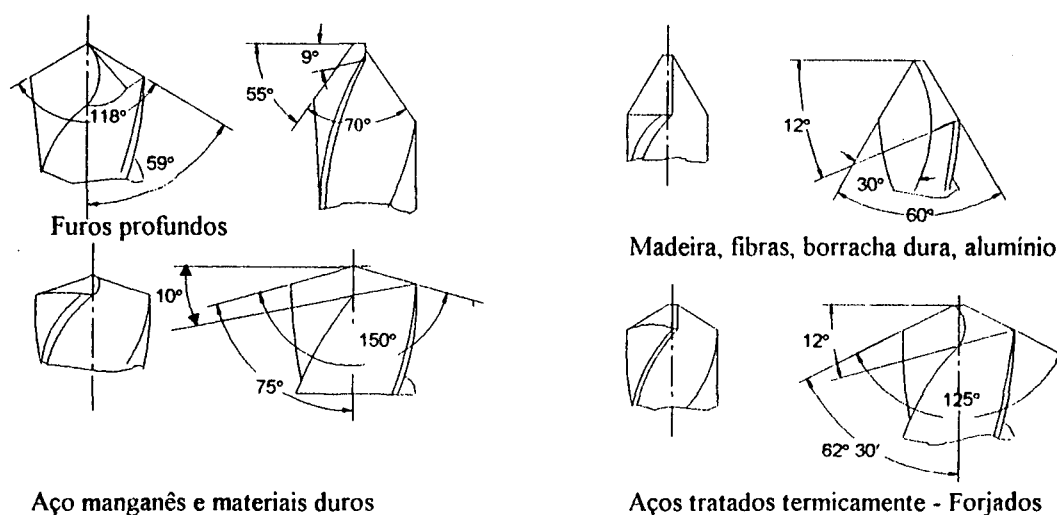


Figura 2.17 - Ângulos de ponta das brocas para diversos materiais.

2.5.6.4 Ângulo de hélice (δ)

Corresponde, no diâmetro externo, ao ângulo de saída lateral da ferramenta. A norma DIN 1836 recomenda três tipos de brocas, quanto ao ângulo de hélice (fig. 2.18) [9].

tipo N (normal) - para aços ligados e não ligados, ferro fundido cinzento e maleável, níquel e ligas de alumínio de cavacos curtos (18 a 30°).

tipo H - para materiais duros e frágeis e ferro fundido com dureza superior a 240 HB (10 a 15°).

tipo W - para materiais moles de cavacos longos (35 a 45°) [8, 9].

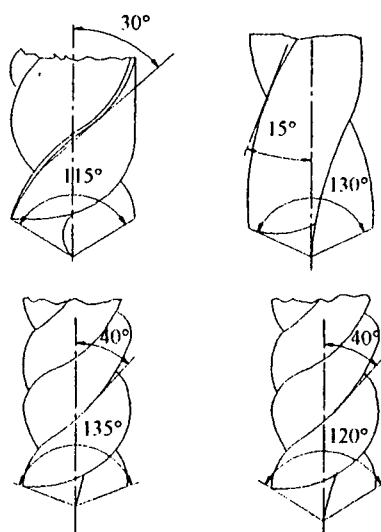


Figura 2.18 - Brocas com diferentes ângulos de hélice e de ponta.

2.5.7 Afição das brocas

Uma furação eficiente dos vários tipos de materiais encontrados na indústria requer tipos diferentes de afiações de ferramentas. Vários furos podem ser usinados satisfatoriamente com brocas "standard" helicoidais, mas nenhuma broca satisfaz todas as aplicações na engenharia. Estão sendo usadas variações nas afiações, mas mantendo sua durabilidade e espaço suficiente para uma fácil remoção dos cavacos, incluindo diferentes pontas de brocas, ângulo de incidência lateral, ângulo de hélice, espessura do núcleo e redução do gume transversal [3].

Uma afiação deveria satisfazer as seguintes condições:

- Originar uma força de avanço pequena;
- Originar um momento de torção pequeno;
- Produzir furos com alargamento mínimo;
- Produzir furos com bom acabamento superficial;
- Ser aplicável na furação do maior número possível de materiais;
- Não causar acidentes;
- Não exigir precisão excessiva na afiação;
- Ter uma longa vida;
- Ser afiada numa única fixação na máquina;
- Permitir a afiação manual;
- Gastar pequena quantidade de material na afiação;
- Ter pequeno custo de afiação.

É evidente que qualquer afiação "real" deve sacrificar algumas das condições acima em benefício de outras [6].

2.5.7.1 Tipos de afiações

A afiação com duplo tronco de cone é, para a grande maioria das aplicações, a forma mais adequada. O nome é decorrente do fato de que cada flanco da ferramenta é uma parte da evolvente de um tronco de cone. As suas vantagens são decorrentes da facilidade de sua obtenção na fabricação e na reafiação e pequena susceptibilidade a solicitações mecânicas elevadas.

Como desvantagens da afiação de duplo tronco de cone podemos citar o pequeno efeito de autocentragem e, com isso, erros de forma e posição. Também o gume transversal aumenta naturalmente com o aumento do diâmetro da broca, em decorrência do processo de afiação. Com isso, temos um aumento hiperproporcional das forças de avanço, com um conseqüente efeito negativo sobre a precisão do trabalho. Neste caso, e de sobremodo, quando são exigidas características especiais a uma ferramenta de furação, a ponta da broca recebe uma afiação especial que pode complementar a afiação de duplo tronco de cone ou levar a uma configuração completamente nova da ponta da broca [8].

a) Forma A - Redução do gume transversal

A redução do gume transversal melhora consideravelmente a capacidade de centragem da broca (fig. 2.19) [8]. O gume transversal é responsável por uma parcela considerável da força de avanço. Assim, neste tipo de afiação, retifica-se uma reentrância na ponta da broca para reduzir o gume transversal e, conseqüentemente, reduzir a força de avanço [9]. Além disto, o gume transversal aumenta à medida que, pelas sucessivas reafiações, a broca fica mais curta. Isto se deve ao fato dos fabricantes aumentarem o diâmetro do núcleo da broca em direção à haste, para aumentar a rigidez torcional da mesma [14].

b) Forma B - Redução do gume transversal com correção do ângulo de saída lateral

A redução do gume transversal e o ângulo de saída lateral corrigido levam à possibilidade de adaptar o ângulo de saída lateral para uma aplicação específica. Normalmente o ângulo de saída lateral é reduzido para 10° , o que leva a uma estabilidade bastante grande da cunha, sem dificultar o transporte do cavaco pela diminuição do ângulo de hélice da broca (fig. 2.19).

Esse tipo de afiação é utilizado para altas solicitações como, por exemplo, para a usinagem de aço com alto teor de manganês ou na furação de chapas finas, que fatalmente seriam puxadas para dentro do furo na saída da broca [8, 9, 14, 16].

c) Forma C - Afiação em cruz

Na afiação em cruz o gume transversal é eliminado totalmente e, em seu lugar, se formam duas parcelas cortantes complementares de gume principal que fazem um ângulo menor do que 90° com o eixo principal, provocando um efeito de centragem da broca (Fig. 2.19) [9, 14]. Este tipo de afiação é usado principalmente em brocas para furos que necessitem qualidades cortantes consideravelmente melhores e uma redução da força de avanço [8]. É o tipo de afiação normalmente utilizado em brocas para a furação de aços inoxidáveis. Esta afiação não é adequada para a furação com avanço manual, decorrente da sensibilidade da ponta da broca.

d) Forma D - Afição para ferro fundido

Esta forma de afiação, que se traduz em uma redução do gume transversal e da quina chanfrada, foi desenvolvida especialmente para a usinagem de ferros fundidos, que apresentam uma casca abrasiva do processo de fundição e atacam as quinas da ferramenta (Fig. 2.19) [8]. O objetivo da quina chanfrada é de reduzir o perigo de super-aquecimento na parte mais externa dos gumes, onde a velocidade de corte é máxima [9].

e) Forma E - Afição com ponta de centragem

Um ângulo de ponta 180° com ponta de centragem neste tipo de afiação é utilizado quando é necessária uma furação centrada e os furos devem ser isentos de rebarbas na furação de chapas (Fig. 2.19). Após a penetração total do cone de centragem, as duas parcelas do gume principal cortantes atingem simultaneamente a superfície a ser cortada em todo o seu comprimento e, com isso, as quinas podem ser apoiadas sobre a parede do furo já no início da furação. A saída da broca ocorre com todo o gume principal no mesmo instante, levando à formação de uma chapinha plana com pequena formação de rebarba [8]. Este tipo de afiação tem como vantagens:

- Melhor localização do centro do furo;
- Menor curso de usinagem (comprimento de entrada e saída da ferramenta pequenos), reduzindo significativamente os tempos de furação em chapas finas;
- Evita o "enganchamento" da broca na chapa no momento da perfuração;
- Pouca ou nenhuma rebarba na saída da chapa.

Esta afiação não deve ser empregada na furação com grandes profundidades e sua aplicação é encontrada nas indústrias de caldeiraria e de construção naval.

f) Afição tipo "S" ou "Spiralpoint"

A afiação em "S" (Fig. 2.19) foi publicada em 1957, anunciada como sendo o aperfeiçoamento mais importante das brocas nos últimos 100 anos.

Os fabricantes citam as seguintes vantagens:

- Maior centragem da broca, principalmente no início do corte;
- A precisão dos furos é maior;
- Os furos obtidos têm melhor circularidade e cilindricidade;
- Redução da força de avanço até 35% em relação à afiação cônica;
- Evita a extrusão do material pelo gume transversal;
- Frequentemente dispensa a operação posterior de alargamento;
- Os furos executados em chapas finas são circulares e sem rebarbas;
- O desgaste da broca é menor, devido ao menor desenvolvimento de calor;
- A vida da broca é maior.

Nem todas estas vantagens citadas puderam ser constatadas na prática e a maior desvantagem deste tipo de afiação reside na necessidade de uma máquina afiadora especial [6].

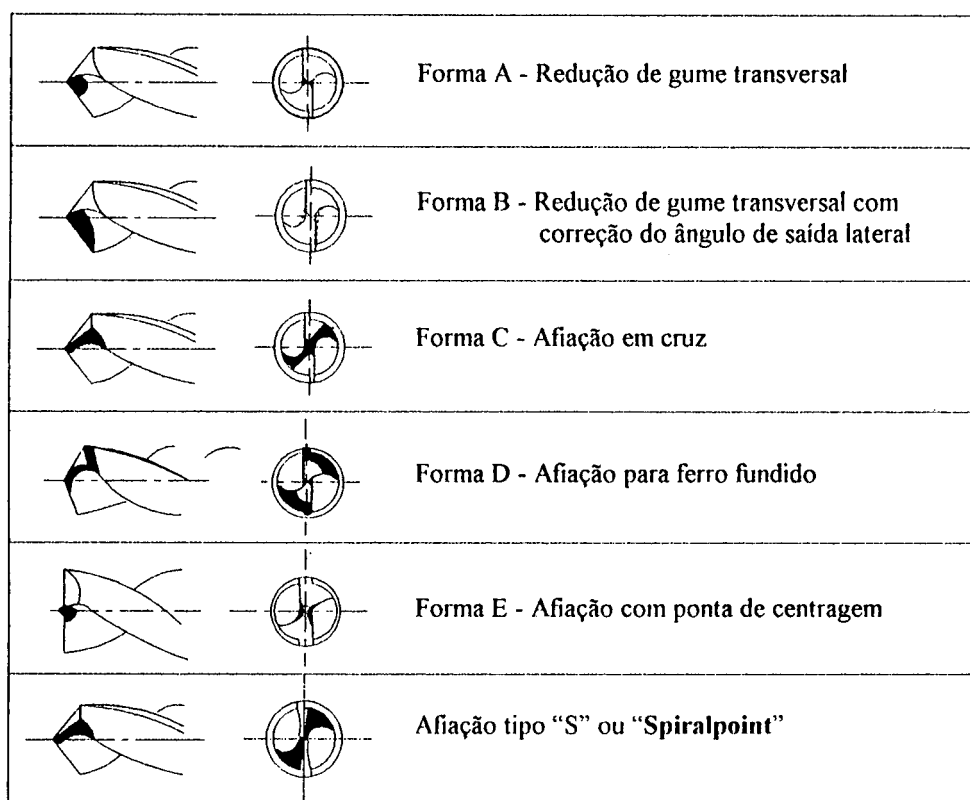


Figura 2.19 - Tipos de afiações.

2.5.7.2 Recomendações para afiação de brocas para a furação de aços inoxidáveis

Em consequência dos esforços maiores a que estão sujeitas as brocas na furação de aços inoxidáveis, é especialmente importante afiar brocas corretamente. A figura 2.20 mostra a geometria sugerida para brocas de aço-rápido a serem usadas em aço inoxidável. O ângulo de ponta deveria ser de $135^\circ \pm 5^\circ$, embora um ângulo menor possa ser usado em ligas mais fáceis de usinar. Um ângulo grande produz cavacos mais fáceis de remover na furação de ligas duras ou tenazes.

O ângulo de incidência deve estar entre 9° e 15° e os dois gumes devem ter o mesmo comprimento e ângulo. A espessura do núcleo da ferramenta deve ser de cerca de 12% do diâmetro da broca, ou menos. Um núcleo menos espesso reduz a pressão do avanço, a geração de calor e o encruamento no fundo do furo [17].

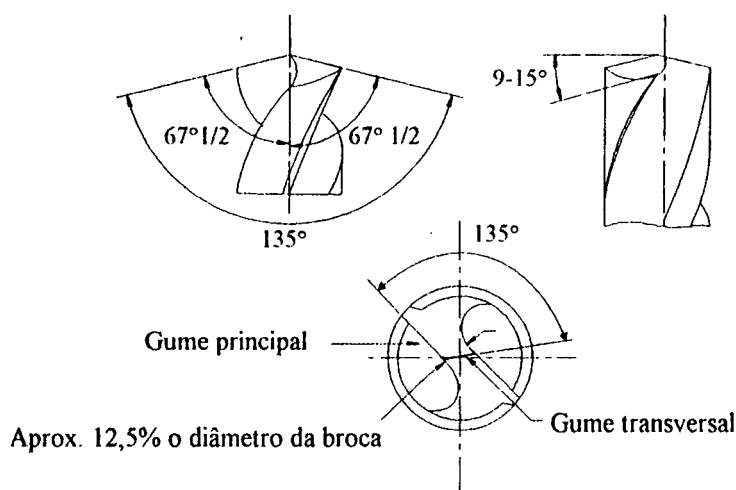


Figura 2.20 - Geometria sugerida para brocas de aço-rápido a serem usadas em aço inoxidável.

A tabela 2.1 mostra, conforme NAS 907 [28], os ângulos dos gumes da broca com afiação tipo C* (afiação em cruz) para a usinagem de aço inoxidável.

Tabela 2.1 - Tabela de ângulos principais de uma broca helicoidal com afiação em cruz.

AFIAÇÃO EM CRUZ	α	β	γ	σ
	$14^\circ - 10^\circ$	50^{+10° 0°	$30^\circ \pm 5^\circ$	$135^\circ \pm 5^\circ$

* As posições de medição dos ângulos da broca com afiação em cruz, estão demonstrados no anexo 2 (Fig. 4.0).

2.5.8 Materiais para brocas helicoidais

As características desejáveis nos materiais para a fabricação de brocas são alta dureza, tenacidade e resistência ao desgaste, bem como resistência a temperaturas elevadas e alternantes (Fadiga térmica).

Os principais materiais para ferramentas que satisfazem essas exigências são o aço-rápido e o metal-duro, que podem ser revestidos, para melhorar suas características para o corte [10].

2.5.8.1 Aço-rápido

Os aços-rápidos contêm carbono, tungstênio, cromo, vanádio, molibdênio, cobalto e ferro em teores que podem variar de acordo com as propriedades que se deseja conferir às ferramentas.

Responsáveis pelas características de revenimento são os elementos que não passaram para a forma de carbonetos e sim foram solubilizados na matriz (W, Mo, V e Co). A dureza e resistência ao desgaste podem ser ampliadas pela martêmpera da estrutura básica e pela formação de carbonetos embutidos nesta martensita (principalmente o carboneto duplo molibdênio-tungstênio, carboneto de cromo e carboneto de vanádio). A formação de carbonetos e a têmpera sobre a secção transversal são melhoradas pela adição do cromo.

As brocas de aço-rápido podem receber tratamentos superficiais como revenimento a vapor, nitretação, oxidação negra, niquelação, revestimento de nitreto de titânio e carbonitreto de titânio [8, 10].

2.5.8.2 Metal-duro

Este é um importante material para ferramentas utilizado na indústria moderna, devido à combinação de dureza à temperatura ambiente e dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, combinação possível de se obter pela variação de sua composição. É um produto da metalurgia do pó, designado também algumas vezes como carboneto de tungstênio sinterizado. Os seus constituintes fundamentais são intimamente misturados na forma de pós e submetidos a um processamento que compreende compressão, sinterização, retificação, etc., resultando um produto completamente consolidado, praticamente denso e apresentando as características de resistência mecânica, dureza e tenacidade adequadas para o emprego em ferramentas de corte.

Essencialmente, o metal-duro é formado por dois constituintes:

- a) Um carboneto extremamente duro e de alta resistência ao desgaste, o carboneto de tungstênio, que se apresenta isolado ou associado com outros carbonetos, como o de titânio, tântalo e nióbio, principalmente. Esses carbonetos são constituintes que, no produto final, conferem a dureza à temperatura ambiente e sua retenção a altas temperaturas e à resistência ao desgaste.
- b) Um elemento aglomerante ou ligante, normalmente um metal do grupo do ferro, usualmente o cobalto, cuja função é aglomerar as partículas duras dos carbonetos, sendo, em consequência, o responsável pela tenacidade do material.

Brocas de metal-duro têm maior dureza, maior resistência ao desgaste abrasivo e maior resistência a quente do que as brocas de aço-rápido que receberam tratamento superficial de endurecimento. Suas vantagens incluem uma maior vida útil (acima de dez vezes) e possibilidades de velocidades mais altas (aproximadamente duas vezes) do que as brocas de aço-rápido [6, 10]. Sua principal desvantagem é de não admitir um batimento do eixo da máquina operatriz superior a 60 μm .

2.5.9 Processos de revestimento para brocas helicoidais

A aplicação de revestimentos é realizada pela precipitação de materiais duros da fase de vapor. Os processos principais são a Deposição Química de Vapor (CVD) e a Deposição Física de Vapor (PVD).

2.5.9.1 Processo de Deposição Química de Vapor (CVD)

O processo de deposição química de vapor (CVD) é realizado em temperaturas que variam entre 900 e 1100°C e pressões bem abaixo da atmosférica. Esta temperatura torna impróprio o revestimento de materiais que perdem suas características mecânicas a essas temperaturas (por exemplo, aço-rápido). Recentes desenvolvimentos de revestimentos por plasma (aproximadamente 500°C) e laser (maior que 100°C), conduzem a reduções significativas na temperatura do substrato.

2.5.9.2 Processo de Deposição Física de Vapor (PVD)

O processo PVD opera entre 450 e 500°C, temperatura esta abaixo das temperaturas de revenimento da maioria dos aços ferramenta de alta liga. No processo "Ion Plating", as temperaturas necessárias para o substrato estão abaixo de 160°C, possibilitando o revestimento da maioria dos materiais sem perigo de perda das suas propriedades.

2.5.9.3 Características dos revestimentos

As principais características dos revestimentos obtidos em processos de deposição por vapor são sua espessura, rugosidade, dureza, resistência e adesão. A espessura desses revestimentos está na faixa de 1 a 10 μm , o que não afeta dimensionalmente as ferramentas para aplicações de pouca precisão. A tendência ao arredondamento do gume não é crítica para grandes espessuras de usinagem. Com um elevado grau de automação são alcançadas deposições entre 0,05 e 2 μm por minuto. A dureza obtida por estes processos está acima de 2200 HV.

Devido às temperaturas envolvidas, os processos PVD e CVD são adequados para o revestimento de aço-rápido e metal-duro, respectivamente. Em metais-duros os revestimentos de TiC, TiCN, TiN e Al₂O₃ e suas combinações são aplicados por CVD.

Em decorrência do revestimento, têm-se dois fatores influentes sobre a temperatura dos cavacos e sobre o fator de recalque na região de cisalhamento: o coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta revestida é menor que com a ferramenta não revestida, diminuindo assim o trabalho de atrito na face da ferramenta. Isto leva a uma diminuição do fator de recalque, menor força de usinagem e conseqüentemente menor potência de usinagem, bem como a diminuição do calor gerado no processo. Devido à diminuição do coeficiente de atrito ocorrerá uma diminuição do pico da temperatura na região de contato entre o cavaco e a face da ferramenta. No entanto, devido à pequena condutividade térmica da camada de revestimento, ocorre uma diminuição da transferência de calor para a ferramenta, sendo esta maior para o cavaco (figura 2.21).

A diminuição da quantidade de calor conduzida para a cunha cortante permite uma melhor exploração das características térmicas da ferramenta pelo aumento da velocidade de corte, do avanço ou de ambos.

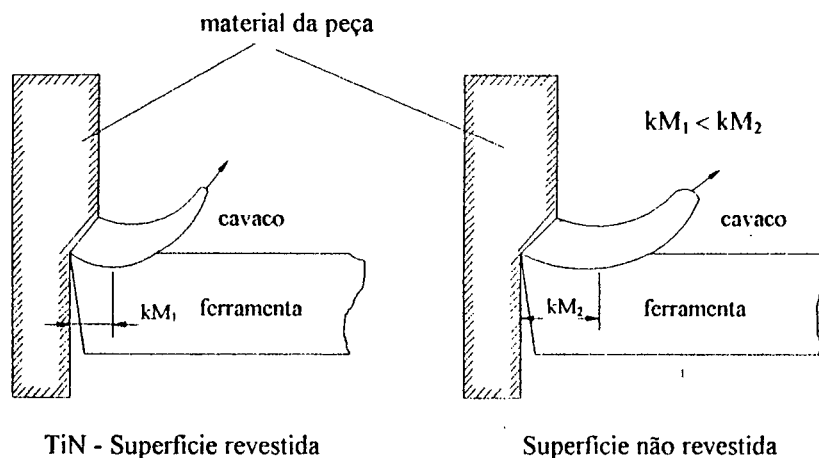


Figura 2.21 - Influência do revestimento na remoção do cavaco.

2.5.9.4 Tipos de revestimentos

a) Carboneto de titânio (TiC)

A diminuição do atrito e a menor condutividade térmica da camada aplicada produzem temperaturas menores no gume e, com isto, o desgaste por difusão e atrito no gume são diminuídos. O baixo coeficiente de atrito e a menor tendência à adesão resultam em forças de avanço menores, embora a força de corte seja geralmente igual às obtidas para as ferramentas não revestidas. O carboneto de titânio é mais duro que o nitreto de titânio, o que resulta numa boa resistência ao desgaste por abrasão. O TiC tem, em relação ao TiN, um menor coeficiente de dilatação térmica.

b) Nitreto de titânio (TiN)

O revestimento com nitreto de titânio (TiN) é quimicamente mais estável que o TiC, isto é, tem menor tendência a fenômenos de difusão em aços. Ocorre, então, um menor desgaste de cratera do que com revestimento com TiC, ao passo que o desgaste abrasivo no flanco é maior com revestimentos de TiN do que com TiC. Sua dureza é de aproximadamente 2000 HV.

Experimentos usando brocas de aço-rápido revestidas com TiN têm mostrado que são possíveis velocidades de corte entre 2,5 a 4 vezes maiores e avanços entre 3 e 5 vezes maiores em relação às brocas não revestidas. Essas brocas oferecem vidas úteis maiores em 600 % ou mais em

relação às não revestidas [10]. Este revestimento é recomendado para materiais com difícil usinabilidade como ferro fundido, latão, alumínio, aço inoxidáveis, etc..

c) Revestimento de carbonitreto de titânio (TiCN)

Este revestimento possui alta dureza (3000 HV), superior ao TiN. As ferramentas revestidas com TiCN possuem uma vida útil superior aos outros revestimentos analisados, permitindo um maior comprimento de usinagem com maior velocidade de corte, sendo recomendado para o corte de aços inoxidáveis, ferro fundido, latão, bronze, alumínio com teor de silício e materiais termoplásticos [13].

2.6. USINABILIDADE

A usinabilidade é uma característica apresentada por um par material da peça/material da ferramenta, definida para cada processo de usinagem. Não existe uma forma prática de definir a usinabilidade, partindo-se apenas das características mecânicas e físicas de um material. Para mesmo assim, se tornar possível estabelecer a usinabilidade, deve-se compor um quadro com diversas informações:

- Vida da ferramenta (um ou vários critérios de desgaste);
- Acabamento da superfície usinada;
- Tipos de cavacos formados;
- Forças de usinagem e suas componentes;
- Temperatura na região de corte.

A cada uma destas informações é dada uma certa importância. Dependendo do processo, ou até da aplicação, os critérios podem ter níveis de importância distintos, de forma que também a avaliação da usinabilidade é variável. Além disto, os diversos critérios são interdependentes.

Para a furação, principalmente de um aço inoxidável tenaz e resistente, com baixa condutividade térmica, a avaliação da usinabilidade deve levar em conta principalmente o desgaste da ferramenta, a forma dos cavacos, forças de usinagem e a temperatura na região de corte.

Por causa dos diferentes critérios de usinabilidade e pelas muitas variáveis influentes sobre o processo de usinagem, a usinabilidade deve ser analisada com cautela. Os resultados obtidos em ensaios de usinabilidade além disto, podem ser afetados por diversos fatores, correlacionados ao processo e ao material da peça:

- Rigidez da ferramenta ou fixação;
- Material e geometria da ferramenta;
- Tipo de fluido de corte;
- Tipo da operação de usinagem;
- Afiação da ferramenta de corte;
- Dureza e distribuição da dureza na peça;
- Microestrutura e distribuição da microestrutura;
- Inclusões (carbonetos, óxidos, silicatos, etc.) [17].

2.6.1 Particularidades na usinabilidade do aço inoxidável austenítico

As dificuldades de usinagem atribuídas ao aço inoxidável em geral são ainda maiores no aço inoxidável austenítico.

- As ferramentas trabalham em temperaturas mais elevadas, com a tendência de formar gume postiço.
- Ocorrem cavacos em fita com a tendência a embarçarem-se, tornando difícil a sua remoção.
- As trepidações são mais pronunciadas, consequência do encruamento do material da peça.
- Há o aumento dos esforços de corte em condições não propícias de usinagem (atrito da ferramenta no fundo do furo sem corte) onde a superfície usinada pode sofrer encruamento, dificultando ainda mais a usinagem.

Devido a estes fatores, precauções gerais para a usinagem de aço inoxidável são particularmente importantes para as ligas austeníticas [17]. Em função da resistência a quente de aços austeníticos, a temperatura na usinagem é elevada e há ocorrência de adesão de material na ferramenta até em velocidades de corte muito altas.

O campo de velocidades de corte onde não ocorre formação de gume postiço é, por isso, muito estreito. Assim, é comum a usinagem no campo onde há adesão, o que leva ao cegamento rápido das ferramentas, devido à interação entre as superfícies.

As velocidades de corte usadas na usinagem em ligas de aço inoxidável austenítico Cr-Ni são menores do que as na usinagem de aço comum.

Os aços austeníticos são em grande parte usinados em estado tratado termicamente. Com isto, as peças tendem, muitas vezes, a uma deformação. A temperatura de tratamento térmico é de 1000 a 1200°C, conforme a liga, e a sua usinabilidade é tanto melhor quanto mais estável for a austenita e tanto menor for a quantidade de inclusões não-metálicas. Um aço de granulometria grosseira, como a que é obtida no tratamento térmico em altas temperaturas, pode ser usinado com velocidades de corte maiores do que um aço austenítico de granulometria fina. Muito influentes sobre o desgaste são as inclusões duras e frágeis, mesmo em quantidades muito baixas [18].

Elementos fortes na formação de carbonetos e nitretos, incluindo titânio e nióbio, são usados nos aços inoxidáveis, como S32100 e S34700, para prevenir carbono nos contornos de grãos, com isso reduzindo a corrosão intergranular. Contudo, as inclusões de carbonetos e nitretos são abrasivas e aumentam o desgaste da ferramenta [17].

Apesar de haver diferentes opiniões, uma quantidade moderada de trabalho a frio tem sido considerada como benéfica para todas as características de usinagem do aço inoxidável. O trabalho a frio reduz a ductilidade do material, o que resulta num corte com cavacos "limpos" e uma menor tendência à formação de gume postiço. Isso produz um melhor acabamento na superfície usinada, mas com alguma perda de vida da ferramenta, devido ao maior nível de dureza que o material atinge [17]. Muito importante na usinagem de aço austenítico com ferramentas de aço-rápido é a aplicação de fluido de corte. Na furação e no fresamento são utilizadas emulsões com grande efeito de refrigeração e de escoamento capilar, contendo aditivos de alta pressão [18].

É possível melhorar a usinabilidade de um aço inoxidável austenítico única e exclusivamente alterando-se as condições de usinagem e sem alteração das propriedades físicas do aço, muito embora cuidados devam ser tomados para garantir a vida da ferramenta [19].

2.6.2 Forças de usinagem na furação

2.6.2.1 Importância das forças de usinagem

O conhecimento da força de usinagem desenvolvida no processo de furação é de suma

importância para a determinação das condições ótimas de corte; na avaliação da precisão de uma máquina-ferramenta em diversas condições de trabalho, na verificação dos fenômenos que ocorrem na região de formação do cavaco e possíveis explicações sobre os mecanismos de desgaste da ferramenta e, por fim, como critério de usinabilidade de um material em relação a certa ferramenta [8].

2.6.2.2 Decomposição das forças na furação

A força de usinagem (F) que atua sobre a cunha cortante durante a furação pode ser decomposta em três componentes: Força principal de corte (F_c), Força de avanço (F_f) e Força passiva (F_p) (Fig. 2.22).

Como a força passiva atuante em uma cunha cortante tem sentido oposto à força passiva atuante na outra cunha, sua resultante é nula. Presumindo-se que a afiação da ponta da broca tenha sido corretamente construída, a resultante $F_{p1} + F_{p2} = F_p$ é desprezível quando comparada com as forças de corte (F_c) e as forças de avanço (F_f) [10].

