

M011
621.3
K152
TES/MEU

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE REBARBAS NO TORNEAMENTO

CILÍNDRICO EXTERNO DE AÇO-CARBONO ABNT 1045

Dissertação apresentada

à Universidade Federal de Uberlândia por:

ALMIR KAZUO KAMINISE

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva (FEMEC/UFU) - Orientador

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado (FEMEC/UFU)

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos (CEFET/MG)

Prof. MSc. Rafael Ariza Gonçalves (FEMEC/UFU) - Convidado

SISBI/UFU



1000215029

Uberlândia, MG, 29 de Abril de 2004.



ALUNO: Almir Kazuo Kaminise

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5992602-X

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de
Fabricação

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

*“Estudo da Formação de Rebarbas no Torneamento
Cilíndrico Externo de Aço-Carbono ABNT 1045.”*

ORIENTADOR: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no anfiteatro do bloco E, Campus Santa Mônica, em 29 de abril de 2004, às 10:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Márcio Bacci da Silva, Prof. Dr.	UFU	
Álison Rocha Machado, Prof. Dr	UFU	
Sandro Cardoso Santos, Prof. Dr.	CEFET/MG	
Rafael Ariza Gonçalves, Prof. Msc.	UFU	

Uberlândia, 29 de abril de 2004.

A Deus que nos ilumina sempre.

Ao meu filho Rodrigo, que é meu incentivo e minha esperança.

À Verônica, minha esposa e companheira.

Aos meus queridos pais Tosio e Zélia
e irmãos Zélia Akemy, Caio Takamori, Zizélia Akiko e Maria Sode.

Ao amigo Márcio Bacci.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva, pelo incentivo, pela orientação, por sua disponibilidade e suporte técnico que foram imprescindíveis à realização deste trabalho.
- Ao Prof. Ms. Rafael Ariza Gonçalves, pelo incentivo, pela participação colaborando nas atividades experimentais, fazendo sugestões e incentivando o que foi fundamental ao desenvolvimento do trabalho.
- Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado, pelo apoio ao trabalho, sem o qual este não teria sido realizado.
- À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelas oportunidades concedidas e, principalmente, pelo apoio à conclusão deste trabalho.
- Aos colegas do LEPU, em especial, ao Dr. Alexandre Martins Reis e Dr. Anderson Clayton Alves de Mello, pelo companheirismo e pelas sugestões.
- À servidora, Sr^a Inês Vidal Magalhães Guimarães, pela colaboração e ajuda quando secretária da Coordenação do Curso de Pós-Graduação.
- Ao CNPq pela ajuda financeira através do projeto nº 474558/03 e de bolsa PIBIC UFU/CNPq.
- À FAPEMIG, pelo apoio financeiro através do projeto nº TEC 85/99
- Ao IFM – Instituto Fábrica do Milênio, pela ajuda financeira e apoio ao LEPU.
- Em especial, ao amigo Prof. Gérson do Carmo Argolo do CEFET/BA - UNED/Barreiras, pelo companheirismo e colaboração.
- À pedagoga, Sra. Dicíola Figueiredo Baqueiro de Andrade, Chefe do Departamento de Ensino da UNED/Barreiras, pela compreensão às dificuldades enfrentadas e apoio ao desenvolvimento do trabalho.
- A todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE REBARBAS NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DE AÇO-CARBONO ABNT 1045

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvi
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
I - INTRODUÇÃO	1
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - Introdução ao estudo da formação de rebarbas em usinagem	5
2.1.1 - Formação de rebarbas no corte ortogonal	8
2.1.2 - Formação de rebarba no corte oblíquo	12
2.2 - Mecanismo de formação de rebarbas segundo Gillespie	13
2.2.1 - Mecanismo de formação da rebarba Poisson	13
2.2.2 - Mecanismo de formação da rebarba de encurvamento (<i>roll over burr</i>)	15
2.2.3 - Mecanismo de formação da rebarba de estiramento (<i>tear burr</i>)	16
2.2.4 - Mecanismo de formação da rebarba de interrupção de corte (<i>cut-off burr</i>)	18
2.3 - Mecanismo de formação das rebarbas segundo Nakayama e Arai	19
2.3.1 - Formação da rebarba lateral (ou rebarba de fluxo lateral)	19
2.3.2 - Formação da rebarba inclinada na direção avanço (ou rebarba inclinada)	21
2.4 - Estudo do mecanismo de formação de rebarba de encurvamento no corte ortogonal	21
2.5 - Estudo da Formação de rebarba de encurvamento no corte oblíquo	25
2.6 - Fatores que influenciam na formação de rebarbas em usinagem	29
2.7 - Formação de rebarbas nas operações de corte	32
2.7.1 - Formação de rebarbas no torneamento	32
2.7.2 - Formação de rebarba no fresamento	37
2.7.3 - Formação de rebarbas na furação	44
III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	47
3.1 - Material usinado	47
3.2 - Ferramentas de corte	48

3.3 - Parâmetros de corte - v_c , f , a_p , χ_r	49
3.4 - Preparação dos corpos-de-prova (cp) de usinagem	50
3.4.1 - Ensaios preliminares	51
3.4.2 - Corpos-de-prova de usinagem - modelo utilizado	52
3.4.3 - Suporte de usinagem	53
3.4.4 - Ajuste do cp para o ensaio	53
3.5 - Equipamentos utilizados	55
3.5.1 - Instrumentos de ajustagem e medição dos cp de usinagem	55
3.5.2 - Instrumentos e Equipamentos para análise das rebarbas	56
3.6 - Inspeção e medição das rebarbas	57
3.6.1 - Medição das dimensões das rebarbas nos corpos-de-prova de usinagem	57
3.6.2 - Medição das dimensões e da microdureza das rebarbas nos corpos-de-prova metalográficos	58
3.7 - Preparação dos corpos-de-prova metalográficos	59
3.7.1 – Procedimentos para a medição da microdureza na raiz da rebarba de saída	60
3.8 - Ensaio para verificação do efeito da variação de a_p e χ_r	61
IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 - Formação da rebarba de entrada	63
4.1.1 - Influência dos parâmetros de corte na formação da rebarba de entrada	71
4.2 - Formação da rebarba de saída	76
4.2.1 - Influência dos parâmetros de corte nas características geométricas da rebarba de saída	80
4.3 - Influência da interação entre profundidade de corte a_p e ângulo de posição principal χ_r na altura da rebarba de saída	83
4.4 - Resultados das medições de microdureza na raiz da rebarba de saída	85
V - CONCLUSÕES	91
VI - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXO 1 – Dedução das Equações 4.2 e 4.3	99

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

A_{α}	-	superfície de folga da ferramenta
a_e	-	penetração de trabalho
a_p	-	profundidade de corte (mm)
e	-	rebarba de entrada (de fluxo para trás)
f	-	avanço (mm/volta)
F_c	-	força de corte
F_f	-	força de avanço
fl	-	rebarba (de fluxo) lateral
F_p	-	força passiva
h	-	espessura de corte
HV	-	dureza Vickers
i	-	rebarba inclinada (na direção do avanço).
l	-	comprimento do corpo de prova
P	-	aresta principal de corte
pl_{ϵ}	-	penetração longitudinal da ferramenta no início do corte ($r_{\epsilon} \neq 0$)
pr_{ϵ}	-	penetração radial de ferramenta no início do corte ($r_{\epsilon} \neq 0$)
P_s'	-	plano de corte secundário da ferramenta
r_{β}	-	raio de arredondamento da aresta de corte
r_n	-	raio de ponta da ferramenta
s	-	rebarba (de fluxo à frente) de saída
S	-	aresta secundária de corte
t	-	espessura de rebarba
t_R	-	espessura da raiz da rebarba
TiN	-	Nitreto de Titânio
v	-	velocidade
v_c	-	velocidade de corte
α_o	-	ângulo de folga da ferramenta
β_o	-	ângulo de cisalhamento negativo inicial
β	-	ângulo de cisalhamento negativo
χ_r	-	ângulo de posição principal da ferramenta
χ_r'	-	ângulo de posição secundário

Δpr	-	Incremento na penetração radial da aresta de corte sem o arredondamento de ponta
ε_r	-	ângulo de ponta da ferramenta
γ_0	-	ângulo de saída da ferramenta
ϕ	-	ângulo de cisalhamento do plano primário
ϕ	-	diâmetro inicial do corpo de prova
γ_s	-	deformação cisalhante
η_c	-	ângulo entre a normal à aresta de corte e a direção de fluxo do cavaco, no corte oblíquo
κ	-	ângulo determinado para calcular $pr \varepsilon$ e $pl \varepsilon$, para ferramenta com raio de ponta r_ε , na fase inicial do corte.
λ_s	-	ângulo de inclinação da ferramenta
ν	-	coeficiente de Poisson
θ	-	ângulo de saída do corte, entre o vetor velocidade de corte e a superfície de saída do corte
ω	-	distância entre a aresta de corte e a superfície de saída da ferramenta, onde ocorre a iniciação da formação da rebarba de encurvamento
ψ	-	ângulo de borda da peça, entre a superfície usinada e a superfície de saída da ferramenta do corte.

SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DIN	-	Deustches Institutes fur Normung e.V.
FEMEC	-	Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU
ISO	-	International Organization for Standardization
LEPU	-	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
LTM	-	Laboratório de Tribologia e Materiais
SME	-	Society of Manufacturing Engineers
UFU	-	Universidade Federal de Uberlândia

ABREVIATURAS

APC	-	aresta postiça de corte
EDM		Electrical Discharge Machining
FEM	-	Finite Element Method
L.C.	-	linha de corte
M.E.F.	-	Método de Elementos Finitos
MEV	-	Microscópio eletrónico de varredura
<i>cp</i>	-	corpo-de-prova
P.C.N.	-	plano de cisalhamento negativo
P.C.P.	-	plano de cisalhamento primário
S.L.E.	-	superfície lateral esquerda
S.S.	-	superfície de saída da ferramenta

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Definição de bordas e rebarbas das peças (Soares Filho, 1995, citando a norma DIN 6784). Definição de bordas e rebarbas das peças	6
Figura 2.2	Representação esquemática das rebarbas: (a) rebarba Poisson, (b) rebarba de encurvamento, (c) rebarba de estiramento (Gillespie, 1973)	9
Figura 2.3	Representação das rebarbas formadas nas operações de corte: (a) fresamento frontal, aplainamento; (b) brochamento, corte com disco abrasivo; (c) furação, torneamento; (d) corte ortogonal (Nakayama e Arai, 1987)	10
Figura 2.4	Representação da formação de cavaco por ferramenta com aresta de corte apresentando raio de arredondamento (Gillespie, 1973)	14
Figura 2.5	Ilustração da pressão na superfície de folga da ferramenta (Gillespie, 1973)	14
Figura 2.6	Ilustração da formação de rebarba Poisson provocada pela ação do raio de arredondamento da aresta de corte r_p (Gillespie, 1973)	15
Figura 2.7	Ilustração da formação de rebarba de encurvamento (<i>rollover burr</i>), (Gillespie, 1973)	16
Figura 2.8	Figura 2.8 - Ilustração da formação da rebarba de encurvamento: (a) no fresamento de topo (Gillespie, 1973) e (b) no torneamento (R. Link citado por Soares Filho, 1995)	17
Figura 2.9	Ilustração da separação inicial de cavaco, formando rebarba de estiramento (Gillespie, 1973)	17
Figura 2.10	Ilustração da formação de rebarba de interrupção de corte no sangramento radial para seccionamento da peça acabada (Gillespie, 1973)	18
Figura 2.11	Representação da formação de rebarba lateral baseado nas imagens obtidas em MEV à esquerda (Nakayama e Arai, 1987)	20
Figura 2.12	Representação da formação da rebarba inclinada na direção de avanço no torneamento (h - altura, t - espessura, t_R - espessura da raiz da rebarba), (Nakayama e Arai, 1987).	22
Figura 2.13	Ilustração da formação de rebarba na usinagem de massa de modelar (Ko e Dornfeld, 1991)	23
Figura 2.14	Ilustração esquemática do mecanismo de transição entre formação de cavaco e formação de rebarba (Ko e Dornfeld, 1991)	24
Figura 2.15	Representação da formação de rebarba de encurvamento: (a) no corte ortogonal e (b) corte oblíquo (Hashimura <i>et al.</i> , 1995)	26
Figura 2.16	Ilustração da localização das rebarbas formadas no corte oblíquo, com	

	ocorrência de fratura (Hashimura <i>et al.</i> , 1995)	27
Figura 2.17	Ilustração esquemática do corte oblíquo mostrando o plano da direção de corte (Ko e Dornfeld, 1996)	28
Figura 2.18	Efeito do ângulo de borda da peça sobre a formação de rebarba de saída (rebarba de encurvamento), (Soares Filho, 1995)	31
Figura 2.19	Ilustração da localização de formação de rebarbas em operações básicas de torneamento (Gillespie, 1973)	32
Figura 2.20	Representação da formação de rebarbas no torneamento cilíndrico externo: (a) rebarba Poisson; (b) rebarba de encurvamento; (c) efeito do ângulo de posição na rebarba de encurvamento. (Gillespie, 1973)	34
Figura 2.21	Ilustração da formação de rebarba no faceamento: (a) rebarba lateral; (b) rebarba de encurvamento (Gillespie, 1973)	35
Figura 2.22	Ilustração da formação de rebarbas na operação de sangramento radial (Gillespie, 1973)	36
Figura 2.23	Representação da localização das rebarbas formadas no fresamento cilíndrico tangencial discordante, de um rasgo passante (Gillespie, 1973)	37
Figura 2.24	Representação da natureza periódica na formação de rebarbas no fresamento cilíndrico tangencial (Gillespie, 1973)	38
Figura 2.25	Figura 2.25 - Representação da formação de rebarbas no fresamento cilíndrico tangencial concordante de um rasgo passante (Gillespie, 1973) .	39
Figura 2.26	Ilustração da localização de rebarbas formadas no fresamento frontal: (a) rasgo cego; (b) rasgo passante (Gillespie, 1973)	39
Figura 2.27	Ilustração da localização de formação de rebarbas no fresamento frontal de ressaltos: (a) lado de entrada da ferramenta; (b) lado da saída da ferramenta da peça (Gillespie, 1973)	41
Figura 2.28	Representação da influência da espessura de trabalho a_e na formação de rebarba 5 (rebarba de encurvamento), (Gillespie, 1973)	42
Figura 2.29	Representação das bordas de formação de rebarbas no fresamento e suas respectivas denominações (Hashimura <i>et al.</i> , 1999b)	43
Figura 2.30	Ilustração de rebarba primária e rebarba secundária formada no fresamento frontal (Kishimoto <i>et al.</i> , 1981)	43
Figura 2.31	Ilustração da localização do ângulo de saída da ferramenta da peça θ (Olvera e Barrow, 1998)	44
Figura 2.32	Representação da formação de rebarba de encurvamento na furação em cheio passante, de material dúctil (Gillespie, 1973)	45
Figura 3.1	Fotografia ilustrativa da microestrutura do aço ABNT 1045 utilizado nos	

	testes (ampliação - 340 vezes), (Reis, 2000)	48
Figura 3.2	Desenho do corpo de prova utilizado nos ensaios preliminares, e respectivas dimensões	51
Figura 3.3	Desenho do corpo de prova utilizado nos ensaios e suas dimensões básicas	52
Figura 3.4	Fotografia ilustrativa de montagens do <i>cp</i> no torno: (a) suporte de fixação usado nos ensaios 01 a 11; (b) suporte de fixação utilizado nos demais ensaios	54
Figura 3.5	Desenho do suporte de fixação de <i>cp</i> , e respectivas dimensões	54
Figura 3.6	Montagem utilizada para verificação do <i>cp</i> antes dos ensaios: (a) excentricidade radial, (b) excentricidade axial na superfície de entrada da ferramenta	55
Figura 3.7	Montagem utilizada para medição de altura de rebarbas diretamente no <i>cp</i> com relógio comparador, (a) em microscópio ferramenteiro; (b) em suporte específico Mitutoyo	56
Figura 3.8	Representação esquemática da localização das rebarbas observadas neste trabalho	58
Figura 3.9	Figura 3.9 - Microestrutura de raiz da rebarba de saída obtida do ensaio nº 14 no analisador de imagens – ataque com Nital 2%.	60
Figura 3.10	Representação das posições de indentações na raiz de rebarba de saída, para a medição da microdureza.	60
Figura 4.1	Ilustração da formação de rebarbas observadas no torneamento cilíndrico externo	63
Figura 4.2	Perfil um risco produzido em uma superfície de através de esclerometria pendular (Maracini <i>et al.</i> , 2002)	65
Figura 4.3	Representação da formação de rebarba de entrada: (a) início da operação - penetração da ferramenta é menor do que a_p ; (b) penetração da ferramenta próximo do valor de a_p ; (c) entrada da ponta da ferramenta no material - penetração da ferramenta igual a a_p ; (d) desenvolvimento do corte após a penetração da ferramenta no <i>cp</i>	66
Figura 4.4	Fotografia ilustrativa de superfície usinada obtida em MEV, mostrando a ocorrência de <i>side flow</i> (Reis, 2000)	67
Figura 4.5	Geometria da fase inicial do corte, durante a penetração da ferramenta, entre o contato inicial ferramenta/ <i>cp</i> ($pr_\varepsilon = 0$) e a profundidade de corte final ($pr_\varepsilon = a_p$)	68

Figura 4.6	Representação da fase inicial do corte com $\chi_r = 20^\circ$: (a) posição de contato inicial ferramenta/cp; (b) posição de penetração igual a a_p	69
Figura 4.7	Representação da fase inicial do corte com $\chi_r = 85^\circ$: (a) posição da ferramenta antes da primeira rotação do cp ; (b) e (c) representação das fases intermediárias com penetração longitudinal equivalente a $2f$ e $3f$, respectivamente; (d) posição de penetração igual a a_p - penetração longitudinal equivalente a $3,8f$	70
Figura 4.8	Fotos de rebarba de entrada (circuladas) obtidas em microscópio metalúrgico NEOPHOT 21, (a) e (b) - ensaio nº 09, (c) e (d) ensaio nº 10. Nota-se diferenças nos respectivos perfis em função da penetração longitudinal da ferramenta. As setas indicam a direção de avanço	71
Figura 4.9	Fotografia obtida em MEV da rebarba de entrada do ensaio nº 19 (aumento de 200X): (a) superfície de entrada da ferramenta, tendo rebarba de entrada ao fundo ; (b) vista da rebarba de entrada na borda do cp, entre superfícies usinada e de entrada	72
Figura 4.10	Gráficos da altura e espessura da rebarba de entrada em função dos parâmetros de corte v_c , f , a_p e χ_r	73
Figura 4.11	Ilustração do mecanismo de formação da rebarba de saída no torneamento cilíndrico (Link, R., citado por Soares Filho, 1995)	77
Figura 4.12	Fotografias da rebarba de saída obtida do ensaio nº 19: (a) foto digital do perfil da rebarba de saída obtida em microscópio ferramenteiro (aumento de 40 vezes); (b) foto da rebarba de saída obtida em MEV.....	78
Figura 4.13	Fotografias de rebarbas de saída - microscópio metalúrgico NEOPHOT 21. As setas indicam as marcas de avanço ao longo do comprimento da rebarba (v_c - 185 m/min, a_p - 1,0 mm, χ_r - 45°)	79
Figura 4.14	Gráficos de altura e espessura de rebarba de saída em função dos parâmetros de corte v_c , f , a_p e χ_r	81
Figura 4.15	Representação das medições na rebarba de saída: 1-altura da rebarba; 2-espessura da raiz; 3-espessura de projeção; 4-espessura mínima (do perfil). (Kishimoto <i>et al.</i> , 1981)	82
Figura 4.16	Fotografias de rebarba de saída obtidas nos ensaios com variação do ângulo de posição principal χ_r	84
Figura 4.17	Gráfico bi-dimensional da altura da rebarba de saída em função de a_p e de χ_r	85
Figura 4.18	Reprodução da Figura 3.9, que mostra a microestrutura de raiz da	

	rebarba de saída do ensaio nº 14, observada em analisador de imagens – ataque com Nital 2%	86
Figura 4.19	Representação da microdureza $HV_{0,01}$ (Kgf/mm ²) no perfil esquemático da rebarba de saída: (a) ensaio nº 17 ($\chi_r = 20^\circ$); (b) ensaio nº 18 ($\chi_r = 70^\circ$); (c) ensaio nº 19 ($\chi_r = 85^\circ$)	87
Figura 4.20	Ilustração da variação da microdureza com a profundidade de corte observada em um mesmo ponto de medição	89
Figura 4.21	Gráficos da média aritmética dos valores medidos da microdureza sobre a reta vertical 5 (Figura 3.10): (a) com variação de v_c ; (b) variação de f ; (c) variação de a_p ; (d) variação de χ_r .	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	- Composição química do material utilizado no trabalho	48
Tabela 3.2	- Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.	49
Tabela 3.3	- Planilha com os parâmetros dos ensaios realizados	50
Tabela 3.4	- Parâmetros de corte utilizados na verificação da influência de a_p e χ_r na altura da rebarba de saída	61
Tabela 4.1	- Resultados das medições da microdureza da raiz das rebarbas de saída...	88

Kaminise, A. K., 2004, "ESTUDO SOBRE A FORMAÇÃO DE REBARBAS NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DE AÇO-CARBONO ABNT 1045", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

RESUMO

Este estudo analisa a formação de rebarba no torneamento cilíndrico externo de aço-carbono ABNT 1045 no qual se verifica a ocorrência de rebarba de entrada (*rebarba Poisson* ou *rebarba de fluxo lateral*) e de rebarba de saída (*rebarba de encurvamento* ou *rebarba inclinada na direção do avanço*). É estudada a influência dos parâmetros de corte - velocidade de corte v_c , avanço f , profundidade de corte a_p e ângulo de posição principal χ_r na geometria das rebarbas - altura e espessura de raiz, e na microdureza da raiz da rebarba de saída. Os ensaios foram realizados em torno mecânico, a seco, com ferramentas de metal duro revestidas com TiN, utilizando-se de corpos-de-prova previamente preparados para os ensaios. Foram aplicados dois métodos de medição das dimensões das rebarbas - medição da altura das rebarbas diretamente nos corpos de prova e a medição de altura e de espessura em corpos-de-prova metalográficos. Verificou-se que a espessura de raiz é uma característica que deve ser analisada usando-se ensaios metalográficos enquanto que a altura obtida por ambos os métodos conduz a resultados muito semelhantes. Pôde-se verificar que os parâmetros de corte investigados influenciam na geometria das rebarbas, principalmente, na rebarba de saída. A altura desta rebarba é influenciada diretamente pela profundidade de corte a_p e em menor intensidade pelo ângulo de posição principal χ_r . O avanço f tem grande influência sobre a sua espessura. Foi observada a variação da microdureza na raiz da rebarba de saída, mas os resultados obtidos não permitiram conclusões sobre a influência destes parâmetros de corte nesta propriedade.

Palavras-chave: rebarbas, torneamento, usinagem.

Kaminise, A. K., 2004, "STUDY ON BURR FORMATION IN EXTERNAL CYLINDRICAL TURNING OF ABNT 1045 CARBON STEEL", M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

Abstract

The main goal of this work is to study burr formation in external cylindrical turning of carbon steel ABNT 1045. It can be identified two kinds of burrs: the entrance burr (Poisson burr or sideflow burr) and exit burr (roll over burr or leaned to feed direction burr). It is studied the effect of cutting speed, feed rate, depth of cut and approach angle on burr's geometry - height and thickness, and on its microhardness (exit burr). The experiments were carried out on turning with single point TiN coated carbide cutting tools, without cutting fluid, and using workpieces in form of flanges. The height and thickness of the burr formed were measured using two different procedures. First, directly from the workpiece using gauge indicator to measure the height. In the second method, small samples were cut out from the workpiece and metallurgical mounts were prepared in resin to be observed in the optical microscope. The results indicates that the machining parameters have effect on burrs geometry, mainly, on the exit burr. The exit burr height is highly affected by depth of cut and entering angle. Feed rate have significant influence on the thickness of burr. It can be observed microhardness variation in the exit burr but the results do not allow any conclusions about the effect of cutting parameters.

Keywords: Burr, turning, machining.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A formação de rebarbas é um dos principais problemas existentes na usinagem dos metais. A sua ocorrência, além de provocar erros geométricos que alteram as bordas das peças e, conseqüentemente, causam sérios problemas ao impedir a montagem entre componentes, prejudicam o processo produtivo durante o corte e provocam a falha prematura da ferramenta devido a um tipo de desgaste de entalhe (Trent, 1984). Dependendo do material usinado e das dimensões da rebarba formada, há ainda o risco de acidentes com os operários que podem cortar-se ao manusear as peças. Por isso, em geral, todo processo de fabricação por usinagem necessita de operações de rebarbação ou de chanframento para a remoção das rebarbas e a obtenção das tolerâncias geométrica e dimensional às peças.

Apesar dos avanços tecnológicos alcançados nas áreas de projeto e construção de máquinas, de materiais para ferramentas e da robotização que proporcionaram o aumento da eficiência e da capacidade produtiva dos sistemas de manufatura, as necessárias operações de rebarbação nem sempre podem ser automatizadas. Normalmente estas são realizadas por meio de equipamentos ou ferramentas operados manualmente por operários que necessitam de qualificação para fazer o julgamento decisivo sobre a intensidade e a qualidade da operação. Quanto maior é a qualidade exigida da borda rebarbada, maiores são estas exigências. No entanto, por mais eficiente que possa tornar-se o ser humano, a rebarbação manual é muito menos produtiva do que um processo automatizado, o que transforma os locais destinados à rebarbação realizada manualmente em pontos de estrangulamento da produção. A dificuldade de implantação de rebarbação automatizada na própria máquina ferramenta em que é gerada ou através da robotização deste procedimento na linha de produção, é causada pela falta de conhecimento sobre a natureza da formação das rebarbas as quais podem apresentar alterações geométricas e de localização na borda da peça.