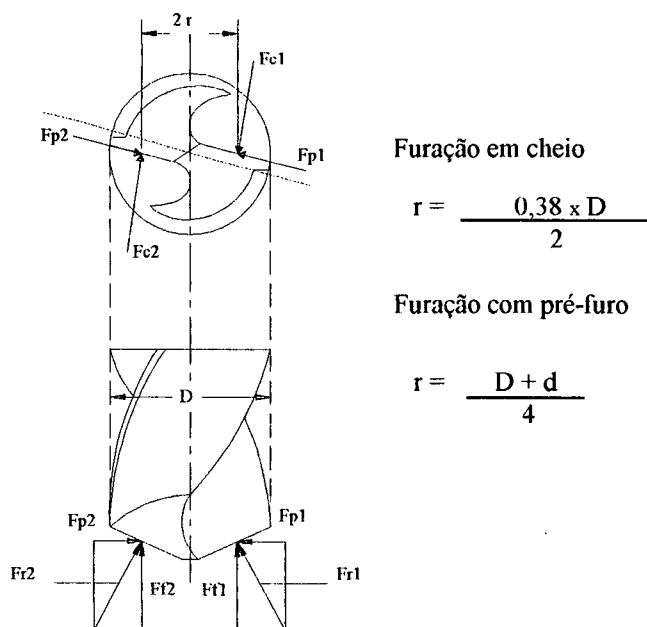


Figura 2.22 - Forças de usinagem [14].

2.6.2.3 Forças na furação

Como a maioria dos dinamômetros existentes não medem diretamente a força de corte (F_c) na furação, esta deve ser calculada a partir do momento torsor (medido diretamente),

utilizando-se a seguinte fórmula [4].

$$\text{Para furação em cheio:} \quad F_c = \frac{M_t}{0,38 \times D} \quad \text{eq. (1)}$$

$$\text{Para furação com pré-furo:} \quad F_c = 2 \frac{M_t}{D + d} \quad \text{eq. (2)}$$

A força de avanço (F_f) é medida diretamente através de um dinamômetro.

a) Forças específicas na furação

A força específica de corte (k_c) e a força específica de avanço (k_f) são as forças específicas referentes a uma seção de corte qualquer. Esta seção de corte é dada pelo produto da largura de usinagem “b” com a espessura de usinagem “h” (Fig. 2.23). Para uma seção de corte $b \times h = 1 \times 1 \text{ mm}^2$ as forças específicas são simbolizadas respectivamente por $k_{c,1,1}$ e $k_{f,1,1}$, onde:

$$h = (f/2) \times \text{sen}\chi \quad \text{eq. (3)}$$

$$\text{Para furação em cheio:} \quad b = \frac{D}{2 \times \text{sen}\chi} \quad \text{eq. (4)}$$

$$\text{Para furação com pré-furo:} \quad b = \frac{D - d}{2 \times \text{sen}\chi} \quad \text{eq. (5)}$$

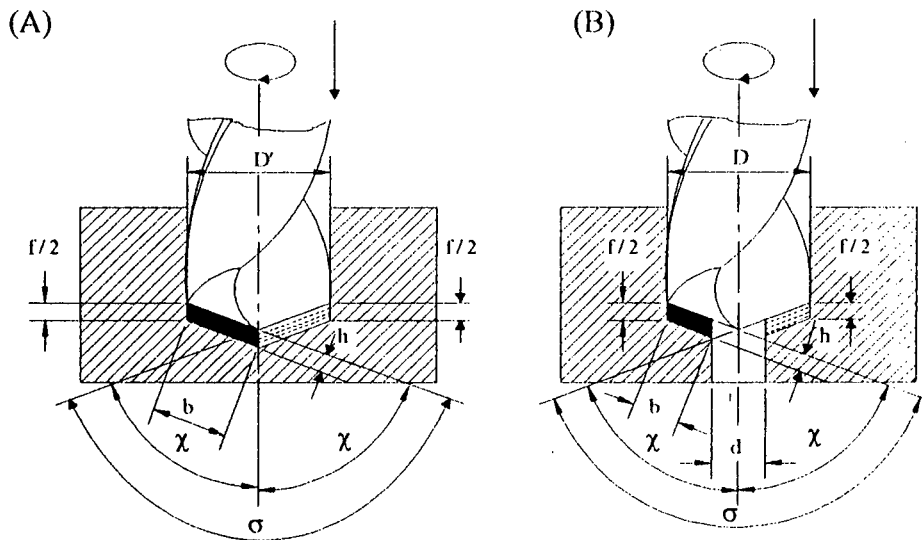


Figura 2.23 - Seção do cavaco para furação em cheio (A) e com pré-furo (B).

Kienzle apresentou, em 1951, uma equação bastante simples e suficientemente precisa para cálculos práticos da força de usinagem:

$$F_c = K_{c1.1} \times b \times h^{(1-mc)} \quad \text{eq. (6)}$$

Nessa equação, $K_{c1.1}$ figura como função da espessura de usinagem “h” e não como função do avanço “f”. Este artifício permite aplicar a equação a todas as operações de usinagem com ângulos de posição qualquer [11].

2.6.2.4 Medição das forças

Os fenômenos físicos não podem ser observados ou medidos sem sofrerem alterações. Isto serve também para a força, que não pode ser medida diretamente e somente sua ação é observada e conseqüentemente medida.

A medida da força de usinagem pode ser direta (ativa) ou indireta (passiva). Entende-se como medida direta a que se baseia na piezoelectricidade e na magneto-estricção ou magneto-elasticidade. A medição indireta é realizada através do deslocamento de molas utilizando-se meios de medição mecânicos, pneumáticos, hidráulicos e elétricos [11].

Os sistemas ativos, como os transdutores piezoelétricos, são extremamente rígidos e permitem determinar a variação dinâmica das forças de usinagem. Os sistemas passivos utilizam extensômetros, sistemas capacitivos e indutivos para determinar esta variação.

Atualmente, os sistemas de medição mais utilizados são os que usam transdutores de força com elementos sensíveis ao efeito piezoelétrico. O efeito piezoelétrico aproveita a propriedade de certos cristais (quartzo, turmalina, etc.) de se tornarem eletricamente carregados sob esforços mecânicos e, inversamente, deforma-se elasticamente sob uma polarização elétrica. O cristal de quartzo tem as características mais apropriadas para a construção de transdutores piezoelétricos, pois apresenta os seguintes efeitos:

- Efeito piezoelétrico longitudinal
- Efeito piezoelétrico transversal
- Efeito piezoelétrico de cisalhamento

A figura 2.24 mostra esquematicamente estes efeitos. O sistema de referência está relacionado com os eixos cristalográficos.

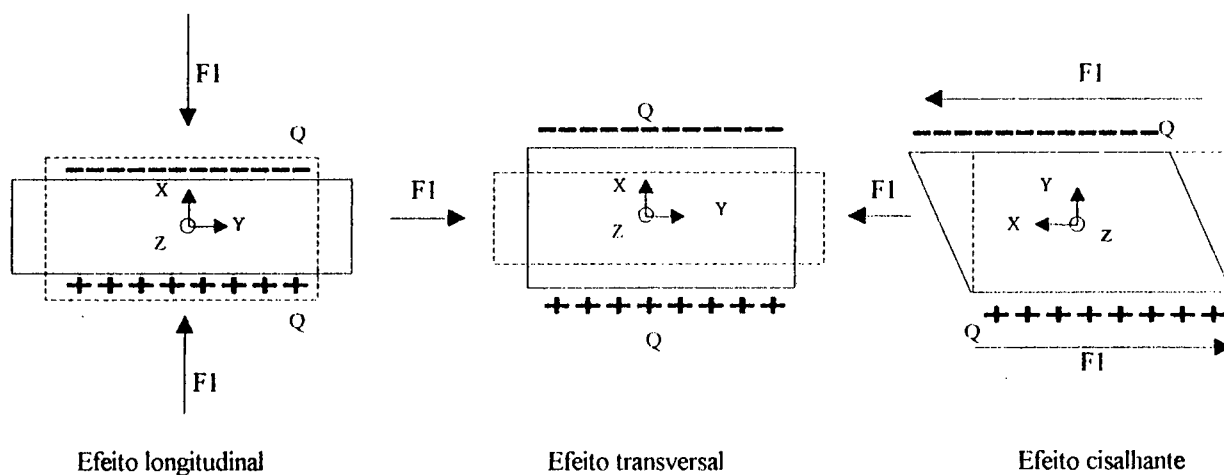


Figura 2.24 - Efeitos piezoelétricos - longitudinal, transversal e cisalhamento.

A rigidez do transdutor é de suma importância onde a frequência natural e a possibilidade de calibrar estaticamente transdutores de quartzo dependem diretamente da rigidez do sistema piezoelétrico [13, 20, 21]. Em virtude das baixas cargas geradas nos dinamômetros piezoelétricos, preferencialmente o valor da carga é transformado em um sinal de tensão proporcional à carga

(tecnologia MOSFET - amplificadores de carga). Após os amplificadores, é feito um tratamento de sinal para que seja possível o processamento de dados via computador (Fig. 2.25) [22].

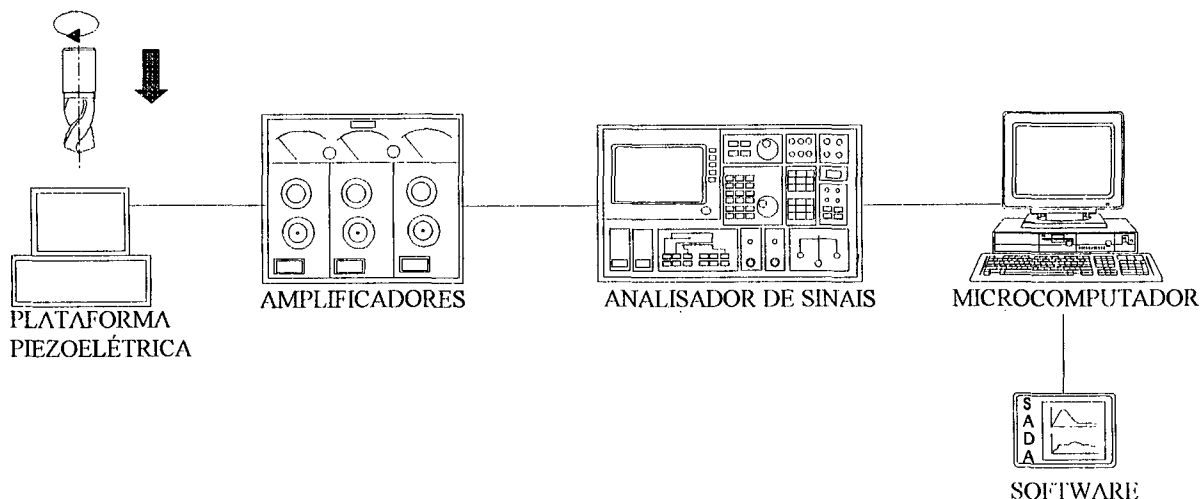


Figura 2.25 - Esquema de medição de forças com plataforma piezoelétrica.

2.6.2.5 Influência de parâmetros de entrada sobre a força de usinagem na furação

Na furação com brocas helicoidais, a força de avanço é muito sensível às variações no comprimento do gume transversal. Uma diminuição desse comprimento reduz as magnitudes de força para deformar plasticamente o material, diminui a temperatura na operação de corte, aumenta a vida da ferramenta e melhora a qualidade do furo.

Resultados de pesquisas indicam que o momento torsor e a força de avanço são funções do diâmetro da broca, do gume transversal, do avanço e do material da peça. Os efeitos do fluido de corte e do ângulo de saída lateral são relativamente menores, a não ser que existam dificuldades na remoção dos cavacos [3].

Pesquisas específicas mostraram que o acabamento superficial na parede do furo é pouco influenciado pela simetria de afiação da ponta da broca. No entanto, essa simetria tem uma influência decisiva sobre a precisão de forma e da medida do furo, e contribui para a eliminação das componentes das forças passivas [8].

Witte [23] e Watson [24] verificaram que a influência da velocidade de corte sobre a força de usinagem é irrelevante. Determinaram ainda que a contribuição do ângulo de ponta sobre as forças de corte é mínima. Para determinar o comportamento das forças como função do ângulo de saída lateral γ , Witte [23] partiu de uma afiação normal com $\gamma = 29^\circ$ e observou que um

aumento ou diminuição de 1° no ângulo de saída lateral causa uma diminuição ou elevação, respectivamente, de 1,5 % na força específica de corte e 5 % na força específica de avanço.

A influência do ângulo de saída lateral na furação é especialmente interessante, uma vez que ele varia em amplos limites no gume de uma broca helicoidal.

2.6.3 Processo de usinagem com brocas

Na furação com brocas helicoidais, o processo de usinagem com as duas partes cortantes do gume principal está mostrado esquematicamente na figura 2.26 [10]. A superfície de corte é gerada pela superposição do movimento de corte e do movimento de avanço efetuado pelas duas parcelas cortantes do gume principal [3, 5].

Como resultado do movimento principal de corte (rotação) e de avanço, tem-se uma direção efetiva de corte, definida pelo ângulo da direção efetiva de corte " η ".

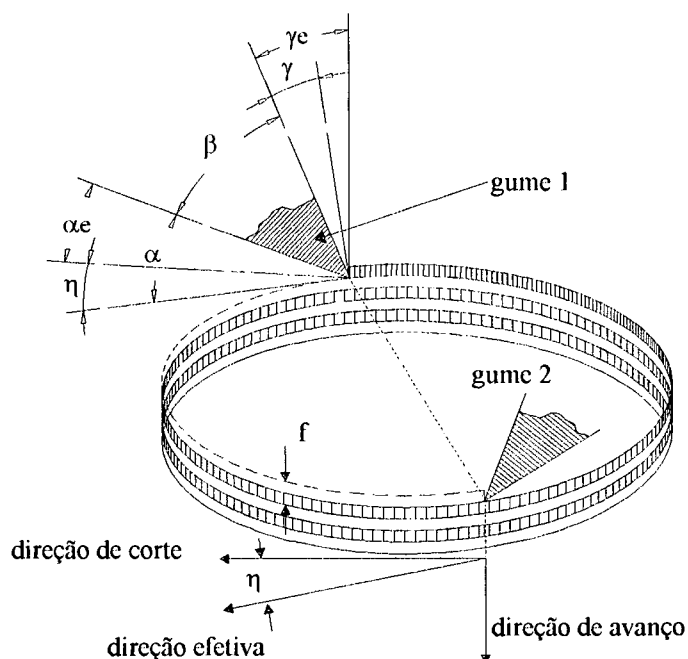


Figura 2.26 - Princípio de corte no gume [5].

Considerando-se as condições de corte, deve-se procurar uma broca com ângulo de incidência lateral (α) grande, para evitar o esmagamento do material na parte central da broca. O aumento deste ângulo está limitado pela resistência da cunha cortante e a tendência a vibrações que ocorrem na usinagem.

A ação de corte com brocas helicoidais apresenta dois aspectos com características diferentes na parte cortante do gume principal e no gume transversal. Ambos estão envolvidos na remoção do material, mas suas ações são completamente diferentes. Enquanto a parte cortante do gume principal, com ângulo de saída lateral (γ) positivo, tem uma ação efetiva de corte, o gume transversal executa uma deformação de material acentuada, contribuindo com aproximadamente 50 % da força de avanço [23].

Esta situação, acrescentada do comprimento desigual dos gumes principais, leva à imprecisão de posicionamento da ponta da broca e à formação de furos com grandes erros de circularidade. Estes fatores aceleram uma alternância no esforço de corte sobre cada gume e propiciam seu desgaste [25].

2.6.3.1 Ação de corte

Enquanto a parte cortante da broca produz cavacos por cisalhamento e corte efetivo, o material da peça abaixo do gume transversal da ferramenta é submetido à mais severa deformação com extrusão lateral, exigindo desse modo forças de avanço maiores. O espaço limitado para a remoção dos cavacos faz com que seja desejável que os mesmos tenham pequenos tamanhos.

Quanto menor a ductilidade do material a ser furado, maior é a tendência de os cavacos se quebrarem em pequenos pedaços, o que é conveniente. Quanto maior a ductilidade do material a ser furado, maior é a possibilidade de os cavacos ficarem aderidos nos canais das ferramentas, dificultando a remoção dos mesmos e a passagem do fluido de corte, causando uma geração de calor excessiva e um desgaste prematuro da broca.

Um aumento no avanço tem efeito de incrementar a espessura dos cavacos, levando a uma severa deformação, além do limite de resistência do material, o que provoca a ruptura dos cavacos, minimizando assim a possibilidade de um enrolamento sobre os canais da broca. O aumento no avanço é limitado pela resistência estrutural da ferramenta e pela capacidade da máquina-ferramenta [3].

2.6.4 Formação de cavacos

A forma e o tamanho dos cavacos têm grande importância principalmente em processos que apresentem um volume de espaço reduzido para o armazenamento de cavaco e em tornos automáticos de usinagem, em decorrência do pequeno espaço disponível para o trabalho e um eventual grande volume de cavaco removido. Além disso, existe possibilidade de concluir-se sobre a usinabilidade de um material pelo fator de recalque do cavaco (relação entre a espessura do cavaco e a espessura de corte) [8].

No processo de furação tudo isto ganha especial importância devido ao fato do canal de saída helicoidal ser reduzido para a remoção dos cavacos [10]. O enrolamento dos cavacos, especialmente em furos profundos, causa obstrução dos canais da broca, interferindo na saída dos próprios e dificultando a passagem do fluido de corte para a ponta da broca. Isto causa geração excessiva de calor e cegamento prematuro dos gumes de corte da ferramenta [3].

2.6.4.1 Influências sobre a formação de cavacos

A formação do cavaco é basicamente influenciada pela ductilidade, tenacidade e resistência ou estado metalúrgico do material da peça, condições de corte e geometria da broca. Um aumento da resistência ou uma diminuição da tenacidade e a incorporação de componentes duros na estrutura básica do material levam à melhor quebra do cavaco [10].

A ductilidade do material da peça é o principal fator na formação do cavaco. Quando materiais de pouca ductilidade são usinados pelo processo de furação, os cavacos tendem a se quebrar em pedaços. Isto é desejável e geralmente permite a utilização de brocas helicoidais "Standard", de menor custo. Quando materiais mais dúcteis são usinados, o cavaco tende a se curvar e enrolar, e ferramentas com geometrias especiais devem ser utilizadas para minimizar este efeito [3].

A espessura do cavaco, que varia com o avanço, também tem uma grande influência na formação de cavacos. Com o aumento do avanço, que aumenta a espessura do cavaco, minimiza-se a possibilidade de obstrução dos canais da broca pelos cavacos enrolados. Um avanço máximo, no entanto, é limitado pela resistência da estrutura da broca e da capacidade da máquina. O ciclo pica-pau pode ser utilizado para a remoção de cavacos quando furos profundos são realizados, mas esta prática não é recomendada para a usinagem de materiais duros [3].

2.6.4.2 Tipos de cavaco

Do ponto de vista da tecnologia da usinagem, pode-se classificar as diversas formas de cavaco em três tipos básicos [26]:

- a) Cavaco contínuo: com a aproximação da ferramenta, o material é recalçado, até começar a escoar, sem se romper, ao longo do plano de cisalhamento, formando um cavaco que desliza uniformemente sobre a face da ferramenta. O cavaco contínuo forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequenos e médios avanços e a velocidades altas.
- b) Cavaco cisalhado: o processo de usinagem não se apresenta ininterrupto e uniforme como na formação do cavaco contínuo. O material, ao escoar ao longo do plano de cisalhamento, fissa em um ponto mais solicitado. Este tipo de cavaco forma-se quando há diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento ou para grandes avanços com velocidades de corte e ângulos de saída pequenos.
- c) Cavaco arrancado: apresenta-se constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. Há uma ruptura completa do material em grupos lamelares, os quais permanecem separados. São formados na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea.

2.6.4.3 Formas de cavaco

As formas de cavaco obtidas na furação, mostradas na figura 2.27, são divididas em [10]:

- a) Cavaco helicoidal cônico: quando o cavaco possui uma espessura pequena, ele pode ter seu diâmetro de enrolamento diminuído, fletindo-se elasticamente, sendo assim deslocado através do estreito espaço dos canais helicoidais da broca.
- b) Cavaco helicoidal: com o aumento da espessura de usinagem forma-se o cavaco helicoidal. Ele leva a uma força de atrito maior nas paredes do furo. A maioria dos cavacos deste tipo tem uma borda interna dentada por causa de uma ductilidade insuficiente.

c) e f) Cavaco em pedaços e lascas: quando o cavaco não suporta uma severa deformação, quebra-se em partes pequenas.

d) Cavaco em vírgula: materiais com ductilidade média conduzem a esta configuração. Este tipo de cavaco se inicia de um cavaco de forma cônica com passo longo (a). No centro, devido à ductilidade insuficiente, ele quebra após um certo comprimento de corte.

e) Cavaco corrugado: Quando o cavaco é dúctil demais para resistir ao atrito com a parede do furo, forma-se um cavaco dobrado firmemente. Esta forma de cavaco é perigosa, pois pode facilmente obstruir os canais da broca, principalmente para avanços pequenos.

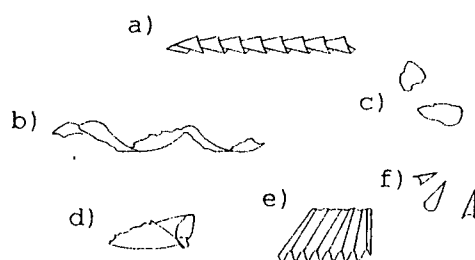


Figura 2.27 - Diversas formas de cavaco obtidas na furação.

O ciclo pica-pau e o avanço intermitente têm como objetivo influenciar a forma do cavaco e facilitar a retirada dos mesmos dos furos. Os ciclos pica-pau e o avanço intermitente, utilizados em máquinas-ferramentas com comando numérico, são muito variáveis e não existem informações contundentes na literatura sobre qual a melhor estratégia que deve ser adotada na sua programação. Existem recomendações na literatura técnica e de fabricantes de máquinas-ferramentas para o ciclo pica-pau que dizem respeito à profundidade após a qual se dá início ao ciclo pica-pau. Geralmente efetua-se uma furação até uma profundidade de 3 a 4 vezes o diâmetro da broca, quando se interrompe o avanço e retira-se a ferramenta, transportando com isto os cavacos para fora do furo. Após esta profundidade de furação os ciclos pica-pau são repetidos para acréscimos na profundidade de 2 a 1 vez o diâmetro e 1 vez o diâmetro da ferramenta nas vezes subsequentes. Sobre o avanço intermitente, entretanto, existem somente informações do usuário atual da tecnologia de furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541. Sabe-se que o mesmo executa em menor tempo a usinagem de um furo em

relação ao ciclo pica-pau, pois não há o retorno da ferramenta até a posição inicial, sendo esta uma de suas vantagens.

Um dos objetivos deste trabalho é a verificação da influência da variação do avanço intermitente sobre a produtividade das ferramentas de corte e a formação dos cavacos.

2.6.5 Critério de fim de vida e tipos de desgastes em brocas

Na furação podem ser adotados diversos critérios de fim de vida. O colapso da ferramenta (destruição da ponta) pela soldagem por fricção no fundo do furo e conseqüente quebra, no entanto, só é utilizado por alguns pesquisadores para caracterizar uma situação final bem definida e em testes de recepção de material. Quando o objetivo é a reutilização da broca, por reafiação, a marca de desgaste nos flancos principais, secundários e de quina são tomados como referência.

Através de um pré-ensaio, pode-se determinar qual o tipo de desgaste que mais contribui para a determinação da vida da broca. Em caso de dúvida podem-se utilizar dois critérios simultaneamente [4].

O desgaste total da ferramenta compreende o desgaste de flanco (superfície de incidência), de cratera, das guias, do gume transversal e das quinas.

Na furação, os desgastes mais freqüentemente encontrados são o desgaste de flanco e o desgaste das guias. Por isto é que estes desgastes são geralmente utilizados para estabelecer o critério de fim de vida da ferramenta.

2.6.5.1 Desgaste de flanco

A figura 2.28 mostra como se caracteriza o desgaste V_B e $V_{Bmáx}$ nos flancos de uma broca.

O procedimento para a medição do desgaste de flanco V_B em uma broca é semelhante ao de uma ferramenta de toronar.

Este desgaste deve ser medido com o uso de microscópio de ferramentaria, com uma ampliação de 10 a 50 vezes. Mesmo quando houver deformação plástica do gume ou desgaste do mesmo, a marca de desgaste deve ser medida em relação à posição original do gume considerado, sendo necessária uma marca de referência "A", conforme mostrado na figura 2.28.

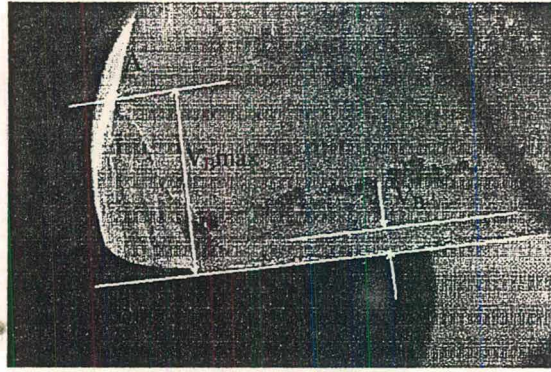
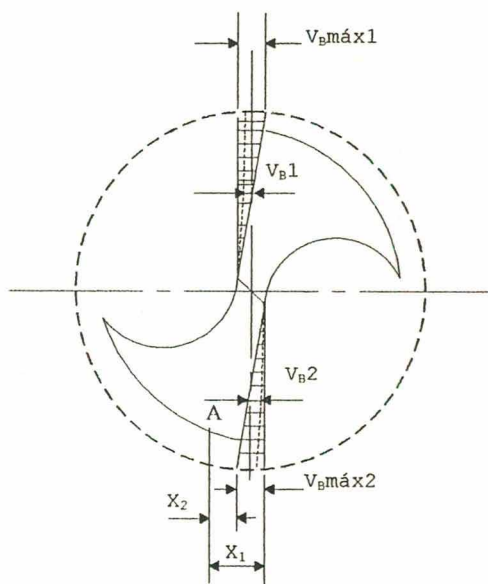


Figura 2.28 - Parte cortante do gume principal com desgaste V_B e $V_{Bmáx}$.

O desgaste de flanco caracteriza-se pela largura média (V_B) e pela largura máxima ($V_{Bmáx}$) das marcas de desgaste (fig. 2.29) localizadas nos flancos da broca (superfícies de incidência).



X_1 - Distância da marca de referência "A" à posição original do gume.(medido com a broca nova).

X_2 - Distância da marca de referência "A" à marca de desgaste $V_{Bmáx}$.

$(X_2 - X_1)$ - Largura da marca de desgaste $V_{Bmáx}$ (procedimento para a medição de V_B é semelhante).

$$V_B = \frac{V_{B1} + V_{B2}}{2} \quad \begin{array}{l} 1 - \text{gume 1} \\ 2 - \text{gume 2} \end{array}$$

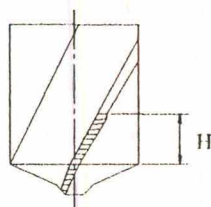
$$V_{Bmáx} = \frac{V_{Bmáx1} + V_{Bmáx2}}{2}$$

Figura 2.29 - Desgaste de flanco.

O desgaste $V_{Bmáx}$ é o mais recomendado para estabelecer o critério de fim de vida, sendo que normalmente se considera como fim de vida da broca um valor de $V_{Bmáx} = 0,1 \times D$.

2.6.5.2 Desgaste das guias

O desgaste das guias, conforme mostrado na figura 2.30, é caracterizado pelo comprimento médio “H” do desgaste sobre as guias da broca. Este deverá ser medido nas duas guias da broca, sendo considerado como desgaste “H” o valor médio das duas medidas.



1 - guia 1
2 - guia 2

$$H = \frac{H_1 + H_2}{2}$$

Figura 2.30 - Desgaste das guias.

2.6.5.3 Outras formas de desgastes e avarias

Além das formas de desgaste citadas anteriormente, existem outros tipos de desgastes que ocorrem em brocas helicoidais e que podem ser utilizados como critério de fim de vida das brocas.

a) Colapso total

Constitui-se da destruição ou inutilização da broca, que na usinagem pode ser reconhecida pelo brusco aumento da potência de corte ou pela mudança do ruído de corte.

A figura 2.31 mostra como é o aspecto de uma broca que alcançou o colapso total na usinagem.

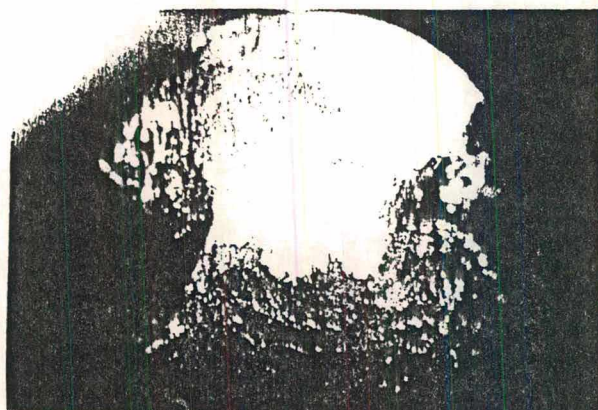


Figura 2.31 - Colapso total da broca (destruição da ponta).

b) Arredondamento das quinas

O desgaste representado pelo arredondamento das quinas é caracterizado pela largura da marca de desgaste “W” nas quinas da broca. A figura 2.32 mostra a diferença no procedimento de medição quando a largura da marca de desgaste nas quinas for menor que a largura das guias (fig. 2.32-A) e quando a mesma for maior (fig. 2.32- B). Este desgaste deverá ser medido nas duas quinas da broca e será considerado como desgaste “W” o valor médio das duas medidas.

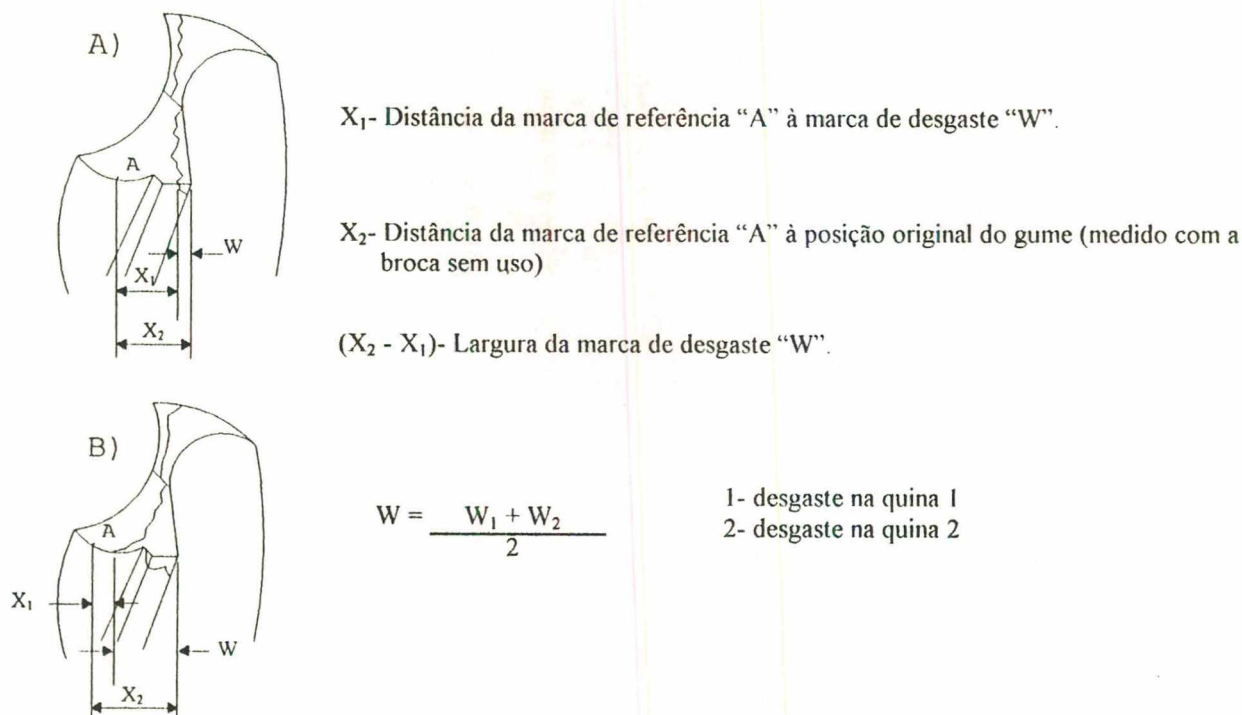


Figura 2.32 - Arredondamento da quina: A) desgaste menor que a largura das guias.

B) desgaste maior que a largura das guias.

c) Desgaste de cratera

Localizado nas faces da broca (superfície de saída), o desgaste de cratera, mostrado na figura 2.33, é caracterizado pela distância “Kb” entre a posição original do gume e a borda da cratera do lado oposto ao gume. Esta medição deverá ser realizada na posição onde a borda da cratera se apresentar mais afastada do gume. É considerado como desgaste “Kb” a média dos valores medidos relativamente aos dois gumes.

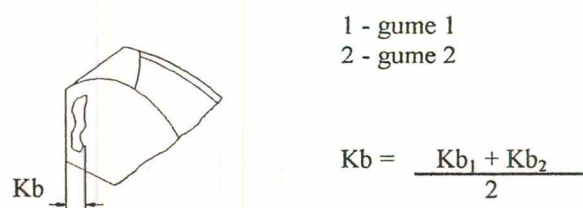


Figura 2.33 - Desgaste de cratera em uma broca.

Na furação com brocas helicoidais de HSS, o desgaste de cratera é muito pequeno e dificilmente é escolhido como critério para o fim da vida da ferramenta.

d) Lascamentos dos gumes

Pequenos lascamentos poderão ocorrer nos gumes das brocas durante a usinagem. A largura "Pm" e a profundidade "Pt" dos lascamentos nos gumes deverão ser medidos conforme indicado na figura 2.34. Caso ocorram lascamentos no gume transversal, o mesmo procedimento deverá ser usado.

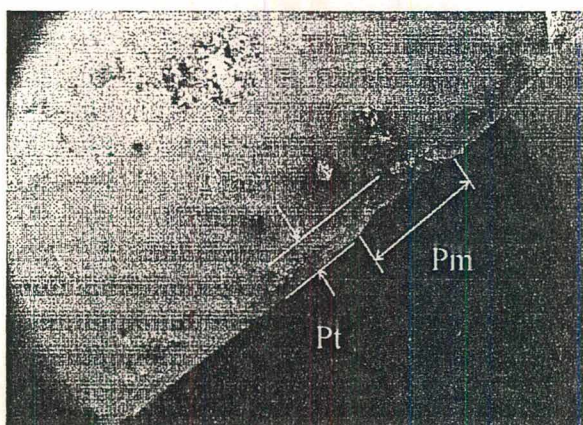


Figura 2.34 - Lascamentos no gume principal da broca.

2.6.6 Cálculo da vida das ferramentas

Denomina-se vida do gume da ferramenta, o tempo que o mesmo efetivamente trabalha até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério de fim de vida pré-estabelecido. A vida pode ser mensurada em unidade de tempo (min) ou comprimento usinado (mm).

Em analogia à fórmula de Taylor, empregada nas ferramentas de barras, constatou-se experimentalmente a existência da seguinte relação entre a vida “L” de uma broca e a velocidade de corte (v_c):

$$v_c \times L^z = C_L \quad \text{eq. (7)}$$

onde:

$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad \text{eq. (8)}$$

- v_c = velocidade de corte (m/min)
- D = diâmetro externo da broca (mm)
- f = avanço (mm/rot)
- n = rotação da broca (rpm)
- L = "vida" da broca em comprimento usinado (mm)
- C_L, C_1 = Constantes cujo o valor depende das outras variáveis como máquina, ferramenta e peça. Seus valores são numericamente iguais à velocidade de corte que dá à ferramenta a vida de 1 minuto.
- z, x = Expoentes cujo o valor depende até certo ponto das outras variáveis como máquina, ferramenta e processo [14].

Para achar a relação entre a vida T [min] e a velocidade de corte v_c [m/min], procede-se como segue:

$$T = \frac{L}{f \times n} \quad (\text{min}) \quad \text{eq. (9)}$$

$$n = \frac{1000 \times v_c}{\pi \times D} \quad \text{eq. (10)}$$

resulta:

$$L = \frac{T \times f \times 1000 \times v_c}{\pi \times D} \quad (\text{mm}) \quad \text{eq. (11)}$$

substituindo-se a eq. (11) na eq. (7), tem-se:

$$v_c \times \left(\frac{T \times f \times 1000 \times v_c}{\pi \times D} \right)^z = C_L \quad \text{eq. (12)}$$

$$v_c^{z+1} \times T^z = C_L \left(\frac{f \times 1000}{\pi \times D} \right)^{-z} \quad \text{eq. (13)}$$

$$T \times v_c^{\frac{z+1}{z}} = C_L^{\frac{1}{z}} \left(\frac{f \times 1000}{\pi \times D} \right)^{-1} \quad \text{eq. (14)}$$

chamando:

$$\frac{z+1}{z} = x \quad C_L^{\frac{1}{z}} \left(\frac{f \times 1000}{\pi \times D} \right)^{-1} = C_t \quad \text{eq. (15)}$$

resulta

$$T \times v_c^x = C_t \quad \text{ou} \quad T = C_t \times v_c^{-x} \quad \text{eq. (16)}$$

, sendo esta a equação de Taylor.

2.6.7 Precisão e acabamentos obtidos na furação

A precisão de um furo usinado, no que se refere aos erros de forma e de medida, depende principalmente da geometria e do estado da afiação da ponta da broca. Quanto mais estreitas forem as tolerâncias exigidas no furo, mais dispendiosa será a operação para executá-lo. Estudos extensos mostram que as imperfeições mais frequentes que ocorrem na geometria do furo (Fig. 2.35) durante o processo de furação são:

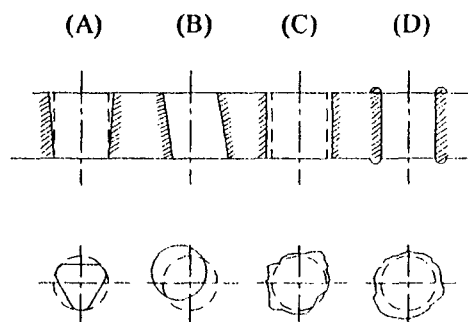


Figura 2.35 - Principais erros na geometria do furo.

1. Erros de forma (Fig 2.35 - A, B e C): Define-se como sendo o desvio de uma geometria prescrita em relação a forma básica reta, plana, circular ou cilíndrica [8]. Ocorre quando o diâmetro do furo não é uniforme ao longo de sua profundidade (DIN 1101).

1.a) Erro de cilindricidade (Fig. 2.35 -A e B): Erro de forma que acontece geralmente na furação de furos profundos com ferramentas helicoidais, em decorrência do desvio da ferramenta que ocorre por gumes não afiados no mesmo comprimento ou condições de corte fora de limites aceitáveis pelo par material/ferramenta de corte [8].

1.b) Erro de circularidade (Fig. 2.35 - C): São erros de forma que tomam as mais diferentes formas. Fatores críticos para este tipo de imperfeições são, entre outras, a rigidez do sistema (árvore/cone/ferramenta/peça), que podem ser minimizados pelo aumento do avanço e pelo uso de ferramentas mais rígidas.

2. Formação e altura das rebarbas na entrada e na saída dos furos (Fig. 2.35 - D): Dependem dos materiais da peça e da geometria da ferramenta, assim como das condições de usinagem utilizadas.

3. Erro de dimensão (Fig. 2.35 - C): Entende-se como erro de dimensão, o desvio de uma medida prescrita no projeto de um componente que é definido pela utilização posterior do produto e está indicada como valor real no desenho da peça [8]. Causado principalmente por ferramentas com gumes desgastados, vibrações da máquina-ferramenta, fixação incorreta da peça/ferramenta, etc..

O acabamento superficial obtido com brocas helicoidais, faz com que o processo de furação geralmente necessite de operações subseqüentes para garantir baixas rugosidades nos furos, como também para obter maior precisão dimensional e de forma [3, 25]. Segundo a literatura técnica, a tolerância dimensional obtida em furos realizados com brocas helicoidais com afiação convencional tipo N, $\sigma = 118^\circ$ alcança valores de H_{11} , sendo estes valores admissíveis.

2.7 FURAÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL

2.7.1 Introdução

A literatura técnica nem sempre é clara quando se refere aos aços inoxidáveis. Para situar o leitor de forma precisa, é apresentada uma breve classificação dos aços inoxidáveis e em seguida recomendações para a sua usinagem, principalmente para a furação.

Um dos aspectos mais comuns nos aços inoxidáveis é a presença de no mínimo 11% de cromo, que confere ao aço uma excelente resistência à corrosão e à oxidação, que são as mais importantes características deste material. Por outro lado, em geral, o aço inoxidável é mais difícil de ser usinado do que outros materiais, como as ligas de alumínio e os aços de baixo carbono.

O aço inoxidável austenítico é caracterizado pelo comportamento plástico durante o corte, mostrando a tendência de produzir cavacos longos e embaraçados, o que causa emperramento ou forma acúmulos de material na ponta da ferramenta. Em decorrência da maior resistência do material, o momento torsor e a força de avanço são maiores, o que por si só leva a um aumento da temperatura. Este é ainda acentuado pela baixa condutividade térmica destes aços. Desta maneira, há redução da vida da ferramenta e degradação da superfície usinada. Essas características gerais são devidas às seguintes propriedades do material usinado:

- Grande diferença entre o limite de escoamento e o limite de ruptura;
- Alta taxa de encruamento;
- Baixa condutividade térmica.

Apesar dessas propriedades, os aços inoxidáveis podem ser usinados, desde que se observe as condições apropriadas. Em geral, a usinagem de aços inoxidáveis requer mais torque do que a de aço-carbono, velocidades de corte mais baixas, ferramentas mais nobres e fixações mais rígidas. No torneamento pode ainda ser necessário o uso de quebra-cavacos ou enrolador de cavacos na ferramenta, e deve-se garantir uma lubrificação e refrigeração durante o corte [17]. Os aços inoxidáveis austeníticos são os que oferecem maior dificuldade de usinagem [27]. A adição de enxofre, selênio, chumbo, etc., a estes aços pode melhorar sensivelmente a sua usinabilidade.

Em aços inoxidáveis austeníticos que não contenham elementos favorecedores de usinabilidade recomenda-se realizar uma deformação a frio, para elevar a dureza a valores

compreendidos entre 180 e 240 HB, e assim conseguir um certo encruamento que favorecerá a sua usinagem [27].

2.7.2 Classificação dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são divididos em cinco grupos. Quatro são baseados em características microestruturais das ligas (ferrítica, martensítica, austenítica, austenítica mais ferrítica) e um baseado no tipo de tratamento usado (ligas endurecíveis por precipitação).

Os aços inoxidáveis austeníticos têm uma estrutura cúbica de face centrada e são não-magnéticos quando tratados termicamente. Estas ligas são divididas em duas categorias: as ligas-padrão contendo níquel para manter a estrutura austenítica à temperatura ambiente (S20100, S20910, S21904) e as ligas contendo uma quantidade substancial de manganês, usualmente com altos níveis de nitrogênio e, em alguns casos, níquel, para aumentar a sua resistência à tração (S30452).

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem boa ductilidade e tenacidade mesmo em temperaturas baixas e podem ser endurecidos substancialmente por trabalho a frio. O grau de endurecimento depende da composição da liga.

A resistência à corrosão das ligas austeníticas varia de boa a excelente, mas depende também da composição da liga.

O aço inoxidável austenítico mais comum é o S30400, que contém aproximadamente 18% de cromo e 8% de níquel. Para prevenir a corrosão intergranular a altas temperaturas, adiciona-se ao aço inoxidável titânio ou nióbio, para estabilizar o carbono (S32100, S34700 e DIN 1.4541) [17].

2.7.3 Parâmetros de corte para a furação de aços inoxidáveis

O avanço e a velocidade de corte são os fatores mais importantes na determinação da produção, pois a escolha de valores apropriados aumenta a vida da ferramenta e a produtividade entre as afiações [17]. As tabelas 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 mostram as condições de usinagem recomendadas para a furação de aços inoxidáveis; os parâmetros de usinagem podem ainda ser otimizados de acordo com as variáveis do processo.

Os parâmetros de usinagem são fornecidos para ligas em condição recozida (140-270 HB), exceto as ligas endurecíveis por precipitação, que são tratadas por solubilização (150-325 HB) ou normalizadas e supertemperadas, como S35000 e S35500. Para materiais tratados

termicamente ou endurecíveis a frio a uma dureza superior ao seu nível normal recozido, melhores resultados são obtidos através da redução das velocidades em aproximadamente 10% até 60% para ligas de maior dureza. São também usadas ferramentas de metal-duro ou aço-rápido para materiais de dureza elevada.

Tabela 2.2 - Parâmetros de furação recomendados para aços inoxidáveis [31].

DESIGNAÇÃO (UNS)	VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	AVANÇO (mm/rot) para diâmetros nominais de:				MATERIAIS DA FERRAMENTA HSS (AISI)
		6,4 mm	13 mm	25mm	38 mm	
Ligas Ferríticas						
S40500, S40900 S43000, S43400	18 - 21	0,10	0,175	0,30	0,38	M1, M7, M10
S44200, S44300 S44400, S44600	15 - 20	0,10	0,175	0,30	0,38	M42, T15
Ligas Martensíticas						
S40300, S41000	18 - 21	0,15	0,25	0,41	0,53	M1, M7, M10
S41400, S42000 S44010, S43100	15 - 18	0,15	0,25	0,41	0,53	M1, M7, M10
S44002, S44003 S44004	12 - 15	0,15	0,25	0,41	0,53	M1, M7, M10
Ligas Austeníticas						
S20100, S30100 S30200, S30400 S30403, S30430 S30500, S31600 S31603, S32100 S34700, S38400	15 - 18	0,10	0,175	0,30	0,38	M1, M7, M10
S30900, S30908 S31000, S21008 S31700, S31703	12 - 15	0,10	0,175	0,30	0,38	M1, M7, M10
S30910, S21904 S24100, S28200 S30452, N08020	9 - 14	0,10	0,175	0,30	0,38	M42, T15

Tabela 2.3 - Parâmetros de usinagem recomendados para furação com broca-canhão [31].

Material da peça	Material da ferramenta	Velocidade de corte (m/min)	Diâmetro (mm)	Avanço (mm/rot)	Fluido de corte
AÇO	K10 (*)	50 - 125	6 - 12	0,010 - 0,020	—————
	K20 (*)		12 - 18	0,010 - 0,050	
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO	—————	50 - 125	18 - 25	0,020 - 0,100	Refrigeração com alta pressão e remoção interna de cavacos
	—————		6 - 12	0,020 - 0,100	
	—————	46 - 91	12 - 25	0,040 - 0,200	Remoção interna de cavacos
	—————		—————	0,100 - 0,300	Remoção interna de cavacos

(*) Metal-duro.

Tabela 2.4 - Parâmetros de usinagem recomendados para furação com brocas helicoidais [31].

Material da peça	Material da ferramenta	Velocidade (m/min)	Diâmetro (mm)	Avanço (mm/rot)	Fluido de corte
AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	HSS HSS - E HSS - Co	3 - 17	6 - 12	0,04 - 0,15 0,13 - 0,23 (*) 0,10 - 0,15 (**)	óleos minerais óleos de corte aditivados óleos de corte sulfurizados emulsões
	S2 - S3	10 - 15 (*)	12 - 20	0,08 - 0,22 0,10 - 0,15 (**)	
	HSS (*) HSS (**)	20 (**)	20 - 30	0,15 - 0,30	
AÇO DIN 1.4541	HSS HSS - E	8 - 10 8 - 10	1 - 8 8 - 50	0,04 - 0,14 0,14 - 0,34	óleos - emulsões
	HM-inserto HM (*) (**)	70 - 85 35 - 65	20 6 - 12	0,08 - 0,10 0,14 - 0,20	
AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO	K20 (*)	26 - 54	10 - 14 14 - 17 17 - 30	0,14 - 0,20 0,16 - 0,23 0,19 - 0,25	pressão mín. de 10 bar para refr. interna. emulsão 6 - 10%
	HM (**)	40 - 60	6 - 12	0,08 - 0,14	
			12 - 18	0,14 - 0,20	

(*) revestidas com TiN.

(**) com canais internos de refrigeração.

Tabela 2.5 - Parâmetros de usinagem recomendados para furação com brocas curtas [31].

Material da peça	Material da Ferramenta	Velocidade (m/min)	Diâmetro (mm)	Avanço (mm/rot)	Fluido de corte
AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO	P15 (*) M15 (*) P40 (*) M40 (*)	180	16 - 20 21 - 22 23 - 28 29 - 34	0,07 0,09 0,11 0,12	Refrigeração interna para profundidades maiores que D Pressão mín. de 5 bar
	P35 P35 (*)	80 - 120 100 - 140	15 - 26 26 - 31	0,05 - 0,08 0,05 - 0,10	

(*) metal-duro com revestimento TiN.

2.7.4 Recomendações para o uso de fluido de corte na furação de aços inoxidáveis

O fluido de corte na furação do aço inoxidável tem uma função de refrigeração da ferramenta de corte e de lubrificação das guias da ferramenta contra as paredes do furo, de forma mais acentuada que nos aços-carbono ou de baixa liga, pelas seguintes razões:

- O aço inoxidável normalmente tem usinabilidade mais baixa do que aços-carbono ou ligados;
- A baixa condutividade térmica do aço inoxidável aumenta a necessidade de refrigeração.

Óleos emulsionáveis em água (normalmente em proporções de 1:12 a 1:20) e óleos de corte sulfoclorados (com viscosidade máxima de 300 SUS a 38°C) são os fluidos de corte mais usados na usinagem do aço inoxidável (Óleos EP ou de extrema pressão), sendo recomendados:

- Óleo sulfoclorado contendo aditivos de enxofre e de 8 a 10% de óleos graxos (sua viscosidade deve ser de aproximadamente 200 SUS a 38°C);
- Óleo sulfoclorado contendo aditivos de enxofre sem óleos graxos (viscosidade aproximada de 130 SUS a 38°C).

Na furação sugere-se uma parte de óleo sulfoclorado e três partes de parafina.

Fluidos emulsionáveis em água são usados na usinagem do aço inoxidável, principalmente pela necessidade de alto poder de refrigeração. Entretanto, as emulsões de óleo em água são inadequados para os casos onde o fluido de corte e a lubrificação da máquina possam se misturar. Muitos dos fluidos emulsionáveis em água não são apropriados às operações de corte severas.

Os fluidos de corte devem ter aditivos polares e de extrema pressão. Tem-se obtido resultados favoráveis com fluidos sintéticos. Em comparação com óleos de corte, os fluidos emulsionáveis em água podem levar a superfícies melhor acabadas, menores zonas afetadas pelo calor na ferramenta e, com isso, menor número de reafiações e maior produtividade [17].

A usinagem de aço inoxidável sem fluido de corte é normalmente restrita a pequenos lotes ou para operações especiais onde o uso de fluido de corte é impraticável, como na usinagem de peças que não podem ser contaminadas pelo fluido lubri-refrigerante. Formas complexas são algumas vezes usinadas a seco para evitar a entrada de fluido em lugares que não permitem limpeza imediata, o que tornaria necessária uma limpeza posterior.

2.7.5 Recomendações gerais na usinagem de aço inoxidável

Nas características que possuem influência na usinabilidade dos aços inoxidáveis incluem-se:

- Resistência à tração relativamente alta;
- Alta taxa de encruamento, principalmente nas ligas austeníticas;
- Alta ductilidade.

Isto explica a tendência do material a aderir na ferramenta durante operações tradicionais de usinagem. Os cavacos removidos na usinagem exercem alta pressão na ponta da ferramenta. Essa pressão, quando associada às altas temperaturas na interface cavaco/ferramenta devido à baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis, causam a soldagem do cavaco sobre a superfície da ferramenta. Outros problemas que surgem na furação de aços inoxidáveis austeníticos estão citados a seguir com sugestão para a solução.

- Para evitar vibrações, ferramentas e fixações devem ser as mais rígidas possíveis. As protuberâncias e balanços, tanto da peça como da ferramenta, devem ser minimizadas. Isso se aplica a ferramentas de torneamento, furação, alargadores, etc;
- Podem ser necessárias baixas velocidades de corte, particularmente para as ligas austeníticas de difícil usinagem, aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação e ligas martensíticas de alta dureza. Velocidades de corte excessivas resultam em desgaste e quebra de ferramentas, levando à necessidade de reafiação ou substituição das mesmas. Pequenas velocidades de corte com longas vidas de ferramenta são muitas vezes a resposta para o aumento da produção ou diminuição dos custos;
- Ferramentas de aço-rápido ou de metal-duro devem ser mantidas afiadas com fino acabamento superficial, para minimizar o atrito com o cavaco. Um gume de corte afiado produz um melhor acabamento na superfície e um aumento na vida da ferramenta. Para produzir um melhor gume de corte em ferramentas de aço-rápido, recomenda-se o uso de rebolos de granulometria 60 para o desbaste e granulometria 120 a 150 para o acabamento. A lapidação produz o melhor acabamento;
- Fluidos de corte devem ser selecionados ou modificados de modo a proporcionar lubrificação e refrigeração apropriadas e eficiente remoção de calor em uma quantidade suficiente para prevenir superaquecimento da ferramenta [17].

2.7.5.1 Furação de aço inoxidável

Em qualquer operação de furação, os seguintes fatores são importantes:

- A região de trabalho deve ser mantida limpa e os cavacos removidos frequentemente, devido à sujeira e à ação abrasiva dos mesmos, que podem cegar o gume da broca;
- As brocas devem ser corretamente afiadas;

- As brocas devem ser corretamente alinhadas e firmemente fixadas;
- O fluxo de fluido de corte deve ser corretamente dirigido ao furo;
- As brocas devem ser presas de modo que se tenha o menor comprimento em balanço possível para evitar problemas de flexão, que podem quebrar a broca ou causar erros nos resultados do trabalho;
- Podem ser necessários avanços elevados e velocidades baixas para reduzir ou eliminar o encruamento da peça.

Para evitar o acúmulo de cavacos, as brocas devem ser periodicamente retiradas. A regra geral, para furos longos, é furar até uma profundidade de 3 a 4 vezes o diâmetro da broca na primeira vez, 1 a 2 diâmetros na segunda vez e aproximadamente 1 diâmetro para cada uma das vezes subseqüentes (pica-pau) [14].

As brocas devem ficar “paradas” no mesmo lugar sem avanço durante o corte, principalmente em aços inoxidáveis austeníticos, pois isso pode levar a um endurecimento do material, o que facilita a retirada do mesmo (ciclo com avanço intermitente). Devido a isso, quando há congestionamento de cavacos as brocas devem ser retrocedidas rapidamente, e a operação deve recomeçar com seu avanço normal [17].

Pode-se evitar rupturas de brocas pequenas, mais sensíveis que as grandes a esforços de torção e de flexão, empregando-se as velocidades de corte conforme recomendada em literatura técnica. A ruptura de brocas pode dar-se ainda, pela má fixação da peça, da broca, ou de ambas, por um insuficiente ângulo de incidência, avanços altos ou pelo acúmulo de cavaco. Uma causa bastante freqüente é o emprego de velocidades de corte inadequadas, que podem ser insuficientes ou excessivas. Se a ruptura é provocada somente nos gumes cortantes, as razões podem ser muitas: deficiências na lubrificação, velocidade de corte elevada, avanço excessivo e excesso de cavaco acumulado [27].

2.8 MEIOS AUXILIARES

2.8.1 Fluidos de corte

2.8.1.1 Funções

Na fabricação por remoção de material por usinagem deseja-se fabricar peças dentro

de tolerâncias pré-especificadas e acabamentos superficiais pré-determinados com o menor custo possível. A exigência primária que deve ser feita a um fluido de corte para o processo de usinagem é que proporcione uma redução dos custos de usinagem pela redução do desgaste da ferramenta e melhoria da superfície do componente fabricado. Além disso, o fluido de corte tem funções como o transporte de cavaco para fora da região de trabalho, proteção contra a corrosão, eliminação do gume postiço, lubrificação e refrigeração do sistema, uma vez que para uma exigência maior de tolerância dimensional um aquecimento demasiado leva à dilatação térmica do componente, o que deve ser evitado.

São ainda desejáveis, nos fluidos de corte, qualidades adicionais como:

- Resistência à contaminação por bactérias e fungos;
- Não ter tendência ao envelhecimento (formação de borras, espumas, oxidação, perda de estabilidade, etc.);
- Não afetar a saúde do operador, quer pelo contato direto, quer pelos seus vapores e névoas;
- Facilidade de preparação e manutenção;
- Não atacar metais, plásticos, tintas, borrachas, elementos de vedação e outras peças da máquina;
- Boa transparência, para permitir a observação do processo de usinagem;
- Baixa inflamabilidade;
- Não afetar ou poluir o meio ambiente;
- Não ter cheiro incomodativo;
- Ter poder de remover impurezas;
- Boa molhabilidade e resistência a altas pressões;
- Boa filtrabilidade.

As qualidades exigidas variam de acordo com as aplicações e às vezes são até contraditórias. Não existe um fluido de características universais que atenda a todas elas. No desenvolvimento de meios lubri-refrigerantes, a melhoria de certas qualidades, por exemplo pelo uso de aditivos, induz frequentemente a piora de outras. Daí a necessidade do estudo de cada caso para a seleção do meio lubri-refrigerante mais adequado [8, 9].

2.8.1.2 Tipos de fluidos de corte

Em princípio tem-se fluidos de corte não miscíveis em água (óleos) e fluidos de corte miscíveis em água (emulsões e soluções aquosas). Estes ainda podem ser subdivididos em vários subgrupos. Fluidos de corte baseados apenas em água apresentam uma lubrificação hidrodinâmica precária e, em muitos processos de fabricação, apresentam apenas uma importância secundária, uma vez que o filme de lubrificação já é rompido com uma pequena variação da pressão entre o par de atrito, principalmente quando tem-se um aumento da temperatura. Pode-se, entretanto, melhorar consideravelmente a qualidade do filme lubrificante pela adição de aditivos polares como ácidos graxos, alcalóides graxos ou ésteres, tanto em emulsões (miscíveis em água) como em óleos de corte (não miscíveis em água). A ação destes aditivos não se restringe apenas à ação por absorção, mas também a uma reação com a superfície recém-formada que leva à formação de sabões metálicos.

Estes sabões formam filmes altamente viscosos, têm a propriedade de suportar pressões muito mais elevadas que o filme hidrodinâmico de lubrificante que se forma devido à ação do fluido de corte sobre a superfície. A ação destes sabões é prejudicada pela sua baixa resistência à temperatura, sendo que a aproximadamente 130°C o efeito cessa.

Para a estabilização da camada protetora que se forma sobre a face da ferramenta (em corte interrompido), podem ser adicionados aditivos ativos, os assim denominados de extrema pressão (EP). Estes apresentam suas vantagens quando existe uma ação muito grande de pressão e após atingir-se uma certa temperatura mínima entre as partes atritantes, levam a uma melhora das condições de atrito decorrente da boa propriedade de cisalhamento do produto formado.

Aditivando-se os fluidos de corte com aditivos polares e ativos é possível estender o seu emprego além das propriedades dos produtos isolados. No entanto, o poder de refrigeração desses fluidos é consideravelmente baixo [9].

2.8.1.3 Seleção de fluidos de corte

A seleção do meio lubri-refrigerante depende dos objetivos que se pretendem alcançar: aumento da produção, aumento da vida da ferramenta, arraste de cavacos, melhor acabamento superficial, etc.. Devem ser observadas as seguintes condições gerais do processo de fabricação, envolvendo:

- Processo de usinagem, variáveis de usinagem, material da peça e da ferramenta;

- Qualidade da usinagem: precisão de forma e dimensional, acabamento superficial;
- Máquinas-ferramentas usadas: simples, múltipla usinagem, produção individual, em série;
- Armazenamento, limpeza, tratamentos posteriores das peças;
- Sistemas de recirculação dos meios lubri-refrigerantes na zona de corte;
- Análise econômica: custos de preparação, manipulação, controle, transporte, manejo, armazenamento e benefícios obtidos;
- Segurança: efeitos sobre a saúde, névoas de óleo, risco de incêndio e descarte;
- Recomendações de fornecimento: apoio técnico do fornecedor, garantias de fornecimento, etc.;
- Despejo (reciclagem).

a) Quanto aos processos de usinagem

Como regra, em materiais de difícil usinagem usam-se baixas velocidades de corte, recomendando-se o uso de fluidos que tenham boas características de lubrificação. Ao contrário, em materiais de usinagem fácil usam-se altas velocidades de corte e o fluido deve ter, preponderantemente, boas qualidades refrigerantes.

Como regra geral, para aços, pode-se estabelecer o seguinte:

- Para materiais de usinagem difícil usam-se óleos com aditivos EP;
- Para materiais de usinagem fácil usam-se emulsões e soluções aquosas.

Para operações de furação convencional, os fluidos de corte recomendados são óleos emulsionáveis, óleos minerais sulfurados ou óleos minerais clorados. Estes proporcionam certo grau de lubrificação para impedir a trepidação do conjunto ferramenta-máquina-peça, diminuir a geração de calor devido ao atrito nas guias e retirar o calor da região de corte.

Para furação de aço inoxidável recomenda-se o uso de óleos emulsionáveis, óleos minerais sulfurados e óleos graxos minerais cloro-sulfurados [6, 8, 9].

b) Quanto ao material da ferramenta

O aço-rápido e o metal-duro, em regra, permitem o uso de qualquer meio lubri-refrigerante.

Para ferramentas cerâmicas o maior problema se resume na sensibilidade aos choques térmicos.

Para minimizá-los recomenda-se [9]:

- Ligar o fluxo refrigerante antes de iniciar a operação de corte (com exceção na retificação);
- Manter o fluxo refrigerante durante um pequeno espaço de tempo depois de concluído o corte;
- Usar óleos de baixas propriedades de transferência de calor, quando não há garantia de fluxo constante de refrigerante.