Assim, um dos grandes desafios dos pesquisadores que investigam sobre rebarbação tem sido o de alcançar o desenvolvimento de tecnologias que permitam automatizar os procedimentos de rebarbação, sem limitações (Valente, 2003). O conceito de rebarbação produziu muitos estudos que buscaram, basicamente, o desenvolvimento de procedimentos eficientes para aumentar a produtividade sem comprometer a qualidade das bordas rebarbadas.

Porém, mais importante do que os esforços para melhoria das práticas de rebarbação é

a busca da compreensão dos mecanismos de formação das rebarbas, a relação destes com as propriedades do material, com a geometria da ferramenta e com as condições de corte. O conhecimento desses mecanismos pode levar ao controle sobre os parâmetros do processo de fabricação para diminuir as dimensões, reduzir a intensidade das propriedades mecânicas e controlar a localização das rebarbas, o que pode simplificar a operação de rebarbação e permitir a automatização da mesma.

Há diversas investigações sobre os mecanismos de formação de rebarbas embora esse assunto não tenha a dedicação de grande número de pesquisadores em todo o mundo. Os principais grupos encontram-se nos Estados Unidos, no Japão e na Alemanha.

Tem-se preocupado, muito mais, com as técnicas de rebarbação do que com os mecanismos envolvidos no desenvolvimento e formação de rebarbas. A justificativa para a escassez de pesquisas nessa área é a dificuldade de analisar esse fenômeno que, nos processos reais de fabricação, geralmente, é tri-dimensional de grande complexidade, cujo aprofundamento exige o envolvimento de teoria de Resistência dos Materiais, Ciência dos Materiais e Metalurgia, Metrologia, teoria de Usinagem e técnicas experimentais avançadas como a simulação de usinagem em MEV, a filmagem de alta resolução e a simulação pelo Método de Elementos Finitos.

Além da formação da rebarba, muitas vezes definida como uma projeção indesejável de material da peça, há o fenômeno do lascamento de borda (*breakout*), ou desbarrocamento, freqüente na usinagem de material frágil, igualmente indesejável porque causam mudanças da geometria da borda podendo levar ao comprometimento da peça. Ambos os fenômenos têm os mecanismos de formação correlacionados.

A princípio, os pesquisadores visavam a total eliminação da formação de rebarbas, o que logo se mostrou não ser possível como indicaram os primeiros estudos desenvolvidos. Nesses, concluiu-se que o assunto é muito complexo e que a formação de rebarbas é provocada, principalmente, por deformação plástica do material. Devido à complexidade, a maioria dos estudos sobre estes mecanismos utiliza simplificações teóricas do corte ortogonal e poucos foram desenvolvidos sob o tratamento do corte oblíquo, o qual é mais aproximado do fenômeno real.

Os primeiros estudos preocupavam-se com a altura da rebarba e, após a observação das suas propriedades que influenciam na sua remoção, evoluiu-se para considerar a dureza e a espessura de raiz como mais importantes. Desenvolveu-se, basicamente, dois sistemas de classificação das rebarbas - um que considera o mecanismo que leva a sua formação, verificado por Gillespie (1973), e outro que adota o processo de formação destas na peça durante o corte, desenvolvido por Nakayama e Arai (1987).

Em seu estudo, Gillespie (1973) identificou quatro mecanismos básicos na formação de

rebarbas em usinagem: o acúmulo de material deformado plasticamente pela ação da ferramenta - rebarba Poisson (*Poisson burr*); o encurvamento de material quando a ferramenta sai da peça - rebarba de encurvamento (*roll over burr*); o estiramento até a ruptura do material localizado entre a peça e o cavaco - rebarba de estiramento (*tear burr*); e a quebra do material antes do final do corte por falta de fixação adequada - rebarba de interrupção do corte (*cut-off burr*).

A classificação elaborada por Nakayama e Arai (1987) relaciona as rebarbas com a aresta de corte que as desenvolve e, principalmente com a forma, classificando-as como rebarba de entrada (*backward burr* ou *entrance burr*), rebarba lateral (*sideward burr*), rebarba de saída (*forward burr*) e rebarba inclinada na direção de avanço (*leaned burr*).

Esses dois sistemas de classificação de rebarbas em usinagem são conhecidos e utilizados amplamente nos meios acadêmicos, mas apesar da importância que as rebarbas representam para o setor produtivo, os seus conceitos e definições ainda não são universais e diferem de uma atividade para outra. A própria identificação do que é uma rebarba, produzida numa mesma operação de corte, depende da tolerância dimensional adotada para a borda em questão por um determinado usuário de acordo com o padrão adotado, normalizado ou não.

Neste estudo, fez-se uma investigação sobre as rebarbas formadas no torneamento cilíndrico externo de um material dúctil, o aço-carbono ABNT 1045. Constatou-se a ocorrência de dois tipos de rebarba nas bordas da superfície usinada - um tipo, de pequenas dimensões, na borda onde a ferramenta inicia o corte do material, e um outro, de dimensões relacionadas à profundidade de corte usada e rigidamente constituída, na outra borda onde a ferramenta sai da peça ao final do corte. Ambas têm a direção de projeção coincidente com a direção do avanço. Segundo Ko e Dornfeld (1996b), a rebarba de entrada (rebarbas Poisson ou de fluxo lateral), e a rebarba de saída (rebarba de encurvamento ou rebarba inclinada na direção de avanço) são as rebarbas mais comuns e que causam os problemas mais sérios na prática, em usinagem. Na indústria, particularmente na automobilística, o torneamento é uma operação muito utilizada na fabricação de peças e componentes onde a formação de rebarbas é muito prejudicial.

O trabalho tem no Capítulo II a apresentação da Revisão Bibliográfica. É um capítulo dividido em sete tópicos onde se apresenta o desenvolvimento na teoria sobre rebarbas e a formação de rebarbas nas operações de torneamento, fresamento e furação.

O Capítulo III apresenta os procedimentos experimentais e o instrumental utilizado na realização dos experimentos.

No Capítulo IV, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. É dividido em quatro tópicos onde os principais são o primeiro e segundo que apresentam os resultados da altura e espessura das rebarbas de entrada e de saída, respectivamente, e discute o efeito da

variação dos parâmetros de corte sobre estas características geométricas. O terceiro tópico trata da influência da variação da profundidade de corte e do ângulo de posição principal sobre a altura da rebarba de saída, verificado sob a forma de um gráfico bi-dimensional, enquanto que o quarto tópico discute os resultados da micro-dureza medida na raiz da rebarba de saída.

O Capítulo V apresenta as conclusões do trabalho e o Capítulo VI, as sugestões para trabalhos futuros.

A imensa aplicação da usinagem na industrialização dos materiais, especificamente dos metais, proporcionou o desenvolvimento e a aplicação de máquinas-ferramenta e ferramentas de corte cada vez mais eficientes e específicas para cada utilização. Portanto, há um crescente e grande conjunto de elementos em correlação nas teorias e práticas da Usinagem que abrangem desde a ampliação dos limites dos parâmetros de corte, o uso ou não de fluidos de corte, a geometria e os materiais de ferramentas de corte, ao controle da qualidade das superfícies usinadas e otimização da fabricação. Nesse contexto, este trabalho sobre formação de rebarbas é apenas uma pequena contribuição dentro de uma linha de pesquisa muito importante mas que, numericamente, ainda não é tão expressiva em nosso país e em todo o mundo. Principalmente quando se trata de operações de torneamento.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há diversos conceitos utilizados para definir as rebarbas, mas não há uma definição universalmente aceita, principalmente entre os ambientes acadêmicos e industriais.

Muitos pesquisadores definem rebarba de usinagem como uma projeção indesejável de material a partir da borda da peça, causada pela deformação plástica resultante do processo de corte (Ko e Dornfeld, 1989). Nos processos de conformação mecânica e de fundição, elas são definidas como imperfeições de projeto ou de fabricação das matrizes (Yeo *et al.*, 1997).

Do ponto de vista de chão de fábrica, a rebarba de usinagem pode ser relacionada à presença de material na borda usinada que impede ou traz problemas funcionais à montagem subsequente, ou simplesmente é relacionada à presença de material visível a olho nu nesta borda. Cada processo de fabricação utiliza um conceito específico que pode ter como ponto em comum o fato de que as rebarbas geralmente são alterações prejudiciais nas superfícies ou bordas que modificam as dimensões, a forma, ou leva ao comprometimento da peça.

Assim, por exemplo, a rebarba pode ser material que ressolidifica nos cantos ou bordas no processo de EDM, o acúmulo de material nas bordas de componentes galvanizados, as marcas arredondadas de batidas que causam deformação nas bordas de peças, etc.

Verifica-se, então, que o conceito de rebarba num processo de usinagem está relacionado às alterações produzidas pela ferramenta nas superfícies ou bordas de superfícies usinadas (furos, rasgos, perfis, planos) que prejudicam a sua utilização devido à presença de material que se projeta dessas bordas, ou ao lascamento da borda provocado por fratura da mesma o que pode gerar um chanfro indesejável.

Soares Filho (1995), citando a norma DIN 6784, apresenta uma definição para bordas e rebarbas, Figura 2.1. Nessa figura, observa-se que uma tolerância é prevista tanto para rebarba quanto para fratura de borda. A determinação de uma tolerância para rebarbas na fabricação de um componente depende de vários fatores relacionados a sua aplicação, como a aparência, a confiabilidade, a segurança e a funcionalidade, e foi chamada de "rebarba tolerável" por Sofronas, citado por Soares Filho (1995).

2.1 - Introdução ao estudo da formação de rebarbas em usinagem

As rebarbas de usinagem são alterações relacionadas ao mecanismo de corte as quais

se formam na superfície usinada e, principalmente, nas suas bordas, resultando na projeção de material da peça para fora dos planos das superfícies trabalhadas, causando alterações geométricas e dimensionais.

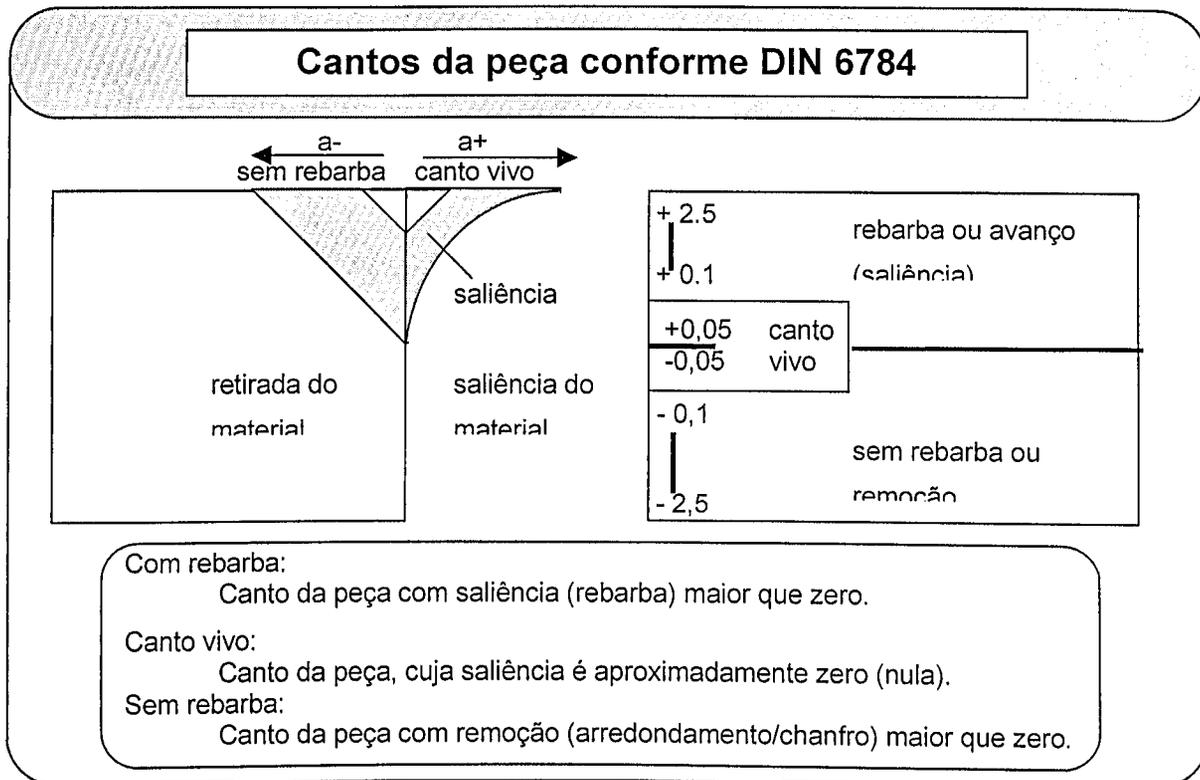


Figura 2.1 - Definição de bordas e rebarbas das peças (Soares Filho, 1995, citando a norma DIN 6784).

As rebarbas ocorrem em qualquer processo de usinagem e geralmente são prejudiciais em todo o sistema de fabricação. A exemplo, durante o corte, a ocorrência de rebarbas pode estar relacionada ao desgaste de entalhe prematuro causado pelo seu choque contra a aresta de corte. O alto grau de encruamento do material na rebarba e o seu perfil afilado podem provocar o surgimento deste tipo de desgaste favorecendo a formação de rebarbas ainda maiores e reduzindo a vida da ferramenta (Nakayama e Arai, 1987).

No processo de fabricação, colocam em risco a integridade física de operários que manuseiam peças com rebarbas devido às formações finas, pontiagudas e resistentes que normalmente as caracterizam.

Outros efeitos negativos que podem ser citados são: as distorções geométricas que causam às bordas das superfícies usinadas as quais impedem ou reduzem o ajuste de montagem entre componentes; a possibilidade de liberação de partículas dentro de componentes em operação causando avarias; e, no planejamento do processo, dificultam ou impedem a automatização do processo de fabricação (Ko e Dornfeld, 1991).

Consequentemente, na maioria dos ambientes de usinagem a ocorrência de rebarbas torna indispensável a utilização de uma operação de rebarbação.

O desenvolvimento tecnológico alcançado nas últimas décadas nas áreas computacional, nos sistemas de manufatura e na tecnologia de ferramentas de corte, proporcionou o desenvolvimento de processos mais produtivos. A tecnologia atual tem recursos disponíveis para melhorar a eficiência através da automatização dos processos de fabricação. Entretanto, um grande empecilho à implementação de sistemas totalmente automatizados é a operação de rebarbação cuja tecnologia não alcançou o desenvolvimento dos outros setores da fabricação. Foram desenvolvidas muitas pesquisas sobre rebarbação na busca de aprimoramento e automatização das operações o que permitiu o aumento significativo da aplicação de processos de rebarbação automatizados mas, em geral, estes ainda são procedimentos manuais.

A rebarbação manual é uma operação muito mais lenta do que outras operações realizadas por máquinas automáticas o que, geralmente, a transforma num ponto de estrangulamento da linha de produção constituindo-se num verdadeiro "gargalo" do processo produtivo. Além disso, coloca os operários em risco de acidentes com ferramentas abrasivas e, às vezes, sob condições de trabalho insalubres; não garante a padronização da borda rebarbada devido às alterações de comportamento e de qualificação do operário; e aumenta os custos de fabricação devido à maior necessidade de hora-homem trabalhada.

Gillespie (1973) estima que eram gastos anualmente 5 bilhões de dólares com rebarbação, no início da década de 70 nos EUA. O mesmo pesquisador, citado em Olvera e Barrow (1996), afirma que em operações de rebarbação e de acabamento de borda de componentes de precisão pode-se consumir em torno de 30% dos custos de fabricação.

Apesar da importância que a formação de rebarbas representa para usinagem dos metais há poucos estudos para compreender os mecanismos que levam a sua formação. Isso poderia conduzir à elaboração de procedimentos para minimizar ou até mesmo para evitar a formação de rebarbas. Essa minimização que pode ser obtida através da seleção adequada das condições de corte, geometria de ferramenta, planejamento do processo, somente é efetivada através dessa compreensão (Gillespie e Blotter, 1976; Ko e Dornfeld, 1991). E as pesquisas realizadas até o momento não conseguiram explicar completamente este complexo fenômeno (Hashimura *et al.*, 1999a). Segundo Gillespie (1973), Nakayama e Arai (1987), Ko e Dornfeld (1991), parece ser impossível eliminar completamente a sua formação.

Qualquer informação que permita a compreensão destes mecanismos é de interesse para a indústria que procura meios para reduzir os custos de fabricação.

A carência de pesquisas sobre os mecanismos de formação de rebarbas está relacionada à complexidade teórica e experimental que envolve este assunto. Num processo

de usinagem estão envolvidos diversos parâmetros como as condições de corte, a geometria e o estado de afiação da ferramenta, a operação de usinagem e a máquina ferramenta, as propriedades do material usinado, teoria da plasticidade, mecanismo de fratura e metalurgia (Nakayama e Arai, 1987; Soares Filho, 1995). A simples análise das propriedades e características das rebarbas ou a observação do comportamento do material usinado durante a sua formação exigem procedimentos e técnicas experimentais mais elaboradas. As pesquisas mais sofisticadas utilizam sistemas de usinagem modificados para operação dentro de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), método de elementos finitos (FEM) para simulações teóricas, sistemas de filmagem de alta velocidade, técnicas de metalografia e micrografia, etc.

Para simplificar as análises dos complexos mecanismos de formação de rebarbas, a maioria das investigações utiliza o corte ortogonal devido a sua simplicidade geométrica para reduzir o número de variáveis envolvidas (Hashimura *et al.*, 1995). E as pesquisas sobre o mecanismo de formação de rebarba no corte oblíquo fazem simplificações para utilizar a análise do corte ortogonal (Ko e Dornfeld, 1996b).

2.1.1 - Formação de rebarbas no corte ortogonal

Uma das pesquisas mais importantes sobre mecanismos de formação de rebarbas em usinagem é a Dissertação de Mestrado de La. K. Gillespie (1973), que levou a uma publicação subsequente - Gillespie e Blotter (1976).

Gillespie (1973) pesquisou a formação de rebarbas em usinagem com o objetivo de identificar os mecanismos envolvidos nessa formação, de classificar as rebarbas produzidas e de elaborar métodos para prever as suas propriedades.

Especificamente, procurou determinar como as rebarbas são geradas nos processos de torneamento, fresamento, furação e retificação; investigou a influência dos parâmetros de corte tais como avanço f , profundidade de corte a_p , geometria da ferramenta e desgaste da ferramenta nas propriedades das rebarbas através de ensaios com aço inoxidável AISI 303 Se; e procurou desenvolver técnicas para prever as propriedades das rebarbas tais como espessura, altura e dureza. Na elaboração das equações analíticas, utilizou-se de conceitos elementares de plasticidade considerando o desenvolvimento no corte ortogonal e verificou que as rebarbas de usinagem são formadas segundo quatro mecanismos básicos:

a) Rebarba Poisson (*Poisson burr*): resulta da tendência de abaulamento lateral dos materiais com comportamento dúctil em torno de um ponto ou área de compressão. Neste caso, o material é comprimido até atingir a deformação plástica permanente. Essa

denominação é relacionada ao coeficiente de Poisson (ν) que explica a deformação lateral dos materiais quando os mesmos são comprimidos.

b) Rebarba de encurvamento (*roll over burr*): é a rebarba formada ao final do corte quando a ferramenta sai da peça. Nesta etapa da usinagem o cavaco não sofre cisalhamento e é empurrado na direção de saída da ferramenta sofrendo o encurvamento ou o enrolamento sobre si, o que gera a rebarba.

c) Rebarba de estiramento (*tear burr*): é a rebarba formada no corte onde a ação da ferramenta que produz um efeito cunha entre a superfície em usinagem e o cavaco. À medida que o corte prossegue, o material da peça que a interliga ao cavaco ao longo da aresta secundária de corte é tracionado até atingir a ruptura, deixando projeções estiradas do material nas superfícies.

d) Rebarba de interrupção de corte (*cut-off burr*): é a rebarba resultante no corte de seccionamento de um material quando a parte seccionada não é fixada adequadamente até a completa finalização da operação. A parte seccionada (peça) cai por gravidade antes que o corte tenha sido completado. Essas rebarbas são comuns nas operações de serramento e de sangramento radial. A Figura 2.2 ilustra um esquema para os três primeiros tipos de rebarba.

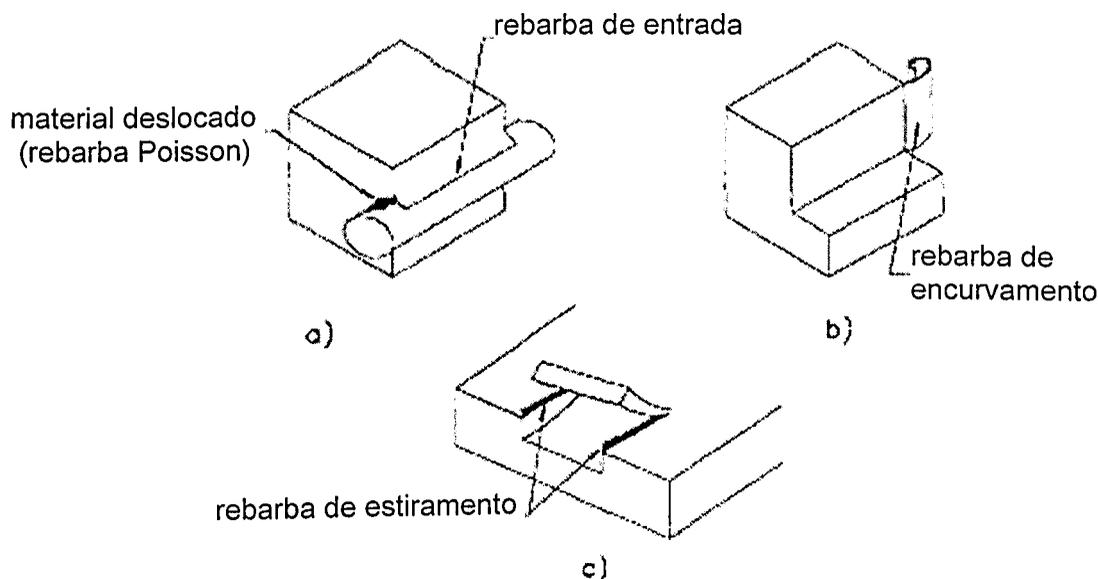


Figura 2.2 - Representação esquemática das rebarbas: (a) rebarba Poisson, (b) rebarba de encurvamento, (c) rebarba de estiramento (Gillespie, 1973).

Apesar de prevalecer um destes quatro tipos de rebarbas identificados, é possível que hajam outros formados da combinação entre estes mecanismos. Estes tipos de rebarbas serão discutidos com mais detalhes posteriormente.

A expressão *rebarba enrolada* foi usada para traduzir a denominação *roll over burr* em outros trabalhos (Soares Filho, 1995; Kaminise *et al.*, 2001). No entanto, é uma expressão que não reflete genericamente a natureza do seu mecanismo de formação que, para os diversos processos de usinagem, a tradução mais apropriada parece ser *rebarba de encurvamento*.

Da mesma maneira, *tear burr* é uma rebarba formada pela ruptura de material sob tração e a expressão adotada aqui é *rebarba de estiramento* ao invés de *rebarba de ruptura* (Kaminise *et al.*, 2001) e *rebarba repuxada* (Soares Filho, 1995).

Outro trabalho importante sobre a formação de rebarbas que também utiliza corte ortogonal foi desenvolvido por Nakayama e Arai (1987). Nesse trabalho, houve a preocupação em elaborar uma classificação para as rebarbas de usinagem relacionando-as à aresta de corte envolvida na sua formação e no modo e direção em que se formam. A Figura 2.3 mostra ilustrações destes tipos de rebarbas.

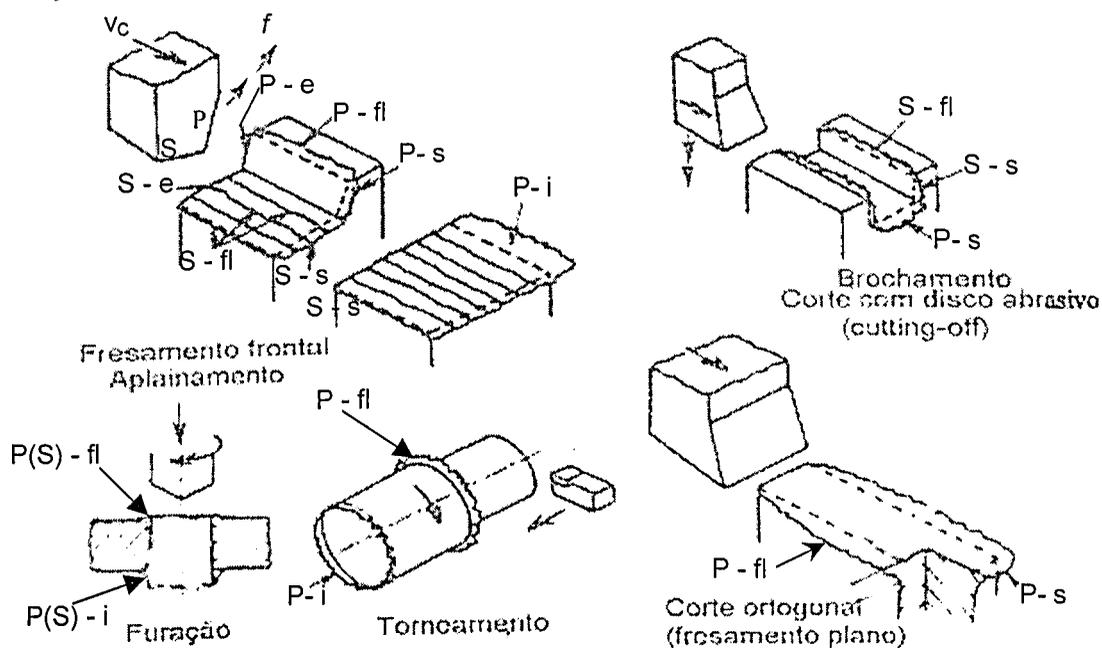


Figura 2.3 – Representação da classificação proposta por Nakayama e Arai (1987) para rebarbas de usinagem; P – aresta principal de corte; S – aresta secundária de corte; e – rebarba de entrada (de fluxo para trás); rebarba (de fluxo) lateral; s – rebarba (de fluxo à frente) de saída; i – rebarba inclinada (na direção do avanço).