2.8.1.4 Forma de aplicação dos fluidos

Tem influência ponderável no sucesso da utilização de lubri-refrigerantes o modo com que estes são aplicados, isto é, volume, pressão, velocidade dos jatos e ângulo de impacto, assim como forma e número de bocais. É importante que o meio lubri-refrigerante seja aplicado antes e não depois do início do processo de furação, não devendo também haver interrupção na alimentação do fluido.

Em ferramentas de furação pode-se usar a alimentação pelo interior da própria ferramenta e/ou externa, por tubos e bocais.

Em furação profunda, o sistema de alimentação interna apresenta vantagens devido ao fato do fluido ser conduzido até próximo do gume, o que por alimentação externa dificilmente pode ser garantido. Deste modo reduz-se substancialmente o atrito e o aumento da temperatura no contato ferramenta-peça. Isto reduz o desgaste e prolonga o tempo de vida das ferramentas, resultando em custos reduzidos por furo usinado, devido à diminuição de perda de tempo com trocas e reafiações.

Dependendo da aplicação, geralmente podem ser usadas velocidades de corte e avanços maiores, aumentando desta forma a taxa de remoção de material e a produtividade.

A furação profunda exige o emprego de bombas de alta pressão e, conseqüentemente, provoca espalhamento de fluido e formação de névoas que poluem o ambiente [3, 9].

a) Considerações sobre sistemas de aplicação de fluidos de corte sob pressão

Diferentes fabricantes de brocas recomendam níveis variáveis de pressão e de vazão de fluido de corte para diferentes operações de furação. Para se determinar quanto fluido é necessário, inicialmente deve-se saber o seguinte:

- Características do material a ser furado;

- Diâmetro e profundidade dos furos;
- Posição de furação;
- Broca em rotação ou estacionária;
- Avanço requerido;
- Qualidade superficial e tolerâncias dimensionais requeridas.

Raramente se tem pressão excessiva. No entanto, freqüentemente um problema que ocorre no uso de altas pressões de fluidos de corte é a contenção dos respingos e recirculação do fluido. Outro problema está na limitação das máquinas, pois apesar de algumas máquinas CNC serem adequadas para esse tipo de furação, sob o ponto de vista de contenção e recirculação de fluido, a maioria ainda é fornecida sem capacidade de levar o fluido de corte através do eixo-árvore. Em muitos modelos de tornos CNC existe ainda uma limitação para a pressão que a vedação do porta-ferramentas pode suportar, normalmente 6 a 8 bar (0,6 a 0,8 MPa).

CAPÍTULO 3

PROPOSIÇÃO PARA O TRABALHO

O aço inoxidável austenítico DIN 1.4541 (SAE 321) é empregado largamente na fabricação de componentes de reatores nucleares, particularmente, na fabricação dos suportes e separadores dos tubos do combustível nuclear, onde o processo de furação é empregado em diversos diâmetros e em grandes quantidades de furos. O processo atualmente utilizado por um fabricante nacional de elementos combustíveis para reatores nucleares (INB) provém de uma tecnologia desenvolvida nos anos 70 e, desde então, não sofreu aprimoramento. Tanto as ferramentas utilizadas como o próprio processo deverão ser analisados no escopo deste trabalho, com o objetivo de melhorar a produtividade do processo de furação.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM ATUAL

Os componentes típicos furados são placas retangulares com espessura de 25 mm, onde são executados 15 fileiras de 16 furos com 10 mm de diâmetro (Fig. 3.1).

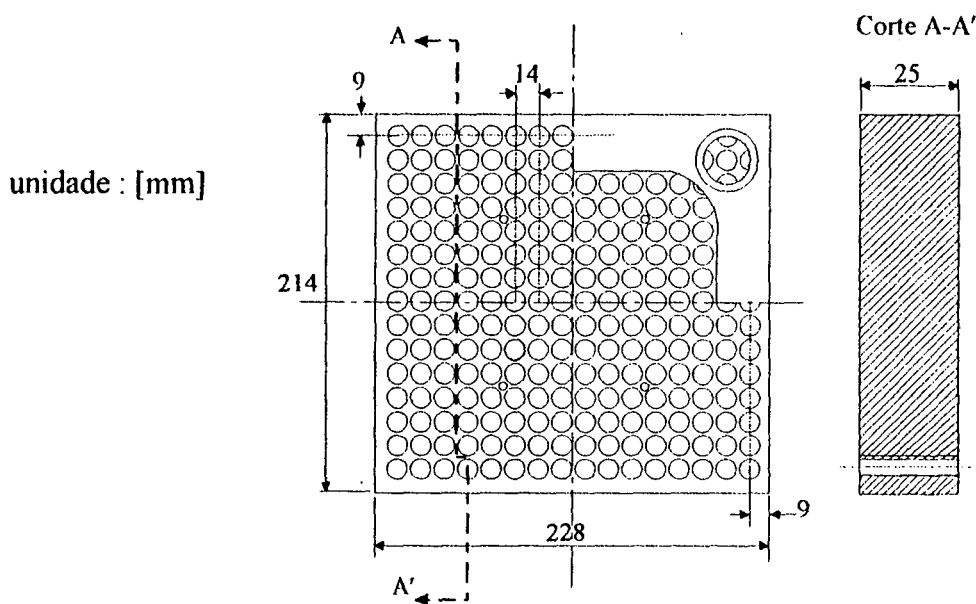


Figura 3.1 - Forma típica de uma placa separadora de tubos do elemento combustível.

A seqüência de usinagem atual consta de uma furação de centro e posterior furação, empregando o ciclo com avanço intermitente.

3.1.1 Qualidade dos furos (exigência mínima)

- Circularidade : $\leq 0,03$ mm
- Cilindricidade : $\leq 0,04$ mm
- Tolerância dimensional : $\leq H11$

3.1.2 Ferramentas de corte

As ferramentas utilizadas para a usinagem destes furos consistem de, inicialmente, uma broca de centro, forma A, conforme DIN 333 - NBR - 6386, com diâmetro $d_2 = 8$ mm, $\sigma = 120^\circ$, corte à direita e hélice à direita e, depois, uma broca helicoidal de haste cilíndrica, série normal, conforme DIN 338 - NBR - 7438, com diâmetro de 10 mm, tipo N, $\sigma = 118^\circ$, com afiação tipo N, conforme DIN 1412 - NBR - 6176, corte à direita e hélice à direita (D), grupo de material AR [28]. Os valores dos comprimentos e ângulos da broca helicoidal e da broca de centro estão mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Dimensões e ângulos das brocas utilizadas pela INB.

	α	δ	γ	σ	ψ	At (mm)	A1a (mm)	A2a (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)
Broca helicoidal	15-12°	30°±5°	30°±5°	118°±5°	45°+5° -0°	1,886	4,964	4,928	—	—	—	—
Broca de centro	—	—	—	120°	—	—	—	—	3,15 ^{+0,18} ₀	8 - h9	50 ^{±2}	3,9 ⁺¹ ₀

A figura 3.2 mostra a forma da broca helicoidal utilizada pela INB para o corte do aço DIN 1.4541.

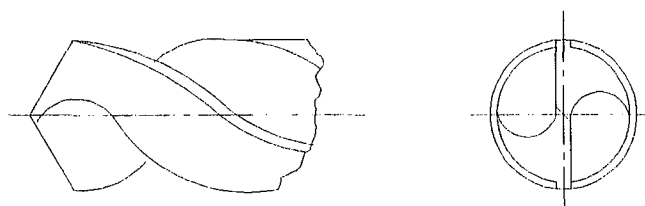


Figura 3.2 - Broca helicoidal - Afiação tipo N.

A utilização da broca de centro se deve ao fato da afiação da ponta da broca helicoidal, tipo N, não permitir valores toleráveis de circularidade, cilíndricidade e tolerância dimensional dos furos, durante a usinagem.

3.1.3 Máquina-ferramenta

A máquina ferramenta utilizada é uma fresadora universal de ferramentaria marca DECKEL, modelo FP41 NC (anexo 1A).

3.1.4 Fixação do corpo de prova e da ferramenta de corte

A placa separadora é fixada em morsa hidráulica, tendo-se o cuidado com o perpendicularismo da superfície desta com a ferramenta. A broca helicoidal é fixada com um comprimento de 95 mm, por pinça.

3.1.5 Fluido de corte

O fluido de corte é um óleo solúvel semi-sintético de alta diluição numa proporção de 1:50. A lubri-refrigeração é externa e abundante, utilizando um bico direcionador (anexo 5A).

3.1.6 Condições de corte

Os parâmetros de corte adotados pelo usuário da placa separadora em questão, fabricada em aço DIN 1.4541 são mostrados na tabela 3.2.

As condições de corte, bem como o avanço intermitente de 0,5 mm foram especificados segundo o processo adquirido pela INB no escopo do convênio NUCLEBRÁS / BRASIL / ALEMANHA. Não havia informações, nem estudos sobre a otimização destas condições de usinagem e do ciclo com avanço intermitente.

Tabela 3.2 - Parâmetros de corte utilizado pelo usuário.

	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Avanço intermitente (mm)
Broca helicoidal	9,42 (300 rpm)	0,1	0,5
Broca de centro	800 rpm	0,1	avanço contínuo

3.1.7 Metodologia de furação adotada pelo usuário

Executam-se os furos de centro conforme programa CNC pré-determinado. Os furos com as brocas helicoidais são realizados em seqüência aleatória, mantendo-se uma distância mínima de 30 mm entre centros na usinagem de um furo para o outro. Esta diferença impede que o aumento da temperatura decorrente da execução de um furo tenha uma influência negativa na abertura do furo seguinte. A broca de centro realiza 240 furos e a cada 80 furos a broca helicoidal é trocada por uma nova, a fim de garantir a tolerância dimensional e os erros de forma máximos exigidos à qualidade dos furos. Os furos são passantes e o bico de refrigeração é direcionado diretamente para a posição do furo.

3.2 COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL

Em virtude da evolução dos materiais de ferramentas nos últimos 10 anos e da necessidade de tornar o processo de usinagem competitivo em nível de mercado mundial, se faz necessário um reestudo de todo o processo de furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541.

Baseado nas informações de fabricantes de ferramentas de corte e em experiências próprias, foi elaborado um procedimento de ensaio com o objetivo de maximizar as informações com a minimização de ensaios (redução de consumo de matéria-prima e ferramentas de corte).

Na primeira etapa foi efetuado um estudo do ciclo pica-pau e do avanço intermitente, com o objetivo de comparar as profundidades empregadas pelo usuário, com as profundidades recomendadas pela literatura e fabricantes de brocas, em relação à vida das ferramentas, bem como averiguar a necessidade da execução ou não de furos de centro.

Na segunda etapa efetuou-se um estudo da afiação da ponta das ferramentas para condições de corte constantes, tendo como critério de avaliação as forças de usinagem, erros de forma dos furos e a vida da ferramenta ao longo do comprimento usinado pela broca, com o objetivo de determinar a mais eficiente afiação de ponta para a usinagem do aço em questão.

Na terceira etapa estudou-se a influência da variação dos parâmetros de corte com o objetivo de otimizar a vida útil das ferramentas de corte na usinagem do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A obtenção experimental de dados tecnológicos de usinagem é a única forma segura de trazer informações de corte para o usuário. Para aumentar a segurança das informações os ensaios foram repetidos em máquinas de diferentes configurações, sendo que alguns ensaios foram repetidos em todas as máquinas. Para minimizar o número de ensaios, se faz necessário limitar algumas variáveis de entrada, pelo que se optou trabalhar com diâmetros da broca constantes e iguais a 10 mm.

A análise dos resultados de usinagem foi feita tomando-se como critérios a qualidade dos furos (circularidade, cilindricidade e dimensões), a força de avanço e o momento torsor, o desgaste de flanco V_B e $V_{B\text{máx}}$, o desgaste das guias H , as condições da ponta da broca e a vida útil da ferramenta.

Para a realização dos ensaios dispunha-se de uma fresadora universal de ferramentaria (DECKEL, modelo FP41, anexo 1A), uma fresadora vertical CNC (AUERBACH, modelo FUW 400, anexo 1B) e um centro de usinagem (MITSUBISHI, modelo Dynamite 4500, anexo 1C).

A medição da força de avanço e do momento torsor foi realizada com uma plataforma piezoelétrica (KISTLER Instrument A.G., modelo 9273, anexo 3A), amplificadores de sinais de carga (KISTLER Instrument A.G., modelo 5006, anexo 3B), um sistema de aquisição automática de dados (HEWLETT-PACKARD, modelo 3563A, anexo 3C) e um microcomputador (SANSUNG, modelo 386 SX, anexo 3D). Para a medição das forças de usinagem, utilizou-se a sequência de montagem mostrada no item 2.6.2.4 deste trabalho (Fig. 2.25).

As verificações dimensionais dos furos e das ferramentas e o desgaste dos gumes foram executadas respectivamente por uma máquina de medir por coordenadas tridimensionais (ZEISS, modelo ZMC 550-CAA, anexo 3E), um microscópio de medição (CARL ZEISS JENA, modelo GWM, anexo 3F), uma máquina universal de medição (VEN CARL ZEISS JENA, modelo UMM, anexo 3G), um microscópio óptico de medição (NIKON, modelo MEASURESCOPE, anexo 3H) e um microscópio eletrônico de varredura (PHILIPS, modelo XL 30, anexo 3I).

As brocas utilizadas no ensaio foram fornecidas pela firma GÜHRING do Brasil (brocas de centro (HSS), forma A, conforme DIN 333-NBR-6386, com diâmetro $d_2 = 8$ mm, $\sigma = 120^\circ$, corte à direita e hélice à direita, brocas helicoidais (HSS) de haste cilíndrica não revestidas, série normal, conforme DIN 338-NBR-7438, com diâmetro de 10 mm, tipo N, conforme DIN 1412-NBR-6176, corte à direita e hélice à direita (D), grupo de material AR, com diferentes afiações

da ponta e brocas helicoidais (HSS), com revestimento de TiN e TiCN, com a mesma especificação das brocas helicoidais não revestidas, $\sigma = 135^\circ$ e afiação em cruz) [26].

As brocas testadas* foram as seguintes:

- Afiação em cruz (HSS) - $\sigma = 135^\circ$
- Afiação em cruz (HSS) - $\sigma = 118^\circ$
- Afiação com diminuição do gume transversal (HSS) - $\sigma = 135^\circ$
- Afiação tipo “S” (HSS) - $\sigma = 135^\circ$
- Afiação em cruz (HSS com revestimento de TiN) - $\sigma = 135^\circ$
- Afiação em cruz (HSS com revestimento de TiCN) - $\sigma = 135^\circ$

O material ensaiado foi em parte fornecido pelo usuário e complementado pela Eletroação Altona/ Blumenau/SC, sendo forjado pela Aços Finos Piratini/Charqueadas/RS. As composições químicas dos materiais ensaiados estão mostrados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição química dos materiais de ensaio.

MATERIAL FORNECIDO PELO USUÁRIO	C - $\leq 0,08$ %	Mn - $\leq 2,00$ %		
	Si - $\leq 1,00$ %	P - $\leq 0,045$ %		
	Ti - $\geq 5 \times \%C, \leq 0,8\%$	Ni - 9 a 12 %		
	S - $\leq 0,03$ %	Cr - 17 a 19 %		
MATERIAL FORNECIDO PELA ELETROAÇÃO ALTONA	C - 0,075 %	Mn - 1,50 %	S - 0,018 %	Al - 0,013 %
	Si - 0,31 %	P - 0,018 %	Cr - 17,71 %	Sn - 0,036 %
	Ti - 0,424 %	Ni - 10,21 %	Mo - 0,22 %	W - 0,022 %
	Cu - 0,02 %	Nb - 0,479 %	B - 0,0009 %	Co - 0,09 %

As propriedades mecânicas dos materiais do ensaio são:

- Dureza HB : 130 a 190 HB (material do corpo de prova = 150 HB).
- Tensão de escoamento ($p/ 0,2\%$ de deformação plástica) = 205 N/mm².
- Resistência à tração: 500 a 750 N/mm².
- Redução de área na fratura: 50%.
- Alongamento na fratura ($L=5D$) = 40%

* As dimensões e ângulos das brocas do ensaio estão demonstrados no anexo 2.

As propriedades físicas dos materiais estão apresentadas a seguir:

- Densidade a 20°C: 7,9 kg/dm³
- Calor específico a 20°C: 0,50 J/g°C
- Resistência ao choque: 95,1 - 149,1 J
- Módulo de elasticidade: 200 x 10³ N/mm²
- Não magnetizável

A figura 3.3 mostra a seqüência de furação em cada corpo de prova e a distância entre os furos. Foram utilizados dois corpos de prova com diferentes dimensões: 140 x 260 x 60 mm e 100 x 110 x 65 mm, por causa dos diferentes fornecedores de material. Devido às diferentes espessuras dos materiais, tornou-se necessária a variação nas profundidades de furação, conforme a espessura do corpo de prova para o máximo aproveitamento deste. Para os corpos com espessuras de 60 e 65 mm, a profundidade de corte foi de 25 e 30 mm, respectivamente. Os furos foram realizados em linha, obedecendo a distância mínima de 1,5xD entre os centros dos mesmos, para eliminar possíveis influências causadas na usinagem de um furo sobre o outro, executado no mesmo corpo de prova [4]. Os furos cegos foram realizados nos dois lados do corpo de prova, usinados em linha, conforme mostrado na figura 3.3. Os corpos de prova foram usinados anteriormente, para garantir o paralelismo e o perpendicularismo entre suas faces.

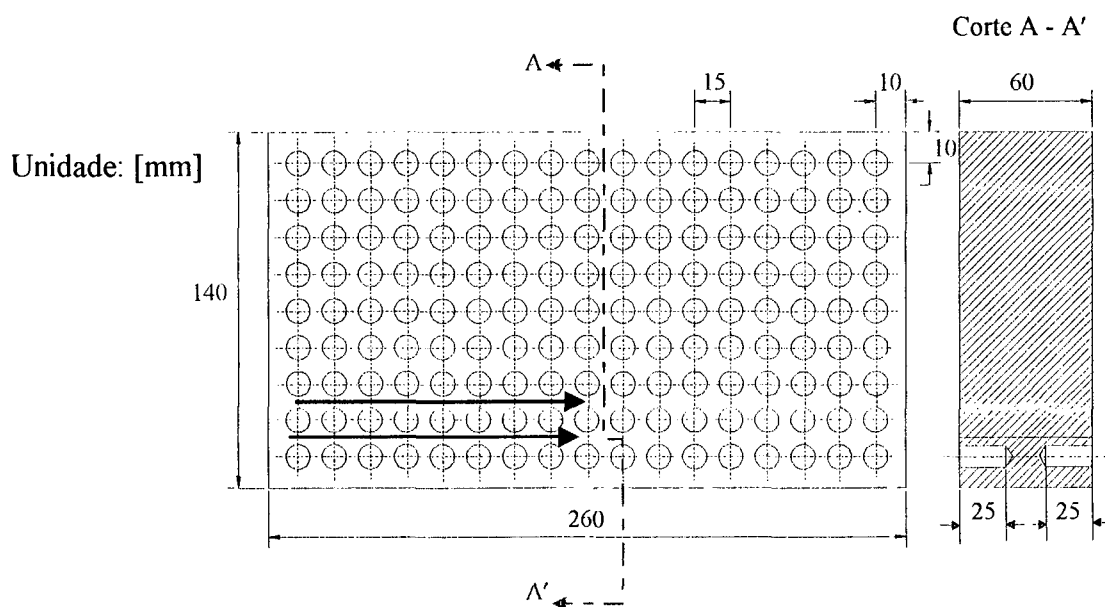


Figura 3.3 - Corpo de prova.

Os corpos de prova foram fixados rigidamente em uma morsa hidráulica, e esta, sobre a mesa da máquina-ferramenta, mantendo-se o perpendicularismo da superfície de corte com a ferramenta. As brocas foram fixadas com um comprimento de 95 mm, por pinça.

Os critérios adotados para a análise das ferramentas em cada etapa dos ensaios foram estabelecidos em conjunto entre o usuário das placas separadoras dos tubos de elemento combustível e o LMP, determinando-se valores aceitáveis para o processo e que proporcionem a melhor escolha da ferramenta.

Os critérios considerados foram os seguintes:

- Circularidade : $\leq 0,030$ mm
- Cilindricidade : $\leq 0,040$ mm
- Comprimento de furação : ≥ 240 furos (6000 mm)
- Desgaste de flanco : $V_{B\text{máx}} \leq 1,0$ mm
- Tolerância dimensional : $\leq H 11$

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS NAS DIFERENTES ETAPAS DO TRABALHO

3.4.1 Primeira etapa

Esta etapa foi desenvolvida numa fresadora universal de ferramentaria na INB, cidade de Resende - RJ. Verificou-se inicialmente a necessidade do furo de centro na furação das placas separadoras dos tubos do elemento combustível e a influência na variação do ciclo pica-pau e do avanço intermitente na vida da ferramenta, comparando a profundidade do ciclo utilizado pelo usuário com o recomendado pela literatura e fabricantes de ferramentas de corte.

3.4.1.1 Ferramentas de corte

As ferramentas ensaiadas foram brocas helicoidais de HSS não revestidas e brocas helicoidais de HSS revestidas com TiN e TiCN, ambas com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$ (anexo 2B). A utilização da afiação em cruz para este ensaio foi recomendada pela literatura técnica e pelo fabricante das ferramentas de corte.

Os furos foram realizados com furação de centro prévia, exceto quando se verificou a qualidade dos furos sem furação de centro. A broca de centro foi a mesma utilizada pelo usuário.

3.4.1.2 Condições de corte

A tabela 3.4 mostra os parâmetros de corte adotados para esta etapa do trabalho. Estes valores foram determinados conforme informações do usuário e da literatura especializada.

Tabela 3.4 - Parâmetros de corte.

brocas/parâmetros	velocidade de corte (m/min)	avanço (mm/rot)	ciclo pica-pau (mm)
afiação em cruz - HSS	15	0,1	1D, 1D e 1D
afiação em cruz - TiN	15	0,1	1D, 1D e 1D
afiação em cruz - TiCN	15	0,1	1D, 1D e 1D
broca de centro	800 rpm	0,1	avanço contínuo

A literatura recomenda, para ciclos “pica-pau” e furos até $3xD$, profundidades de penetração da ferramenta de $1xD$, $1xD$ e $1xD$ [14]. Os resultados obtidos com a utilização do ciclo pica-pau e do avanço intermitente, nestas profundidades, no entanto, não confirmaram a expectativa da literatura. Em todos os ensaios o colapso da ferramenta de corte se deu entre o primeiro e o terceiro furo, sendo que na broca não revestida, houve a soldagem do cavaco na ponta da broca e nas brocas revestidas com TiN e TiCN, houve a quebra da ferramenta em diversos pedaços, não podendo mais ser aproveitada para reafiação.

Esta profundidade do ciclo “pica-pau”, recomendado pela literatura, proporcionaria uma grande redução no tempo de usinagem das placas separadoras dos tubos do elemento combustível, em relação ao processo utilizado pelo usuário.

Os resultados obtidos pelo usuário na furação, utilizando o avanço intermitente de 0,5 mm, eram mais favoráveis e passou-se a empregar este procedimento na continuidade desta etapa do trabalho.

3.4.1.3 Fluido de corte

O fluido de corte utilizado foi um óleo solúvel semi-sintético de alta diluição, numa proporção de 50:1. A alimentação do fluido foi externa e abundante, utilizando-se um bico direcionado para o início do furo (anexo 5A).

3.4.1.4 Metodologia do ensaio

Para cada broca helicoidal do ensaio, realizou-se um ensaio de vida até o colapso total da ferramenta e determinou-se os erros de forma e as dimensões dos furos com e sem furação de centro prévia. Para o ensaio de vida, análise dimensional e dos erros de forma, utilizou-se brocas novas, realizando cada uma três furos e, os valores apresentados, foram as médias entre eles. Os valores obtidos foram comparados com as exigências máximas a cada erro de forma e dimensional dos furos, pré-estabelecidos. Análise a cada 40 furos de 25 mm de profundidade.

3.4.1.5 Análise dos resultados

Com relação as dimensões e erros de forma dos furos, com e sem furação de centro prévia, a tabela 3.5 mostra os valores encontrados em furos executados com as diferentes brocas, utilizando-se inicialmente a broca de centro.

Tabela 3.5 - Dimensões e erros de forma com furação de centro prévia.

Broca / Nº de Furos unid. (mm)	Circularidade				Cilindricidade			
	Diâm. efetivo	Erro máx.	Erro mín.	Erro de circul.	Diâm. efetivo	Erro máx.	Erro mín.	Erro de cilind.
A / 3	10,080	0,0120	-0,0100	0,0220	10,082	0,0039	-0,0135	0,0274
B / 3	10,065	0,0090	-0,0102	0,0192	10,057	0,0117	-0,0154	0,0271
C / 3	10,043	0,0086	-0,0097	0,0183	10,063	0,0089	-0,0190	0,0279

Broca A- Afiação em cruz (HSS) - $\sigma = 135^\circ$

Broca B- Afiação em cruz (TiN) - $\sigma = 135^\circ$

Broca C- Afiação em cruz (TiCN) - $\sigma = 135^\circ$

Com o furo de centro prévio verificou-se que qualquer uma das brocas do ensaio executa furos com dimensões e erros de forma dentro de valores admissíveis, anteriormente estabelecidos.

A tabela 3.6 mostra os valores dos erros de forma e a tolerância dimensional dos furos analisados na execução de um furo sem uma prévia furação de centro.

Tabela 3.6 - Dimensões e erros de forma sem furação de centro prévia.

Broca / N° de Furos unid. (mm)	Circularidade				Cilindricidade			
	Diâm. efetivo	Erro max.	Erro min.	Erro de circul.	Diâm. efetivo	Erro max.	Erro min.	Erro de cilind.
A / 3	10,157	0,0196	-0,0314	0,0310	10,169	0,0186	-0,0271	0,0457
B / 3	10,131	0,0227	-0,0221	0,0448	10,170	0,0224	-0,0254	0,0478
C / 3	10,174	0,0199	-0,0223	0,0422	10,175	0,0190	-0,0275	0,0465

Broca A- Afiação em cruz (HSS) - $\sigma = 135^\circ$

Broca B- Afiação em cruz (TiC) - $\sigma = 135^\circ$

Broca C- Afiação em cruz (TiCN) - $\sigma = 135^\circ$

Os valores encontrados na furação sem furo de centro demonstram um aumento significativo dos erros de forma e dimensionais, sendo seus valores maiores do que os permitidos, portanto, não sendo recomendados neste processo de furação.

Utilizando-se as brocas revestidas com TiN e profundidade de furação de 25 mm, a ferramenta executou 130 furos com um desgaste $V_{B\text{máx}}$ de 0,275 mm e a broca com revestimento de TiCN, realizou 100 furos, apresentando um desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$ de 0,26 mm. O colapso total destas ferramentas se deu com 10% a mais na quantidade de furos, não sendo mais possível a medição dos desgastes de flanco. O início do colapso caracterizava-se por um ruído (na forma de estalos) durante a usinagem. A broca helicoidal de HSS sem revestimento, com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, executou 240 furos, mantendo um desgaste de flanco $V_{B\text{máx}} = 0,310$ mm, apenas chegando ao colapso após 300 furos.

Os resultados obtidos com o avanço de 0,1 mm/rot, com intermitência a cada 0,5 mm se mostraram bastante favoráveis para ferramentas com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, sendo que todas apresentaram vidas superiores à obtida com ferramentas com afiação tipo N. A vida mais curta das ferramentas revestidas foi reavaliada na segunda etapa deste trabalho.

A profundidade de furação e o ciclo pica-pau, recomendado por literatura, não se mostraram adequados para o corte do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541 com brocas helicoidais de HSS, com ou sem revestimento e afiação em cruz, devido à baixíssima vida que proporciona às ferramentas.

3.4.2 Segunda etapa

Esta etapa foi desenvolvida em uma fresadora vertical CNC no CMPJ, na Escola Técnica Tupy, na cidade de Joinville - SC. Seu principal objetivo foi o de limitar o número de experimentos e variáveis (tipos, materiais, geometria e afiação da ponta da broca, condições de corte, fluido de corte, etc.) que envolvem o processo de usinagem a ser estudado. Para tanto, optou-se em verificar a influência da modificação da afiação da ponta das brocas helicoidais não revestidas utilizadas para o corte do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541, mantendo-se as outras variáveis constantes. Adotou-se parâmetros de corte constantes (v_c , f e p), material de corte, geometria e material de ferramenta e tipo de fluido lubri-refrigerante, colhendo-se dados sobre força de avanço e momento torsor, erros de forma (circularidade e cilindridade) e dimensional nos furos, a forma do cavaco e o desgaste de flanco e guias ao longo do comprimento usinado pelas brocas. Analisou-se, também, o desgaste de flanco e guias, força de avanço e momento torsor das brocas helicoidais de HSS com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, com revestimento de TiN, utilizando-se as mesmas condições de corte e intervalo de medição, comparando sua eficiência, em relação às brocas não revestidas. Segundo o fabricante desta ferramenta revestida [29], sua vida útil e custo são bem superiores às brocas helicoidais de HSS, devido ao revestimento TiN. Este diminui o atrito entre as partes em contato, reduzindo a temperatura de usinagem e aumentando a resistência ao desgaste mecânico da ferramenta.

3.4.2.1 Ferramentas de corte

As ferramentas utilizadas neste ensaio foram brocas helicoidais com mesma geometria, com e sem revestimento, com diferença apenas nos ângulos de ponta e tipos de afiações. Os ângulos e as dimensões das brocas do ensaio estão mostrados no anexo 2C. A escolha das diferentes afiações desta etapa foi em função de recomendações da literatura técnica, que evidencia o uso de brocas com diminuição, quase total, do gume transversal para o corte dos aços inoxidáveis. A broca de centro e os parâmetros de corte foram os mesmos utilizados pelo usuário.

Em seqüência testou-se as seguintes brocas helicoidais:

1^o) Afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$

2^o) Afiação com redução do gume transversal - $\sigma = 135^\circ$

3^o) Afição tipo S - $\sigma = 135^\circ$

4^o) Afição em cruz - $\sigma = 118^\circ$

5^o) Afição em cruz (HSS com revestimento de TiN) - $\sigma = 135^\circ$

3.4.2.2 Condições de corte

Os parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço, para as brocas helicoidais do ensaio, foram determinados conforme dados de revisão bibliográfica e estão mostrados na tabela 3.7; Segundo STEMMER [14], o avanço recomendado para ferramentas com estas afiações é de 1% do diâmetro até 15 mm e a velocidade de corte é de 8 a 15 m/min. O ciclo com avanço intermitente e o avanço da ferramenta foram os mesmos utilizados pela INB.

Tabela 3.7 - Parâmetros de corte constantes.

Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Avanço intermitente (mm)
15	0,10	0,5

3.4.2.3 Fluido de corte

O fluido de corte usado nos testes foi o RENOLUB - NH 5000, numa emulsão de proporção 20:1. A alimentação do fluido foi externa e abundante, utilizando um bico direcionado para o início do furo (anexo 5B).

3.4.2.4 Metodologia do ensaio

Foram ensaiadas brocas helicoidais de HSS não revestidas com 4 diferentes tipos de afiações e brocas de HSS com revestimento de TiN e afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, diâmetro de 10 mm, fornecidas pela GÜHRING, sendo todas de mesma geometria. Para cada broca ensaiada, não revestida, foram adquiridos dados como a força de avanço e o momento torçor, o desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$, erros de forma (circularidade e cilíndricidade) e dimensionais dos furos e forma do cavaco produzidos na operação de furação ao longo do comprimento usinado. Para as brocas revestidas adquiriu-se dados referente ao desgaste $V_{B\text{máx}}$, força de avanço, momento torçor e forma dos cavacos ao longo do comprimento usinado.

3^o) Afição tipo “S” - $\sigma = 135^\circ$

4^o) Afição em cruz - $\sigma = 118^\circ$

5^o) Afição em cruz (HSS com revestimento de TiN) - $\sigma = 135^\circ$

3.4.2.2 Condições de corte

Os parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço, para as brocas helicoidais do ensaio, foram determinados conforme dados de revisão bibliográfica e estão mostrados na tabela 3.7; Segundo STEMMER [14], o avanço recomendado para ferramentas com estas afiações é de 1% do diâmetro até 15 mm e a velocidade de corte é de 8 a 15 m/min. O ciclo com avanço intermitente e o avanço da ferramenta foram os mesmos utilizados pela INB.

Tabela 3.7 - Parâmetros de corte constantes.

Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Avanço intermitente (mm)
15	0,10	0,5

3.4.2.3 Fluido de corte

O fluido de corte usado nos testes foi o RENOLUB - NH 5000, numa emulsão de proporção 20:1. A alimentação do fluido foi externa e abundante, utilizando um bico direcionado para o início do furo (anexo 5B).

3.4.2.4 Metodologia do ensaio

Foram ensaiadas brocas helicoidais de HSS não revestidas com 4 diferentes tipos de afiações e brocas de HSS com revestimento de TiN e afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, diâmetro de 10 mm, fornecidas pela GÜHRING, sendo todas de mesma geometria. Para cada broca ensaiada, não revestida, foram adquiridos dados como a força de avanço e o momento tursor, o desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$, erros de forma (circularidade e cilindricidade) e dimensionais dos furos e forma do cavaco produzidos na operação de furação ao longo do comprimento usinado. Para as brocas revestidas adquiriu-se dados referente ao desgaste $V_{B\text{máx}}$, força de avanço, momento tursor e forma dos cavacos ao longo do comprimento usinado.

Foram colhidos dados referentes ao desgaste de flanco ($V_{B\text{máx}}$), (V_B) e o desgaste das guias (H).

Utilizou-se, para execução dos gráficos, o desgaste $V_{B\text{máx}}$, pois este é o que mais influencia o fim da vida da ferramenta. O desgaste das guias H não foi significativo ao transcorrer dos comprimentos usinados.

A figura 3.5 mostra o comportamento do desgaste $V_{B\text{máx}}$ das brocas de HSS com 4 diferentes afiações, não revestidas, e das brocas de HSS com revestimento de TiN, ao longo do comprimento usinado. A forma típica das curvas é idêntica às descritas amplamente na literatura [8], podendo ser subdividida em três regiões distintas. A 1ª região de estabilização do gume, a 2ª de desgaste normal e a 3ª região de desgaste progressivo, que normalmente culmina no colapso da ferramenta (Análise da curva da broca com afiação tipo S - $\sigma = 135^\circ$, Fig. 3.5).

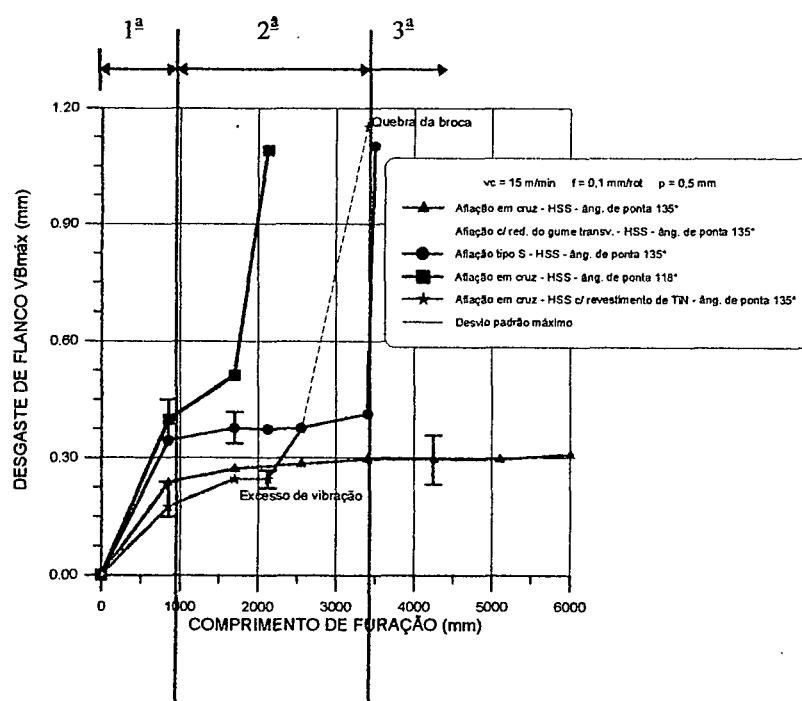


Figura 3.5 - Desgaste de Flanco $V_{B\text{máx}}$ em função do comprimento usinado.

As brocas de HSS, não revestidas, com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, foram as únicas que conseguiram chegar no limite proposto de 6000 mm de comprimento de furação.

As ferramentas com revestimento de TiN e afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, não superaram o comprimento usinado pelas brocas de HSS com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$ não revestidas, sendo que o colapso da broca se caracterizou pela sua quebra total (Das três brocas testadas, duas quebraram-se e, na outra, o ensaio foi interrompido precocemente. A parte tracejada da curva

referente as brocas revestidas é apenas indicativa de sua quebra). Para esclarecer este comportamento não esperado das ferramentas revestidas foram analisadas as composições químicas do núcleo das ferramentas revestidas e não revestidas. Utilizando um microscópio eletrônico de varredura do laboratório de Materiais da UFSC, analisou-se as brocas, demonstrando serem suas composições químicas praticamente iguais.

A pouca performance das brocas helicoidais de HSS com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$ revestidas com TiN, levou-nos a verificar a quantidade retirada de revestimento TiN na usinagem, nos gumes da ferramenta (medido na face, 1 mm abaixo do gume) (Fig. 3.6).

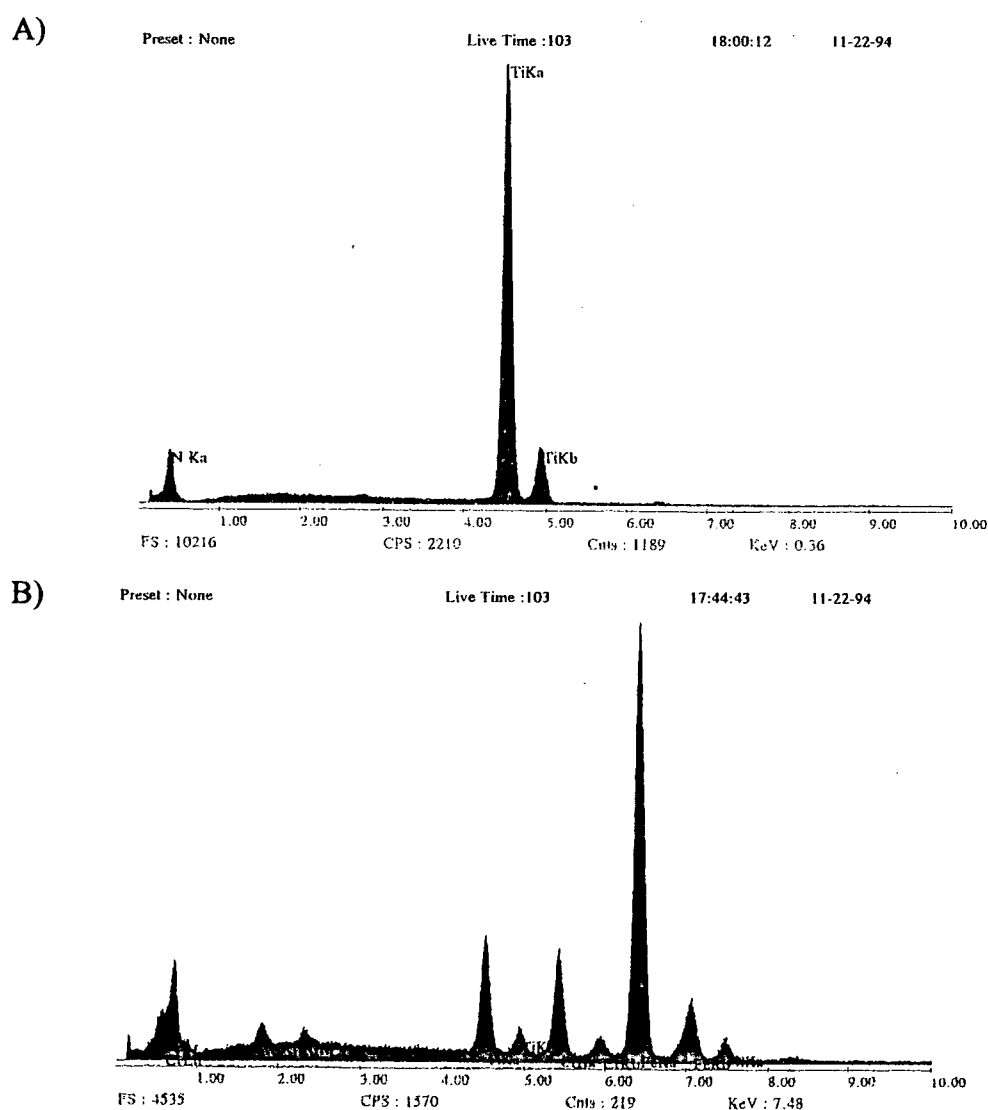


Figura 3.6 - Elementos de liga da superfície da broca de HSS com revestimento de TiN

A) Broca nova;

B) Depois de 2500 mm (100 furos) de comprimento usinado.

A análise da figura 3.6 e da tabela 3.8, mostrou que o revestimento TiN, ao final de 100 furos, praticamente, foi todo retirado. A tabela 3.8 demonstrou a não existência do nitrogênio e a baixa porcentagem de titânio na superfície da ferramenta depois do comprimento usinado, não contendo mais o revestimento de TiN na região de atrito do cavaco.

Tabela 3.8 - Elementos de liga na superfície da broca antes e depois da usinagem.

Elementos (%)	W	Mo	Ti	Cr	Fe	Ni	N
Fer. nova	----	----	87,393	----	----	----	12,607
Fer. (100 furos)	3,887	2,744	9,864	11,547	67,596	68,677	----

Uma possível causa para o colapso das brocas revestidas é a perda do revestimento e com isto uma modificação drástica das condições de atrito da ferramenta no furo, levando a um aumento no momento torsor, até superar a resistência torcional da broca. Os menores valores iniciais do desgaste de flanco das brocas revestidas ao longo do comprimento usinado, se deve ao fato do revestimento de TiN propiciar maior resistência ao desgaste e menor atrito entre os gumes da ferramenta e o material de corte. Um inconveniente a se salientar é que as brocas revestidas não podem ser reafiadas pelo usuário.

A broca não revestida com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$ demonstrou sua eficiência em relação à vida da ferramenta, pois seu comprimento usinado foi bem superior à afiação tipo S - $\sigma = 135^\circ$, à afiação em cruz - $\sigma = 118^\circ$ e à broca de HSS revestidas com TiN.

Os comprimentos de furação realizados pelas diferentes brocas foram os seguintes:

- Afiação em cruz (HSS) - $\sigma = 135^\circ$ - 6000 mm
- Afiação de redução de gume transversal (HSS) - $\sigma = 135^\circ$ - 1700 mm
- Afiação tipo S (HSS) - $\sigma = 135^\circ$ - 3500 mm
- Afiação em cruz (HSS) - $\sigma = 118^\circ$ - 2125 mm
- Afiação em cruz (HSS com revestimento de TiN) - $\sigma = 135^\circ$ - 2500 mm

Os testes com as ferramentas com afiação com redução de gume transversal - $\sigma = 135^\circ$ foram interrompidos antes do colapso total, devido à grande vibração causada no processo de furação.

Ao longo de todo comprimento de furação as brocas helicoidais do ensaio apresentavam um ruído característico, mais acentuado nas brocas com afiação com redução do gume

transversal - $\sigma = 135^\circ$ e de menor intensidade nas brocas revestidas. O aumento do ruído emitido serviu como identificação da proximidade do fim da vida da ferramenta.

b) Força de avanço

A figura 3.7 mostra o comportamento da força de avanço das brocas em função do comprimento usinado pelas ferramentas. Todas as ferramentas ensaiadas apresentam um aumento da força de avanço, similar ao comportamento do desgaste de flanco.

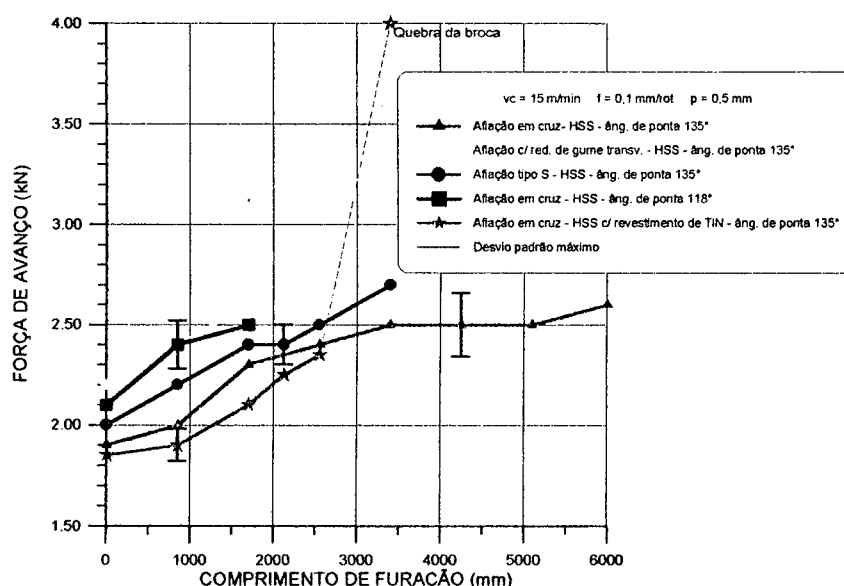


Figura 3.7 - Força de avanço em função do comprimento usinado.

Esta característica de crescimento da força de avanço se deve ao fato do desgaste das ferramentas ao longo do comprimento de furação. Com um desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$, valor médio de 0,3 mm, a força de avanço alcançada pelas brocas helicoidais de HSS com afiação em cruz $\sigma = 135^\circ$ não revestidas, foi em média de 2,5 kN. Valores acima podem servir como critério de fim de vida para estas brocas, mantendo-se as mesmas condições de usinagem. As outras afiações, com exceção das brocas helicoidais de HSS revestidas com TiN, tiveram valores de força de avanço maiores, até o fim do ensaio, devido à perda do poder do corte dos gumes.

Com as brocas helicoidais de HSS com revestimento de TiN, registraram-se os menores valores de força de avanço (na 1ª e 2ª região de desgaste), devido à diminuição do atrito proporcionado pelo revestimento TiN.

c) Momento torsor

A figura 3.8 mostra a variação do momento torsor em função do comprimento de furação em cada afiação ensaiada.

Este gráfico também mostra uma íntima relação entre o momento torsor, a força de avanço e o desgaste $V_{B\text{máx}}$. As brocas com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, com e sem revestimento, produziram momentos torsores menores em relação às outras afiações das brocas helicoidais.

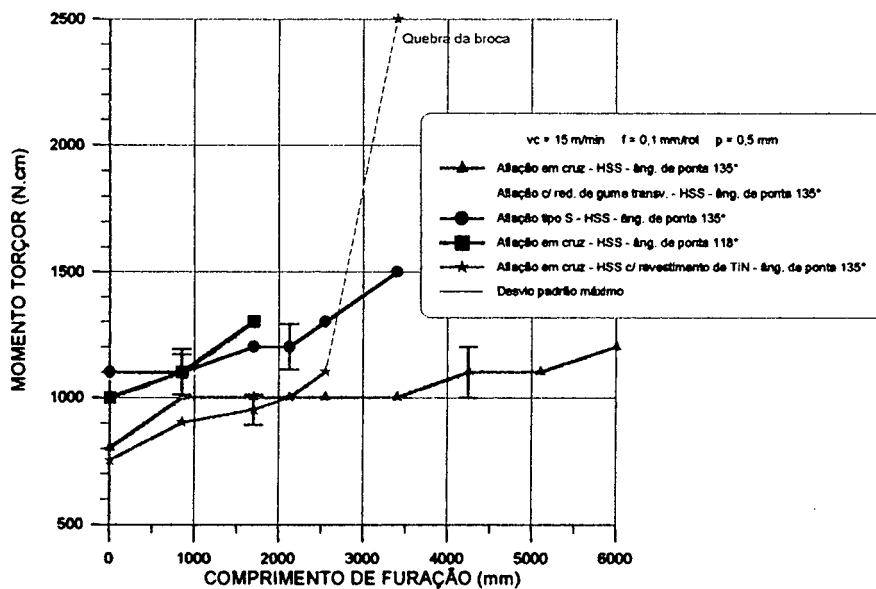


Figura 3.8 - Momento torsor em função do comprimento usinado.

d) Forma do cavaco

Por causa do ciclo com avanço intermitente muito pequeno (0,5 mm), o cavaco gerado na usinagem apresentou-se em pedaços e lascas, bem regular ao longo do comprimento usinado.

Este cavaco é facilmente transportado para fora do furo, não obstruindo os canais das brocas nem atritando entre as paredes do furo e as guias da broca.

e) Tolerâncias dimensionais e erros de forma dos furos

A tabela 3.9 mostra os valores dos erros de forma e a tolerância dimensional dos furos, analisados ao longo do comprimento usinado pelas brocas.

A broca com afiação com redução de gume transversal ($\sigma = 135^\circ$) não apresentou valores admissíveis pré-estabelecidos em relação à tolerância dimensional dos furos, devido à excessiva vibração causada na usinagem. As demais brocas ensaiadas mantiveram os erros de forma e dimensionais dentro da faixa admissível.

Tabela 3.9 - Tolerância dimensional e erros de forma dos furos.

Broca / Nº de Furos unid. (mm)	Circularidade				Cilindricidade			
	Diâm. efetivo	Erro máx.	Erro mín.	Erro de circul.	Diâm. efetivo	Erro máx.	Erro mín.	Erro de cilind.
A / 1	10,069	0,0113	-0,0119	0,0232	10,089	0,0158	-0,0133	0,0291
B / 1	10,070	0,0137	-0,0126	0,0263	10,077	0,0141	-0,0133	0,0274
C / 1	10,124	0,0110	-0,0176	0,0286	10,120	0,0087	-0,0188	0,0275
D / 1	10,062	0,0124	-0,0074	0,0198	10,062	0,0079	-0,0121	0,0200
A / 34	10,078	0,0146	-0,0143	0,0289	10,084	0,0168	-0,0158	0,0326
B / 34	10,065	0,0075	-0,0051	0,0126	10,052	0,0102	-0,0077	0,0179
C / 34	10,125	0,0129	-0,0077	0,0206	10,129	0,0101	-0,0229	0,0329
D / 34	10,043	0,0080	-0,0080	0,0160	10,048	0,0147	-0,0075	0,0222
A / 68	10,086	0,0103	-0,0126	0,0229	10,075	0,0171	-0,0195	0,0367
B / 68	10,063	0,0113	-0,0098	0,0211	10,060	0,0115	-0,0102	0,0217
C / 68	10,122	0,0145	-0,0096	0,0241	10,128	0,0203	-0,0191	0,0395
D / 68	10,065	0,0078	-0,0072	0,0150	10,047	0,0080	-0,0062	0,0142
B / 84	10,079	0,0126	-0,0105	0,0131	10,062	0,0097	-0,0106	0,0203
A / 102	10,081	0,0084	-0,0124	0,0209	10,066	0,0180	-0,0182	0,0362
D / 102	10,060	0,0063	-0,0086	0,0149	10,050	0,0074	-0,0070	0,0144
A / 136	10,079	0,0087	-0,0086	0,0175	10,064	0,0131	-0,0171	0,0302
D / 136	10,055	0,0089	-0,0104	0,0193	10,068	0,0090	-0,0082	0,0172
A / 170	10,078	0,0122	-0,0101	0,0223	10,076	0,0197	-0,0182	0,0379
A / 240	10,062	0,0135	-0,0211	0,0246	10,063	0,0139	-0,0130	0,0269

Broca A- Afiação em cruz- $\sigma = 135^\circ$

Broca B- Afiação em cruz- $\sigma = 118^\circ$

Broca C- Afiação com redução de gume Transversal- $\sigma = 135^\circ$

Broca D- Afiação tipo "S" - $\sigma = 135^\circ$

Nesta etapa pode-se concluir que utilizando afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$ e demais condições de corte constantes, uma broca helicoidal de HSS, não revestida, executa os 240 furos de 25 mm de profundidade pré-estabelecida com um desgaste de flanco $V_{Bm\acute{a}x} = 0,3$ mm e, ainda, possui condições de corte, não ultrapassando valores limitantes de erros de forma e tolerância dimensional. Em relação à broca helicoidal de HSS com afiação convencional tipo N, utilizada pelo usuário, a afiação em cruz possibilita uma aumento de produtividade acima de 200%.

Com relação às outras afiações testadas, a afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$ mostrou-se superior em produtividade. A utilização de afiação com diminuição de gume transversal - $\sigma = 135^\circ$ não é recomendada para utilização nestas condições de corte, devido à grande vibração gerada na operação, não possibilitando alcançar os valores pré-estabelecidos com relação à tolerância dimensional. As outras brocas helicoidais de HSS como a afiações tipo “S” e em cruz- $\sigma = 118^\circ$ não são recomendadas para o corte do material de teste nestas condições, pois não conseguiram realizar o limite mínimo de comprimento usinado (6000 mm). Para a afiação tipo “S”, se o critério fundamental, para a análise, fosse a qualidade dos furos, certamente esta afiação seria considerada, devido aos menores valores encontrados com relação a erros de forma e dimensionais e por ter conseguido o segundo valor com relação a comprimento usinado (Tab. 3.9). A broca helicoidal com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$ com revestimento de TiN não é recomendada para o corte do aço DIN 1.4541, nestas condições de corte, devido ao curto comprimento de furação, a não possibilidade da reafiação e o custo elevado com relação às brocas não revestidas. Para otimizar as condições de trabalho na terceira etapa deste trabalho, será realizado um estudo aprofundado com as brocas de HSS, não revestidas e com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$.

3.4.3 Terceira etapa

Esta etapa foi desenvolvida em um centro de usinagem, na Universidade de Caxias do Sul-RS e teve como objetivo a otimização dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e ciclo com avanço intermitente) do par ferramenta/material de corte, analisando o desgaste de flanco dos gumes das ferramentas ao longo do comprimento de furação e verificando os erros de forma, tolerância dos furos e as forças de usinagem produzidas em cada combinação das condições de corte do ensaio.

3.4.3.1 Ferramentas de corte

As ferramentas utilizadas para esse ensaio foram brocas de centro e brocas helicoidais de HSS, não revestidas, com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$ (Fig. 3.9). Foram utilizadas 81 brocas helicoidais com a mesma geometria e afiação de ponta. Suas medidas e ângulos estão em anexo 2A. A broca de centro e os parâmetros de corte foram os mesmos utilizados pelo usuário.

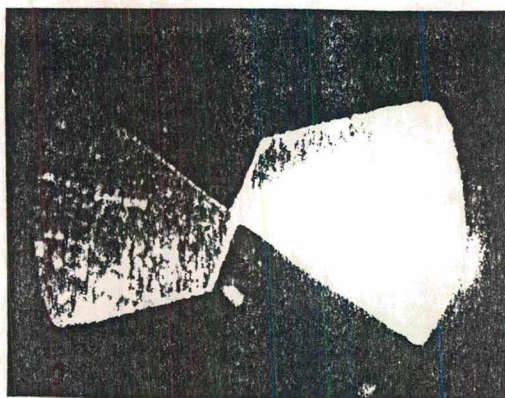


Figura 3.9 - Vista frontal da afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$.

3.4.3.2 Condições de corte

Para este ensaio de otimização dos parâmetros de corte foram selecionados três valores de velocidade de corte, avanço e ciclo com avanço intermitente, baseado nos resultados obtidos nas primeiras etapas deste trabalho. A velocidade de corte = 15 m/min, o avanço = 0,1 mm/rot e o avanço intermitente = 0,5 mm foram considerados como mínimos. Os valores adotados são da série normalizada R 40 (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 - Valores de parâmetros de corte para o ensaio de otimização.

$v_c1 = 15$ m/min	$f1 = 0,1$ mm/rot	$p1 = 0,5$ mm
$v_c2 = 18$ m/min	$f2 = 0,125$ mm/rot	$p2 = 1,0$ mm
$v_c3 = 20$ m/min	$f3 = 0,15$ mm/rot	$p3 = 1,5$ mm

3.4.3.3 Fluido de corte

O fluido de corte utilizado foi o mesmo da segunda etapa deste trabalho (item 3.4.2.3), na mesma proporção de emulsão, lubri-refrigeração externa e abundante, realizada por dois bicos afastados de 45° e direcionados para o início do furo (anexo 5B).

3.4.3.4 Metodologia do ensaio

De forma idêntica aos ensaios realizados nas primeiras etapas, os corpos de prova eram rigidamente montados sobre a mesa da máquina-ferramenta. Os furos eram não passantes e executados com furação de centro.

Padronizou-se ciclos de medição do desgaste de flanco para cada 21 furos de 30 mm de profundidade. No entanto, sempre que se apresentavam irregularidades no comportamento das ferramentas (como mudança no nível de ruído) os intervalos de medição eram diminuídos.

A tabela 3.11 mostra a ordem adotada para a combinação dos parâmetros de corte para este ensaio. Em cada combinação foram testadas três brocas helicoidais e os valores apresentados, são as médias das medições. As duas parcelas cortantes do gume principal da broca foram avaliados segundo seu desgaste e os valores de $V_{B\text{máx}}$ apresentados foram a média entre eles. Para a verificação dos erros de forma e medição das forças de usinagem que envolvem cada combinação, foram realizados os ensaios com brocas novas e com três furos para cada combinação. Os dados apresentados foram as médias entre os três furos e permitiram avaliar as diferenças entre as diversas combinações de parâmetros de corte. Os valores foram anotados em planilhas adequadas (anexo 4).

Tabela 3.11 - Ordem de combinações de parâmetros.

1	$v_c1 - f1 - P1$	10	$v_c2 - f1 - P1$	19	$v_c3 - f1 - P1$
2	$v_c1 - f2 - P1$	11	$v_c2 - f2 - P1$	20	$v_c3 - f2 - P1$
3	$v_c1 - f3 - P1$	12	$v_c2 - f3 - P1$	21	$v_c3 - f3 - P1$
4	$v_c1 - f1 - P2$	13	$v_c2 - f1 - P2$	22	$v_c3 - f1 - P2$
5	$v_c1 - f2 - P2$	14	$v_c2 - f2 - P2$	23	$v_c3 - f2 - P2$
6	$v_c1 - f3 - P2$	15	$v_c2 - f3 - P2$	24	$v_c3 - f3 - P2$
7	$v_c1 - f1 - P3$	16	$v_c2 - f1 - P3$	25	$v_c3 - f1 - P3$
8	$v_c1 - f2 - P3$	17	$v_c2 - f2 - P3$	26	$v_c3 - f2 - P3$
9	$v_c1 - f2 - P3$	18	$v_c2 - f2 - P3$	27	$v_c3 - f2 - P3$

3.4.3.5 Análise dos resultados

a) Desgaste das ferramentas

As 27 combinações dos ensaios de vida realizados com as brocas de HSS, não revestidas, com afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, foram repetidos três vezes, para aumentar a confiabilidade dos resultados.

Os gráficos* das figuras 3.10 a 3.18 mostram os valores médios do comportamento da vida das ferramentas, indicando a máxima dispersão dos resultados na faixa de desgaste regular (2ª região de desgaste).

Como a medição da marca de desgaste foi efetuada em intervalos regulares de 21 furos de 30 mm de profundidade, próximo ao final da vida das ferramentas, nem sempre foi possível chegar a este intervalo completo, porque antes de serem completados os furos pré-estipulados no programa CNC do centro de usinagem, o ruído das ferramentas aumentava sensivelmente e o ensaio era interrompido. A decisão de interrupção do ensaio era tomada pelo operador, e não por um sistema de monitoramento automático, de forma que a dispersão dos valores finais de desgaste foram desconsiderados.

Para facilitar a interpretação da influência dos parâmetros de corte variados, os resultados são apresentados em três grupos de gráficos que, no entanto, contêm a mesma informação. No primeiro grupo de 9 gráficos (Fig. 3.10, 3.11 e 3.12) é apresentado o resultado das curvas, variando-se a velocidade de corte em cada gráfico, mantendo-se a intermitência do avanço e o avanço constantes. No segundo e terceiro grupo são apresentadas as combinações dos mesmos resultados para a variação do avanço e da intermitência do avanço respectivamente (Fig. 3.13, 3.14 e 3.15 (avanço intermitente); 3.16, 3.17 e 3.18 (avanço)).

Os resultados mostram que tanto o aumento da velocidade de corte como do avanço e da intermitência do avanço causam uma diminuição na vida da ferramenta e que a velocidade de corte tem a maior influência. Apenas com a velocidade de 15 m/min, avanço de 0,1 mm/rot e avanço intermitente de 0,5 mm, obteve-se resultados satisfatórios em relação ao comprimento pré-estabelecido de 6000 mm de comprimento de furação (Tab. 3.12).

Tabela 3.12 - Comprimento usinado em cada combinação de parâmetros de corte.

		COMPRIMENTO USINADO (mm)			[(**) destruição da broca]
		p = 0,5 mm	p = 1,0 mm	p = 1,5 mm	
vc = 15 m/min	f = 0,1 mm/rot	7560	3030	1530	
	f = 0,125 mm/rot	5310	2100	1140	
	f = 0,15 mm/rot	2880	1260	330	
vc = 18 m/min	f = 0,1 mm/rot	1950	1350	720	
	f = 0,125 mm/rot	1260	300	90	
	f = 0,15 mm/rot	630	180	60 (**)	
vc = 20 m/min	f = 0,1 mm/rot	900	420	300	
	f = 0,125 mm/rot	840	90 (**)	60 (**)	
	f = 0,15 mm/rot	270	60 (**)	30 (**)	

* Nestes gráficos, quando evidenciado a palavra **colapso**, quer se caracterizar a destruição total da ponta da ferramenta, conforme mostrado na figura 2.31 deste trabalho.

a.1) Mantendo-se o avanço intermitente constante e variando a velocidade de corte e o avanço

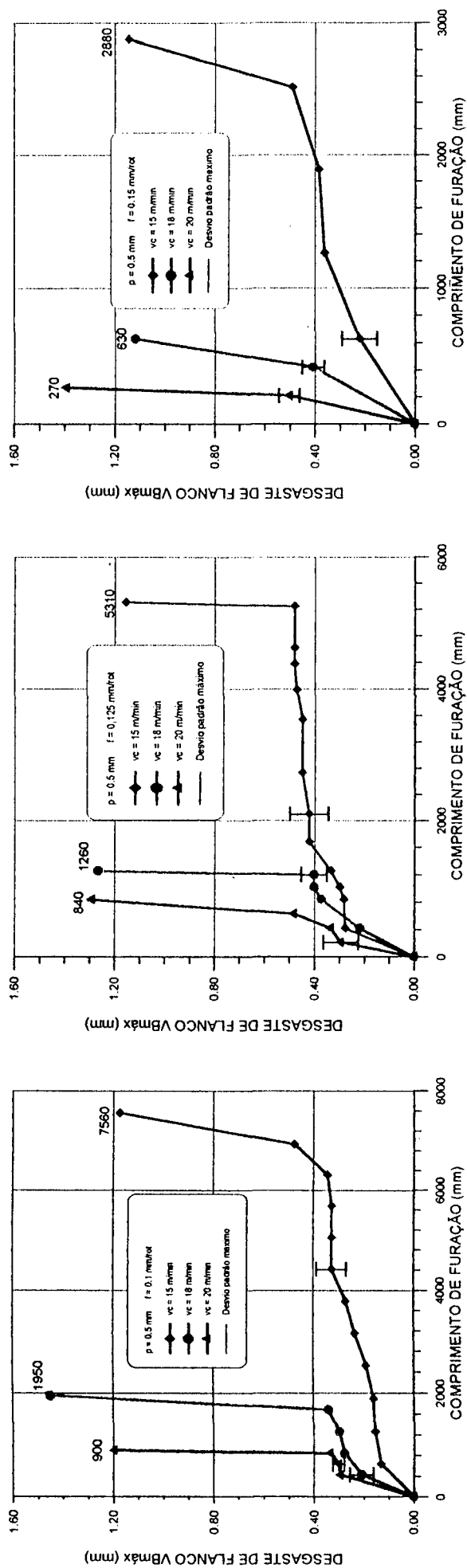


Figura 3.10 - Desgaste de flanco $V_{Bmáx}$ com $p = 0,5$ mm, variando a velocidade de corte e o avanço.

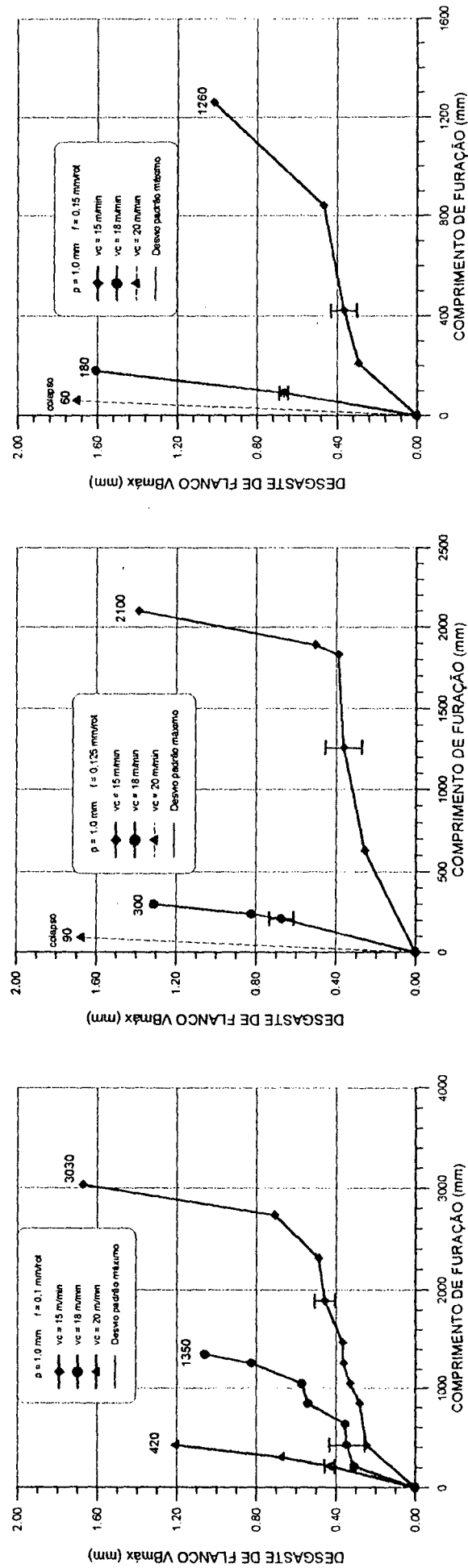


Figura 3.11 - Desgaste de flanco $V_{Bmáx}$ com $p = 1,0$ mm, variando a velocidade de corte e o avanço.

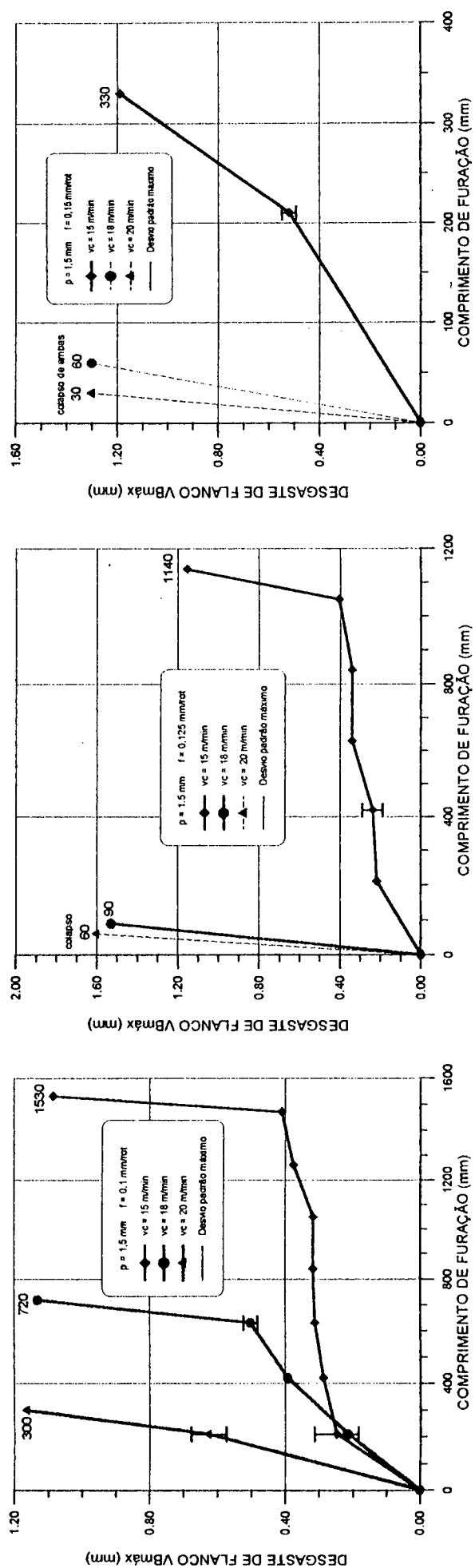


Figura 3.12 - Desgaste de flanco $V_{g\text{máx}}$ com $p = 1,5$ mm, variando a velocidade de corte e o avanço.

a.2) Mantendo-se a velocidade de corte constante e variando o avanço e o avanço intermitente

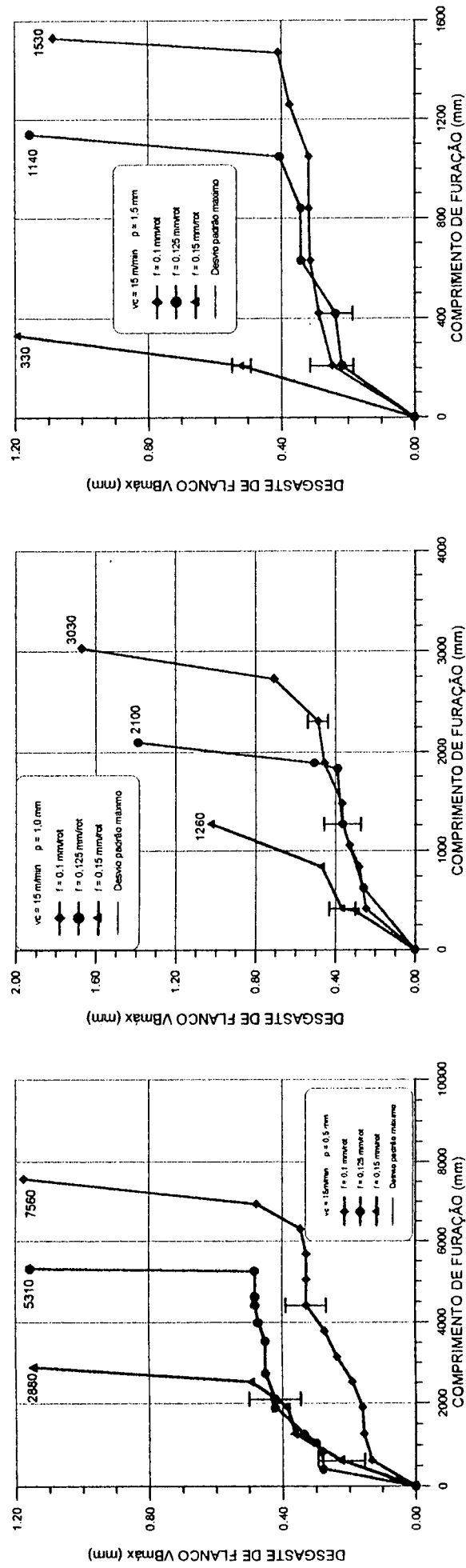


Figura 3.13 - Desgaste de flanco $V_{Bmáx}$ com $v_c = 15$ m/min, variando o avanço e o avanço intermitente.

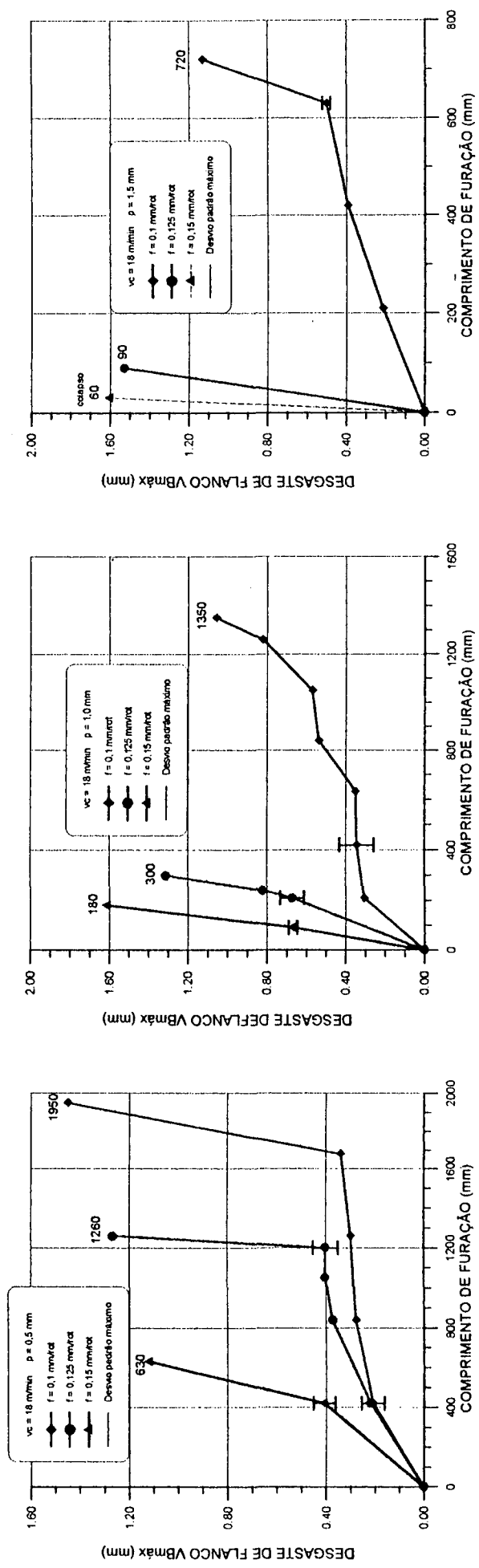


Figura 3.14 - Desgaste de flanco $V_{Bmáx}$ com $v_c = 18 \text{ m/min}$, variando o avanço e o avanço intermitente.

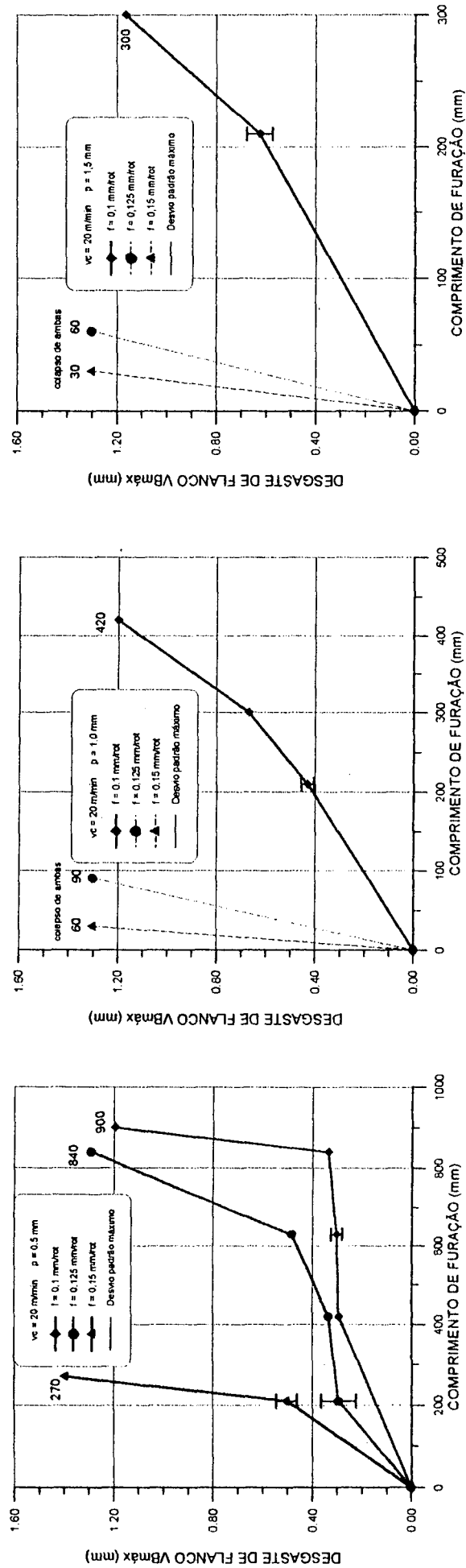


Figura 3.15 - Desgaste de flanco $V_{bmáx}$ com $V_c = 20$ m/min, variando o avanço e o avanço intermitente.

a.3) Mantendo-se o avanço constante e variando o avanço intermitente e a velocidade de corte

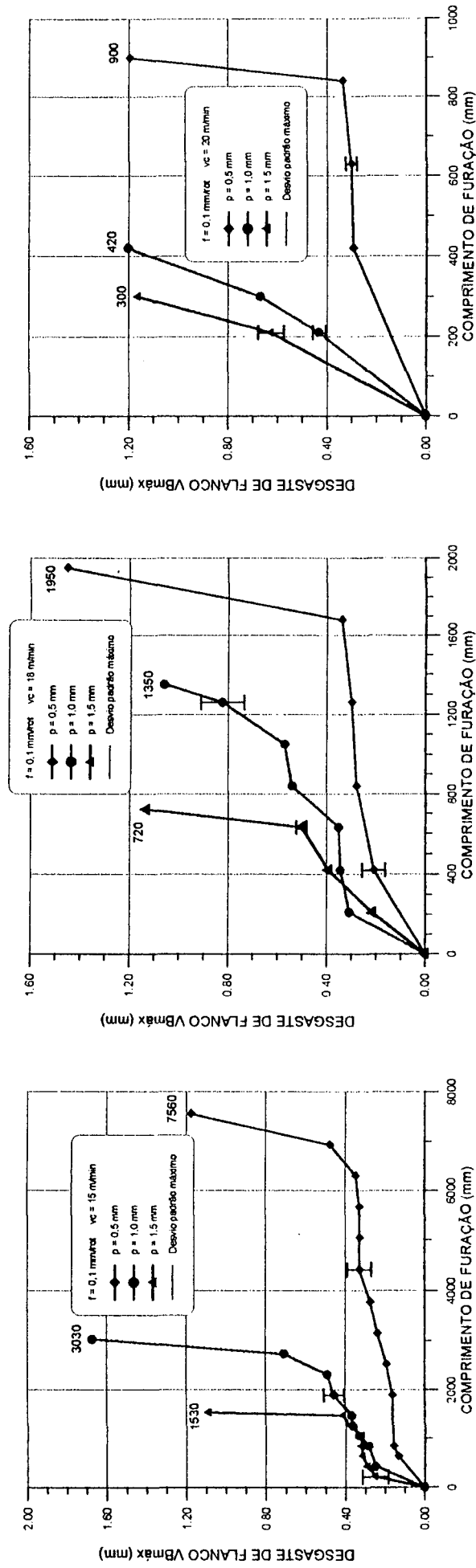


Figura 3.16 - Desgaste de flanco $V_{b\max}$ com $f = 0,1$ mm/rot, variando o avanço intermitente e a velocidade de corte.

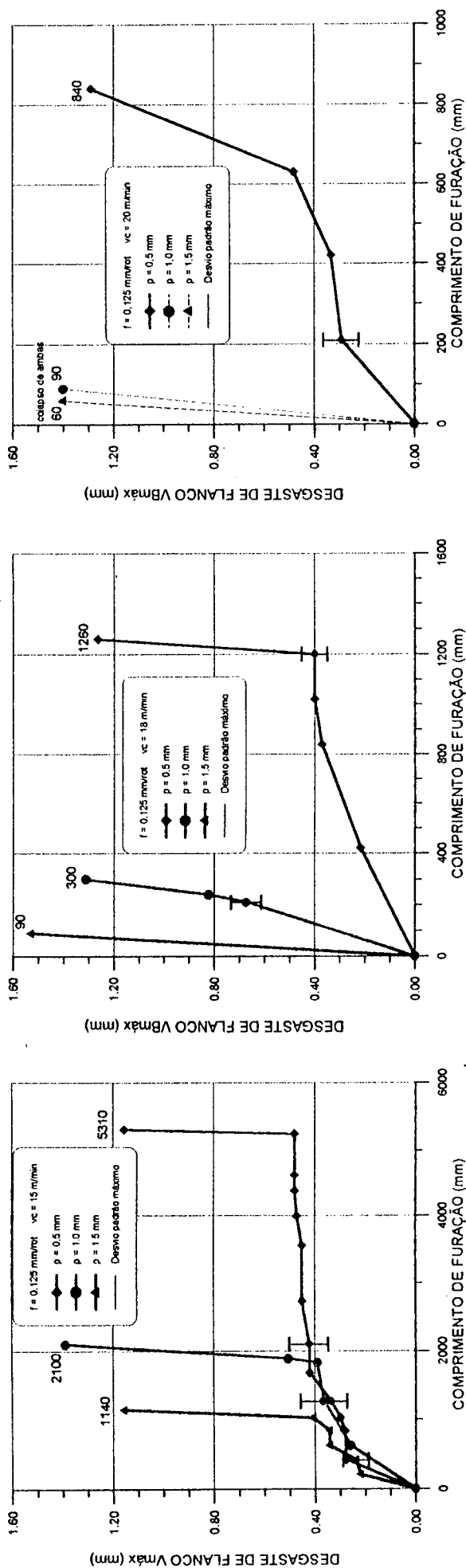


Figura 3.17 - Desgaste de flanco V_{bmax} com $f = 0,125$ mm/rot, variando o avanço intermitente e a velocidade de corte.

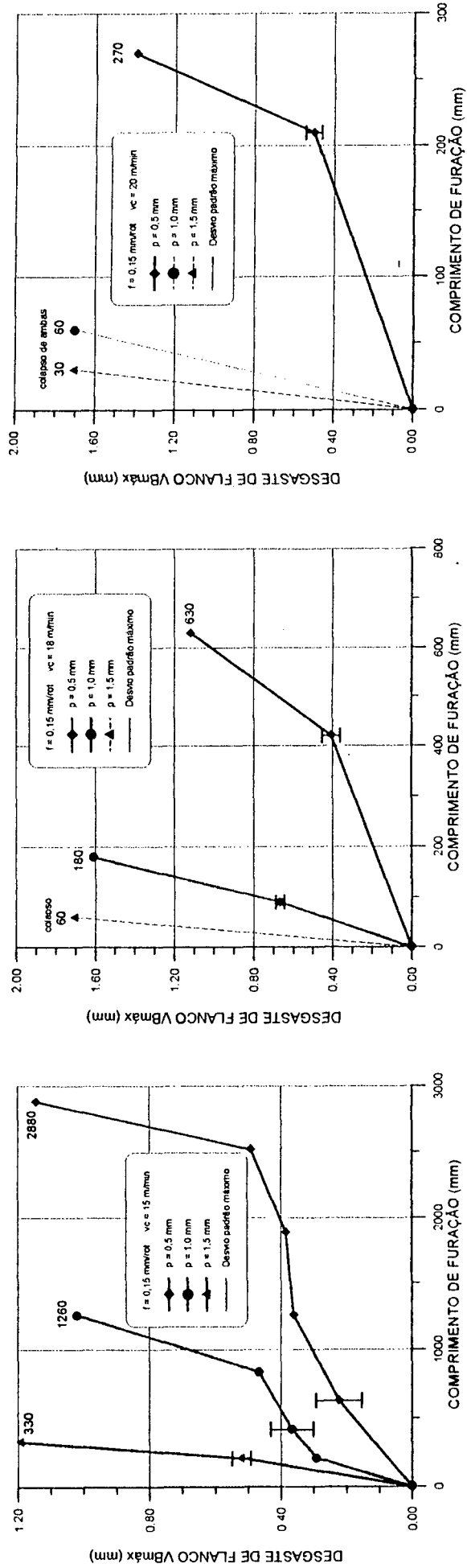


Figura 3.18 - Desgaste de flanco $V_{B\max}$ com $f = 0,15$ mm/rot, variando o avanço intermitente e a velocidade de corte.

O comportamento das curvas de vida das ferramentas está resumido nas figura 3.19. Com estas curvas é possível determinar o comprimento de furação pela ferramenta deste ensaio em qualquer velocidade de corte, nos três avanços e ciclos com avanços intermitentes.

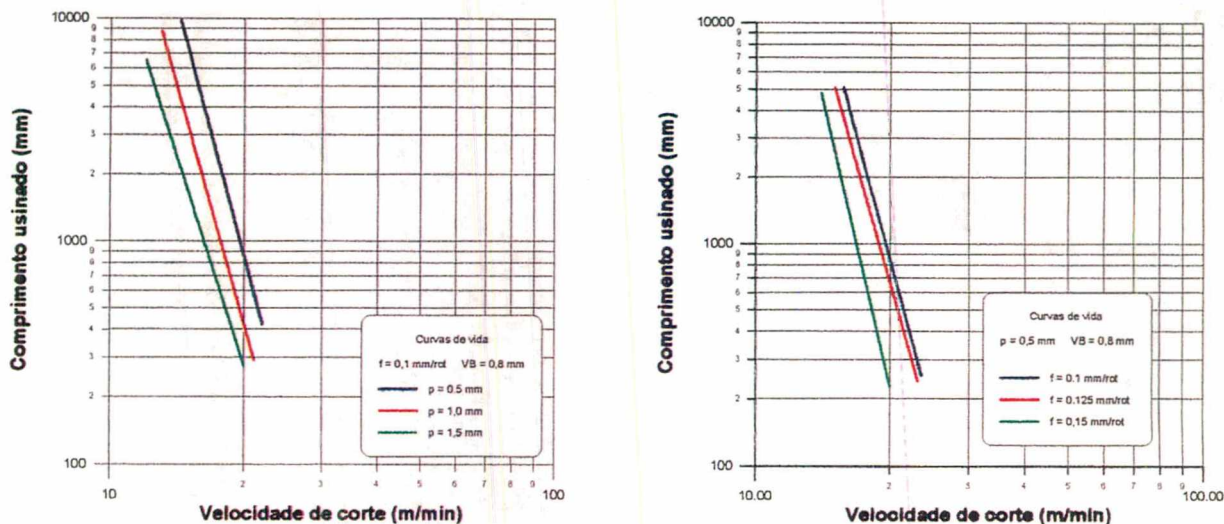


Figura 3.19 - Curvas de vida da ferramenta.

As curvas de vida da figura 3.19 foram obtidas a partir das curvas de desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$ da figura 3.16 e 3.10, respectivamente. Como já era esperado, aumentando os valores do avanço e da intermitência do avanço, para uma dada velocidade de corte, o comprimento de usinagem diminui significativamente.

Para cada avanço e intermitência do avanço foi determinada a equação de Taylor para um desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$ igual a 0,8 mm. Este $V_{B\text{máx}}$ foi escolhido em função de ser um valor intermediário entre o desgaste máximo e o desgaste que inicia o fim do poder de corte dos gumes da broca.

Estas equações de Taylor proporcionam quantificar o comprimento de furação usinado por brocas helicoidais de HSS, não revestidas, afiação em cruz - $\sigma = 135^\circ$, sendo a única variável necessária a velocidade de corte (Tab. 3.13).

Com relação a outros tipos de desgaste de ferramenta, observou-se que o desgaste das guias era muito pequeno, não sendo dominante como critério de fim de vida. Quando a broca perdia o poder de corte, observava-se um acentuado arredondamento da quina, sendo este um critério dominante para o fim da vida da ferramenta.

Tabela 3.13 - Equação de Taylor.

L = comprimento de furação (mm)		
Variação do avanço	f = 0,1 mm/rot	$L = 3,974023 \times 10^{12} \times v_c^{-7,43583}$
	f = 0,125 mm/rot	$L = 1,215528 \times 10^{12} \times v_c^{-7,12637}$
	f = 0,15 mm/rot	$L = 2,904885 \times 10^{13} \times v_c^{-8,55349}$
Variação do avanço intermitente	p = 0,5 mm	$L = 3,39175 \times 10^{12} \times v_c^{-7,37899}$
	p = 1,0 mm	$L = 6,70351 \times 10^{11} \times v_c^{-7,08144}$
	p = 1,5 mm	$L = 3,05743 \times 10^{10} \times v_c^{-6,18352}$

Ao longo do comprimento usinado pelas ferramentas, até a perda do corte, não se notava mudanças significativas no processo de furação. A passagem da 2ª para a 3ª região de desgaste, na maior parte dos ensaios, era muito abrupto e, na maioria dos ensaios, esta passagem do comportamento estável da 2ª região de desgaste para a 3ª região de desgaste (comportamento progressivo) se dava no intervalo de apenas um furo.

Com $v_c = 15$ m/min, combinado com as variantes dos outros parâmetros (f e p), a tendência das curvas de desgaste foi regular, o que não foi notado nas maiores velocidades de corte do ensaio. As várias combinações dos parâmetros de corte mostraram que certos valores não permitem executar mais do que três furos de 30 mm de profundidade (Tab. 3.14).

Tabela 3.14 - Combinação de parâmetros que foram atingidos no máximo 3 furos.

1	$v_c = 18$ m/min	f = 0,125 mm/rot	p = 1,5 mm
2	$v_c = 18$ m/min	f = 0,15 mm/rot	p = 1,5 mm
3	$v_c = 20$ m/min	f = 0,125 mm/rot	p = 1,0 mm
4	$v_c = 20$ m/min	f = 0,125 mm/rot	p = 1,5 mm
5	$v_c = 20$ m/min	f = 0,15 mm/rot	p = 1,0 mm
6	$v_c = 20$ m/min	f = 0,15 mm/rot	p = 1,5 mm

Pode-se considerar estas combinações de parâmetros totalmente fora de limites admissíveis de resistência pela ferramenta deste ensaio.

O tempo de usinagem para a execução de um furo é influenciado pela velocidade de corte, pelo avanço e pela intermitência do avanço. Na programação do avanço intermitente foi estipulado uma parada de 1 segundo em cada parada, de forma que para uma profundidade de 30 mm tem-se um período sem corte de 60 segundos para o avanço intermitente de 0,5 mm, de 30 e 20 segundos para os avanços intermitentes de 1 e 1,5 mm respectivamente, de forma independente da velocidade de corte. O tempo de corte efetivo, por sua vez, é influenciado

diretamente pela velocidade de corte e o avanço da ferramenta, sendo os tempos teóricos para a execução de furos de 30 mm de profundidade apresentados na tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Tempos teóricos para a execução de um furo [min].

$v_{c1} - f1 - p1 = 1' 38''$	$v_{c1} - f1 - p2 = 1' 08''$	$v_{c1} - f1 - p3 = 58''$
$v_{c1} - f2 - p1 = 1' 30''$	$v_{c1} - f2 - p2 = 1'$	$v_{c1} - f2 - p3 = 50''$
$v_{c1} - f3 - p1 = 1' 25''$	$v_{c1} - f3 - p2 = 55''$	$v_{c1} - f3 - p3 = 45''$
$v_{c2} - f1 - p1 = 1' 31''$	$v_{c2} - f1 - p2 = 1' 01''$	$v_{c2} - f1 - p3 = 51''$
$v_{c2} - f2 - p1 = 1' 25''$	$v_{c2} - f2 - p2 = 55''$	
$v_{c2} - f3 - p1 = 1' 21''$	$v_{c2} - f3 - p2 = 51''$	
$v_{c3} - f1 - p1 = 1' 28''$	$v_{c3} - f1 - p2 = 58''$	
$v_{c3} - f2 - p1 = 1' 20''$	$v_{c3} - f1 - p3 = 48''$	
$v_{c3} - f3 - p1 = 1' 19''$		

A soma do tempo em corte e o tempo de parada nos fornece o tempo total de usinagem.

A medição do tempo real, mostrado na tabela 3.16 não coincide com os tempos teóricos.