Assim, com relação à aresta de corte as rebarbas foram identificadas como *rebarba de aresta principal de corte* e como *rebarba de canto* (ou *de aresta secundária de corte*). Segundo o modo e direção em que se formam, classificaram-nas como *rebarba de entrada* (*backward burr* ou *entrance burr*), como *rebarba lateral* (*sideward burr*), como *rebarba de saída* (*forward burr*) e como *rebarba inclinada* na direção de avanço (*leaned burr*). Esses tipos de rebarba também serão estudados com mais detalhes posteriormente.

Os trabalhos de Gillespie (1973), de Gillespie e Blotter (1976) e de Nakayama e Arai (1987), são trabalhos muito referenciados em estudos sobre o mecanismo de formação e critérios de classificação de rebarbas formadas em usinagem. Se já existiam pesquisas sobre o assunto desde a década de 50 como citado em Gillespie (1973) e Soares Filho (1995), os trabalhos acima propiciaram a compilação das informações nesta área e transformaram-se em referência mundial para estudiosos em rebarbas.

As pesquisas sobre formação de rebarbas estiveram voltadas, inicialmente, para a formação de rebarbas na usinagem de materiais com comportamento dúctil. Provavelmente, isto tenha sido causado pela própria conceituação de rebarba que a relaciona à projeção de material da peça provocada por deformação plástica do material. Há sugestões de que o tamanho da rebarba possa ser reduzido se houver substituição de um material dúctil por outro com comportamento mais frágil (Nakayama e Arai, 1987). Disto pode-se inferir que materiais totalmente frágeis não produzem rebarbas, o que é relativamente compreensível do ponto de vista do conceito de que rebarba é uma alteração que se projeta da borda ou superfície da peça resultante da ductilidade do material. No entanto, pode levar à falsa conclusão de que as rebarbas são características da usinagem de materiais dúcteis e não ocorrem naqueles frágeis o que é um equívoco, pois há formação de rebarbas positivas (de projeções) na usinagem de ferro fundido (Souza Jr, 2001; da Silva, 2004). Como será visto posteriormente, a formação de rebarbas engloba também a fratura de borda que é própria de materiais frágeis ou da fragilização dos mesmos (Souza Jr, 2001; Ko e Dornfeld, 1989).

A evolução dos estudos sobre os mecanismos de formação de rebarbas levou ao avanço na análise da formação de um dos mecanismos mais importantes para os processos de usinagem: a formação da rebarba de saída e da rebarba inclinada na direção do avanço, cujos mecanismos de formação são idênticos aos da rebarba de encurvamento.

Ko e Dornfeld (1991), investigaram o mecanismo de formação da rebarba de encurvamento no corte ortogonal de materiais dúcteis. Verificaram que há um ponto de transição no corte onde o regime de formação de cavaco sofre a transformação para a formação de rebarba, quando a ferramenta se aproxima da borda de saída no final do corte (Ko e Dornfeld, 1989, citam o artigo homônimo apresentado em 1988 - Ko, S., Dornfeld, D. A., "A Study on Burr Formation Mechanism", *Symposium on Robotics*, K. Youcef-Toumi & H. Kazerooni, eds., ASME, New York, 1988, pp 271-282).

Os autores observaram que o mecanismo de formação desta rebarba é composto por três etapas: a iniciação da formação da rebarba, o desenvolvimento da rebarba e a formação da rebarba. Foi elaborado um modelo teórico quantitativo para prever as características das rebarbas cujas previsões foram comparadas com resultados de ensaios de micro-usinagem de material puramente dúctil (massa de modelar) dentro de um MEV para verificar a confiabilidade

das previsões teóricas.

Em outro trabalho, Ko e Dornfeld (1989) propuseram um modelo qualitativo para o mecanismo de formação de rebarba no corte ortogonal para qualquer tipo de material, dúctil ou frágil. Foi verificado que dependendo das propriedades do material e das deformações impostas pelas condições de corte há a formação de rebarba ou a fratura no pé da rebarba, como situações extremas, ou a formação de rebarba com fratura ao longo da rebarba em situações intermediárias.

A compreensão da influência dos parâmetros de corte, da geometria da ferramenta, das propriedades do material usinado e das características geométricas da peça permite o controle sobre a fratura de borda quando da usinagem de materiais ou superfícies com tendência à fragilidade, assim como sobre a minimização das dimensões e alterações nas propriedades do material na rebarba quando esta é formada.

2.1.2 - Formação de rebarba no corte oblíquo

Hashimura *et al.* (1995) fizeram uma investigação sobre a formação de rebarba no corte oblíquo onde procuraram analisar a influência da variação do ângulo de inclinação da ferramenta λ_s nas suas dimensões. Utilizando-se do corte oblíquo e ortogonal na micro-usinagem de material dúctil (Al 2024-O) num MEV, observaram a formação de *rebarba de saída*, de *rebarba lateral* e de *fratura de borda*. Além disso, realizaram a previsão das dimensões das rebarbas através de aplicação de método de elementos finitos (FEM) para comparar com os resultados experimentais.

Ko e Dornfeld (1996b) desenvolveram um modelo quantitativo para previsão dos fenômenos de formação de rebarbas e fratura de borda para o corte oblíquo, a partir de um modelo analítico elaborado para o corte ortogonal (Ko e Dornfeld, 1989). No trabalho, é analisada a formação de *rebarba de saída* (ou *rebarba de encurvamento*). Citando um trabalho de C. Rubenstein sobre a formação de cavaco no corte oblíquo, aqueles autores estudaram a formação de rebarba no corte oblíquo analisando-a como uma composição de parcelas de formação de rebarba de corte ortogonal, que se desenvolvem na direção de corte perpendicular à aresta de corte, já que as *rebarbas de encurvamento* se formam nesta direção. É uma investigação que tem maior enfoque e conseqüente contribuição ao estudo de fratura de borda. Além de confirmar os resultados obtidos por Hashimura *et al.* (1995) que previam a redução nas dimensões das rebarbas formadas com o aumento do ângulo de inclinação λ_s , apresentaram procedimentos para prever a posição da fratura de borda através de condições de corte e propriedades do material. O modelo desenvolvido é restrito a materiais ou condições

de corte que não levam a grande distorção do cavaco.

Os trabalhos realizados até o presente indicam que a formação de rebarbas em usinagem não pode ser eliminada, entretanto, mostram que os parâmetros e condições de corte, a geometria da ferramenta e as propriedades do material influenciam diretamente nas dimensões das rebarbas e podem ser utilizados para minimizá-las.

O conhecimento do mecanismo de formação que leve a minimização, à formação direcionada e controlada em posição específica da peça, à prevenção de fratura de borda (*break-out*) e ao controle das características (altura, espessura, dureza) deverá ser atingido através da continuação das pesquisas e auxiliarão no desenvolvimento de processos automatizados de rebarbação para o aumento de produtividade e redução de custos de fabricação.

2.2 - Mecanismo de formação de rebarbas segundo Gillespie

Neste item serão discutidos os quatro mecanismos básicos de formação de rebarbas propostos por Gillespie (1973): rebarba Poisson, rebarba de encurvamento, rebarba de estiramento e rebarba de interrupção de corte.

2.2.1 - Mecanismo de formação da rebarba Poisson

Na análise do mecanismo de formação da rebarba Poisson, dois importantes fatores devem ser observados:

a) A aresta de corte de uma ferramenta não é perfeitamente afiada, mas possui um pequeno raio de arredondamento. Se houver a formação de aresta postiça de corte (APC), o raio de arredondamento da aresta de corte r_p torna-se efetivamente maior, Figura 2.4.

b) Existe elevada pressão entre a superfície usinada e a superfície de folga da ferramenta, principalmente na usinagem de materiais que apresentam baixa condutividade térmica, elevado coeficiente de expansão térmica e baixo módulo de elasticidade, como o aço inoxidável. O efeito desta na interface cavaco/ferramenta é ilustrado na Figura 2.5.

Feitas estas observações, pode-se analisar a ação da aresta de corte sobre a peça considerando-a análoga a um cilindro indeformável fino e longo que é forçado contra a peça, como ilustrado na Figura 2.6. A contínua penetração deste cilindro produz um deslocamento lateral de material, ou um abaulamento, em todas as superfícies em contato com o mesmo, formando a rebarba.

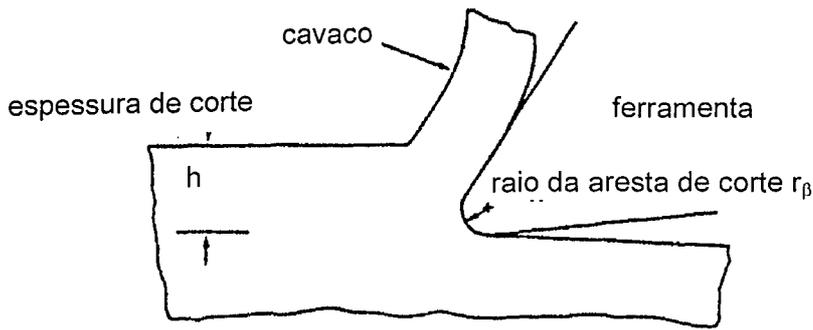


Figura 2.4 - Representação da formação de cavaco por ferramenta com aresta de corte apresentando raio de arredondamento (Gillespie, 1973).

Numa operação de usinagem, esta formação de rebarba acontece quando a espessura de corte (ou taxa de avanço no torneamento) é suficientemente grande para impedir que o material a frente da aresta de corte se desloque radialmente na direção do cavaco. O material é deslocado (por escoamento) na direção axial da aresta de corte formando a rebarba na superfície da peça em contato com esta aresta, como apresentado na Figura 2.6 pelo ponto 1. A quantidade de material deslocado é função do raio efetivo da aresta de corte, da pressão exercida pela aresta de corte e das propriedades do material (Gillespie, 1973).

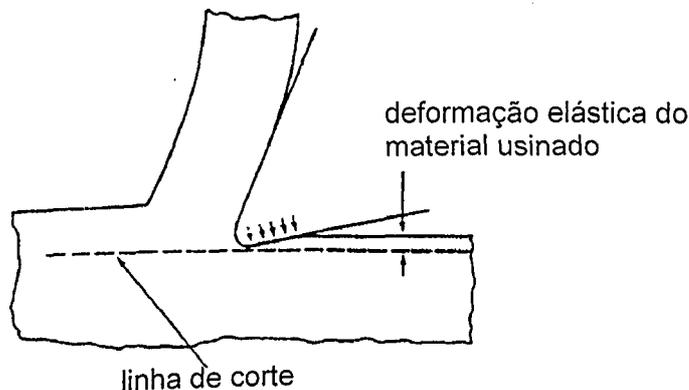


Figura 2.5 - Ilustração da pressão na superfície de folga da ferramenta (Gillespie, 1973).

Em materiais que sofrem encruamento devido às altas pressões entre a superfície de folga e a peça (Figura 2.5), o material localizado atrás da área de contato peça/ferramenta torna-se mais resistente do que o material na área de contato, a frente da ferramenta. Nestas condições, a penetração da ferramenta provoca um deslocamento de material na direção determinada pela aresta de corte, uma extrusão de material ao longo do seu eixo axial formando novamente a rebarba na borda da peça como mostrado pelo ponto 1 na Figura 2.6. O fluxo de material ocorre em frente à ferramenta. Este modo de formação também é

influenciado pela deformação plástica da ponta da ferramenta e pelo desgaste de flanco que aumentam a área de contato da aresta de corte.

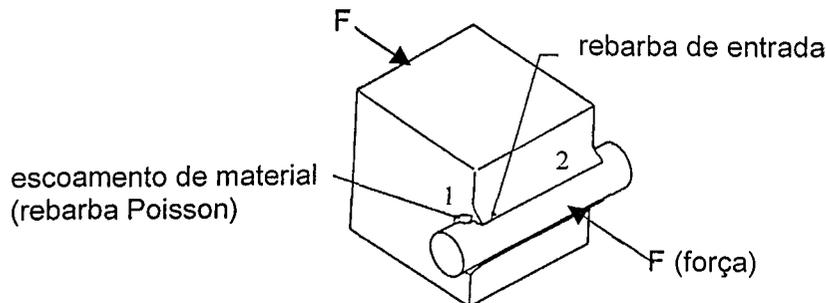


Figura 2.6 - Ilustração da formação de rebarba Poisson provocada pela ação do raio de arredondamento da aresta de corte r_p (Gillespie, 1973).

A *rebarba Poisson* também pode ser formada na superfície de entrada da ferramenta na peça, na direção oposta ao seu movimento (região 2 na Figura 2.6), sendo denominada de *rebarba de entrada*. O mecanismo de formação deste tipo de *rebarba Poisson* parece assemelhar-se ao abaulamento do material por indentação em ensaios de dureza com indentadores esféricos. As dimensões desta rebarba estão relacionadas às propriedades do material ou ao seu grau de encruamento.

Portanto, o mecanismo de formação de *rebarba Poisson* é provocado pelo deslocamento de material deformado plasticamente o que está relacionado à espessura de corte h , ao raio efetivo da aresta de corte r_p (à formação de APC) e às propriedades do material.

2.2.2 - Mecanismo de formação da rebarba de encurvamento (*roll over burr*)

A rebarba de encurvamento é formada na usinagem de materiais dúcteis quando a ferramenta alcança o final do corte, na borda formada pela interseção da superfície usinada com a superfície de saída da ferramenta do corte. Numa definição simplificada, trata-se do encurvamento do cavaco pela ferramenta na direção de corte sem a sua remoção da peça (Figura 2.7). É uma das rebarbas mais visíveis qualquer que seja a operação de corte onde há a sua ocorrência, porque é formada sempre que a força principal de corte passa sobre uma superfície livre (Gillespie, 1973).

Na operação de fresamento de topo, Figura 2.8a, o seu comprimento (ou altura) é aproximadamente igual à penetração de trabalho a_e e a sua largura é correspondente à

profundidade de corte a_p . No torneamento cilíndrico externo, a sua altura também é proporcional a profundidade de corte a_p (Figura 2.8b).

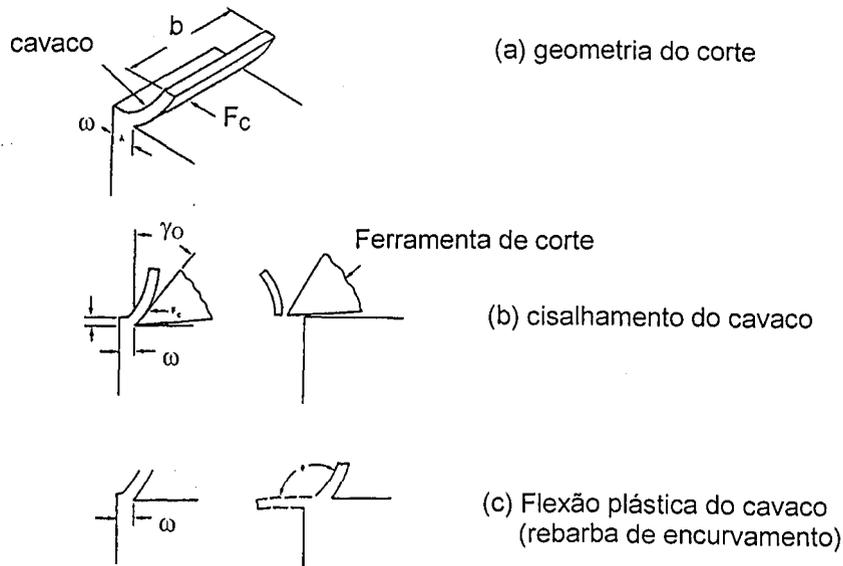


Figura 2.7 - Ilustração da formação de rebarba de encurvamento (rollover burr) - Gillespie, 1973

O mecanismo de formação da rebarba de encurvamento é próprio dos materiais dúcteis, ao final do corte. No entanto, quando estes materiais apresentam características frágeis ou quando sofrem alterações nas suas propriedades devido ao encruamento, podem apresentar tendência à fratura antes que a formação da rebarba seja completada. Nesta situação, o material não sofre o encurvamento total para formar a rebarba e pode ocorrer uma fratura ao longo do seu perfil que reduz o seu comprimento, ou ocorrer um outro tipo de fratura que produz um chanfro na borda, denominado de lascamento de borda ou "breakout" (Ko e Dornfeld, 1989) ou desbarrocamento, como no caso do ferro fundido cinzento. Santos (2002) relata sobre este tipo de fratura na usinagem de ferro fundido cinzento, denominada desbarrocamento.

A rebarba de encurvamento é o tipo de rebarba citada por Pekelharing (1978) no seu trabalho sobre a falha prematura de ferramentas de metal duro devido à formação do pé do cavaco (*foot formation*) no corte ortogonal interrompido de aços.

2.2.3 - Mecanismo de formação da rebarba de estiramento (*tear burr*)

A rebarba de estiramento é formada em operações de usinagem onde a ferramenta de corte é mais estreita do que a largura da peça trabalhada. Por exemplo, no fresamento

cilíndrico tangencial com fresa estreita em relação à peça e o início da operação de sangramento radial no torneamento (Figura 2.9).

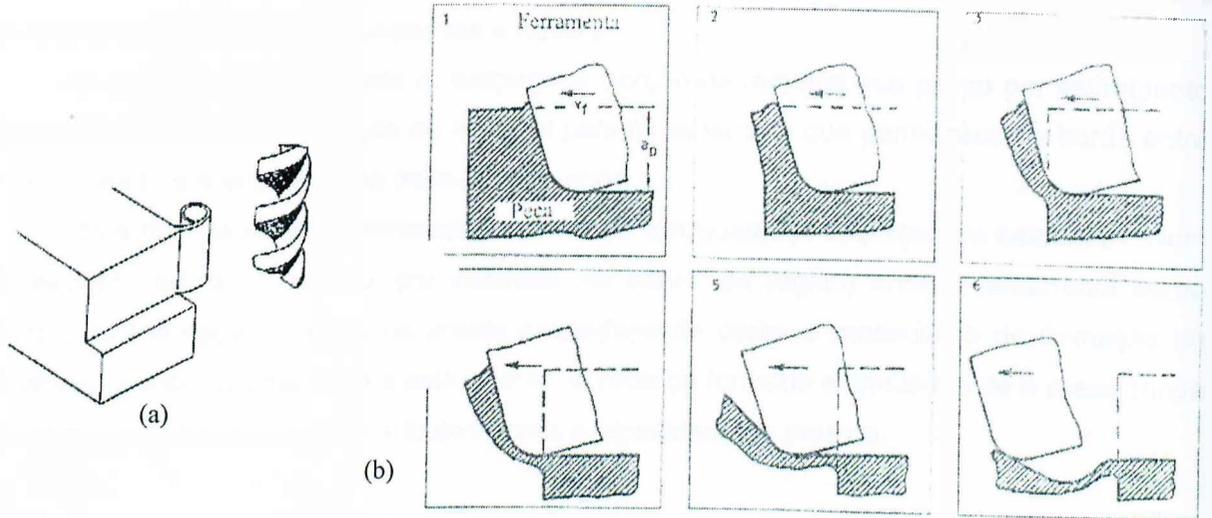


Figura 2.8 - Ilustração da formação da rebarba de encurvamento: (a) no fresamento de topo (Gillespie, 1973) e (b) no torneamento (R. Link citado por Soares Filho, 1995).

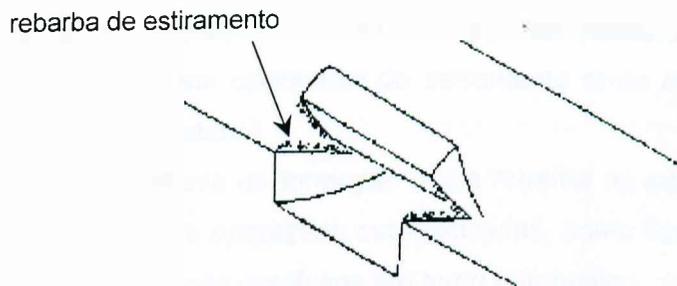


Figura 2.9 - Ilustração da separação inicial de cavaco, formando rebarba de estiramento (Gillespie, 1973).

O mecanismo de formação deste tipo de rebarba está relacionado ao estiramento do material que conecta o cavaco à superfície da peça, nos planos ou superfícies que interceptam a peça e contêm as arestas secundárias de corte (plano de corte secundário da ferramenta P_s').

A partir da entrada da ferramenta, no início do corte, há a formação de uma cavidade pela ação da cunha cortante através da remoção do cavaco. Entretanto, o material entre o cavaco e a superfície da peça contido no P_s' , não passa por um processo de cisalhamento como ocorre na formação de cavaco. A continuidade da ação da ferramenta movimenta o

cavaco que está sobre a superfície de saída afastando-o da superfície da peça, o que provoca o estiramento progressivo do material do P_s' que conecta cavaco à peça até ocorrer a sua ruptura. Esse estiramento é semelhante ao ensaio mecânico de tração em materiais dúcteis onde o corpo de prova é tracionado até a ruptura.

A rebarba de estiramento é, portanto, a porção de material que passa por estiramento até a ruptura durante a remoção do material pela ferramenta e que permanece na borda entre o perfil gerado e a superfície da peça, após o corte.

Este tipo de rebarba provavelmente ocorre em qualquer operação de usinagem. Num torneamento cilíndrico externo, por exemplo, no ponto (ou região) onde a ferramenta perde contato com a peça ao longo da aresta secundária de corte, o mecanismo de formação do cavaco passa de cisalhamento a estiramento. A rebarba formada eventualmente é pressionada contra a superfície da peça, contribuindo para a rugosidade da mesma.

2.2.4 - Mecanismo de formação da rebarba de interrupção de corte (*cut-off burr*)

É a rebarba formada ao final de operação de corte de seccionamento devido à fixação insuficiente, que leva à queda ou ao deslocamento imprevisto das partes a serem separadas, provocando ruptura ou fratura do material restante entre aquelas partes antes que a ferramenta complete a operação. É comum em operações de serramento onde ela pode ser eliminada através de fixação adequada do material.

No torneamento, há tendência de formação desta rebarba no sangramento radial para cortar componentes fabricados em operações automatizadas, como ilustrado na Figura 2.10. Um exemplo é a fabricação seriada de parafusos em torno automático.

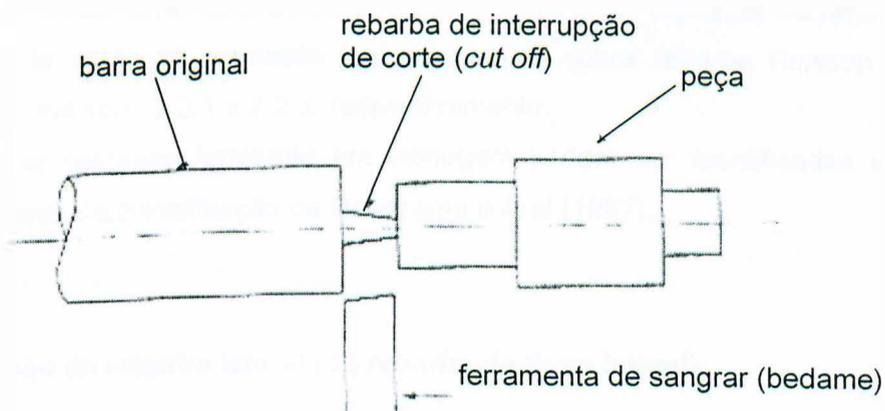


Figura 2.10 - Ilustração da formação de rebarba de interrupção de corte no sangramento radial para seccionamento da peça acabada (Gillespie, 1973).

2.3 - Mecanismo de formação das rebarbas segundo Nakayama e Arai.

As rebarbas de usinagem foram classificadas de acordo com o modo de formação e a direção em que se formam durante a operação. É o método de classificação elaborado por Nakayama e Arai (1987) através de observação do corte ortogonal de material dúctil (latão recozido).

Quanto ao modo de formação, basicamente as rebarbas se formam devido ao escoamento de material da peça para trás em relação ao movimento da ferramenta, e à combinação de escoamento e flexão plástica do material da peça para os lados e para frente em relação a este movimento. A introdução do conceito da direção de formação das rebarbas complementa essa análise.