Este fato é correlacionado com a imprecisão do tempo de parada, cujo valor mínimo para a máquina empregada nos ensaios era de 1 segundo. No entanto, não se tem informações sobre a precisão deste intervalo.

Tabela 3.16 - Tempo real para a execução de um furo [min].

$v_{c1} - f1 - p1 = 1' 12''$	$v_{c1} - f1 - p2 = 53''$	$v_{c1} - f1 - p3 = 48''$
$v_{c1} - f2 - p1 = 1' 07''$	$v_{c1} - f2 - p2 = 48''$	$v_{c1} - f2 - p3 = 41''$
$v_{c1} - f3 - p1 = 1' 03''$	$v_{c1} - f3 - p2 = 44''$	$v_{c1} - f3 - p3 = 36''$
$v_{c2} - f1 - p1 = 1' 09''$	$v_{c2} - f1 - p2 = 51''$	$v_{c2} - f1 - p3 = 45''$
$v_{c2} - f2 - p1 = 1' 05''$	$v_{c2} - f2 - p2 = 44''$	
$v_{c2} - f3 - p1 = 1' 01''$	$v_{c2} - f3 - p2 = 38''$	
$v_{c3} - f1 - p1 = 1' 07''$	$v_{c3} - f1 - p2 = 45''$	
$v_{c3} - f2 - p1 = 1' 03''$	$v_{c3} - f1 - p3 = 34''$	
$v_{c3} - f3 - p1 = 59''$		

Observa-se nos resultados que, com o aumento efetivo do somatório dos tempos de parada da ferramenta ao longo da furação, a vida da ferramenta aumenta sensivelmente (em comprimento total de furação). Este fato mostra que a temperatura na cunha da ferramenta é a principal responsável pelo colapso da ferramenta e, à medida que aumentamos o tempo de parada, temos melhores condições de dissipação de calor e a ferramenta apresenta um melhor desempenho.

b) Forças de usinagem

Neste experimento, verificou-se os valores da força de usinagem nas combinações de parâmetros em que foi possível usinar o material com a ferramenta, executando-se três furos em cada combinação e adquirindo, como dados, a média entre os três furos. Os valores foram colhidos pelo programa SADA [30] e anotados em planilha adequada (anexo 4).

Os valores do momento torsor, não apresentaram resultados homogêneos ao longo dos ensaios, não sendo considerados nesta etapa da pesquisa.

O comportamento típico da força de avanço na furação com o avanço intermitente está mostrado na figura 3.20. Neste gráfico pode ser observado o aumento dos picos da força durante a fase de entrada da ponta da ferramenta no material da peça, conseqüente ao aumento da seção de usinagem neste intervalo. Posteriormente, os picos da força estabilizam em um patamar decorrente da seção de usinagem constante durante cada ciclo de furação.

Os resultados das medições da força de avanço foram resumidas e apresentadas na forma de histogramas nas figuras 3.21, 3.22 e 3.23.

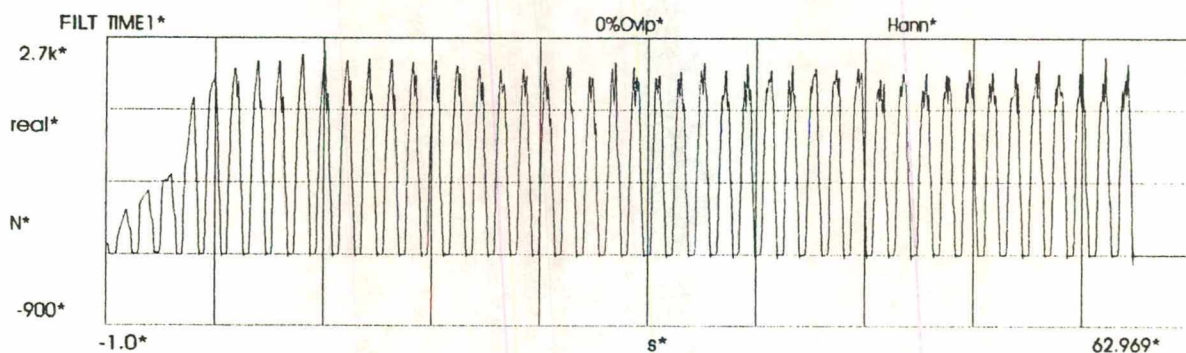


Figura 3.20 - Curva de força de avanço adquirida com o auxílio do programa SADA.

A figura 3.21 mostra que para um avanço de 0,1 mm/rot e intermitência a cada 0,5 mm, os valores da força de avanço praticamente independem da velocidade de corte.

O ciclo com avanço intermitente de 0,5 mm, mantendo-se constante a velocidade de corte e o avanço, demonstrou os maiores valores da força de avanço. Este fato se deve ao valor do ciclo muito baixo e associado aos pequenos avanços, não permite uma atuação efetiva de corte por parte dos gumes da ferramenta que, ora cortam o material e ora o esmagam, causando o encruamento deste. Desta forma, a dureza aumenta e, conseqüentemente, aumentam os valores das forças.

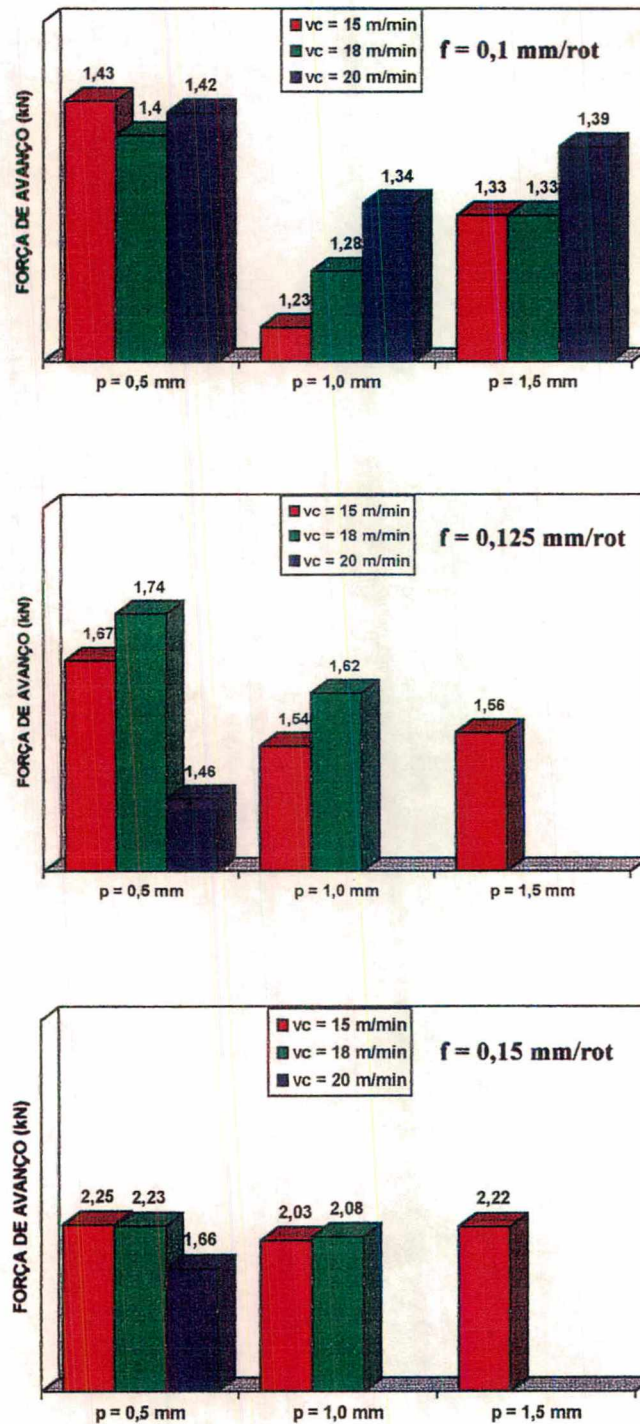


Figura 3.21 - Comportamento da força de avanço variando “ v_c ” e “ p ”.

Para as demais combinações, a variação da velocidade de corte mostra uma dependência não regular em todos os ensaios. Um aumento da velocidade de corte leva a um desgaste mais

acentuado, de forma que, mesmo em ensaios de curta duração, este influencia os resultados da força de avanço, o que explica o comportamento irregular nas condições com solicitação mais severa.

As combinações de parâmetros de corte da figura 3.22, com o avanço intermitente constante, mostram a variação da força de avanço com os demais parâmetros.

Esta análise permite observar uma nítida influência do avanço nos ensaios, sendo este responsável por um aumento da seção de usinagem e, conseqüentemente, a um aumento da força de avanço, em qualquer velocidade de corte do ensaio.

Para o ciclo com avanço intermitente de 0,5 mm e avanço de 0,15 mm/rot pode-se observar uma tendência de diminuição da força de avanço com o aumento da velocidade de corte. Para as demais combinações de parâmetros o aumento da velocidade de corte não proporcionou esta influência, pois está se trabalhando no limite superior de resistência térmica da ferramenta e, conseqüentemente, os resultados são fortemente influenciados pelo desgaste da ferramenta. O aumento da velocidade de corte, aumenta a temperatura e diminui o emcruamento, diminuindo com isto a força de avanço.

Para o ciclo com avanço intermitente de 1 e 1,5 mm só foi possível a medição da força de avanço, em todas as combinações, para o avanço de 0,1 mm/rot. Para avanços maiores a vida útil da ferramenta era inferior ao necessário para obter-se resultados confiáveis da força.

A combinação dos parâmetros da figura 3.23, mantendo-se as velocidades de corte constantes, mostraram que o aumento do ciclo com avanço intermitente não provoca um aumento significativo nas forças de avanço. A maior variação é notada com o aumento do avanço.

Analisando os parâmetros de corte e suas influências sobre a variação das forças de avanço, observou-se que o avanço provoca o maior gradiente das forças, em relação à velocidade de corte e o ciclo com avanço intermitente.

c) Forma do cavaco

A forma do cavaco na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, para avanços contínuos, é de helicoides contínuos. Estes apresentam problemas de travamento entre as ranhuras helicoidais da broca e o furo na usinagem.

Um dos motivos do emprego do ciclo com avanço intermitente é interromper os cavacos, diminuindo seu comprimento e, assim, reduzir este inconveniente.

Para o ciclo com avanços intermitentes do ensaio, o comprimento dos cavacos é significativamente reduzido, apresentando-se na forma de cavaco segmentado, facilmente transportado para fora do furo, mesmo em um processo de furação vertical.

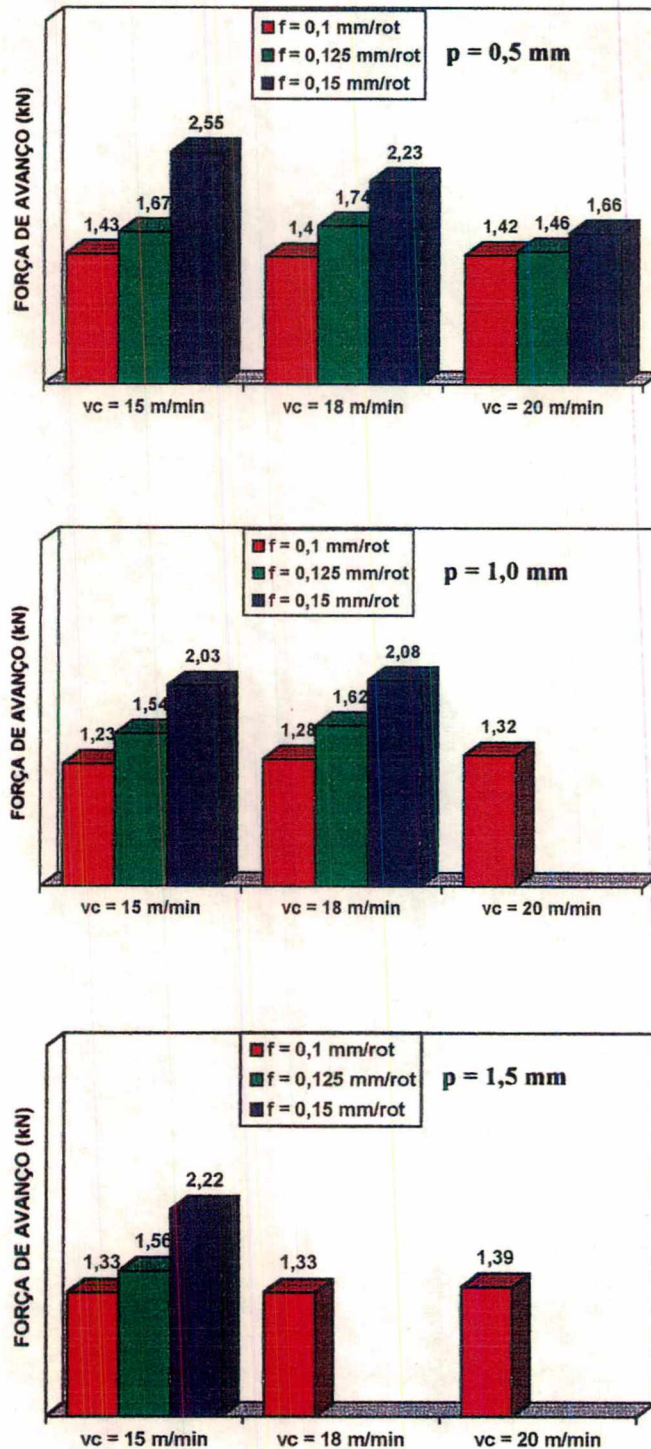


Figura 3.22 - Comportamento da força de avanço variando "f" e "vc".

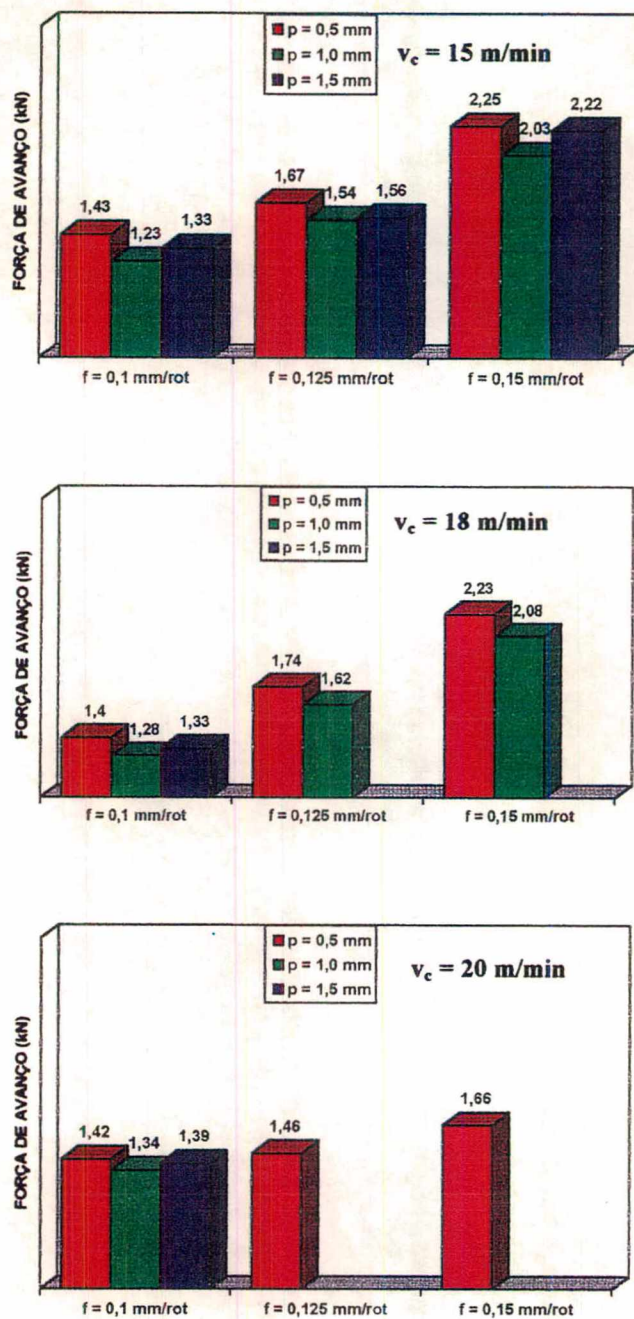


Figura 3.23 -Comportamento da força de avanço variando “p” e “f”.

d) Tolerâncias dimensionais e erros de forma dos furos

A tabela 3.17 mostra que a tolerância dimensional e os erros de circularidade dos furos são mantidos dentro de valores especificados com as combinações que envolvem velocidades de

corde de 15 e 18 m/min. Este fato não ocorreu com o erro de cilindridade que teve grande irregularidade em todas as combinações das velocidades de corte.

tabela 3.17 - Tolerâncias dimensionais e erros de forma para cada combinação de parâmetros.

Parâmetros de corte			Circularidade		Cilindridade	
Vc	f	p	D. médio	s	D. médio	s
15	0,1	0,5	10,073	0,00776	10,049	0,00757
15	0,125	0,5	10,057	0,00907	10,037	0,01331
15	0,15	0,5	10,061	0,00650	10,047	0,00907
15	0,1	1,0	10,068	0,01504	10,055	0,00611
15	0,125	1,0	10,069	0,00850	10,054	0,01001
15	0,15	1,0	10,061	0,00208	10,059	0,00503
15	0,1	1,5	10,050	0,01429	10,047	0,00737
15	0,125	1,5	10,043	0,01050	10,051	0,00305
15	0,15	1,5	10,053	0,00404	10,049	0,01530
18	0,1	0,5	10,064	0,01594	10,046	0,00416
18	0,125	0,5	10,067	0,01021	10,055	0,00902
18	0,15	0,5	10,066	0,01205	10,055	0,00611
18	0,1	1,0	10,081	0,00950	10,068	0,00351
18	0,125	1,0	10,084	0,00832	10,054	0,01289
18	0,15	1,0	10,070	0,01171	10,060	0,00945
18	0,1	1,5	10,079	0,00115	10,073	0,01320
18	0,125	1,5				
18	0,15	1,5				
20	0,1	0,5	10,085	0,00450	10,061	0,01823
20	0,125	0,5	10,083	0,01422	10,271	0,09119
20	0,15	0,5	10,078	0,01001	10,266	0,09395
20	0,1	1,0	10,069	0,03008	10,314	0,19552
20	0,125	1,0				
20	0,15	1,0				
20	0,1	1,5	10,075	0,01616	10,314	0,13124
20	0,125	1,5				
20	0,15	1,5				

As áreas sombreadas na tabela 3.17 são valores onde não foi possível realizar os ensaios, devido às brocas não executarem mais de três furos.

As combinações de parâmetros que envolveram a velocidade de corte de 20 m/min, elevaram significativamente os erros de forma dos furos, em relação à cilindridade e à circularidade.

Os desvios de cilindridade nestas condições alcançam valores próximos a 0,35 mm, valor bem superior aos pré-estabelecidos como limite para aplicação do usuário.

Para ser analisado de maneira plausível e confiável os dados obtidos nos ensaios das ferramentas, ou seja, verificar a influência dos parâmetros de corte utilizados, torna-se necessário o uso de ferramentas estatísticas para análise dos ensaios.

A Análise de Variância é um método suficientemente poderoso para poder identificar diferenças entre as médias populacionais devido às várias causas atuando simultaneamente sobre os elementos da população. Pela análise de variância faz-se a comparação dos grupos baseada na relação da variabilidade das médias entre os grupos com a variabilidade das observações dentro dos grupos.

Para a análise estatística, teve-se como variáveis independentes a velocidade de corte (m/min), avanço (mm/rot) e profundidade do avanço intermitente (mm), e como variáveis dependentes as variações nos efeitos de medições de circularidade e cilindridade.

Com um nível de significância de 0.005 e oito graus de liberdade para o experimento, obteve-se os seguintes valores de F para os parâmetros de corte, referentes aos efeitos de circularidade e cilindridade:

Parâmetro de corte	Circularidade	Cilindridade
Velocidade de corte	51,11	15,03
Avanço	10,55	56,78
Profundidade de avanço intermitente	5,75	6,68

Como para esta condição o valor tabelado de F é 5,32 conclui-se que todos os parâmetros exercem influência significativa. No entanto, constata-se que para os efeitos de circularidade o parâmetro de maior influência significativa é a velocidade de corte seguida do avanço e da profundidade de avanço intermitente respectivamente. Para os efeitos de cilindridade o parâmetro de maior influência significativa é o avanço seguido da velocidade de corte e da profundidade de avanço intermitente respectivamente.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A principal vantagem dos trabalhos de pesquisa reside no reconhecimento do fato de que pequenas modificações em um processo podem levar a ganhos consideráveis de efeito prático e tecnológico. Na execução deste trabalho, tanto a INB como o LMP adquiriram mais conhecimento sobre uma área específica da fabricação mecânica. O LMP aumentou a sua base de tecnologia de furação e, a INB, tem a oportunidade de resolver parte do problema de sua produção em busca de mercados mais competitivos.

Verificou-se que a melhor geometria de ponta para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541 (SAE 321) é a afiação em cruz com $\sigma = 135^\circ$, $\alpha = 10$ a 14° , $\beta = 50^\circ_{-0^\circ}^{+10^\circ}$ e $\gamma = 30^\circ \pm 5^\circ$, utilizando-se brocas helicoidais de HSS, não revestidas, lubri-refrigeração abundante e os seguintes parâmetros de corte:

$$v_c = 15 \text{ m/min} \qquad f = 0,1 \text{ mm/rot} \qquad p = 0,5 \text{ mm}$$

O ciclo com avanço intermitente é fundamental para a boa atuação de corte da ferramenta, pois este possibilita a quebra do cavaco produzido no corte, sendo que, sem o mesmo, a broca não conseguiria realizar um único furo. Com o ciclo com avanço intermitente o cavaco não é problemático, sendo facilmente removido do furo. Além disto, o ciclo com o avanço intermitente melhora as condições de dissipação de calor nas cunhas da ferramenta, de forma que a solicitação térmica da ferramenta é significativamente reduzida.

Com relação ao aumento de produtividade, utilizando a afiação da ponta da broca em cruz, $\sigma = 135^\circ$, observou-se que esta executa comprimentos de furação superiores a 6000 mm com uma $v_c = 15 \text{ m/min}$, contra 2000 mm realizado pela afiação tipo N utilizado pela INB e $v_c = 9,42 \text{ m/min}$, mantendo-se a qualidade dos furos dentro de valores aceitáveis, como:

- circularidade : $\leq 0,03 \text{ mm}$
- cilíndricidade : $\leq 0,04 \text{ mm}$
- tolerância dimensional : $\leq H 11$

Isto representa um ganho médio real de produtividade em torno de 200 %, não havendo aumento no custo com as ferramentas.

As forças de usinagem, para gumes estabilizados e parâmetros ótimos de corte, possuem os seguintes valores:

- força de avanço = 2,5 kN
- momento torsor = 1000 N.cm

Aumentos acima destes valores podem ser usados como critérios de fim de vida para a ferramenta.

Não se recomenda a utilização de brocas helicoidais revestidas com TiCN e TiN para o corte do aço DIN 1.4541, devido ao seu alto custo em relação às brocas de HSS e a sua característica de colapso total ao fim da capacidade de corte, além de não exceder a 3000 mm de comprimento de furação.

Utilizando-se furação de centro, não há problemas quanto a erros de forma e dimensionais nos furos, desde que se utilize os parâmetros de corte corretos e os limites de erros pré-estabelecidos neste trabalho.

Como sugestões para novas pesquisas, ficam:

- Realizar ensaios com outros materiais e revestimentos de ferramentas;
- Executar ensaios com outros tipos de ferramentas de furação;
- Executar o estudo aprofundado sobre a usinagem do aço inoxidável austenítico com brocas helicoidais de metal-duro com canais de refrigeração internos;
- Verificar a utilização de outros óleos lubri-refrigerantes na usinagem, para aumentar o tempo de vida útil da ferramenta;
- Verificar a influência do titânio que compõe o material da peça, no tempo de vida útil das ferramentas revestidas;
- Verificar a influência da saída da ferramenta em furos passantes sobre a vida das ferramentas;
- Verificar a influência do diâmetro da broca e o ciclo com avanço intermitente sobre o resultado da trabalho.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] DEVRIES, M. F., CROSHECK, M. K, NEGISHI, H. An investigation of the cutting mechanisms of the new point drill. **Annals of the CIRP**, v. 37, p. 73-78, 1988.
- [2] DE BEER, C. The web thickness of twist drills. **Annals of the CIRP**, v. 19, p. 247-254, 1971.
- [3] SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. **Tool and manufacturing engineers handbook - machining**. 4.ed. Dearborn: One S.M.E. Drive, 1983. v.1.
- [4] TEIXEIRA, C. R. - **Influência dos Erros Geométricos de Afição nas Brocas Helicoidais de Aço Rápido na Qualidade dos Furos Produzidos**. Florianópolis : UFSC, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- [5] HOFF, M. **Analyse und Optimierung des Bohrprozesses**. Aachen: RWTH, 1986. 149p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Rheinisch Vestfalischen Technische Hochschule Aachen. 1986.
- [6] FERRARESI, D. **Processo de furação**. [s. l.: s. n., 19__], 44p.
- [7] A evolução da aresta de corte nas brocas helicoidais. **Mundo Mecânico**, p. 24-27, jun 1989.
- [8] KOENIG, W., **Tornear, Fresar e Furar**. Traduzida e adaptada por Walter Lindolfo Weingartner. Florianópolis : 1990. v. 1, 421p. Tradução de: *Fertigungsverfahren: Drehen, Frasen, Bohren*. VDI Verlag, Düsseldorf.
- [9] STEMMER, C.E. **Ferramentas de furar**. Florianópolis: [s. n., 1987]. 275p.
- [10] VILLARROEL, J. C. **Análise Comparativa entre Furação com Brocas para furos curtos de insertos reversíveis e brocas helicoidais**. Florianópolis: UFSC, 1991. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.

- [11] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: 1977. 751p.
- [12] VARA, J. P. La maquina herramienta (XXXVII). **Metalurgia y Eletricidad**, n. 613, p. 186-207, jun./ago. 1989.
- [13] BOEHS, L., SCHUITEK, A. J., LEPIKSON, M. **Estudo comparativo do desempenho de brocas com diversos tipos de revestimentos e várias geometrias na usinagem do aço SAE 4340 e do ferro fundido FE-450-12**. Florianópolis: LMP, 1992. 58p.
- [14] STEMMER, G. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresar, brochas, rebolos, abrasivos**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1992. 313p. Série Didática.
- [15] ANSCHUTZ, E. Vollhartmetall-Spiralbohrer mit zwei Spitzen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 116, n. 5, p. 253-254, 1983.
- [16] SKF FERRAMENTAS S. A. **Ferramentas de corte**. [S.l. : s.n.], [1991]. p. 29.
- [17] ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook: machining**. Ohio: Metals Park, 1989. v19, 685p.
- [18] VIeregge, G. **Zerspanung der Eisenwerkstoffe**. Duesseldorf: Stahleisen M.B.H., 1959. v.16, 346p.
- [19] DINIZ, A., CUPINI, N. L. Estudo do processo de furação de aços inoxidáveis austeníticos. **Metalurgia - ABM**, v. 42, n. 349, p. 881-888, dez. 1986.
- [20] SANDVIK. **Herramientas de Taladrar**. [s.l.]: Sandvik, [1990]. p. 7-10.
- [21] HOFF, M., KOENIG, W. Vollbohren harter Stahl-und Gusswerk-stoffe. **Industrie-Anzeiger**, v.16, n. 92, p. 50-51, 1984.
- [22] WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B., DE BARBA JR, D. J. et al. **Análise de forças na furação de pistões de ferro sinterizado não ligado com brocas de metal-duro**. Florianópolis : LMP, 1992. 32p.

- [23] WITTE, L. **Spezifische Zerspankräfte beim Drehen und Bohren**. Aachen: RWTH, 1980. 142p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Rheinisch westfälische Technische Hochschule Aachen. 1980.
- [24] WATSON, A.R. **Drilling Model for Cutting Lip and Chisel Edge and Comparison of Experimental and Predicted Results**. Int. J. Mach. Tool Des. Res. Great Britain, january 1985. 29 (1 - 3) : 347 - 404.
- [25] HATSCHEK, R. L. **Fundamentals of Drilling**. American Machinist. New York, february 1979. 23(2) 108-128.
- [26] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte: ferramentas simples de tornear**. 2.ed. rev. amp. Florianópolis: Editora da UFSC, 1989. 295p. Série Didática.
- [27] ZABALA, A. I. **Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor: propiedades, transformaciones y normas**. Mexico : Limusa, 1981. 410p.
- [28] SKF FERRAMENTAS S.A. **Manual técnico SKF**. São Paulo: SKF, 1987. 61p.
- [29] GÜHRING Ferramentas do Brasil , **GÜHRING 92 - Prazisions - Scheidwerzeuge**. São Paulo: 1992. 977p.
- [30] LOPES, J. C. O. **Furação por escoamento e rosqueamento por conformação**: Florianópolis: UFSC, 1994. 212p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- [31] KOSA, T. and NEY, R. P. **Machining of Stainless Steel**: Carpenter Technology Corporation.
- [32] DIN 6580. **Begriffe der Zerspantechnik, Bewegungen und Geometrie des zerspanvorganges**. Berlin, beuth-Vertrieb GmbH, abril, 1963.

BIBLIOGRAFIAS COMPLEMENTARES

- [1] SANDVIK. **Herramientas Rotativas y Plaquitas**. [s.l.] : Sandvik, [1985]. p. 220-242.
- [2] BOEHS, L., VILLARROEL, J. C., ECKHARDT, M. Brocas revestidas com TiN: otimização das condições de usinagem para furação em aço de baixo carbono. In: CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA MECANICA, 4, 5 a 7 de nov. 1990, Santiago. **Anais...**[S. L.: s. n.], 1990. p. 41-52.
- [3] SOEDERBERG, S. A study of twist drill wear. **Tooling & Production**, p. 99-102, apr. 1979.
- [4] OXFORD JR., C. Causes of twist drill breakage. **Tooling & Production**, p. 88-90, jan. 1978.
- [5] LENZ, E., MAYER JR., J. E., LEE, D. G. Investigation in Drilling. **Annals of the CIRP**, v. 27, p. 49-53, jan. 1978.
- [6] KOCH, U., LEVI, R. Some mechanical and thermal aspects of twist drill performance. **Annals of the CIRP**, v. 19, pag. 247-254, jan. 1971.
- [7] NEW geometries for wide-webe drills. **American Machinist**, p. 140-141, nov. 1984.
- [8] DOLODARENKO, A. G., HAM, I. Effects of built-up edge in drilling. **ASME**, p. 287-292, feb. 1976.
- [9] LORENZ, G. Helix angle and drill performance. **Annals of the CIRP**, v. 28, p. 83-86, 1979.
- [10] KALDOR, S., LENZ, E. Investigation in tool life of twist drills. **Annals of the CIRP**, v. 29, p. 23-27, jan. 1980.
- [11] HOSHI, T., ZHAO, H. Study of a high performance drill geometry. **Annals of the CIRP**, v. 38, p. 87-90, 1989.