As rebarbas são formadas na direção do deslocamento do material pela ação da ferramenta no corte, podendo se formar na direção contrária, na direção lateral e na direção do seu movimento. Dessa forma, as rebarbas são classificadas em:

- rebarba de fluxo para trás ou *rebarba de entrada*,
- rebarba fluxo lateral ou simplesmente *rebarba lateral*,
- rebarba de fluxo à frente ou *rebarba de saída*, e
- rebarba inclinada na direção do avanço ou *rebarba inclinada*.

A Figura 2.3 ilustra a localização das rebarbas classificadas por esse método, formadas em alguns processos de usinagem.

Comparados à classificação quanto aos mecanismos de formação de Gillespie (1973) apresentados no item 2.2, a *rebarba de entrada* e a *rebarba lateral* correspondem à rebarba Poisson, e as rebarbas *de saída* e *rebarba inclinada* são rebarbas de encurvamento.

As rebarbas de entrada e de saída têm as denominações relacionadas à localização na entrada e na saída da ferramenta da peça, respectivamente. A formação da rebarba de entrada e da rebarba de saída foi analisada nas discussões sobre rebarba Poisson e rebarba de encurvamento, nos itens 2.2.1 e 2.2.2, respectivamente.

Todas as rebarbas formadas em usinagem podem ser identificadas e classificadas segundo o método de classificação de Nakayama e Arai (1987).

2.3.1 - Formação da rebarba lateral (ou rebarba de fluxo lateral)

A formação da rebarba lateral pode ser determinada pela profundidade de corte a_p e pela intensidade de deformação cisalhante γ_s produzida na geração do cavaco, como foi verificado experimentalmente por Nakayama e Arai (1987). Segundo estes autores, a

deformação cisalhante é influenciada pela geometria da ferramenta, pelas condições de corte, pela velocidade de corte, pelo uso de fluido de corte e pelo grau de encruamento do material.

Para uma pequena deformação cisalhante ($\gamma_s < 3$), aqueles autores verificaram que praticamente não há formação de rebarba lateral, enquanto que para grande deformação a dimensão destas rebarbas não sofre alteração significativa com o aumento de γ_s . Numa faixa intermediária de deformação cisalhante (γ_s entre 3 e 6) há o crescimento da rebarba lateral com o aumento de γ_s . Na Figura 2.11 ilustra-se o efeito de γ_s na formação deste tipo de rebarba.

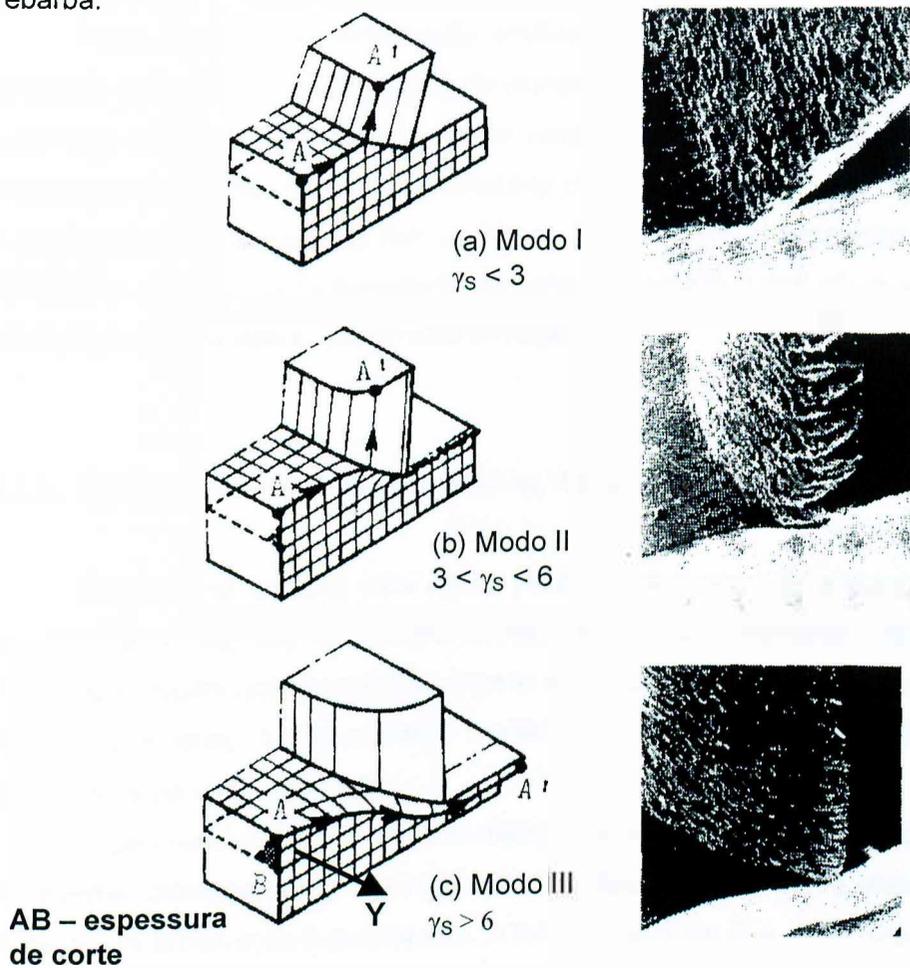


Figura 2.11 - Representação da formação de rebarba lateral baseado nas imagens obtidas em MEV à esquerda (Nakayama e Arai, 1987).

Os autores verificaram que quando a deformação cisalhante é pequena, o corte se desenvolve sem deformação significativa na região do plano de cisalhamento primário, como representado na Figura 2.11a. Isso significa que o mecanismo de corte sob estas condições não provoca o escoamento de material à frente da aresta de corte (mecanismo de formação de rebarba Poisson) para formar uma rebarba lateral com dimensões significativas. Na Figura

2.11a, isso é bem ilustrado pela trajetória do ponto A para A' que não se desvia do plano que contém estes pontos, indicando que não há deformação desse plano.

À medida que a deformação cisalhante é aumentada (γ_s entre 3 e 6), ocorre a deformação do plano que contém A A' na região do plano de cisalhamento primário formando a rebarba lateral. Na Figura 2.11b, essa deformação é representada pela distorção na trajetória A-A' na direção indicada Y. Observa-se na trajetória A-A' que o ponto A, inicialmente no material da peça, é removido com o cavaco (ponto A') e a rebarba lateral é o abaulamento na superfície lateral.

Para uma grande deformação cisalhante ($\gamma_s > 6$), a zona de cisalhamento primária é ampliada aumentando a espessura de material à frente da aresta de corte que escoar para a superfície lateral. É a direção de menor resistência ao escoamento. A espessura de material afetado pela zona de cisalhamento primária pode ultrapassar a profundidade de corte a_p , como é representado pela trajetória A-A' na Figura 2.11c. Assim, a superfície lateral da peça entre os pontos A e B, que é a profundidade de corte, determina a sua altura e passa a formar a face inferior da rebarba lateral nesta representação.

2.3.2 - Formação da rebarba inclinada na direção de avanço (ou rebarba inclinada)

É a rebarba formada pela flexão plástica, na direção de avanço, da porção de material que deveria ser retirada nos passes subsequentes da ferramenta, como ilustra a Figura 2.12. A formação deste tipo de rebarba ocorre ao final da usinagem no torneamento longitudinal, interno ou externo, no fresamento frontal, na saída da broca na furação passante, e no plainamento de uma superfície.

A geometria da ponta da ferramenta tem influência decisiva sobre a dimensão da raiz da rebarba, indicada por t_R na Figura 2.12, influenciando na sua resistência à remoção num processo de rebarbação subsequente. A força de avanço F_f e a tenacidade do material da peça são os fatores que determinam a espessura t deste tipo de rebarba, e a sua altura é proporcional à profundidade de corte a_p (Nakayama e Arai, 1987; Kaminise *et al.*, 2001).

2.4 - Estudo do mecanismo de formação de rebarba de encurvamento no corte ortogonal

Ko e Dornfeld (1991), desenvolveram um estudo sobre a formação de rebarba de encurvamento na usinagem ortogonal de materiais dúcteis onde analisaram a sua formação e desenvolveram modelos para prever suas características. Na elaboração destes modelos,

consideraram que não ocorre fratura durante a formação de rebarba e que as deformações existentes no mecanismo são compostas de deformações cisalhantes e de flexão. Essa é uma consideração mais realística do que a abordagem que Gillespie (1973) fez na elaboração do seu modelo de previsão deste tipo de rebarba onde considerou que a sua formação é provocada por deformação de flexão na direção da força principal de corte F_c .

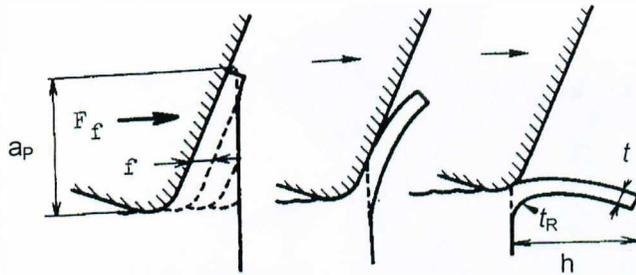


Figura 2.12 - Representação da formação da rebarba inclinada na direção de avanço no torneamento (a_p - profundidade de corte; F_f - força de avanço; f - avanço; h - altura, t - espessura, t_R - espessura da raiz da rebarba), (Nakayama e Arai, 1987).

Na investigação de Ko e Dornfeld (1991), a formação de rebarbas de encurvamento foi observada durante a simulação de usinagem ortogonal de corpos de prova preparados com um tipo de massa de modelar (plasticina comercial), com ferramentas de madeira e em baixas velocidades de corte. Para visualizar as deformações durante a usinagem, uma malha com pequeno espaçamento foi desenhada na lateral dos corpos de prova, como é ilustrado na Figura 2.13, e fez-se a filmagem de alta velocidade dos ensaios. As observações e análises foram feitas posteriormente sobre as imagens gravadas.

A comprovação das previsões dos modelos foi feita através de ensaios com cobre puro e ligas de alumínio em microusinagem ortogonal sem a ocorrência de fratura, dentro de um MEV.

A observação da usinagem ortogonal de massa de modelar permitiu verificar que a rebarba de encurvamento é formada em três etapas denominadas de *iniciação da formação rebarba*, *desenvolvimento da rebarba* e *formação da rebarba*.

- Iniciação da formação da rebarba

Nos processos de usinagem, quando a ferramenta se aproxima da borda da peça ao final do corte, há uma posição na sua trajetória em que ocorre a transição entre o regime de formação de cavaco para a formação de rebarba. Nessa posição, foi considerado inicialmente que a formação de cavaco é interrompida e inicia-se a formação de rebarba. Na realidade,

pode haver o prosseguimento da formação de cavaco enquanto desenvolve-se a formação de rebarba e isso depende das propriedades do material relacionadas à maior ou menor ductilidade.

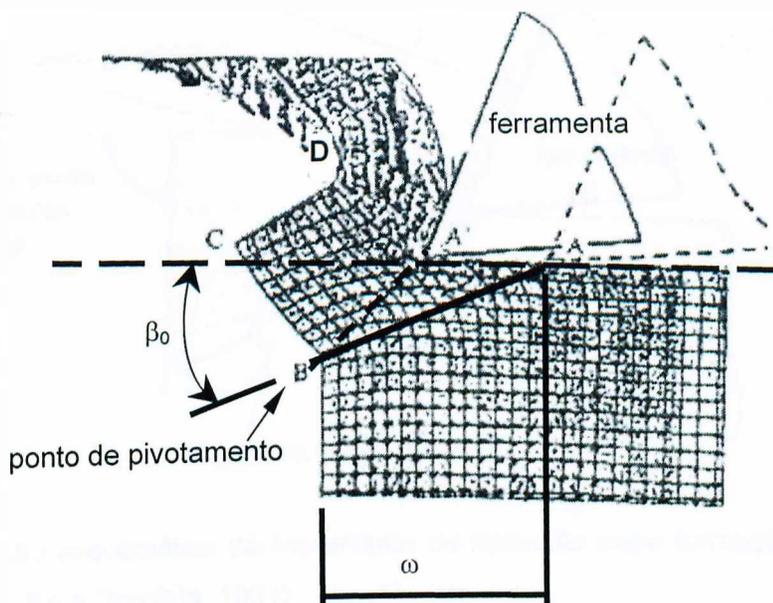


Figura 2.13 - Ilustração da formação de rebarba na usinagem de massa de modelar (Ko e Dornfeld, 1991).

Na posição de transição, surge uma zona de cisalhamento negativa à frente da aresta de corte e abaixo do plano de corte, ilustrada na Figura 2.14 (a terminologia apresentada foi sugerida por Iwata em estudo sobre formação de rebarba na usinagem de alumínio num MEV, citado por Ko e Dornfeld - 1991). Esta zona de cisalhamento negativa se estende da aresta de corte à superfície da peça que intercepta o plano de corte, que é a superfície de saída da ferramenta da peça, segundo o ângulo de cisalhamento negativo inicial β_0 .

Conforme observado por Pekelharing (1978), a ocorrência da zona de cisalhamento negativa depende do ângulo de borda da peça ψ (Figuras 2.14 e 2.18), que é o ângulo entre a superfície usinada e a superfície onde a ferramenta sai da peça, o qual influencia na formação de rebarbas. Para valores deste ângulo maiores do que 150° não há manifestação da zona de cisalhamento negativa e, segundo Soares Filho (1995), não há formação de rebarbas.

O ângulo β_0 é o ângulo entre a direção de corte, A - A' e o plano que contém a direção definida por A - B, chamado de plano de cisalhamento negativo (P.C.N.), na Figura 2.13. Nesta figura, A é a aresta de corte e B é denominado *ponto de pivotamento* ou de rotação do P.C.N.

Portanto, a iniciação da formação da rebarba é caracterizada pelo ângulo de cisalhamento negativo inicial β_0 e pela posição inicial da ferramenta em relação à borda da peça ω , que é a distância de A à borda da peça na Figura 2.13.

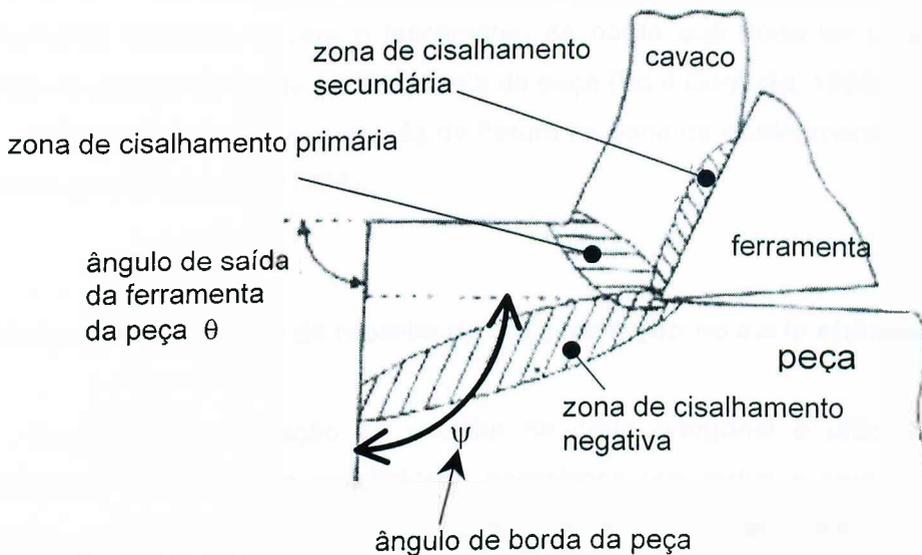


Figura 2.14 - Ilustração esquemática do mecanismo de transição entre formação de cavaco e formação de rebarba (Ko e Dornfeld, 1991).

- Desenvolvimento da formação da rebarba

Após a iniciação da formação da rebarba, o avanço da ferramenta provoca a rotação do plano de cisalhamento negativo em torno do ponto B que passa a atuar como um ponto de rotação deste plano e permanece imóvel durante o desenvolvimento da formação da rebarba. Numa posição intermediária do desenvolvimento da rebarba, o plano A-B gira para A'-B na Figura 2.13.

A porção de material à frente da ferramenta, porção A'BCD na Figura 2.13, não sofre mais distorção após a iniciação da formação da rebarba indicando que a mesma gira rigidamente em torno de B.

As deformações no plano de cisalhamento negativo aumentam com o avanço da ferramenta e a região em torno da aresta de corte é a região que apresenta as maiores deformações.

- Formação da rebarba

Com a aproximação da ferramenta do final do corte na borda da peça, aumenta a rotação do P.C.N. em torno de B e a distância da aresta de corte A ao ponto de rotação B, A' B na Figura 2.13, é progressivamente reduzida aumentando as deformações nesse plano. Finalmente a ferramenta sai da peça formando a rebarba.

A rebarba pode ocorrer com ou sem fratura do material na porção cavaco/rebarba. Se ocorrer a fratura no cavaco durante a formação da rebarba, esta surge ao longo da linha A'D na

Figura 2.13 o que reduz a sua altura final. Se ocorrer a fratura ao longo do plano de cisalhamento negativo, haverá o lascamento de borda que pode ter uma pequena rebarba formada na direção de saída da ferramenta da peça (Ko e Dornfeld, 1996a).

A formação de rebarba através de fratura na zona de cisalhamento negativa também foi verificada por Pekelharing (1978).

2.5 - Estudo da Formação de rebarba de encurvamento no corte oblíquo

O estudo da formação de rebarba no corte ortogonal é utilizado na maioria das investigações devido à sua simplicidade geométrica que reduz a complexidade da análise. Entretanto, algumas pesquisas foram direcionadas ao estudo desta formação no corte oblíquo porque é uma situação mais real na maioria das operações de usinagem.

Nakayama e Arai (1987) incluíram uma breve análise sobre a influência do ângulo de inclinação da ferramenta λ_s na formação de rebarba lateral concluindo que o uso de ângulo de inclinação negativo pode auxiliar na redução da dimensão desta rebarba.

Hashimura *et al.* (1995), investigaram o efeito de λ_s na formação de rebarba de saída (ou rebarba de encurvamento) e de rebarba lateral, nos cortes ortogonal e oblíquo de alumínio Al 2024-O usando a micro-usinagem em MEV, e verificaram a formação de rebarba com e sem fratura de borda.

Através da observação em MEV e da simulação por Método de Elementos Finitos (M.E.F.), elaboraram a ilustração das três etapas da formação de rebarba de encurvamento, explicadas por Ko e Dornfeld (1991), o que está apresentado na Figura 2.15.

Foi observado que, no corte ortogonal, a formação de rebarba ou a fratura de borda desenvolve-se uniformemente ao longo da largura da peça, na sua superfície de saída. A rotação do plano de cisalhamento negativo ocorre em torno de uma linha eqüidistante à superfície da peça, como ilustrado na Figura 2.15 (a3). Uma zona de cisalhamento negativa se forma uniformemente em torno dessa linha de rotação por toda a largura da peça e se estende até a aresta de corte.

No corte oblíquo, observaram que a distância da ferramenta em relação à borda da peça para a iniciação da formação da rebarba ω , é menor do que no corte ortogonal. Isso pode ser atribuído à menor deformação do material produzido pela inclinação da aresta de corte λ_s em relação à direção de corte.

Deve-se observar que no corte oblíquo a inclinação da ferramenta λ_s determina dois pontos importantes da sua aresta de corte em relação à peça: o ponto mais avançado da aresta de corte em relação à direção de corte, que é o primeiro sair da superfície da peça, e o

ponto mais recuado desta aresta que é o último a fazê-lo.

Durante o corte, o cavaco sai da superfície da ferramenta torcendo-se em direção normal à aresta de corte, Figura 2.15 (b3). Isso pode significar que o cisalhamento do cavaco é gradual e acontece inicialmente no ponto mais avançado da ferramenta. À medida que esta avança, o ponto instantâneo de cisalhamento do cavaco desloca-se sobre a aresta de corte para o lado do ponto mais recuado. Da mesma maneira, a iniciação da formação da rebarba começa no ponto mais avançado e progride para o ponto mais recuado dessa aresta.

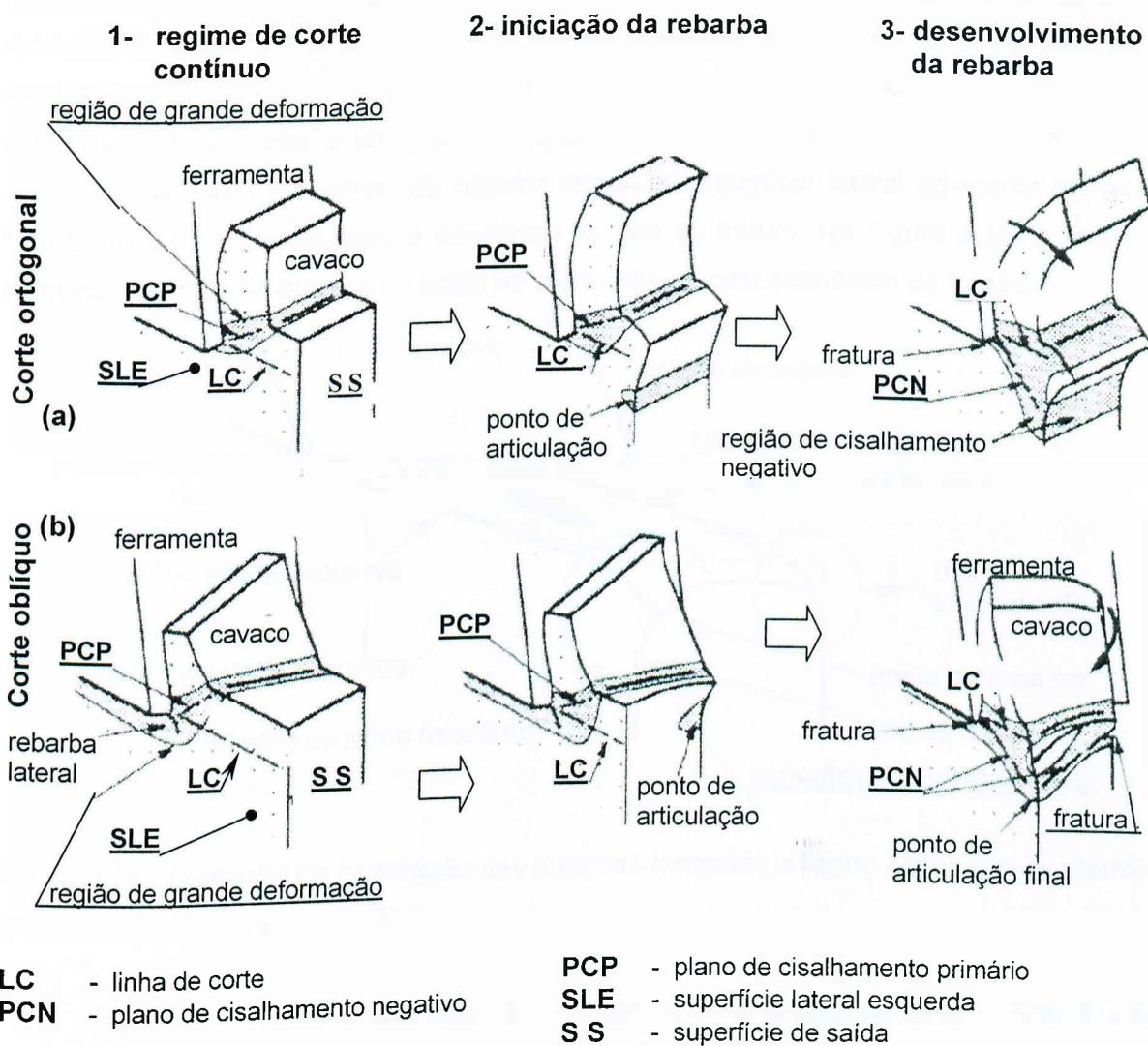


Figura 2.15 - Representação da formação de rebarba de encurvamento: (a) no corte ortogonal e (b) corte oblíquo (Hashimura *et al.*, 1995)

Na iniciação da formação da rebarba, surge um ponto de rotação do plano de cisalhamento negativo na interseção da superfície de saída com a superfície lateral da peça, Figura 2.15 (b2). Portanto, apenas o plano normal à

superfície usinada, que contém a direção de corte e o ponto mais avançado da aresta de corte, atingiu as condições para iniciar a formação de rebarba.

Pode-se supor, então, que este mecanismo se estende por infinitos planos paralelos que, com o avanço da ferramenta, vão atingindo essa condição até que o ponto mais recuado da aresta de corte, na outra superfície lateral, também passe por esta fase, como se pode verificar na Figura 2.15 (b3).

O ponto de rotação desloca-se sobre a superfície de saída da peça à medida que a ferramenta avança, descrevendo uma reta sobre a mesma. A fratura ou o encurvamento do cavaco é iniciado do lado do ponto mais avançado e progride, juntamente com o corte, para o lado do ponto mais recuado da ferramenta. Este deslocamento de um lado para o outro ao final do corte pode provocar a formação de rebarba de saída (ou rebarba de encurvamento) na superfície de saída e também de rebarba lateral na superfície lateral adjacente ao lado do ponto recuado da aresta, com a ocorrência ou não de fratura. Na Figura 2.16, é ilustrada a formação de rebarba lateral e de saída no corte oblíquo, com ocorrência de fratura.

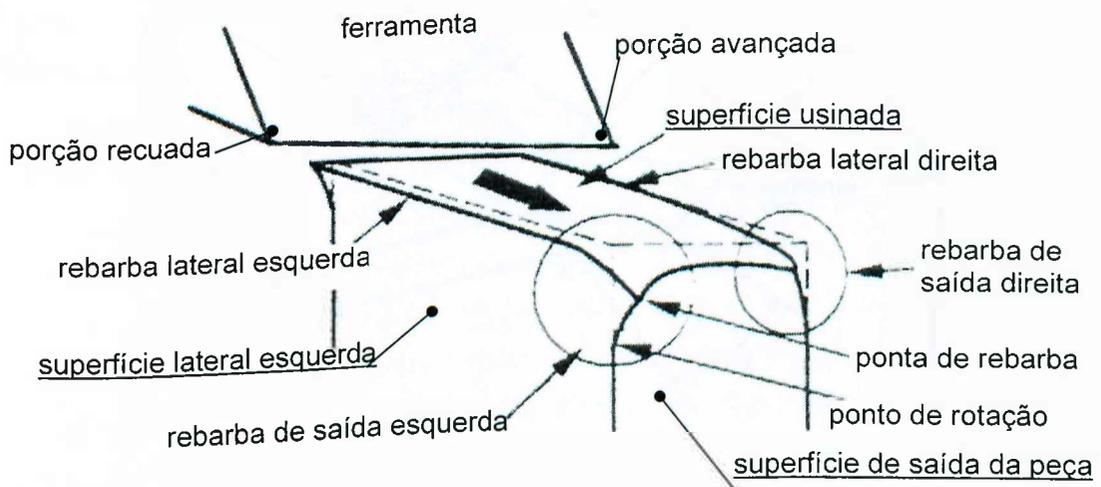


Figura 2.16 - Ilustração da localização das rebarbas formadas no corte oblíquo, com ocorrência de fratura (Hashimura *et al.*, 1995).

Outro estudo sobre a formação de rebarbas no corte oblíquo foi desenvolvido por Ko e Dornfeld (1996b), que analisaram o mecanismo de formação de rebarba de saída, abrangendo a ocorrência de fratura.

Citando o trabalho de Rubenstein sobre um modelo para previsão de formação de cavaco no corte oblíquo, e considerando que o mecanismo de formação de rebarba de saída é semelhante ao da formação de cavaco, aqueles autores desenvolveram um modelo para prever as rebarbas e lascamento de borda no corte oblíquo de materiais dúcteis e frágeis, respectivamente.

Segundo Ko e Dornfeld (1996b), a simplificação básica usada no modelo de Rubenstein para o estudo da formação de cavaco no corte oblíquo é a suposição de que o cavaco efetivamente se forma num plano de corte perpendicular à aresta de corte, plano POQ na Figura 2.17, e flui lateralmente segundo uma direção η_c . Então, a formação de cavaco no corte oblíquo é o efeito cumulativo de parcelas de formação de cavaco no corte ortogonal em cada plano de corte perpendicular à aresta de corte. Os seus respectivos deslocamentos laterais segundo o ângulo η_c têm participação na sua saída da ferramenta.

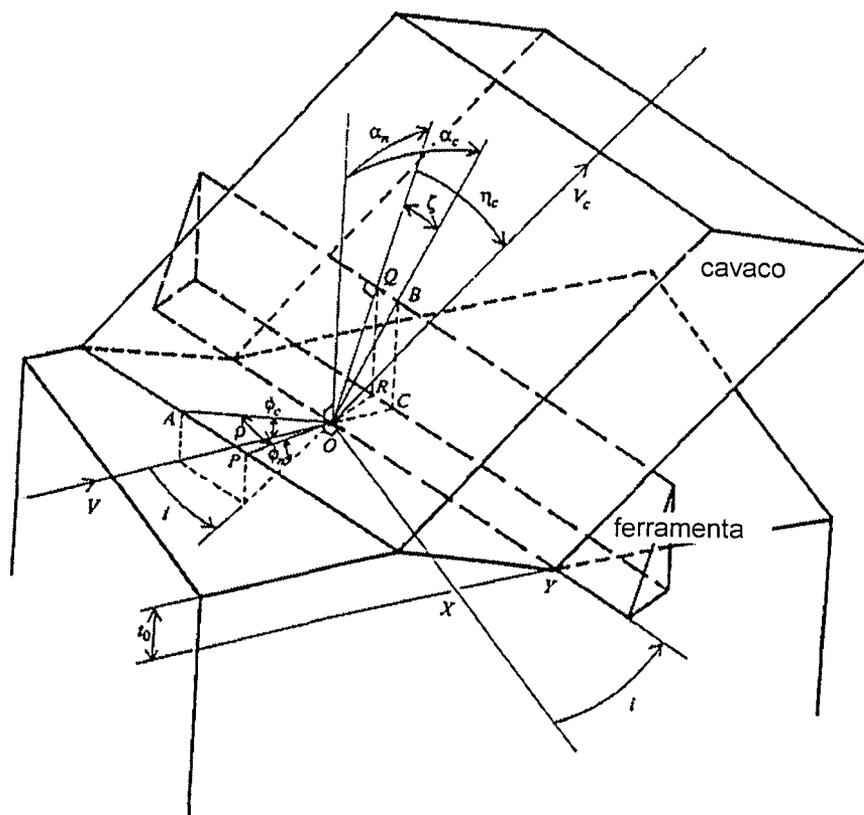


Figura 2.17 - Ilustração esquemática do corte oblíquo mostrando o plano da direção de corte (Ko e Dornfeld, 1996).

Através de transformações geométricas e modificações no modelo de previsão de rebarba no corte ortogonal feitas em trabalhos anteriores (Ko e Dornfeld, 1989 e 1991), foi obtido o modelo para prever as características de rebarba de saída que inclui o fenômeno de fratura de borda, no corte oblíquo. Naquele trabalho, os autores fizeram testes com materiais dúcteis e frágeis para comprovar as previsões do modelo e concluíram que a utilização de dados obtidos de usinagem ortogonal levou à previsão de fratura com boa aproximação aos resultados experimentais.

2.6. Fatores que influenciam na formação de rebarbas em usinagem

A formação de rebarbas nos processos de usinagem é influenciada ou determinada por diversos fatores relacionados ao material e à geometria da peça, às condições de corte, à geometria e estado de afiação da ferramenta, à operação de corte, à máquina ferramenta, etc. Geralmente, os efeitos sobre a formação de rebarbas não são independentes e podem apresentar-se combinados.

Segundo Soares Filho (1995), os fatores relacionados à peça, à ferramenta e aos parâmetros do processo estão em primeiro plano de influência sobre a formação de rebarbas.

As pesquisas sobre formação de rebarbas em usinagem sempre analisam os fatores que influenciam as características e propriedades mecânicas da rebarba (altura, espessura de raiz, dureza, localização) ou influenciam na ocorrência de fratura de borda. A fratura de borda, que surge do mecanismo de formação de rebarbas, pode determinar a descaracterização da peça para a sua utilização (Souza Jr., 2001).

- Propriedades dos materiais

Os fatores característicos dos materiais que podem influenciar na formação de rebarbas ou fratura de borda são basicamente relacionados à ductilidade ou fragilidade do material. Estão envolvidas as suas propriedades mecânicas como a resistência à tração, o limite de escoamento, a resistência ao cisalhamento e o alongamento relativo (Soares Filho, 1995). Há os fatores inerentes à dureza e fragilidade próprios da natureza do material ou devido a processos de fabricação anteriores envolvendo o grau de encruamento.

Gillespie (1973) verificou que o mecanismo da rebarba Poisson pode se manifestar em materiais que apresentam baixa condutibilidade térmica, elevado coeficiente de expansão térmica e baixo módulo de elasticidade.

Ko e Dornfeld (1989), iniciaram estudos sobre a ocorrência de fratura de borda durante formação de rebarbas verificando a influência da fragilidade do material neste fenômeno.

Hashimura *et al.* (1999a), considerando a importância que as propriedades mecânicas do material da peça exercem sobre a formação de rebarbas, classificaram 8 estágios entre as fases de iniciação e a formação da rebarba de encurvamento, discutidas no item 2.4, distinguindo-as quanto a material dúctil e material frágil.

Os 5 primeiros estágios são comuns a ambos os materiais. Os demais estágios são correspondentes, porém, neles os materiais têm comportamentos distintos que levam à formação de rebarbas conseqüentemente diferentes.

A rebarba formada em material dúctil é produzida pela propagação da fratura ao longo da zona de cisalhamento primária na direção da linha de corte, pela ação da ferramenta que

produz, também, a deformação no material usinado. O desenvolvimento da fratura leva à separação do cavaco ao longo da linha de corte e uma rebarba é formada na borda da peça, chamada "rebarba positiva", quando é encerrada a ação da ferramenta.

No caso de material frágil, a propagação da fratura ocorre ao longo da zona de cisalhamento negativa. O deslocamento da ferramenta ao longo da linha de corte provoca o desenvolvimento da fratura, que separa o cavaco juntamente com o material localizado acima da zona de cisalhamento negativa, como sugerido por Pekelharing (1978) no estudo sobre formação do pé do cavaco. Assim, uma pequena porção de material deformado forma a rebarba na borda onde a ferramenta sai da peça, cuja superfície usinada apresenta um aspecto característico de fratura na região próxima a esta borda. Nesse caso, a rebarba é chamada de lascamento de borda (*breakout*), ou "rebarba negativa".

- Condições de corte, geometria e estado de fiação da ferramenta

Os parâmetros de corte são os principais fatores, juntamente com as características da ferramenta, que podem determinar as propriedades da formação de rebarba (com ou sem fratura de borda), estando definidos o processo de corte e o material da peça.

Muitos trabalhos verificaram a influência dos parâmetros de corte nos mecanismos de formação das rebarbas (profundidade de corte a_p , velocidade de corte v_c e avanço f); e geometria da ferramenta (ângulo de inclinação λ_s , ângulo de posição principal χ_r , ângulo de saída da ferramenta γ_0 , raio da aresta de corte r_β , raio de ponta da ferramenta r_n). Foi verificado que as características de cada tipo de rebarba (rebarba de entrada, de saída, lateral e inclinada, segundo classificação de Nakayama e Arai, 1987), principalmente a altura e a espessura da raiz, são afetadas por uma ou mais dentre estas condições de corte.

De maneira geral, o aumento da profundidade de corte a_p provoca o aumento da altura e da espessura das rebarbas (Gillespie, 1973; Kishimoto *et al.*, 1981; Nakayama e Arai, 1987; Ko e Dornfeld, 1991; Kaminise *et al.*, 2003). O aumento da velocidade de corte v_c tende a reduzir as dimensões das rebarbas devido à correspondente redução na deformação cisalhante γ_s na interface cavaco/ferramenta, e portanto, da força de corte F_c (Nakayama e Arai, 1987; Ko e Dornfeld, 1991). O avanço f pode influenciar na formação de fratura durante o desenvolvimento da rebarba, alterando as características e dimensões da rebarba remanescente (Nakayama e Arai, 1987; Hashimura *et al.*, 1999b) e o aumento do avanço f pode influenciar as dimensões da rebarba de entrada (Gillespie, 1973) e da espessura de raiz das rebarbas (Nakayama e Arai, 1987).

A geometria da ferramenta também tem influência decisiva sobre as dimensões das rebarbas. O raio da aresta de corte r_β e o raio de ponta da ferramenta r_n têm influência direta sobre a espessura da raiz da rebarba (Gillespie, 1973; Nakayama e Arai, 1987; Hashimura *et*

al., 1999b) e ferramentas desgastadas provocam o aumento da espessura das rebarbas de entrada, da rebarba de saída e da rebarba inclinada na direção de avanço. É verificado que o aumento do ângulo de saída γ_0 (Ko e Dornfeld, 1991) pode diminuir as dimensões das rebarbas assim como o aumento do ângulo de inclinação λ_s (Nakayama e Arai, 1987; Hashimura *et al.*, 1995; Ko e Dornfeld, 1996b) pode alterar as dimensões das rebarbas e provocar a fratura de borda. A redução do ângulo de posição principal χ_r diminui a dimensão de rebarbas de saída (Soares Filho, 1995; Kaminise *et al.*, 2003) e pode, também, levar à ocorrência de fratura ao longo do perfil transversal da rebarba permanecendo na peça uma rebarba de altura menor denominada rebarba secundária (Kishimoto *et al.*, 1981).

Há outros fatores relacionados ao processo de corte que também influenciam na formação de rebarbas como a temperatura de corte, as forças de usinagem e as condições de saída da ferramenta da peça (da Silva, 2004). O aumento das forças de usinagem, força de corte F_c e força de avanço F_f , influenciam a formação das rebarbas e qualquer redução destas forças produz a diminuição nas dimensões das rebarbas (Soares Filho, 1995).

A influência das condições de saída da ferramenta do corte está relacionada ao ângulo da borda ψ , entre a superfície de corte e a superfície de saída da ferramenta do corte (Nakayama e Arai, 1987; *Society of Mechanical Engineers* citado por Soares Filho, 1995; Pekelharing, 1978). À medida que este ângulo aumenta, há tendência de redução do tamanho das rebarbas formadas, conforme ilustra a Figura 2.18. Para um ângulo ψ maior do que 150° não há formação de rebarba.

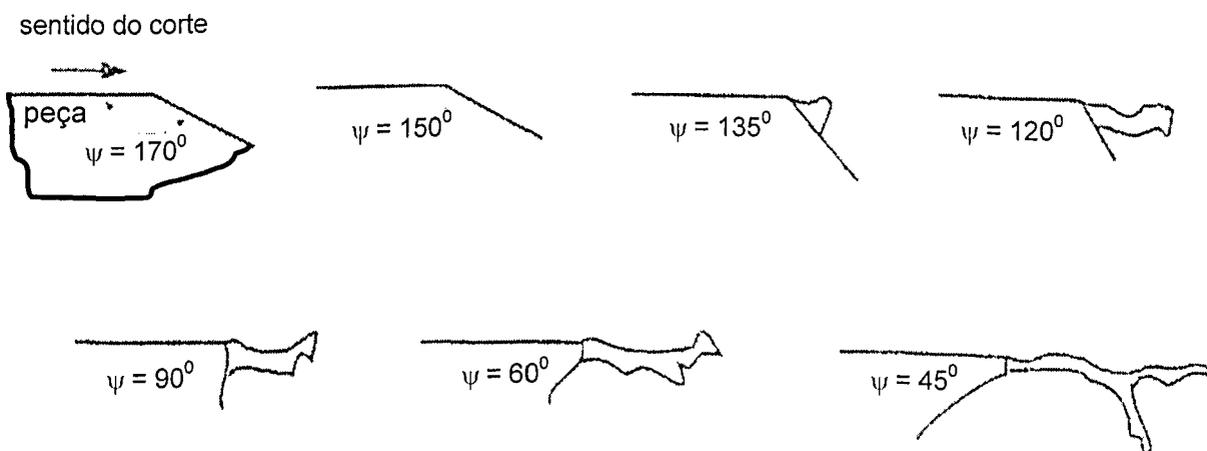


Figura 2.18 - Efeito do ângulo de borda da peça sobre a formação de rebarba de saída (rebarba de encurvamento), (Soares Filho, 1995).

2.7 Formação de rebarbas nas operações de corte

Há formação de rebarbas em todas as operações de usinagem de metais devido à natureza deste fenômeno a qual está relacionada ao próprio mecanismo de geração do cavaco.

A seguir será discutida a formação de rebarbas nas operações de torneamento, fresamento e furação, por serem as principais operações de usinagem utilizadas.

2.7.1 - Formação de rebarbas no torneamento

Pode-se distinguir as operações de torneamento nos três grupos básicos, faceamento, sangramento e torneamento cilíndrico para identificar as rebarbas que se formam nesta operação, como ilustra a Figura 2.19.

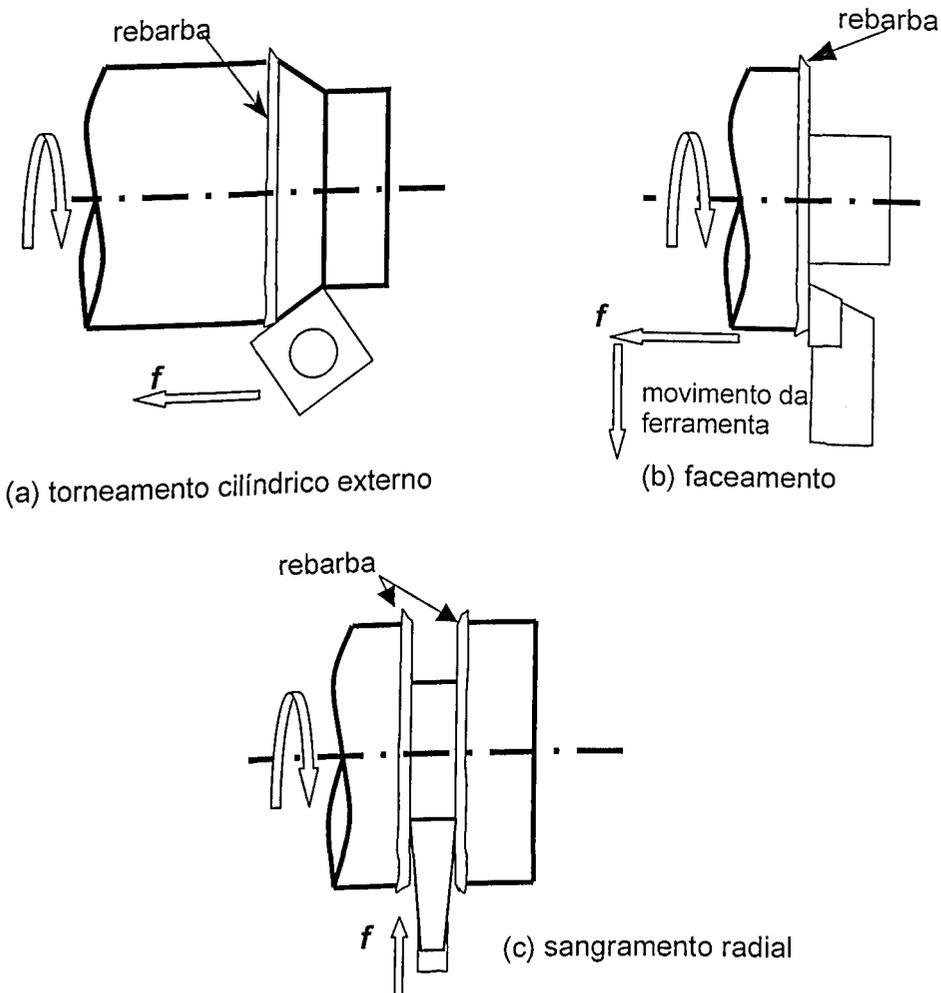


Figura 2.19 - Ilustração da localização de formação de rebarbas em operações básicas de torneamento (Gillespie, 1973).

Todos os tipos de rebarbas classificados segundo Gillespie (1973), ou seja, rebarba Poisson, rebarba de encurvamento, rebarba de estiramento e rebarba de interrupção de corte podem ser identificadas nestas operações. Conseqüentemente, também podem ser verificadas através da classificação de Nakayama e Arai (1987) por rebarba de entrada, rebarba lateral, rebarba de saída e rebarba inclinada (ou *inclinada na direção de avanço*).

Na Figura 2.20a é ilustrada a formação de rebarba Poisson durante o torneamento cilíndrico (externo). Segundo Gillespie (1973), essa é uma rebarba formada pelo primeiro dos mecanismos de rebarba Poisson, devido ao raio efetivo da aresta de corte r_{β} , ou pelo segundo daqueles mecanismos como resultado do atrito entre a superfície de folga da ferramenta $A\alpha$ e a peça, conforme discutido no item 2.2.1.

Nas Figuras 2.8b e 2.20b é ilustrada a formação da rebarba de encurvamento ao final do torneamento cilíndrico externo de uma superfície. A seqüência da Figura 2.20b, da esquerda para a direita, ilustra o desenvolvimento do corte quando a ferramenta aproxima-se da superfície de saída da peça. A partir de determinada espessura de material à frente da aresta de corte, não há resistência suficiente para suportar a força de avanço F_f (e força passiva F_p) e esta porção de material é flexionada na direção do avanço formando a rebarba.

A formação da rebarba de encurvamento no torneamento cilíndrico é semelhante à fabricação por conformação mecânica, na operação de repuxo. Pode-se pressupor que uma redução progressiva do avanço ao final do corte, acompanhando a redução da espessura do material entre a aresta de corte e a superfície de saída da peça, com o objetivo de manter a resistência à flexão desta porção sobre o esforço do avanço da ferramenta, possa retardar esta flexão e reduzir a espessura de uma rebarba que seja inevitavelmente formada.

Pode ocorrer uma fratura do material durante a flexão na formação da rebarba de encurvamento o que reduz a altura da rebarba remanescente. Esta fratura pode ser conseqüência do aumento do avanço f ou da alteração dos parâmetros de corte que aumente a deformação cisalhante γ_s (Kishimoto *et al.*, 1981).

Nos casos onde a fratura ocorre em toda a circunferência da peça, há a separação do material fraturado na forma de um anel que fica solto entre a peça e a sua fixação na máquina o que pode causar transtornos à fabricação. Devido ao grau de deformação que leva a esta fratura, este anel de material é resistente e não é facilmente removível o que prejudica o processo de corte pois pode avariar as superfícies da peça, danificar a ferramenta e consumir muito tempo para removê-lo.

A Figura 2.20c é uma ilustração do efeito do ângulo de posição principal χ_r na fase final do torneamento cilíndrico onde se forma a rebarba de encurvamento. Para pequenos valores de χ_r , a profundidade de corte a_p é continuamente reduzida à medida que a ferramenta se aproxima da borda da peça devido à inclinação da ferramenta em relação à superfície em

usinagem principal. Isso deve provocar a redução na altura da rebarba formada. A espessura da raiz da rebarba também deve ser influenciada por este ângulo porque é uma grandeza que está relacionada ao esforço de flexão do material pelo avanço da ferramenta. O uso de χ_r pequeno diminui o ângulo de rotação do material que é encurvado à frente da ferramenta, o que deve diminuir a deformação na raiz da rebarba. Por outro lado, à medida que for utilizado maior valor de χ_r a altura da rebarba de encurvamento resultante deve aproximar-se do valor da profundidade de corte a_p .

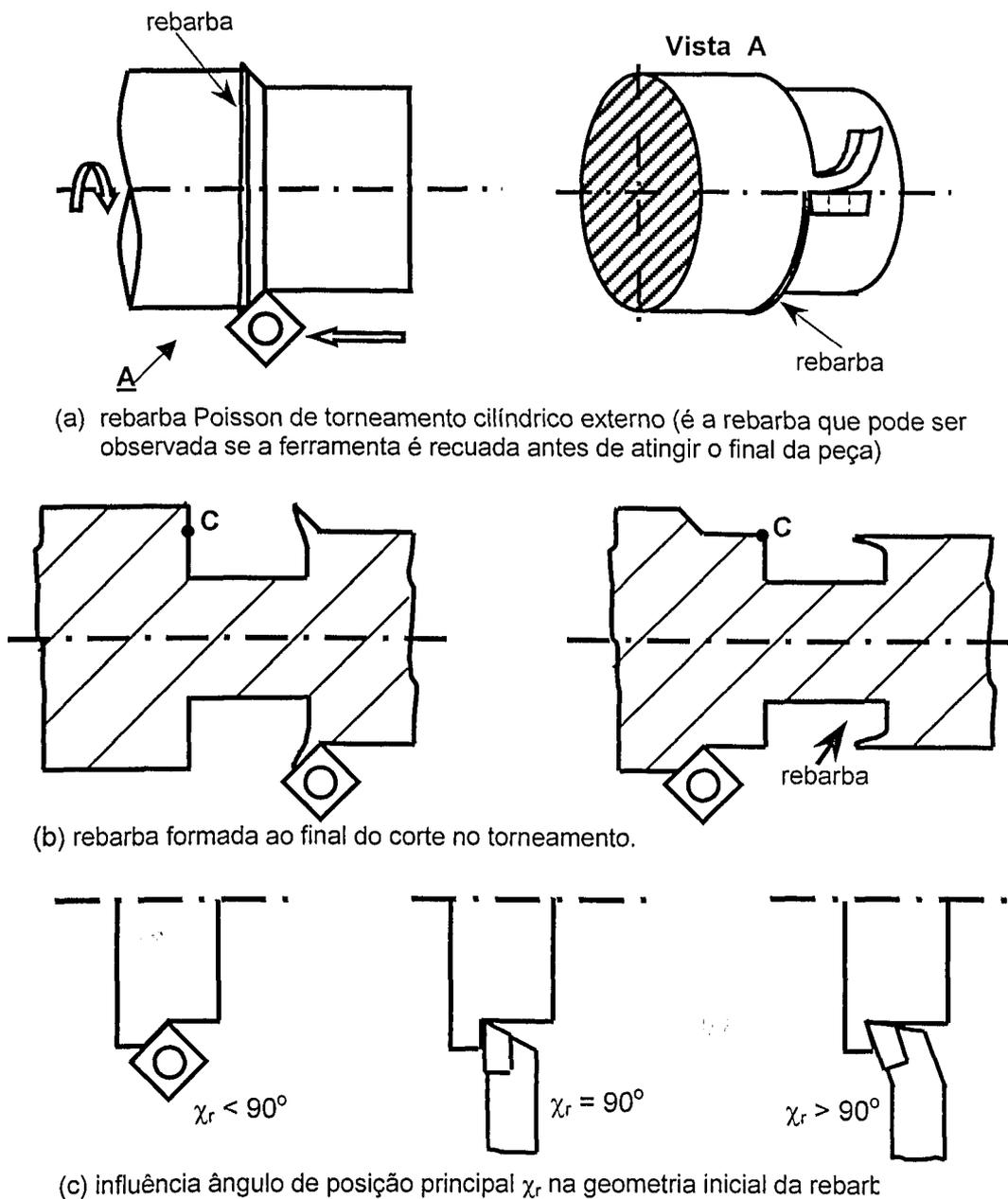


Figura 2.20 - Representação da formação de rebarbas no torneamento cilíndrico externo: (a) rebarba Poisson; (b) rebarba de encurvamento; (c) efeito do ângulo de posição na rebarba de encurvamento. (Gillespie, 1973)

No faceamento, pode haver formação de rebarba Poisson e rebarba de encurvamento. A rebarba Poisson é formada quando se usa uma ferramenta de facear com ângulo de posição principal χ_r igual a 0° . Após a penetração axial da ferramenta, há o seu deslocamento radial em direção à superfície da peça. Novamente, o primeiro e o segundo mecanismos de formação da rebarba Poisson podem atuar e esta é verificada na borda da superfície faceada, como representado na Figura 2.21a.