- [12] KEMMER-PRAEZISION. **Bohren von gedruckten Schaltungen mit Kemmer-Vollhartmetall-Spiralbohrer.** Gmuend: Kemmer, 1981. 52p.
- [13] WEKO. **Katalog Preisliste.** [S.I.]: Werko, 1991. p. 14-15.
- [14] ANSCHUETZ, E. Rationelles Bohren und Senken. **Wt Werkstatts Technik**, v. 73, p.687-688, 1983.
- [15] MUELLER, P. Kurzbohrer sind produktiver. **Werkstatt und Betrieb**, v. 123, n. 5, p. 371-372, 1990.
- [16] SHNADT-KISRCHNER, R. Einsatz und Verschleissverhalten von Vollhartmetall-Bohrern. **Werkstatt und Betrieb**, v. 123, n. 12, p. 909-913, 1990.
- [17] HATTERSHEIM, W., BALZHEIM, K. Hochleistungszerspanen mit Hartmetall-Präzisionswerkzeugen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 119, n. 7, p. 597-599, 1986.
- [18] STRIEGL, G. Präzisions-Aufbohrwerkzeug mit Wendeschneidplatten fuer passgenaue Bohrungen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 116, n. 5, p. 255-258, 1983.
- [19] BARTZ, W. J. Wirtschaftliches Zerspanen durch Kuehlschmier-stoffe. **Wt-Z. ind. Fertig.**, v. 68, n. 10, p. 621-624, 1978.
- [20] SCHULZ, H., ERISKEN, E. Bohren ins Volle mit Hartmetall- Wendeschneidplatten fuer passgenaue Bohrungen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 116, n. 5, p. 259-264, 1983.
- [21] CRONJAEGER, L., FUSS, H., BUSE, B. Leistungsfähige Tief-bohrwerkzeug: Folgerungen aus der Betrachtung des Verschleissvorganges. **Annals of the CIRP**, v. 37, p. 83-87, 1988.
- [22] KOPPLIN, D. Hartmetall-Bohrer ohne Querschneide. **Werkstatt und Betrieb**, v. 119, n. 7, p. 603-606, 1986.
- [23] SECO TOOLS AB. **Perçage: outils seco de perçage.** Fagersta: Seco 1991. 24p.

- [24] MAZOFF, J. Choose the best drill point geometry. **Modern Machine shop**, p. 66-76, june 1989.
- [25] ADACHI, K., ARAI, N., OKITA, K. et al. A study on drilling of SUS 304 by TiN-coated drills. **Bull. Japan Soc. of Prec. Eng.**, v. 24, p. 200-205, sep. 1990.
- [26] NOAKER, P. M. Drilling with a twist. **Manufacturing Engineering**, p. 47-51, jan. 1990.
- [27] SKEVINGTON, E., FREEMAN, R. The truth about twist drills. **Tooling & Production**, v. 52, p. 54-61, apr. 1986.
- [28] CHRISTOU, P. Werkzeug aus Hartmetall fuer das Zerspanen von nichtrostenden Staehlen. **Maschinenmarkt. Wurzburg**, v. 91, n. 69, p. 1321-1323, 1985.
- [29] ZEISER, W. Drill-point geometries: choices to match the job. **Tooling & Production**, v. 52, n. 1, p. 64-66, apr. 1986.
- [30] HORN, H. Sonderbohrwerkzeuge für Form- und Stufenbohrungen. **Fertigungstechnik und Betrieb**, p. 215-219, Berlin 37 (1987) 4.
- [31] STUTCLIFFE. Coolants-Laboratory evaluation by drill test technique using high speed drills. **33rd Annual Meeting (American Society of Lubrication Engineers)**, p. 1-8, apr. 1978.
- [32] NELSON, D. Drilling Technology: The Hole Store. **Cutting Tool Engineering**, p. 20-24, feb. 1988.
- [33] NELSON, D. Making It Big In Carbide Drills. **Cutting Tool Engineerig**, p. 34-38, dec. 1988.
- [34] TROST, C. The Improvement Potential of Pressurized Coolant Driling. **Cutting Tool Engineering**, p. 32-34, aug. 1985.
- [35] FRIEDRICH, M., BURANT, R., MCGINTY, M. Point Styles and Applications. **Manufacturing Engineering**, p.29-30, july 1979.

- [36] CHAMPIN, B., MOSTACCHI, A. Amélioration des conditions d'usinage des alliages de titane et de zirconium avec des outils du type aciers rapides. **Mémoires et Études Scientifiques Revue de Métallurgie**, p. 285-297, juin 1982.
- [37] FANTIN, J.-P. LEFEBVRE, M. Fresamento e Furação: em busca das melhores ferramentas. **Máquinas e Metais**, p. 40-45, agosto 1992.
- [38] MACHINABILITY DATA CENTER. **Machining Data Handbook**. 3.ed. Cincinnati: [s. n.], 1980. v. 2, paginação irregular.
- [39] MACHINABILITY DATA CENTER. **Machining Data Handbook**. 3.ed. Cincinnati: [s. n.], 1980. v. 1, paginação irregular.
- [40] MICHELETTI, G. F. **Tecnologia mecânica : Mecanizado por Arranque de Viruta**. Barcelona: Blume, 1980. 426p
- [41] WEGST, C. W. **Stahlschlüssel**. 13 auf. Marbach: Stahlschlüssel wegst GmbH, 1983. v. 3.
- [42] DROESE, J. **Titannitrid Beschichtete HSS Spiralbohrer**. Aachen: RWTH, 1987. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Rheinisch westfälische Technische Hochschule Aachen. 1987.
- [43] RAMSAY, J. M. G. **Furação profunda no alumínio com brocas normais**. Florianópolis: UFSC, 1988. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, 1988.
- [44] SPUR, G, STOEFERLE, TH. **Handbuch der Fertigungstechnik Spanen**. Muenchen: Carl Hanser, 1979. v. 3, t. 1, 592p.
- [45] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 4.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1981. 504p.
- [46] KRONENBERG, M. **Grundzuege der Zerspanungslehre**. Berlin: Springer, 1963. v.2, 361p.

ANEXO 1**A) Fresadora Universal de Ferramentaria****Características técnicas :**

-Marca:	DECKEL
-Modelo:	FP41 NC
-Potência instalada no eixo árvore:	5 HP (4KW)
-Torque máximo:	35 kg.cm
-Rotações:	40 a 4000 RPM
-Avanços:	1 a 1000 mm/min
-Cone:	ISO 40
-Bomba de lubrificação:	motor - ½ cv, um bico de refrigeração
-Batimento:	perto da árvore: 0,003 mm

B) Fresadora Vertical CNC**Características técnicas:**

-Marca:	AUERBACH
-Modelo:	FUW 400
-Potência instalada no eixo árvore:	7 HP (5,6 KW)
-Rotações:	30 a 3000 RPM
-Avanços:	1 a 3600 mm/min
-Cone:	ISO 40
-Bomba de lubrificação:	motor - ½ cv, um bico de refrigeração
-Batimento:	perto da árvore: 0,001 mm

C) Centro de Usinagem

Características técnicas:

- Marca:	Mitsubishi
- Modelo:	Dynamyte 4500
- Potência instalada no eixo árvore:	10 HP (7,5 KW)
- Torque máximo:	60 Kg.cm
- Rotações:	60 a 6000 RPM
- Avanços:	1 a 1000 mm/min
- Cone:	ISO 40
- Bomba de lubrificação:	motor - ½ HP, com dois bicos de refrigeração
- Batimentos:	perto da árvore: 0,004 mm e a 200 mm de distância: 0,01 mm
- Magazine de ferramentas:	16 ferramentas

ANEXO 2

A) Dimensões e ângulos das brocas helicoidais utilizadas na terceira etapa do trabalho*

COMPRIMENTOS E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS											
Nº/DADOS	At (mm)	A1a (mm)	A2a (mm)	A1b (mm)	A2b (mm)	σ	α	β	δ	$\psi 1$	$A\alpha 1$
1	0,30	1,24	1,20	4,40	4,45	131° 10'	14°	46° 30'	29° 30'	16° 30'	41°
2	0,29	1,10	1,04	4,17	4,72	131°	14° 30'	46° 40'	28° 40'	17° 30'	40° 20'
3	0,29	1,23	1,27	4,14	4,28	131°	14° 30'	46° 30'	28° 50'	17°	41° 20'
4	0,33	1,09	0,97	4,10	4,17	131° 25'	14° 15'	46° 15'	29° 30'	17° 15'	40°
5	0,27	1,44	1,43	4,19	4,08	131° 30'	13° 20'	47° 50'	28° 50'	16° 30'	40° 30'
6	0,30	1,09	1,11	4,12	4,10	133°	13° 40'	46° 10'	30° 10'	16° 50'	40° 50'
7	0,32	1,04	1,07	4,21	4,30	131° 30'	13° 50'	46°	30° 10'	16° 30'	41° 10'
8	0,37	1,05	1,10	4,07	4,20	131° 30'	13° 30'	46° 50'	29° 40'	17° 10'	39° 50'
9	0,34	0,94	1,09	4,16	4,15	131° 10'	13° 20'	47° 40'	30°	17° 15'	41° 40'
10	0,43	0,94	0,98	4,20	4,14	131° 20'	13°	48°	29°	16° 10'	40° 20'
11	0,34	0,96	1,08	4,20	4,17	131°	13° 10'	47° 40'	29° 10'	17° 50'	40° 40'
12	0,36	0,98	1,13	4,12	4,08	133°	13° 10'	47° 50'	29°	17°	40° 10'
13	0,53	1,21	0,93	3,96	4,26	128°	14° 25'	47° 10'	28° 30'	14°	37° 30'
14	0,68	1,28	0,99	4,23	4,21	125°	14°	47° 10'	28° 45'	15° 35'	38° 20'
15	0,33	0,96	1,03	4,26	4,25	130°	13° 30'	47° 40'	28° 50'	17°	40°
16	0,32	1,12	1,13	4,27	4,15	132° 10'	13° 25'	47° 50'	28° 45'	17° 45'	40° 40'
17	0,55	0,98	0,89	4,00	4,19	132° 10'	13° 55'	46° 40'	29° 25'	16° 30'	39° 50'
18	0,30	1,06	1,03	4,32	4,21	132° 10'	14° 15'	46° 10'	29° 35'	17° 55'	40° 30'
19	0,40	0,85	1,24	4,26	4,04	131° 50'	13° 45'	47° 10'	29° 05'	16° 10'	41°
20	0,29	0,95	1,06	4,36	4,45	132°	13° 10'	47° 40'	29° 10'	16° 10'	41°
21	0,39	0,79	1,22	4,21	3,95	131°	12° 45'	48° 50'	28° 25'	16° 50'	40°
22	0,19	1,23	1,11	3,94	3,98	131° 10'	13° 55'	47° 50'	28° 15'	17° 25'	40° 20'
23	0,25	1,00	1,05	4,13	4,05	133°	14° 05'	46°	29° 55'	17° 40'	40° 40'
24	0,29	0,95	1,13	4,08	4,09	131° 10'	13° 45'	47° 05'	29° 10'	17° 25'	40° 30'
25	0,32	0,77	1,19	3,95	4,27	132°	13° 20'	47°	29° 40'	16° 25'	41° 30'
26	0,29	1,15	1,24	3,97	4,06	132° 10'	13° 20'	47° 30'	29° 10'	16° 50'	41° 40'
27	0,30	1,16	0,95	4,40	4,14	132° 20'	13° 50'	46° 05'	30° 05'	17°	41°
28	0,32	0,89	1,07	4,12	3,97	131° 40'	14° 10'	46°	29° 50'	17° 45'	39° 50'
29	0,40	1,16	1,02	3,84	4,05	131° 05'	13° 45'	47° 10'	29° 05'	17° 30'	40° 30'
30	0,34	1,24	1,14	3,82	3,95	134°	13° 50'	46° 35'	29° 35'	17°	39° 50'
31	0,37	1,07	1,24	4,03	3,82	132°	13° 10'	46° 40'	30° 10'	16° 35'	40° 30'
32	0,34	1,03	0,99	3,99	4,14	132°	13° 10'	47°	29° 50'	16° 10'	40°
33	0,34	1,04	0,97	4,13	4,12	132° 10'	14° 05'	46° 45'	29° 10'	17° 25'	40°
34	0,34	1,18	1,08	4,04	3,92	133°	13° 50'	47°	29° 10'	17° 50'	40° 45'
35	0,33	1,19	1,14	3,85	3,90	131° 20'	13° 40'	47° 35'	28° 45'	17° 10'	39° 50'
36	0,34	0,98	1,08	4,09	3,95	131° 20'	14° 50'	46°	29° 10'	18° 30'	39° 30'
37	0,33	0,98	1,07	4,27	4,02	131°	13° 10'	47°	29° 50'	18° 15'	40° 30'
38	0,34	0,97	1,15	4,08	3,99	131° 40'	14° 25'	46° 40'	28° 55'	17° 30'	41° 30'
39	0,31	1,02	1,00	4,00	4,16	133°	13° 20'	46° 30'	30° 10'	16°	40° 50'
40	0,33	0,90	1,09	4,15	4,00	132° 20'	14° 10'	46° 40'	29° 10'	16° 25'	41° 50'

* As brocas sombreadas na tabela não foram utilizadas por estarem com valores dos ângulos fora do especificado.

COMPRIMENTOS E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS											
Nº/DADOS	At (mm)	A1a (mm)	A2a (mm)	A1b (mm)	A2b (mm)	σ	α	β	δ	ψ_1	$A\alpha_1$
41	0,33	1,02	1,00	4,05	3,99	131°	13° 55'	47° 20'	28° 45'	17° 05'	40° 50'
42	0,30	0,99	1,00	3,99	3,98	132°	13°	47°	30°	17° 55'	41°
43	0,34	1,09	1,10	4,09	4,18	131° 50'	13° 50'	46° 35'	29° 35'	16°	41°
44	0,33	1,00	1,05	3,99	3,90	131° 20'	14°	46° 20'	29° 40'	16° 30'	40° 30'
45	0,34	0,99	1,05	3,98	4,05	131°	14° 05'	46°	29° 55'	16° 20'	40° 30'
46	0,33	1,05	1,05	3,98	3,97	132° 50'	13° 40'	47° 10'	29° 10'	17°	40° 30'
47	0,33	1,20	1,12	4,00	4,17	131° 50'	14°	46° 10'	29° 50'	17°	40° 20'
48	0,35	1,12	1,09	4,05	4,09	132°	14° 05'	46° 20'	29° 35'	16° 30'	41°
49	0,34	1,00	1,09	4,12	4,00	131° 40'	13° 40'	47° 50'	28° 30'	16° 30'	41° 20'
50	0,32	0,99	0,98	3,97	3,99	132° 40'	13°	46° 50'	30° 10'	17°	40°
51	0,33	0,98	1,03	4,10	3,98	131°	13° 50'	46° 30'	29° 40'	16° 50'	40° 40'
52	0,32	1,07	1,02	4,04	4,15	131° 10'	13° 40'	47°	29° 20'	16° 30'	40° 30'
53	0,31	1,06	0,99	4,02	3,95	131° 30'	13° 55'	47° 50'	28° 15'	18° 50'	40° 30'
54	0,35	1,09	1,07	3,97	4,07	132° 30'	13° 05'	48° 10'	28° 45'	18° 30'	40° 20'
55	0,34	1,11	1,10	4,00	4,10	131°	13° 40'	48° 05'	28° 15'	17° 30'	40° 10'
56	0,35	1,17	1,20	3,97	3,93	133°	13° 10'	47° 40'	29° 20'	17° 10'	41° 40'
57	0,35	1,05	1,05	4,14	4,15	131°	14°	46° 50'	29° 10'	17° 40'	41° 40'
58	0,30	0,96	0,99	3,99	4,09	131° 40'	13° 50'	47° 30'	28° 40'	18° 40'	40°
59	0,34	1,12	1,15	4,05	4,04	131° 50'	13° 40'	46° 30'	29° 50'	18°	39° 10'
60	0,31	0,98	0,98	4,09	3,98	132° 20'	13° 10'	46° 20'	30° 30'	17° 10'	40° 30'
61	0,33	1,00	0,97	3,96	3,99	133° 20'	13°	47° 05'	29° 55'	16° 20'	41° 30'
62	0,33	1,00	1,05	4,05	4,12	132°	13°	47°	30°	16° 30'	41°
63	0,35	1,10	1,02	4,09	4,17	131° 20'	14°	46° 20'	29° 40'	17°	40° 20'
64	0,30	1,06	0,99	4,13	4,08	131°	14°	46° 50'	29° 10'	16° 10'	40° 10'
65	0,34	1,08	1,00	4,16	4,14	131° 30'	13° 50'	46° 55'	29° 15'	17° 30'	40° 30'
66	0,31	1,05	1,13	3,97	3,95	134°	12° 50'	47°	30° 10'	16° 50'	40°
67	0,35	1,12	1,10	4,00	3,98	132° 30'	13° 30'	47° 30'	29°	16° 50'	39° 50'
68	0,32	1,10	1,05	4,12	4,00	132° 40'	13° 20'	47° 20'	29° 20'	16° 30'	41° 30'
69	0,35	0,97	1,06	4,12	4,05	132° 20'	13° 40'	47° 20'	29°	17°	40° 40'
70	0,32	0,99	1,05	3,99	3,97	133°	13°	48° 10'	28° 50'	16° 50'	40° 40'
71	0,34	1,16	1,09	3,99	4,12	132°	13° 40'	46° 50'	29° 30'	17°	39° 10'
72	0,34	1,05	1,05	4,06	4,08	131° 40'	13° 50'	46° 30'	29° 40'	16° 10'	40° 40'
73	0,34	1,05	1,00	4,00	4,07	131° 30'	13° 40'	47°	29° 20'	16° 50'	41°
74	0,33	1,00	1,09	4,00	3,99	132° 20'	13° 10'	47° 50'	29°	17°	41°
75	0,34	1,02	0,98	4,02	3,97	132° 10'	13° 05'	48° 05'	28° 50'	17°	39° 50'
76	0,33	1,12	1,12	4,10	4,12	131° 50'	14° 10'	46° 50'	29°	16° 30'	40° 30'
77	0,33	1,10	1,12	4,02	4,02	131°	14° 05'	46° 30'	29° 25'	16° 50'	40° 10'
78	0,35	0,97	1,00	4,10	3,98	132° 50'	13° 30'	47°	29° 30'	16° 30'	40°
79	0,32	1,12	1,15	3,99	3,95	133°	13° 20'	47° 50'	28° 50'	16° 50'	40°
80	0,30	0,99	0,97	4,14	4,10	131° 30'	14°	47° 30'	28° 30'	16° 10'	41° 10'
81	0,30	1,09	1,00	3,97	4,05	132°	13° 20'	48°	28° 40'	17° 40'	39° 50'

B) Dimensões e ângulos das brocas helicoidais utilizadas na primeira etapa do trabalho

B.1) Afição em cruz - $\sigma = 135^\circ$ (HSS) - Não revestida

DIMENSÕES E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS			
	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3
At	0,30 mm	0,31 mm	0,32 mm
A1a	1,12 mm	1,10 mm	1,10 mm
A2a	1,11 mm	1,11 mm	1,10 mm
A1b	4,09 mm	4,09 mm	4,07 mm
A2b	4,08 mm	4,06 mm	4,08 mm
Ag1	0,23 mm	0,24 mm	0,25 mm
Ag2	0,24 mm	0,24 mm	0,26 mm
σ	132°	132° 30'	133°
α	14° 30'	13°	14°
β	45°	45°	46°
δ	29°	29°	29°
ψ_1	16° 35'	16° 20'	16° 20'
A α 1	40°	40° 15'	40°

B.2) Afição em cruz - $\sigma = 135^\circ$ (HSS) - Revestida com TiN

DIMENSÕES E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS			
	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3
At	0,30 mm	0,31 mm	0,30 mm
A1a	1,05 mm	1,04 mm	1,05 mm
A2a	1,05 mm	1,05 mm	1,03 mm
A1b	4,07 mm	4,05 mm	4,08 mm
A2b	4,06 mm	4,08 mm	4,08 mm
Ag1	0,22 mm	0,24 mm	0,22 mm
Ag2	0,24 mm	0,25 mm	0,23 mm
σ	134°	134° 30'	134°
α	13° 30'	13°	13°
β	47°	47°	47°
δ	29° 50'	29° 30'	30°
ψ_1	15° 15'	15° 15'	15° 15'
A α 1	40°	40°	40° 30'

B.3) Afição em cruz - $\sigma = 135^\circ$ (HSS) - Revestida com TiCN

DIMENSÕES E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS			
	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3
At	0,31 mm	0,31 mm	0,31 mm
A1a	1,00 mm	1,02 mm	1,02 mm
A2a	1,02 mm	1,01 mm	1,01 mm
A1b	4,08 mm	4,06 mm	4,05 mm
A2b	4,06 mm	4,06 mm	4,07 mm
Ag1	0,24 mm	0,24 mm	0,23 mm
Ag2	0,24 mm	0,24 mm	0,24 mm
σ	134°	134°	133° 30'
α	13° 40'	13° 20'	13° 20'
β	47°	47°	47°
δ	29° 30'	29° 30'	30°
ψ_1	16°	15° 55'	16°
A α 1	40°	40° 30'	40°

C) Dimensões e ângulos das brocas helicoidais utilizadas na segunda etapa do trabalho

C.1) Afição em cruz - $\sigma = 135^\circ$ (HSS) - Não revestida

DIMENSÕES E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS			
	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3
At	0,35 mm	0,35 mm	0,35 mm
A1a	1,13 mm	1,03 mm	1,04 mm
A2a	1,10 mm	1,04 mm	1,05 mm
A1b	4,06 mm	4,05 mm	4,07 mm
A2b	4,08 mm	4,06 mm	4,07 mm
Ag1	0,24 mm	0,24 mm	0,25 mm
Ag2	0,23 mm	0,23 mm	0,26 mm
σ	133°	133° 30'	132°
α	13° 30'	13° 30'	14°
β	46°	46°	47°
δ	29° 20'	30°	29° 30'
ψ_1	16° 30'	16° 30'	16° 25'
A α 1	40° 30'	40° 20'	40°

C.2) Afição com diminuição de gume transversal - $\sigma = 135^\circ$ (HSS) - Não revestida

DIMENSÕES E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS			
	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3
At	1,45 mm	1,50 mm	1,40 mm
A1a	5,04 mm	5,15 mm	4,99 mm
A2a	5,00 mm	5,12 mm	5,00 mm
Ag1	0,25 mm	0,24 mm	0,23 mm
Ag2	0,23 mm	0,24 mm	0,23 mm
σ	131°	131° 30'	131°
α	14° 50'	12°	14°
β	46°	47° 30'	47°
δ	30°	30°	30°

C.3) Afição em cruz - $\sigma = 118^\circ$ (HSS) - Não revestida

DIMENSÕES E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS			
	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3
At	0,65 mm	0,60 mm	0,60 mm
A1a	0,80 mm	0,90 mm	0,84 mm
A2a	0,85 mm	0,90 mm	0,80 mm
A1b	4,42 mm	4,00 mm	4,30 mm
A2b	4,39 mm	4,05 mm	4,30 mm
Ag1	0,26 mm	0,24 mm	0,25 mm
Ag2	0,24 mm	0,23 mm	0,26 mm
σ	118°	119°	119°
α	13°	14°	14° 30'
β	47° 30'	46°	47°
δ	29° 30'	30°	28° 30'
ψ_1	5°	4°	5°
A α 1	59°	60°	59°

C.4) Afição tipo "S" - $\sigma = 135^\circ$ (HSS) - Não revestida

DIMENSÕES E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS			
	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3
At	0,49 mm	0,45 mm	0,50 mm
Ag1	0,26 mm	0,27 mm	0,29 mm
Ag2	0,26 mm	0,27 mm	0,29 mm
σ	132°	131°	131°
α	15°	14° 30'	15°
β	48°	48°	47° 30'
δ	30°	30°	29° 30'

C.5) Afição em cruz - $\sigma = 135^\circ$ (HSS) - Revestida com TiN

DIMENSÕES E ÂNGULOS DAS BROCAS HELICOIDAIS			
	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3
At	0,30 mm	0,31 mm	0,33 mm
A1a	1,05 mm	1,04 mm	1,05 mm
A2a	1,05 mm	1,05 mm	1,03 mm
A1b	4,07 mm	4,05 mm	4,08 mm
A2b	4,06 mm	4,08 mm	4,08 mm
Ag1	0,22 mm	0,24 mm	0,22 mm
Ag2	0,24 mm	0,25 mm	0,23 mm
σ	134°	134° 30'	134°
α	13° 30'	13°	13°
β	47°	47°	47°
δ	29° 50'	29° 30'	30°
$\psi 1$	15° 15'	15° 15'	15° 15'
A α 1	40°	40°	40° 30'

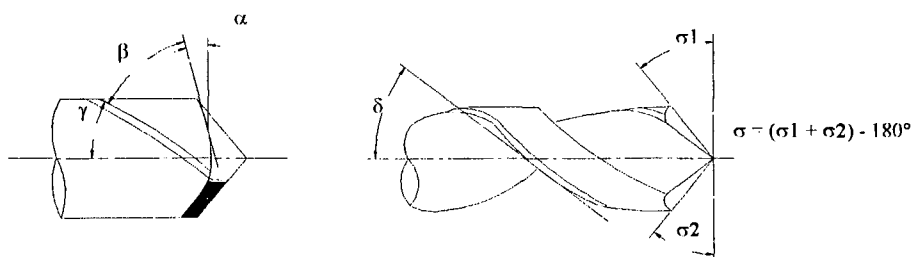
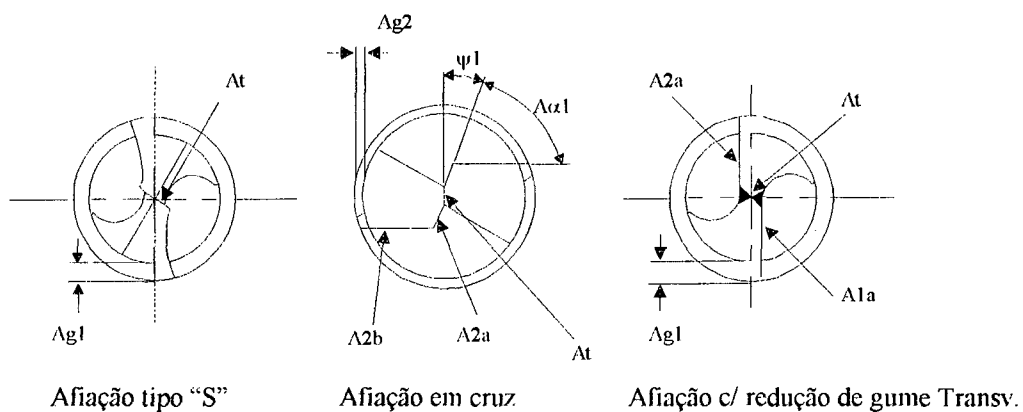


Figura 4.0 - Dimensões e ângulos das brocas.

ANEXO 3

A) Plataforma Piezoelétrica

Características técnicas:

Marca:	Kistler Instrument A. G.	
Modelo:	9273	
Número de Série:	142405	
Faixas de Medição:	Fz -5.....20 kN	Md -100.....100 N.m
Sensibilidade:	- 1,94 pC/N	- 1,65 pC/N
Linearidade:	$\leq \pm 1 \% \text{ VFE}$	$\leq \pm 1 \% \text{ VFE}$
Histerese:	$\leq 1 \% \text{ VFE}$	$\leq 1 \% \text{ VFE}$
Frequência Natural:	3 kHz	
Temperatura de Utilização:	0.....70 °C	
Diafonia:	Fz \Rightarrow Fx,y $\leq \pm 1\%$ Fx \Rightarrow Fy $\leq \pm 3\%$ Fx,y \Rightarrow Fx $\leq \pm 3\%$	

B) Amplificador de Sinais

Características técnicas:

Marca:	Kistler Instrument A. G.
Modelo:	5006
Faixa de Medição:	$\pm 10.....500000 \text{ pC}$
Sensibilidade:	0,1.....11000 pC/unid. mecânica
Impedância da entrada:	$\cong 100 \text{ T}\Omega$
Faixa de frequência:	0.....180 kHz
Incerteza de medição:	$\leq \pm 1\%$
Temperatura de utilização:	0.....50 °C

C) Sistema de Aquisição Automática de Dados (CONTROL SYSTEMS ANALISER)**Características técnicas:**

Marca: HEWLETT-PACKARD
Modelo: 3563 A

D) Microcomputador**Características técnicas:**

Marca: SAMSUNG
Modelo: 386 SX - 25 MHz
Memória RAM: 2 Mbytes

E) Máquina de Medição Tridimensional**Características Técnicas:**

Marca: ZEISS
Modelo: ZMC 550-CAA
Incerteza de medição: 1 μ m
Faixa de medição: x = 550 mm y = 500 mm z = 450 mm
cabeçote medidor com apalpador de contato intercambiável

F) Microscópio de Medição**Características técnicas:**

Marca:	CARL ZEISS JENA
Modelo:	GWM - DC
Ampliações:	10x, 15x, 30x e 50x
Faixas de medições:	x = 0 - 150 mm y = 0 - 50 mm
Resolução:	1 μm

G) Máquina Universal de Medição**Características técnicas:**

Marca:	VEN CARL ZEISS JENA
Modelo:	UMM
Ampliações:	10x, 15x, 30x e 50x
faixa de medição:	x = 0 - 200 mm y = 0 - 100 mm
Resolução:	1 μm

H) Microscópio de Medição**Características técnicas:**

Marca:	NIKON
Modelo:	MEASURESCOPE
Número:	18771
Ampliações:	10x, 15x e 30x
Resolução:	1 μm

I) Microscópio Eletrônico de Varredura**Características técnicas:**

Marca:	PHILIPS
Modelo:	XL 30
Ampliações:	até 100.000x

ANEXO 5

A) Fluido de corte

Características técnicas:

Fabricante:	MORGANITE DO BRASIL INDUSTRIAL LTDA
Marca:	ROCOL ULTRACUT 370
Aparência translúcida:	verde claro
Odor:	amina suave
pH (50:1):	9,0
Gravidade específica:	1,01
Nitritos:	não contém

B) Fluido de corte

Características técnicas:

Fabricante:	RENOLUB
	Normas
Densidade a 20°C, g/cm	DIN 51 757 1,07
pH da emulsão a 2% em água	DIN 51 368 9,4
Aspecto da emulsão a 2% em água	Limpido, esverdeado
Teste Bosch, GG 23, emul. a 2% em água	DIN 51 362-2 0
Estabilidade da emulsão a 2% (mín. 15 h)	estável
Estabilidade do produto a 40/4°C (mín. 15 h)	estável
Fator de refração	1,8