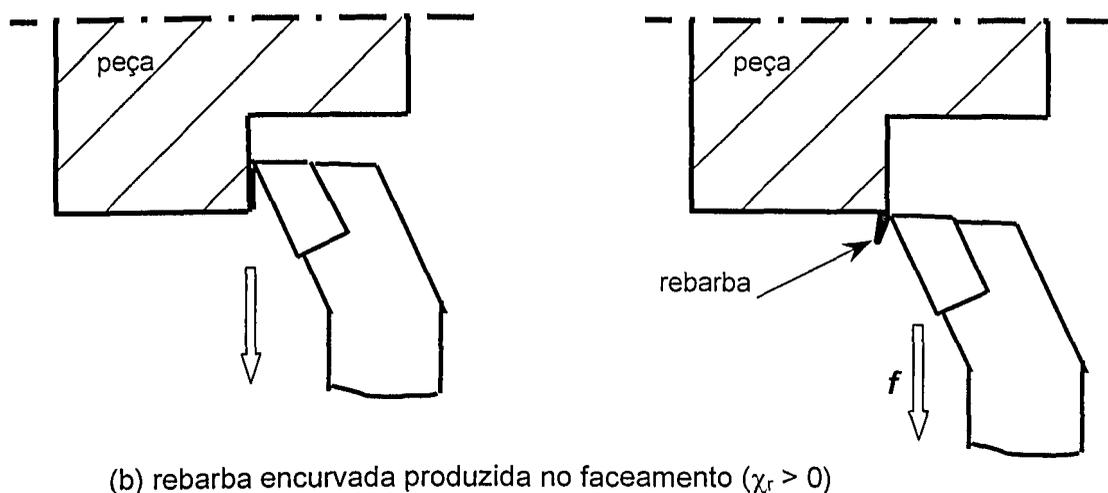
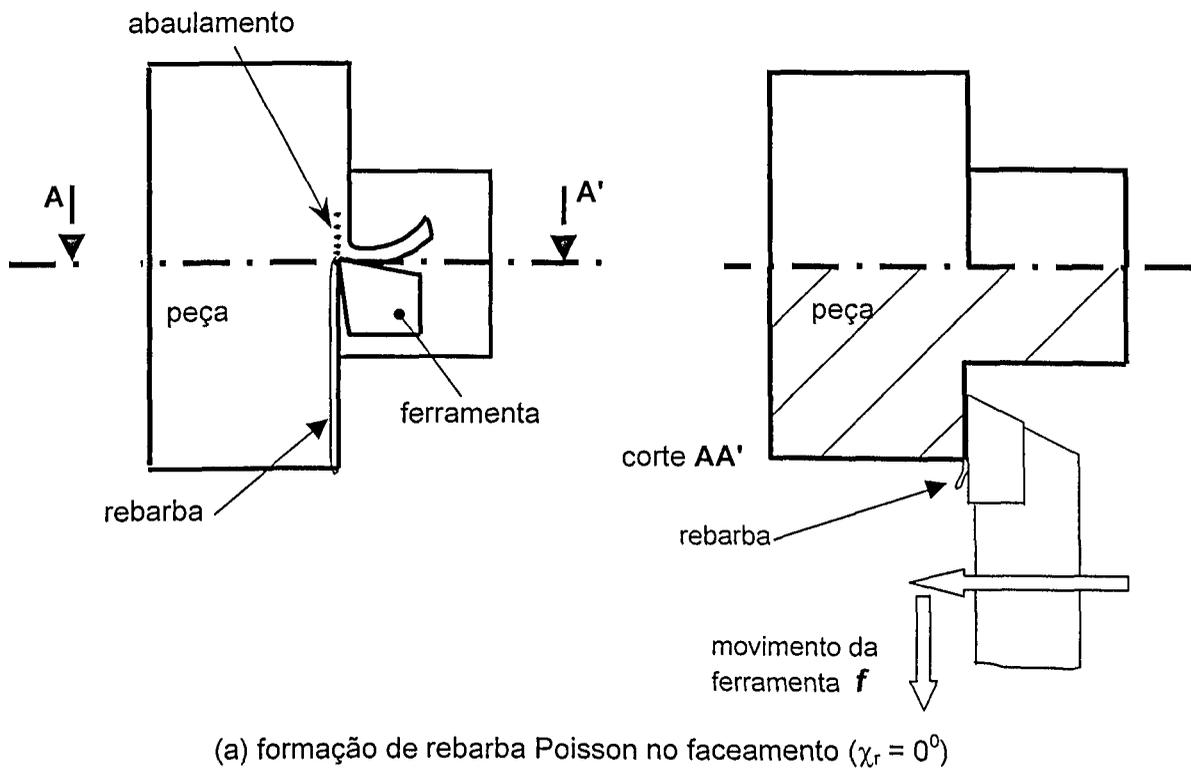


Figura 2.21 - Ilustração da formação de rebarba no faceamento: (a) rebarba lateral; (b) rebarba de encurvamento (Gillespie, 1973)

A rebarba de encurvamento do faceamento é gerada quando a força de avanço da ferramenta flexiona, na direção do avanço, a porção final do material a ser removido, se o ângulo de posição principal χ_r é maior que 0° , Figura 2.21b (Gillespie, 1973).

No sangramento radial, pelo fato de a ferramenta ser mais estreita do que a peça, ocorre a formação de rebarba de estiramento nas bordas do entalhe produzido (Figura 2.22c). Após a formação da rebarba de estiramento no início do corte, as suas dimensões permanecem inalteradas desde que não haja atrito entre as arestas de corte e as superfícies secundárias de corte. Caso isso ocorra, a força de atrito pode provocar expulsão de material para a borda do entalhe, conforme explicado pelo segundo mecanismo da rebarba Poisson, e aumentar a espessura da rebarba de estiramento já formada (Gillespie, 1973).

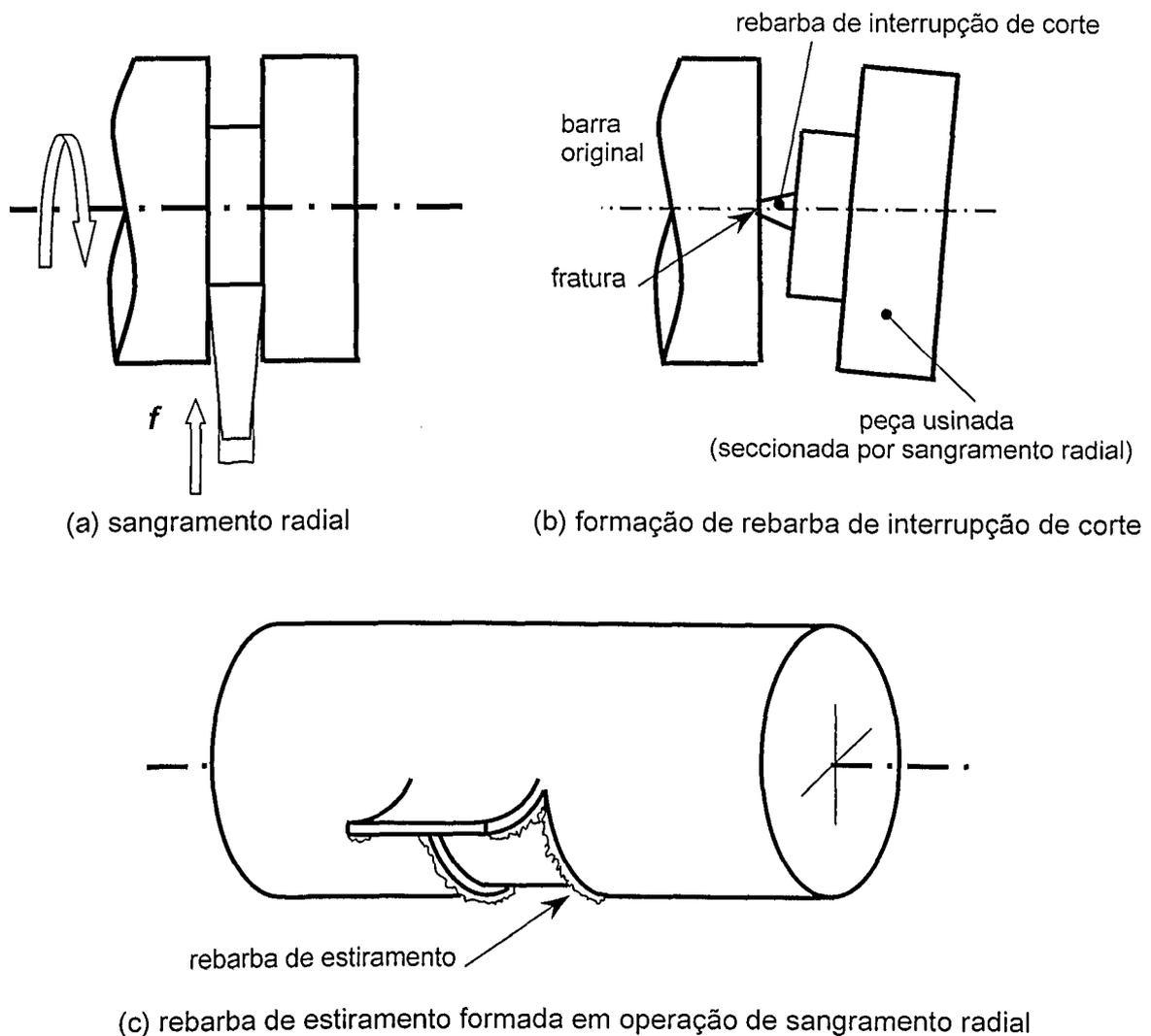


Figura 2.22 - Ilustração da formação de rebarbas na operação de sangramento radial (Gillespie, 1973).

Caso o sangramento tenha o objetivo de separar uma peça que está sendo produzida do material originário, como ilustra a Figura 2.22b, pode ocorrer o rompimento do material restante entre as duas partes devido à força de penetração da ferramenta. Isto interrompe o corte e deixa material aderido no centro da seção transversal das superfícies geradas pelo sangramento, em cada uma das partes. Tal formação de material é a rebarba de interrupção de corte (Gillespie, 1973).

Numa operação semelhante ao sangramento radial, porém, com ferramenta mais larga do que a largura de corte, há formação de rebarba Poisson nas bordas das superfícies laterais da peça. A formação destas rebarbas é causada pela extrusão do material à frente da aresta de corte, na direção axial desta aresta, que se acumula na borda da peça (Gillespie, 1973).

2.7.2 - Formação de rebarba no fresamento

A formação de rebarbas no fresamento pode ser analisada em operações de fresamento tangencial e frontal. Todos os tipos de rebarbas classificadas conforme Gillespie (1973) ou Nakayama e Arai (1987) são identificadas nessas operações.

No fresamento tangencial cilíndrico discordante de um rasgo passante, são identificados oito tipos de rebarbas relacionadas a três mecanismos de deformação (rebarba Poisson, de encurvamento e de estiramento), como ilustra a Figura 2.23. Foi verificado que o ângulo de hélice da fresa, no caso de fresamento de topo, afeta as propriedades de cada uma dessas rebarbas (Gillespie, 1973). A rebarba de interrupção de corte não será discutida aqui para operações de fresamento.

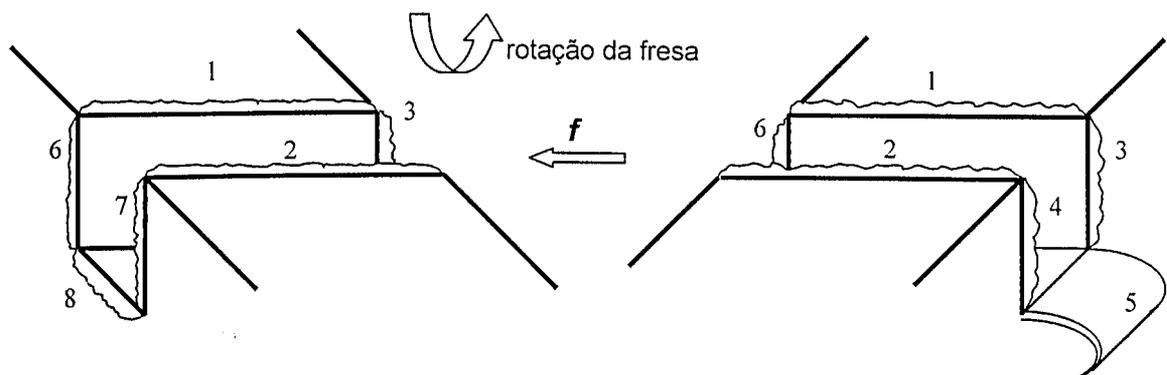


Figura 2.23 - Representação da localização das rebarbas formadas no fresamento cilíndrico tangencial discordante, de um rasgo passante (Gillespie, 1973).

Na Figura 2.23, as rebarbas 1 e 2 são rebarbas de estiramento produzidas pelo movimento ascendente dos dentes da ferramenta na saída do corte, na superfície superior da

peça. A Figura 2.24b ilustra a periodicidade na formação destas rebarbas 1 e 2 pela ação sucessiva de cada dente.

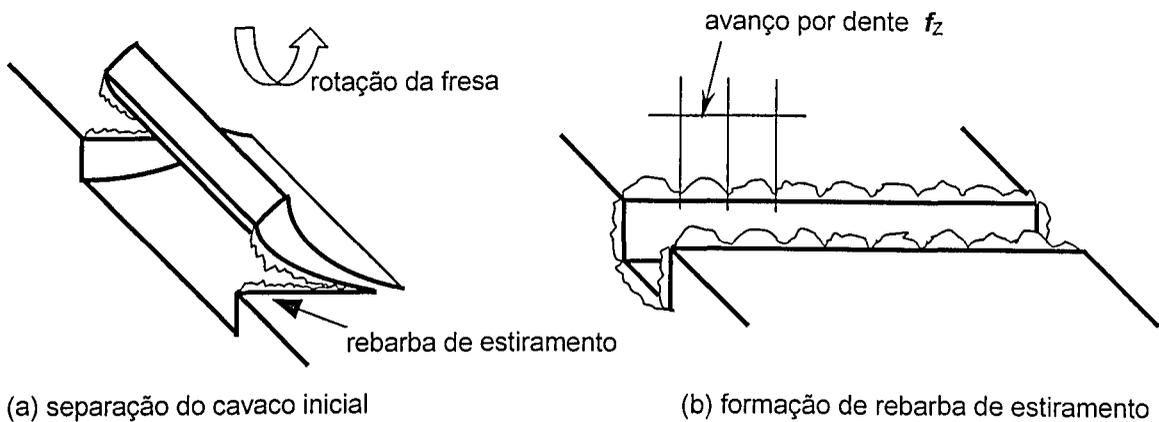


Figura 2.24 - Representação da natureza periódica na formação de rebarbas no fresamento cilíndrico tangencial (Gillespie, 1973).

Na superfície de entrada da ferramenta, a rebarba 8 é rebarba Poisson (de entrada) e as rebarbas 6 e 7 podem ser tanto rebarba de entrada quanto rebarba de estiramento. As rebarbas 6 e 7, localizadas nas bordas laterais do rasgo, são formadas pela penetração dos dentes da fresa em profundidades diferentes. Quando a ferramenta avança, os dentes penetram sucessivamente na peça cada um mais abaixo do que o anterior até atingir a profundidade de corte a_p do rasgo.

As rebarbas 3 e 4 são rebarbas de estiramento e a rebarba 5 é rebarba de encurvamento, todas formadas na saída da ferramenta da peça.

No fresamento cilíndrico tangencial concordante, ilustrado na Figura 2.25, há alteração significativa na formação das rebarbas 5 e 8. A rebarba 5, que é uma rebarba de encurvamento, é formada na superfície de entrada da ferramenta na peça, na saída de aresta principal de corte dos dentes da fresa (pela flexão da última porção de material removido pela fresa ao atingir a profundidade de corte a_p). A rebarba 8 é rebarba Poisson formada pela entrada de aresta de corte na superfície de saída da ferramenta.

Da mesma forma e devido à inversão do movimento no corte concordante em relação ao discordante, a formação de 3 e 4 está relacionada aos mecanismos de Poisson e de estiramento, enquanto 6 e 7 são, agora, puramente rebarbas de estiramento.

As rebarbas 1 e 2 continuam sendo rebarbas de estiramento, porém, formadas quando a ferramenta entra na peça o que pode mudar suas características devido à alteração na geometria do corte.

No fresamento frontal, a localização das rebarbas formadas na usinagem de rasgo cego

e de rasgo passante com penetração de trabalho a_e igual ao diâmetro da fresa, é ilustrada na Figura 2.26. Deve ser observado que a numeração dada corresponde àquelas das Figuras 2.23 e 2.25 do fresamento tangencial, e estão vinculadas à localização de cada uma na peça.

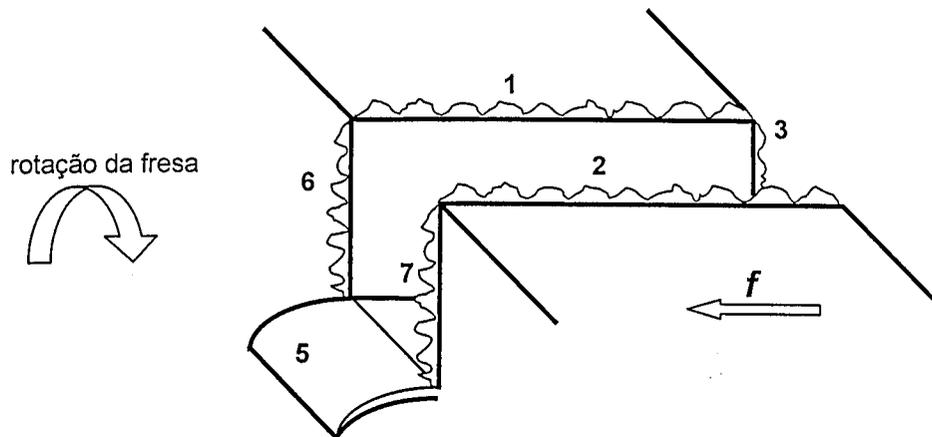


Figura 2.25 - Representação da formação de rebarbas no fresamento cilíndrico tangencial concordante de um rasgo passante (Gillespie, 1973).

Na Figura 2.26, as rebarbas 1, 2 e 10 são rebarbas Poisson produzidas por um dos mecanismos envolvidos com a aresta de corte ou com a superfície de folga da ferramenta. Gillespie (1973) observou que, devido ao desenvolvimento de corte concordante ou discordante nas regiões 1 e 2, respectivamente, as rebarbas 1 e 2 têm dimensões diferentes e as rebarbas formadas no lado concordante são maiores do que aquelas do lado discordante. A rebarba 10 é uma rebarba Poisson com características intermediárias entre 1 e 2.

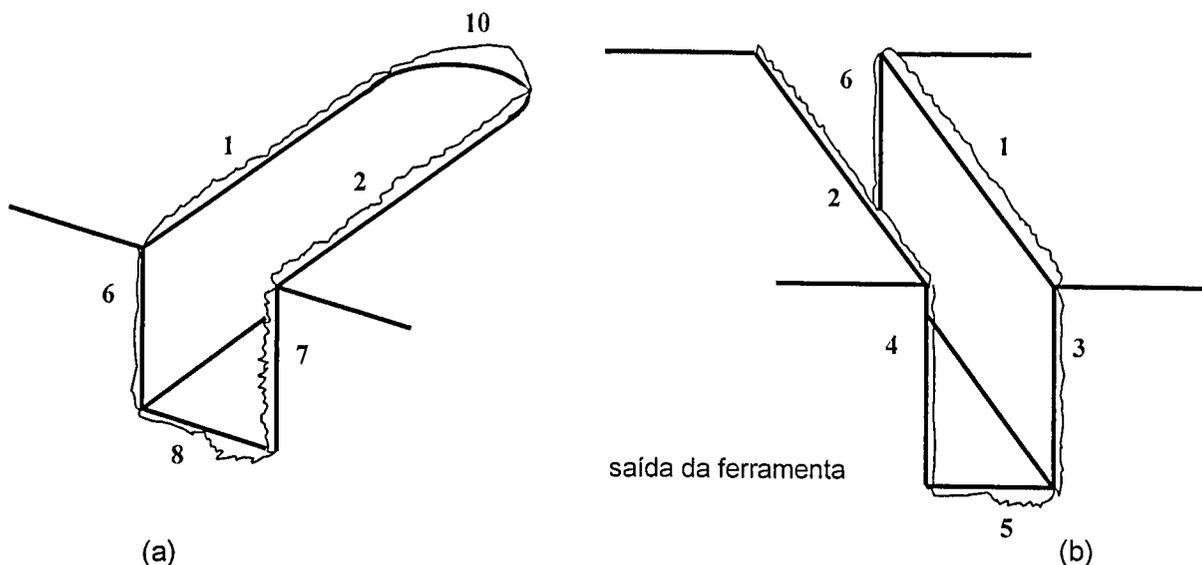


Figura 2.26 - Ilustração da localização de rebarbas formadas no fresamento frontal: (a) rasgo cego; (b) rasgo passante (Gillespie, 1973).

As rebarbas 3 e 7 são rebarbas de encurvamento formadas quando a aresta principal de corte sai da peça. A rebarba 7 forma-se durante o início da penetração da ferramenta, na borda do rasgo onde aresta principal sai da peça; e a rebarba 3 é formada quando a ferramenta termina um rasgo passante, na saída da aresta de corte do material. Assim, a rebarba 3 é formada quando a ferramenta flexiona a porção final de material, na fase de saída da peça e a rebarba 7 é gerada na superfície de entrada da ferramenta, pela flexão da última porção de material removido para produzir a penetração de trabalho a_e .

As rebarbas 4 e 6 são formadas pela entrada do dente da fresa e também são rebarbas Poisson. Nas mesmas posições da ferramenta onde se formam 3 e 7, ou seja, nas superfícies de entrada e de saída da peça, há a formação de 4 e 6 pela ação de penetração da aresta de corte.

Deve-se observar que as rebarbas 5 e 8 são compostas por duas partes: uma de rebarba de encurvamento pois corresponde ao lado de saída dos dentes da fresa, e a outra de rebarba Poisson (rebarba de entrada), formada pela entrada da ferramenta.

A formação de rebarba no fresamento frontal de ressaltos é semelhante ao do fresamento frontal de rasgo passante, como ilustrado na Figura 2.27. Há formação de rebarba 1 na superfície superior, 6 e 8 na superfície de entrada, 3 e 5 na superfície de saída. Além disso, há a formação de uma rebarba de encurvamento na borda lateral inferior, que foi numerada por 9. Na Figura 2.27 é ilustrada a operação de corte discordante. A rebarba 9 é produzida pela flexão do material durante a saída dos dentes da fresa do plano de corte.

Se o ressalto é usinado em corte concordante, há alteração no mecanismo de formação das rebarbas 3, 5, 6 e 8, sendo que 1 e 9 permanecem inalteradas. 3 e 5 passam a ser formadas por mecanismo de rebarba Poisson, 6 e 8 por mecanismo de rebarba de encurvamento.

Quando a penetração de trabalho a_e for maior do que o raio da fresa, as rebarbas 5 e 8 são formadas por mecanismo de Poisson e de encurvamento, como no fresamento frontal de rasgo. Além disso, a penetração de trabalho a_e influencia o comprimento da rebarba de encurvamento 5 (ou 8 no corte concordante) como ilustrado na Figura 2.28.

As rebarbas do fresamento foram denominadas por Gillespie (1973) com expressões que as relacionam à localização nas bordas de um ressalto usinado por fresamento frontal. Dessa forma, para as rebarbas do fresamento ilustradas na Figura 2.27, a rebarba 1 é denominada por rebarba superior (*top burr*), 3 é a rebarba lateral de saída (*exit side burr*), 5 é a rebarba inferior de saída (*exit bottom burr*), 6 é a rebarba lateral de entrada (*entrance side burr*), 8 é a rebarba inferior de entrada (*entrance bottom burr*) e 9 é a rebarba inferior (*bottom burr*).

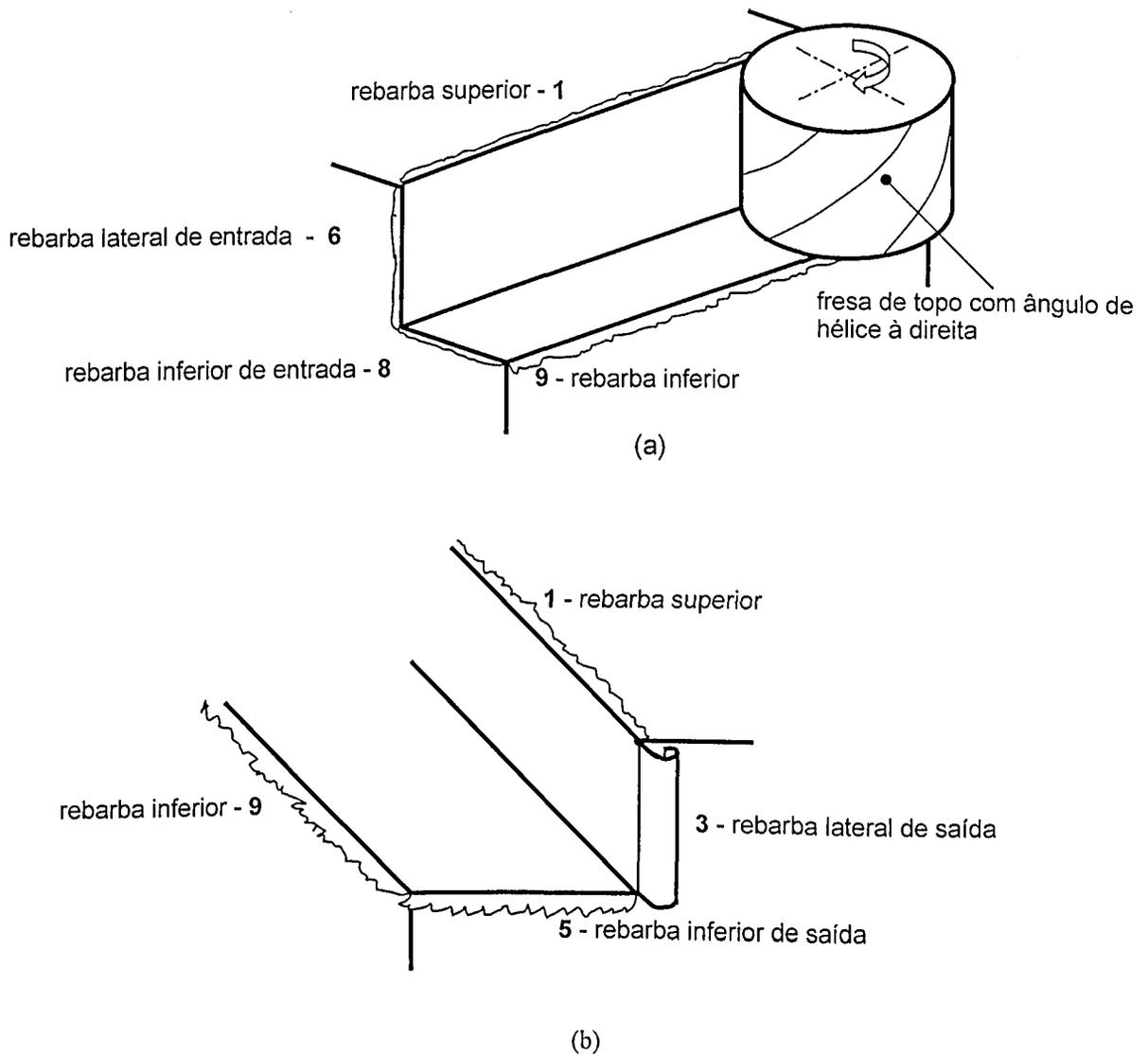


Figura 2.27 - Ilustração da localização de formação de rebarbas no fresamento frontal de ressaltos: (a) lado de entrada da ferramenta; (b) lado da saída da ferramenta da peça (Gillespie, 1973).

Pode-se observar que numa operação de fresamento há formação de rebarba em cinco regiões da peça em usinagem, como ilustra a Figura 2.29 (Hashimura *et al.*, 1999b):

- na borda entre a superfície usinada e a superfície de saída,
- na borda entre a superfície de transição e a superfície de saída,
- na borda entre superfície superior e superfície de transição,
- na borda entre a superfície usinada e superfície de entrada, e
- na borda entre a superfície de transição e a superfície de entrada

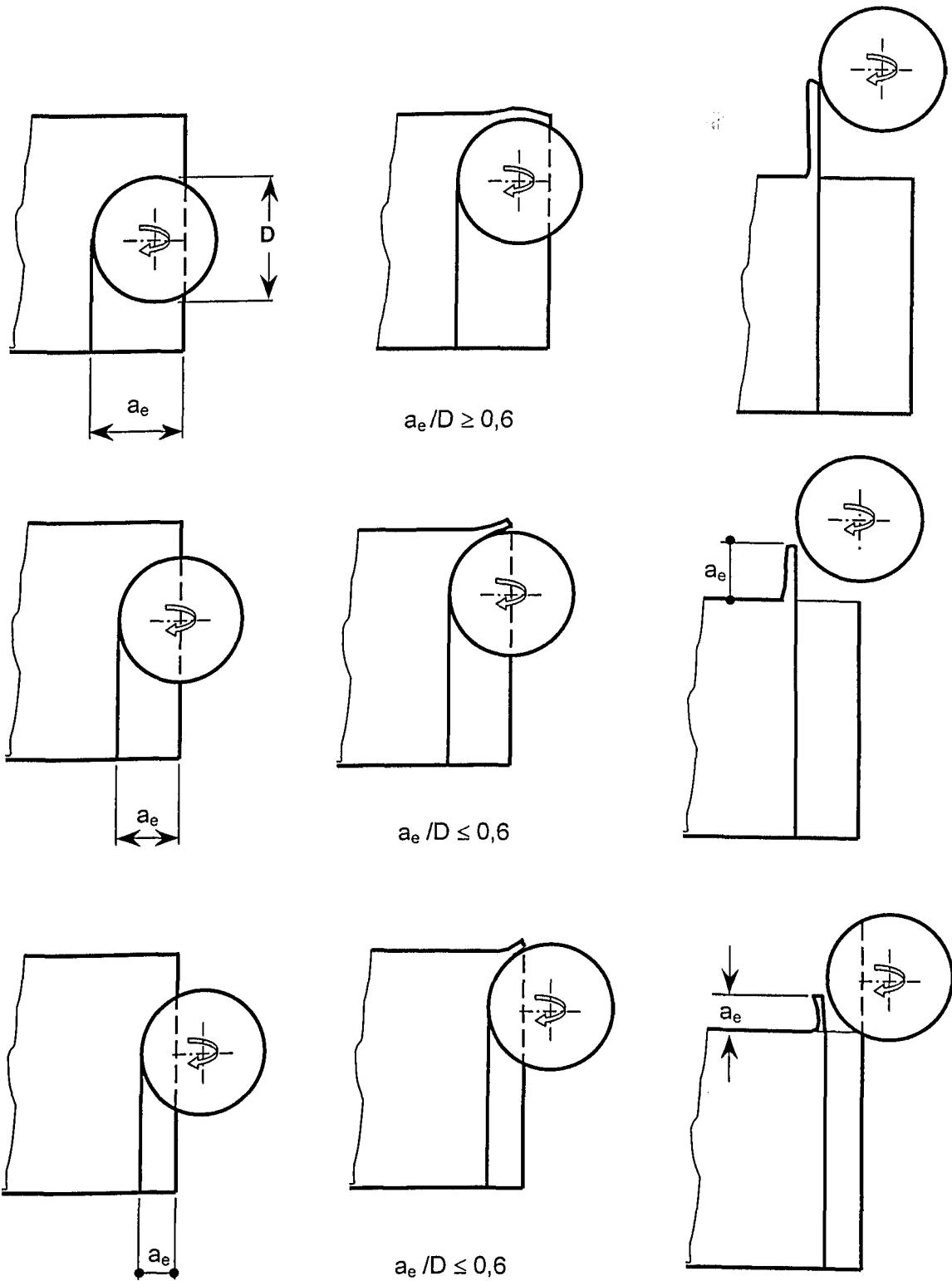


Figura 2.28 - Representação da influência da espessura de trabalho a_e na formação de rebarba 5 (rebarba de encurvamento) - Gillespie, 1973.

Kishimoto *et al.* (1981), analisaram a formação da rebarba 9 no fresamento frontal sob condições de acabamento e verificaram que alterações nas condições de corte podem levar à

ruptura em sua seção transversal mais fina, reduzindo o comprimento da rebarba remanescente. Chamaram a rebarba 9 sem esta ruptura por *rebarba primária* e a rebarba resultante da ruptura de *rebarba secundária*, o que está ilustrado na Figura 2.30. Segundo Olvera e Barrow (1998), a rebarba 9 geralmente é o tipo de rebarba de fresamento mais difícil de ser removida pois é significativamente longa e muito resistente. Chern e Dornfeld (1996), observaram que três formas distintas de rebarba primária podem-se formar: rebarba tipo faca (knife-type burr), rebarba tipo onda (wave-type burr) e rebarba tipo anelada (curl-type burr).

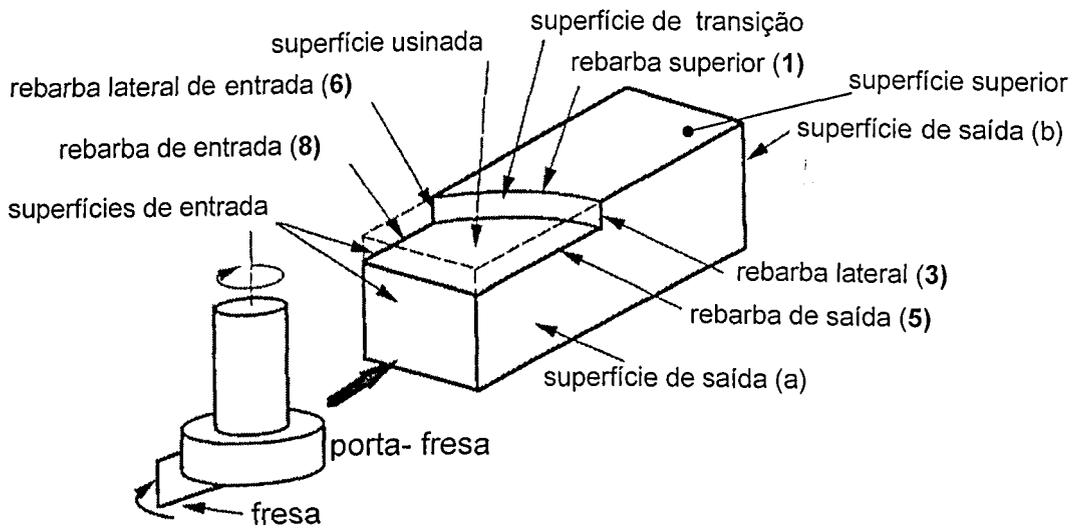


Figura 2.29 - Representação das bordas de formação de rebarbas no fresamento e suas respectivas denominações (Hashimura *et al.*, 1999b).

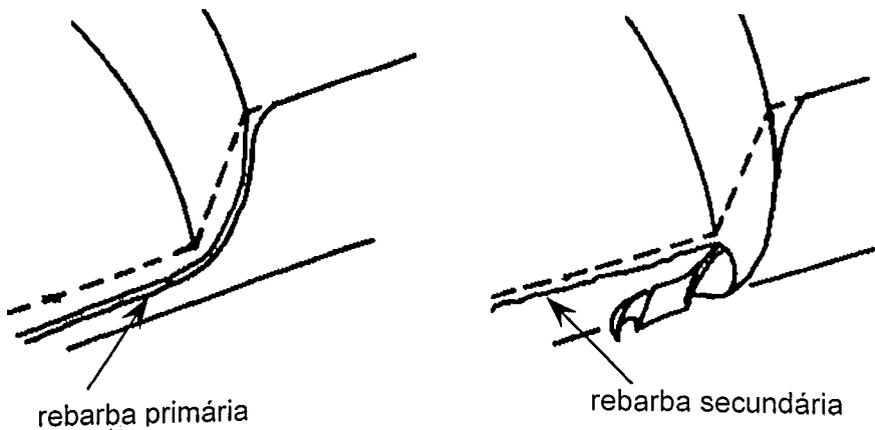


Figura 2.30 - Ilustração de rebarba primária e rebarba secundária formada no fresamento frontal (Kishimoto *et al.*, 1981).

Os estudos de Kishimoto *et al.* (1981), Olvera e Barrow (1996) e Chern e Dornfeld (1996) sobre a formação da rebarba 9 indicaram que a transição entre rebarba primária para rebarba secundária é afetada principalmente pela profundidade de corte a_p , pela geometria da ferramenta como raio de ponta r_n , e ângulo de saída da ferramenta de corte da peça θ .

O ângulo de saída da ferramenta da peça θ é definido como o ângulo entre o vetor velocidade de corte e a superfície de saída da ferramenta do corte, Figura 2.31. Olvera e Barrow (1996) citando Schafer, e Soares Filho (1995) citando artigo da SME, afirmam que quando o ângulo de borda da peça, que é o suplementar do ângulo de saída do corte, é superior a 150° não há mais formação de rebarbas, como ilustrado na Figura 2.18. Segundo Pekelharing (1978), há a formação de uma rebarba resistente e cumulativa entre cortes consecutivos, para ângulo de saída θ entre 115° e 120° .

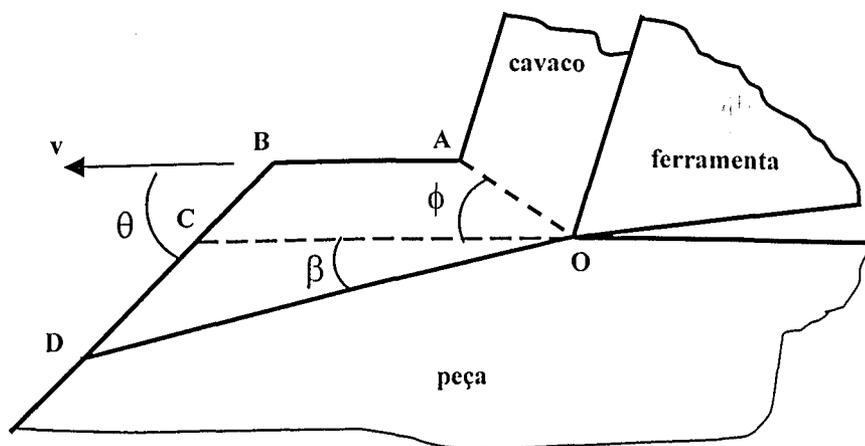


Figura 2.31 - Ilustração da localização do ângulo de saída da ferramenta da peça θ (Olvera e Barrow, 1998).

2.7.3 - Formação de rebarbas na furação

As rebarbas do processo de furação podem ser formadas segundo os mecanismos de rebarba Poisson, rebarba de estiramento e rebarba de encurvamento. A rebarba na entrada de furos é rebarba de estiramento enquanto que, para furo passante, pode-se formar rebarba de encurvamento ou rebarba Poisson na saída da broca (Gillespie, 1973).

Para uma operação de furação em cheio, o corte inicia-se com o contato entre a aresta transversal da broca e a peça. A pressão exercida pela broca e o ângulo de saída caracteristicamente negativo na região da aresta transversal produzem a deformação lateral de material em relação a esta aresta, em forma circular. Com o avanço e rotação da ferramenta, esse material é removido pelas arestas de corte até que a largura de corte (ou profundidade de

corte a_p) tenha a dimensão do raio da broca. Nessa fase do processo, quando o furo atinge o diâmetro da broca, as pontas de corte começam a atuar na formação do cavaco. O material que, à frente da aresta de corte sofre cisalhamento, nos cantos da broca é forçado pela ferramenta a mover-se para a sua superfície de saída o que provoca o seu estiramento em relação à superfície da peça. O estiramento progride até ocorrer a ruptura deste material num ponto entre o cavaco e a peça. O material estirado que permanece na peça é a rebarba de estiramento na entrada do furo.

Para a furação em cheio passante, a rebarba desenvolvida na saída da broca é geralmente formada pelo mecanismo de rebarba de encurvamento. Observa-se que a ponta da broca não produz corte de material dado à quase ausência de rotação, principalmente, na proximidade do seu eixo axial onde a sua ação é a de empurrar o material devido à força axial.

Quando a ferramenta aproxima-se da superfície de saída do corte, a ponta da broca que empurra o material à sua frente, provoca o rompimento deste material e começa a deslocá-lo para fora de sua trajetória, através do seu estiramento radial (Gillespie, 1973). Ao final da saída da ponta da broca, o material deformado torna-se semelhante a um cilindro que tem o diâmetro da ferramenta sendo, portanto, a rebarba de encurvamento, como ilustra a Figura 2.32.

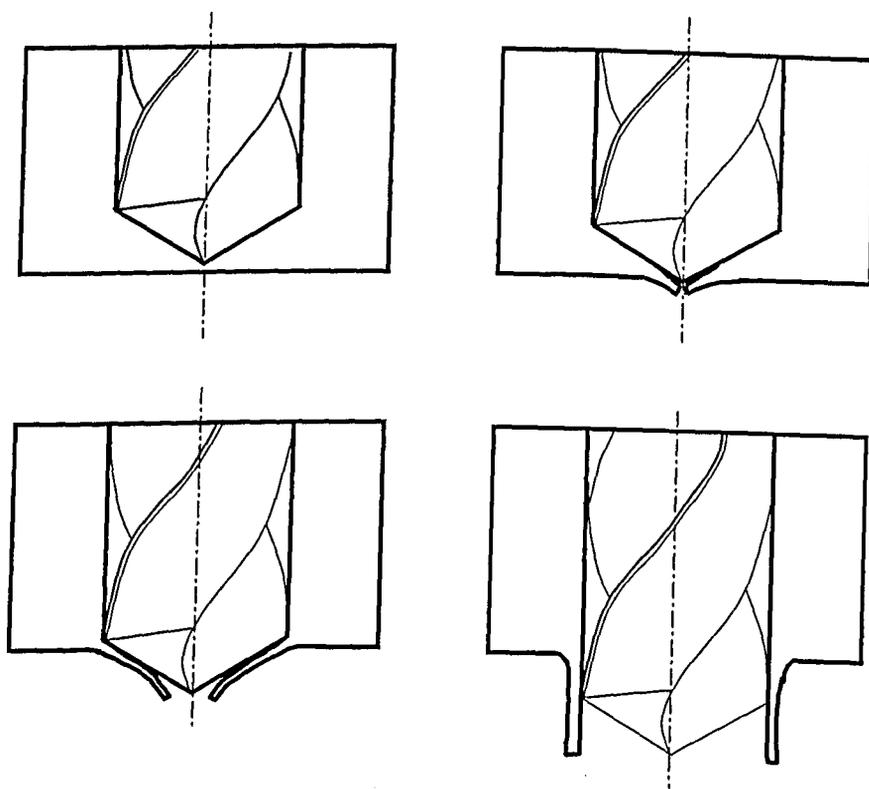


Figura 2.32 - Representação da formação de rebarba de encurvamento na furação em cheio passante, de material dúctil (Gillespie, 1973).

Gillespie (1973) afirma que, devido ao estiramento radial do material na formação desta rebarba ao invés de ser por estiramento circunferencial, ela é firmemente constituída na saída do furo o que dificulta a sua remoção.

A rebarba Poisson pode ocorrer na borda do furo na superfície de saída, quando a broca remove todo o material durante sua saída da peça, ou seja, quando não há formação de rebarba de encurvamento (Gillespie, 1973), como pode ocorrer quando se usa a pré-furação. Nesse caso, no último passe da broca a aresta de corte produz a formação de rebarba Poisson na borda do furo devido à extrusão de material à sua frente, como discutido no item 2.2.1.

Em sua investigação, Gillespie (1973) verificou que o comprimento das rebarbas formadas na furação de material dúctil, na entrada do furo e na sua saída, são diretamente influenciadas pelo ângulo de hélice da broca, ângulo de ponta e avanço. Pode-se sugerir, da observação da formação de rebarbas no torneamento e no fresamento, que a ductilidade do material contribui para o aumento da altura das rebarbas na entrada e na saída do furo.

Na análise de rebarbas de furação, o primeiro fator a considerar deve ser a pressão axial, ou força axial, exercida pela broca (Gillespie, 1973). A variação do avanço f conduz à variação direta da força axial (força de avanço F_f) e, portanto, sobre a formação de rebarbas. Qualquer modificação nas condições de corte que produzam uma redução do avanço f , ou força axial F_f , deverá reduzir o tamanho da rebarba, conseqüentemente. Segundo Soares Filho (1995), os parâmetros de usinagem podem provocar elevadas forças no processo de furação e produzir rebarbas na saída do furo com altura superior ao raio do furo.

Deve-se observar que a formação de rebarbas na furação desenvolve-se na direção de avanço da ferramenta como na maioria das operações de torneamento enquanto que em outros processos, como no fresamento, esta ocorre, também, devido ao movimento de corte.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, apresentam-se os procedimentos experimentais utilizados neste trabalho onde se verificam os efeitos dos parâmetros de corte v_c , f , a_p e χ_r sobre as características das rebarbas formadas. O estudo foi realizado com aço carbono ABNT 1045 usinado por torneamento cilíndrico externo com ferramentas de metal duro, sem aplicação de fluido de corte. Embora a utilização deste material seja geralmente feita com fluido de corte aplicado sobre-cabeça, optou-se por iniciar este estudo com usinagem a seco deixando a utilização de fluido para uma etapa posterior. As rebarbas foram analisadas medindo-se a altura, a espessura e a microdureza.

O torneamento foi utilizado porque é uma operação de corte muito empregada pela indústria na fabricação de peças e elementos de máquinas, e porque há poucos trabalhos disponíveis sobre a formação de rebarbas nessa operação. Além disso, trata-se de um procedimento de usinagem simples que utiliza uma ferramenta monocortante e permite o controle satisfatório sobre os parâmetros de corte envolvidos.

Utilizou-se o torneamento cilíndrico externo desenvolvido sobre todo o comprimento da superfície cilíndrica dos corpos-de-prova (*cp*) com o objetivo de se verificar a formação de rebarbas em duas regiões definidas: na borda onde a ferramenta inicia o corte e na outra, onde ela sai do *cp* ao final do corte.

Os testes foram desenvolvidos e realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - LEPU, no Laboratório de Metrologia e no Laboratório de Tribologia e Materiais - LTM, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU.

A máquina-ferramenta utilizada é um torno mecânico IMOR modelo MAXI-II-520, com potência máxima de 4,42 kW (6,0 CV). Suas características operacionais são 12 rotações, entre 28 rpm e 1400 rpm, e 20 avanços longitudinais, entre 0,095 mm/volta e 1,939 mm/volta. A resolução do ajuste de penetração transversal da ferramenta, ou de profundidade de corte a_p , é de 0,05 mm no diâmetro, por divisão do colar.

3.1 - Material usinado

O material selecionado para estudo é o aço carbono ABNT 1045 com dureza média de

206 HV. Na Tabela 3.1 é apresentada a composição química deste aço, fornecida pelo fabricante Aços Villares S.A. Na Figura 3.1 é mostrada uma fotografia da sua microestrutura (Reis, 2000).

Na escolha deste material para o trabalho, as suas propriedades mecânicas e a sua grande utilização em usinagem na indústria foram fatores determinantes. A literatura afirma que os materiais dúcteis apresentam tendência em formar rebarbas nos processos de usinagem o que vem atender aos objetivos do trabalho.

Tabela 3.1 – Composição química (%em massa) do material utilizado nos ensaios (Reis, 2000).

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	P	S
0,48	0,24	0,70	0,10	0,07	0,02	0,04	0,027	0,024	0,020



Figura 3.1 – Fotografia ilustrativa da microestrutura do aço ABNT 1045 utilizado nos testes (ampliação - 340 vezes), (Reis, 2000).

3.2 - Ferramentas de corte

Como ferramentas de corte, foram utilizados insertos de metal duro revestidos com TiN com especificação ISO SNMG 120408 da classe P40. Nos ensaios, utilizou-se de um porta-ferramentas especificado por ISO PSSNR 2020 K12. As características operacionais

recomendadas para estas ferramentas são: a_p – 0,5 a 4,0 mm, v_c – 265 a 405 m/min, e f – 0,15 a 0,5 mm/volta.

Este conjunto porta-ferramentas e inserto fornece a seguinte geometria de cunha cortante: $\gamma_o = 7^\circ$, $\alpha_o = 11^\circ$, $\chi_r = 45^\circ$ e $r_n = 0,8$ mm.

3.3 - Parâmetros de corte - v_c , f , a_p , χ_r

Os parâmetros de corte v_c , f e a_p foram escolhidos para a realização deste estudo uma vez que a variação dos mesmos no processo de corte tem influência sobre a formação de rebarbas, conforme relatam Gillespie e Blotter (1976).

O último dos parâmetros investigados, o ângulo de posição principal χ_r , foi selecionado por interferir diretamente na geometria do corte através da alteração da seção do cavaco.

Os valores desses parâmetros foram escolhidos considerando-se as limitações impostas pela usinabilidade do material e pelas capacidades da máquina-ferramenta e da ferramenta de corte. Na Tabela 3.2 estão apresentados os valores dos parâmetros utilizados nos ensaios.

Tabela 3.2 – Valores dos parâmetros de corte utilizados nos ensaios

v_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	χ_r (graus)
93	0,138	0,50	20°
115	0,215	0,75	45°
144	0,323	1,00	70°
185	0,431	1,50	85°
231	0,554	2,00	
288	0,646		

As velocidades de corte v_c foram escolhidas preocupando-se, também, em evitar a formação de APC. A usinagem em presença de APC modifica a geometria da aresta de corte da ferramenta e influencia na formação de rebarbas, (Nakayama e Arai, 1987). A usinagem do aço carbono ABNT 1045 com ferramentas de metal duro revestidas pode levar à formação de APC para v_c entre 65 m/min e 80 m/min, (Machado e da Silva, 1998). Os valores de f e de a_p foram selecionados de acordo com as especificações da ferramenta de corte.

O ângulo de posição principal χ_r teve seus valores escolhidos conforme a geometria do conjunto porta-ferramentas e inserto, entre 0° e 90°.

Procurou-se dividir as faixas de parâmetros de corte em intervalos aproximadamente iguais contendo um número de pontos que permitisse uma amostragem homogênea e

significativa sobre o intervalo estudado.

Os ensaios foram planejados procurando-se reduzir a quantidade de testes, com o menor número de variáveis a serem analisadas. Foram agrupados conforme o parâmetro de corte variado, como mostra a Tabela 3.3 que apresenta a planilha dos experimentos realizados.

Nos ensaios de 1 a 6 variou-se v_c , de 7 a 11 variou-se f , de 12 a 16 variou-se a_p e de 17 a 19 variou-se χ_r . Durante a variação de um parâmetro os demais foram mantidos constantes, com os seguintes valores: $v_c = 185$ m/min, $f = 0,215$ mm/volta, $a_p = 1,0$ mm e $\chi_r = 45^\circ$.

Tabela 3.3 - Condições de corte utilizadas nos testes experimentais.

ensaio	v_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	χ_r (graus)
1	93	0,215	1,0	45°
2	115	0,215	1,0	45°
3	144	0,215	1,0	45°
4	185	0,215	1,0	45°
5	231	0,215	1,0	45°
6	288	0,215	1,0	45°
7	185	0,138	1,0	45°
8	185	0,323	1,0	45°
9	185	0,431	1,0	45°
19	185	0,554	1,0	45°
11	185	0,646	1,0	45°
12	185	0,215	0,50	45°
13	185	0,215	0,75	45°
14	185	0,215	1,00	45°
15	185	0,215	1,50	45°
16	185	0,215	2,00	45°
17	185	0,215	1,0	20°
18	185	0,215	1,0	70°
19	185	0,215	1,0	85°

Antes de cada ensaio, os parâmetros ajustados na própria máquina, como o avanço f e a rotação, e aqueles que dependem da ajustagem do operador como a_p e χ_r , foram conferidos através de instrumentos de medição adequados.

3.4 - Preparação dos corpos-de-prova (cp)

Neste trabalho utilizou-se de corpos-de-prova (cp) cilíndricos para a realização dos testes. O modelo dos cp utilizados foi desenvolvido após a realização de ensaios preliminares.

3.4.1 - Ensaios preliminares

Foram realizados testes preliminares com o primeiro modelo de *cp* concebido com o objetivo de se verificar a eficiência dos procedimentos adotados para os ensaios e para a análise das rebarbas encontradas. Na Figura 3.2, apresenta-se o desenho e as dimensões do protótipo de *cp* usado nesta etapa.

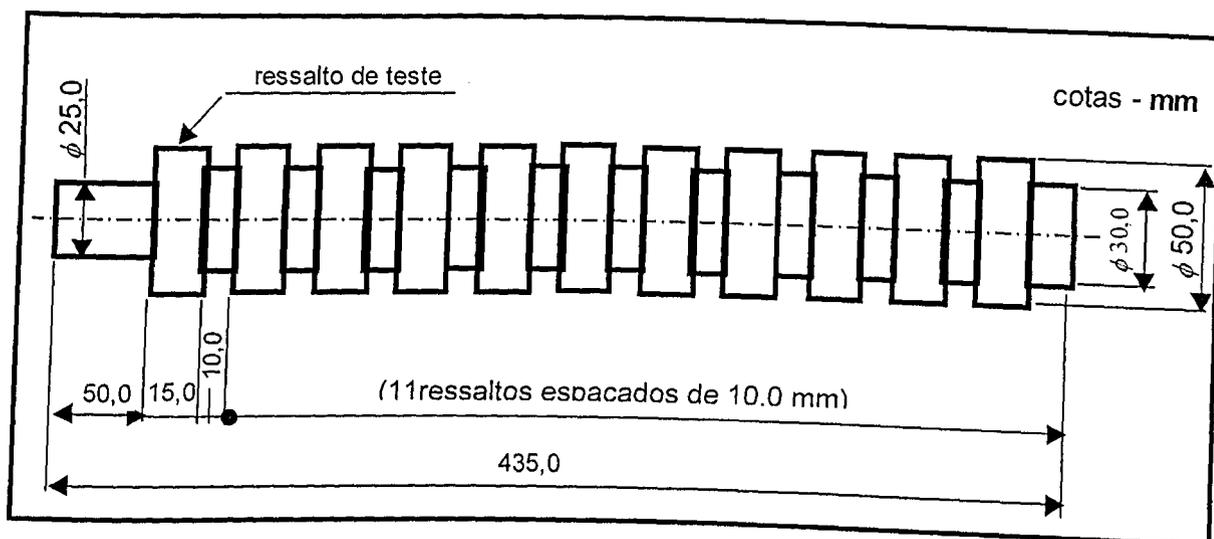


Figura 3.2 - Desenho do corpo-de-prova utilizado nos ensaios preliminares, e respectivas dimensões.

Após a execução destes ensaios, pôde-se concluir que:

- o torneamento cilíndrico externo em todo o comprimento do ressalto de teste leva à formação de rebarbas nas regiões de entrada e de saída da ferramenta do *cp*, em todos os testes.
- não é possível efetuar-se medições das rebarbas no próprio *cp* como o da Figura 3.2, utilizando-se de qualquer equipamento ou instrumento de medição proposto inicialmente.
- um *cp* com esta concepção deve ter um afastamento entre os raios de teste que permita a utilização de ferramenta de corte (lâmina de serra manual) para a retirada de amostras para preparação de corpos-de-prova metalográficos.
- na usinagem de rebaiços no *cp*, formando os raios de teste, há muita perda de material na forma de cavaco,
- para a medição das dimensões das rebarbas no *cp* ensaiado é necessário o desenvolvimento de um modelo que permita a sua inspeção nos equipamentos de medição e a utilização de instrumentos de medição.

A partir das observações sobre os ensaios preliminares realizados com o *cp* mostrado na Figura 3.2, desenvolveu-se o modelo que foi usado definitivamente no trabalho.

3.4.2 - Corpos-de-prova *cp* - modelo utilizado

O *cp* projetado a partir das observações feitas anteriormente tem como características um formato de disco com diâmetro externo $\phi = 100,0$ mm e comprimento $l = 10,0$ mm, para ser utilizado com um suporte de usinagem ao qual deve ser fixado através do furo central de diâmetro $\phi = 25,4$ mm.

Este modelo de *cp* tem o objetivo de permitir a sua rápida substituição após cada ensaio, facilitar o manuseio e a montagem do ensaio em caso de eventual repetição do teste, reduzir a quantidade de material de teste a ser utilizada com a diminuição do volume de cavaco por *cp* preparado, permitir a medição da altura no próprio *cp* e simplificar a preparação de corpos-de-prova metalográficos. Na Figura 3.3, apresenta-se o desenho do *cp* utilizado com as respectivas dimensões.

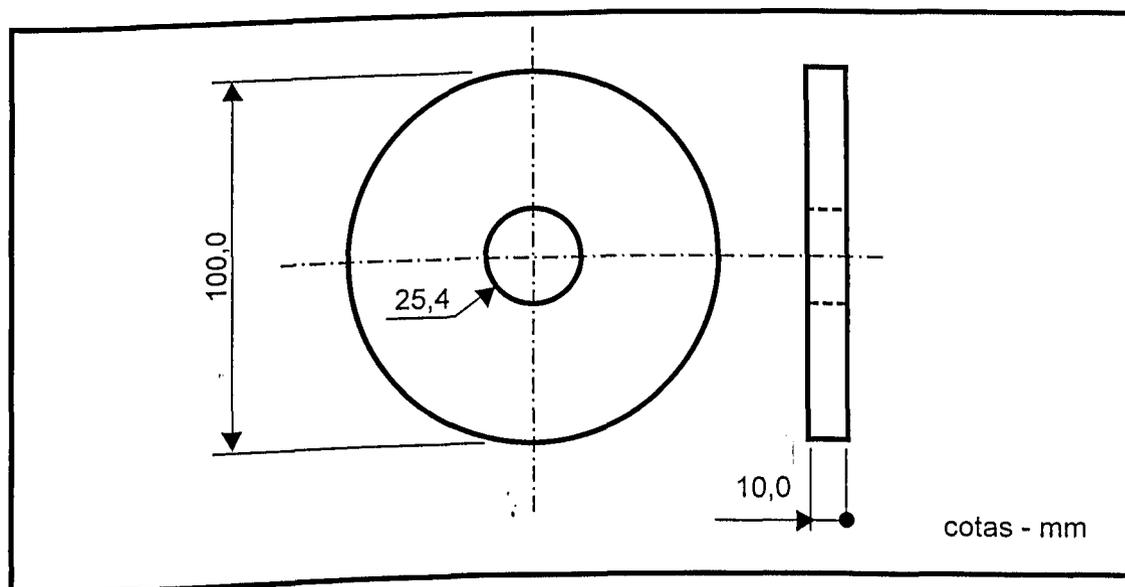


Figura 3.3 – Desenho do corpo-de-prova utilizado nos ensaios e suas dimensões básicas.

A dimensão do diâmetro externo $\phi = 100,0$ mm permite a redução da quantidade de material removido da matéria-prima (uma barra redonda com diâmetro de 101,6 mm), além de levar à seleção de v_c executáveis na máquina ferramenta disponibilizada. A escolha do comprimento $l = 10,0$ mm também teve o objetivo de reduzir a quantidade de material gasto nos ensaios, após a verificação de que é uma dimensão que oferece segurança na preparação dos *cp*, na realização dos ensaios e não interfere na análise das rebarbas.

Na fabricação dos *cp*, empregam-se as seguintes etapas e operações de corte:

1 - corte dos *blanks* em serra alternativa mecânica, com espessura aproximada de 12,0 mm, a partir de uma barra de seção circular.

- 2 - remoção manual das rebarbas de corte dos *blanks*, com lima manual ou esmeril.
- 3 - faceamento de uma das faces do *blank* no torno mecânico.
- 4 - execução do furo central de diâmetro $\phi = 25,4$ mm usando-se de brocas, no torno.
- 5 - conclusão da preparação do *cp* com o faceamento da outra face do *blank*.

Para as etapas de preparação do *cp* no torno, são necessárias duas fixações do *blank*: Na primeira, faz-se um faceamento e a seguir a furação. Na segunda fixação, executa-se o último faceamento. Nesse estágio da preparação do *cp*, o diâmetro externo é mantido em bruto e o mesmo é ajustado somente na fixação final para execução do próprio ensaio.

3.4.3 - Suporte de usinagem

Um suporte de fixação do *cp* para o ensaio, o suporte de usinagem, foi fabricado em aço carbono ABNT 1020 para ser utilizado na realização dos testes. É utilizada porca sextavada e arruela para a fixação do *cp* nesse suporte, e a sua montagem no torno é feita através da sua fixação na placa e uso do contra-pontas da máquina.

Procurou-se evitar uma possível flexão do conjunto (suporte de usinagem / *cp*) devido às forças de usinagem, utilizando-se de um suporte de comprimento reduzido mostrado na Figura 3.4a. Entretanto, verificou-se que esse dispositivo deve fornecer um afastamento adequado entre o *cp* e a placa do torno para permitir o fluxo e a manipulação dos cavacos, principalmente aqueles do tipo contínuo, para evitar que possam danificar a borda de saída da ferramenta do corte, onde ocorre formação de rebarbas. Além disso, um afastamento maior entre o *cp* e a placa permite melhores condições de operação da máquina-ferramenta dando ao operador mais segurança para controlar a operação durante o ensaio, principalmente quando forem realizados os ensaios em maiores velocidades de corte e maiores avanços.

Na Figura 3.4a, é mostrada a fotografia da montagem de um *cp* no torno após a execução de um ensaio. Nessa situação, com o primeiro dos suportes de usinagem, foram realizados os ensaios de 01 a 11 e verificou-se que o *cp* fica muito próximo da placa do torno. O suporte de usinagem utilizado nos demais ensaios é mostrado na fotografia da Figura 3.4b e foi fabricado com as dimensões do desenho da Figura 3.5.

3.4.4 - Ajuste do *cp* para o ensaio

Para a execução dos ensaios, foi necessário ajustar o diâmetro e a posição do *cp* após

a sua fixação definitiva no suporte de usinagem instalado na placa do torno. Para isso foram utilizados relógios-comparadores para a verificação de desvios de posicionamento, e de paquímetro para as medições necessárias.

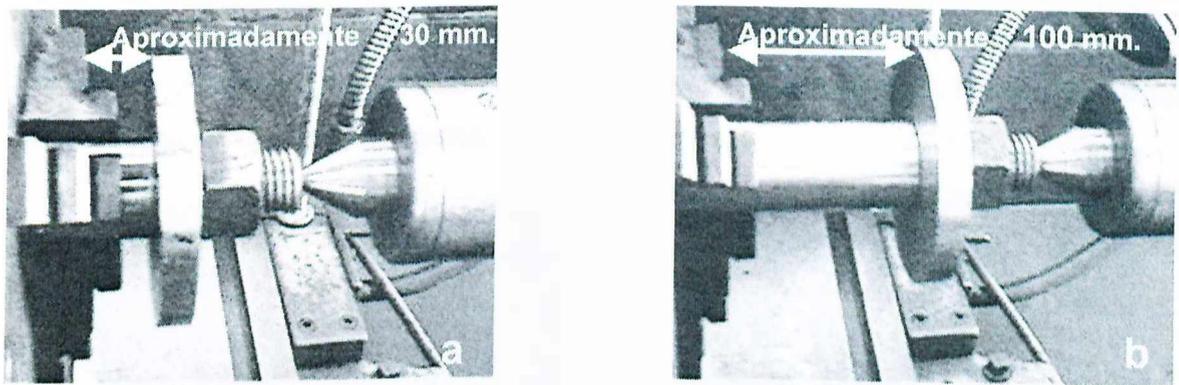


Figura 3.4 - Fotografia ilustrativa de montagens do *cp* de usinagem no torno: (a) suporte de fixação usado nos ensaios 01 a 11; (b) suporte de fixação utilizado nos ensaios 12 a 19.

Os desvios de posição do *cp* após a montagem, a excentricidade radial do *cp* e a excentricidade axial das superfícies anterior e posterior deste *cp*, foram verificados com relógio-comparador. A verificação dessas excentricidades na preparação de cada ensaio foi realizada para evitar que sejam fontes de possíveis variações nas dimensões das rebarbas formadas.

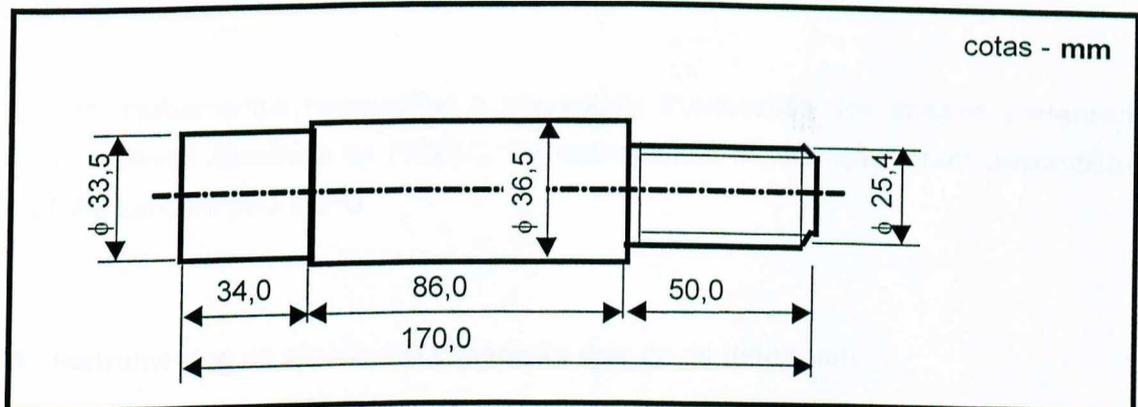


Figura 3.5 – Desenho do suporte de fixação de *cp*, e respectivas dimensões.

A Figura 3.6 ilustra a verificação de excentricidade radial e de excentricidade axial na superfície de entrada da ferramenta (superfície anterior do *cp*)

A eliminação das excentricidades verificadas e o ajuste necessário do diâmetro do *cp* foram realizados através de usinagem de acabamento após a montagem definitiva do conjunto suporte de usinagem/*cp*, no torno.

A seguir, verificou-se irregularidade nas superfícies e nas bordas do *cp* utilizando-se,

novamente, de relógio-comparador e base magnética. A eliminação das irregularidades superficiais e pequenas rebarbas existentes nas bordas, foi feita através de lixamento dos *cp* a seco, com lixas d'água de granulação 80 a 600, sem removê-los do torno e utilizando-se do movimento rotação da máquina.

O lixamento corretivo foi realizado até constatar-se uma indicação no relógio-comparador inferior a 0,01 mm, ao deslocar o seu apalpador sobre as superfícies do *cp* na direção perpendicular às suas bordas.

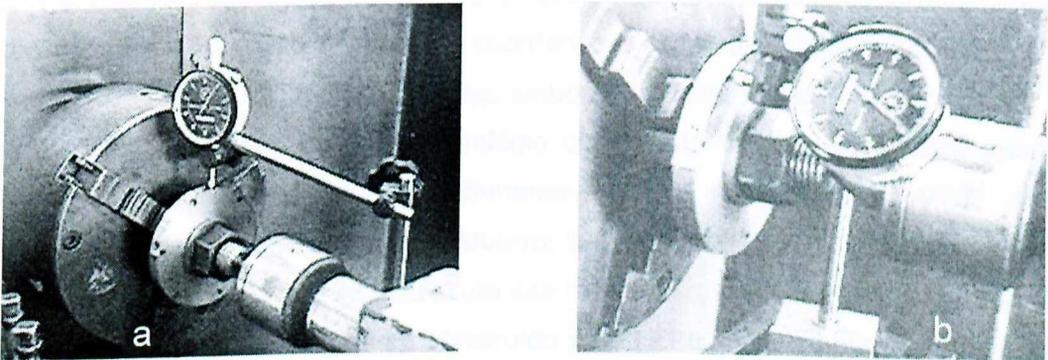


Figura 3.6 - Montagem utilizada para verificação do *cp* antes dos ensaios: (a) excentricidade radial, (b) excentricidade axial na superfície de entrada da ferramenta.

3.5 - Equipamentos utilizados

Os equipamentos necessários à preparação e execução dos ensaios pertencem ao LEPU e à Oficina Mecânica da FEMEC. Os instrumentos de medição foram disponibilizados pelo LTM e também pelo LEPU.

3.5.1 - Instrumentos de ajustagem e medição dos *cp* de usinagem

Foram utilizados relógios-comparadores Mitutoyo, com escala de 0 a 10 mm e resolução de 0,01 mm, montados em bases magnéticas para as verificações de posicionamento e de irregularidades superficiais dos *cp*. Esses instrumentos foram empregados, também, para a ajustagem de parâmetros de corte, especificamente, da profundidade de corte a_p .

As medições para ajustar o diâmetro inicial e verificar o diâmetro final do *cp* foram feitas com paquímetro quadrimensional Mitutoyo, com escala de 0 a 300 mm e resolução de 0,05 mm.

A rotação do *cp* foi verificada com um tacômetro digital óptico, Lutron, modelo DT-2236

e a ajustagem e verificação dos ângulos de posição principal χ_r foram feitas com um goniômetro de precisão Mitutoyo.

3.5.2 - Instrumentos e equipamentos para análise das rebarbas

A inspeção das rebarbas no *cp* usinado foi realizada no Laboratório de Metrologia da FEMEC. Para as verificações de espessura, utilizou-se de um microscópio ferramenteiro com ampliação óptica de 50 vezes e mesa de coordenadas com resolução de 0,001 mm; e de projetor de perfil, com ampliação de 200 vezes, ambos CarlzZeiss Jena.

A medição da altura foi feita com relógio comparador e base magnética montados, primeiramente, naquele microscópio ferramenteiro como mostrado na Fig. 3.7a, e posteriormente, em um suporte específico Mitutoyo, ilustrado na Fig. 3.7b.

Nas medições de altura e de espessura das rebarbas realizadas nos *cp* metalográficos, utilizou-se do microscópio ferramenteiro construído pelo LEPU, com ampliação óptica de 200 vezes e resolução de 0,01 mm. Uma câmera digital CASIO QV-70 foi utilizada na obtenção de imagens digitais das rebarbas através de sua instalação na ocular do microscópio ferramenteiro do LEPU.

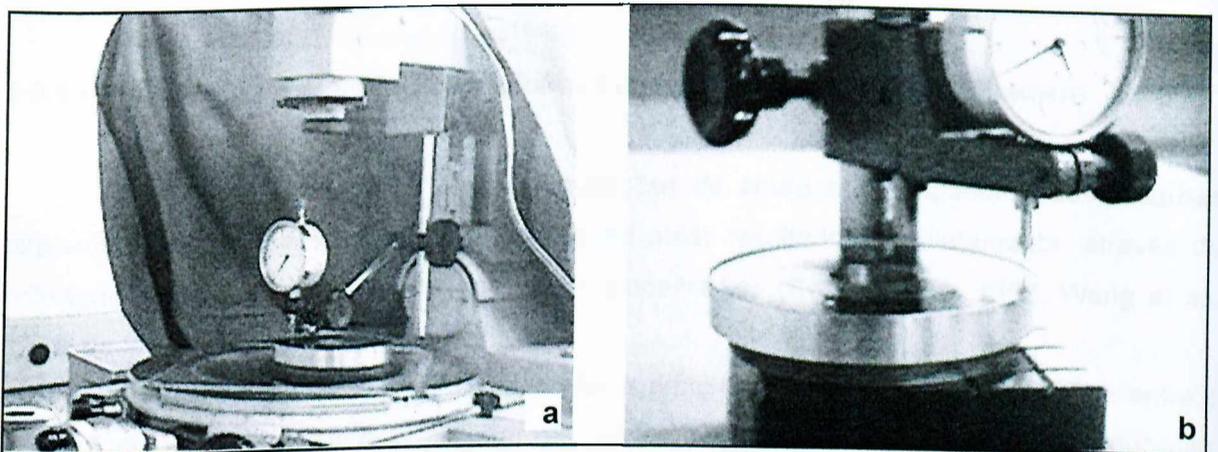


Figura 3.7 – Montagem utilizada para medição de altura de rebarbas diretamente no *cp* com relógio comparador, (a) em microscópio ferramenteiro; (b) em suporte específico Mitutoyo.

Outras imagens digitais de rebarbas nos *cp* metalográficos foram feitas em um analisador de imagens IMAGE PRO-PLUS acoplado a um banco metalográfico NEOPHOT 21 CarlzZeiss. Também se obteve imagens das rebarbas no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Utilizou-se, ainda, dos recursos fotográficos do banco metalográfico NEOPHOT 21 para a observação e obtenção de fotografias convencionais das rebarbas, e de um micro-durômetro CalzZeiss para a medição da microdureza, todos equipamentos pertencentes ao Laboratório de Tribologia e Materiais – LTM.

3.6 - Inspeção e medição das rebarbas

Após a execução dos ensaios fez-se a inspeção visual dos *cp* usinados para verificar a ocorrência e a localização de rebarbas. Constatou-se a sua formação em duas localizações específicas: na borda formada pela interseção das superfícies anterior e a de trabalho, onde a ferramenta inicia o corte do *cp*; e na borda formada pela interseção desta superfície de trabalho e a superfície posterior, onde a ferramenta sai do *cp* quando o corte termina.

Neste trabalho, estas rebarbas são identificadas por rebarba de entrada e rebarba de saída, respectivamente. A Figura 3.8 ilustra a localização das rebarbas encontradas.

As características dimensionais das rebarbas, altura e espessura, foram medidas diretamente no *cp* de usinagem e nos *cp* metalográficos.

3.6.1 - Medição das dimensões das rebarbas nos corpos-de-prova de usinagem

Inicialmente, procurou-se fazer as medições de altura e de espessura das rebarbas diretamente nos *cp* usinados com o objetivo de obter resultados imediatamente, através da utilização de métodos usados em aplicações semelhantes (Soares Filho, 1995; Wang *et al.*, 1996, de Souza Jr, 2001).

Para a medição da espessura optou-se, a princípio, pelo melhor desempenho entre o microscópio ferramenteiro e o projetor de perfil. Verificou-se, entretanto, que ambos os equipamentos não são adequados para esta aplicação porque as rebarbas têm perfil irregular, apresentando arredondamento ao pé e seção irregular no perfil longitudinal. A falta de visualização em profundidade dificulta a determinação da espessura com precisão.

Essa irregularidade de perfil impediu também, a utilização de instrumentos de medição por contato, como paquímetros e micrômetros. Em ambos os instrumentos, os apalpadores são deslocados transversalmente à altura da rebarba e por isso, um perfil irregular fornece uma espessura aparente, que é maior do que a real, ou não permite a medição na raiz da rebarba.

A medição da altura das rebarbas no próprio *cp* usinado foi feita utilizando-se de um

relógio comparador e seu suporte de fixação específico, como mostrado na Figura 3.7b. Observou-se que os valores das medições feitas desta maneira e com um relógio comparador montado no microscópio ferramenteiro para utilizar os recursos de deslocamento da mesa de coordenadas XY, Figura 3.7a, apresentam resultados idênticos. Optou-se, então, por empregar o primeiro destes procedimentos para medir a altura de rebarbas diretamente no *cp*.

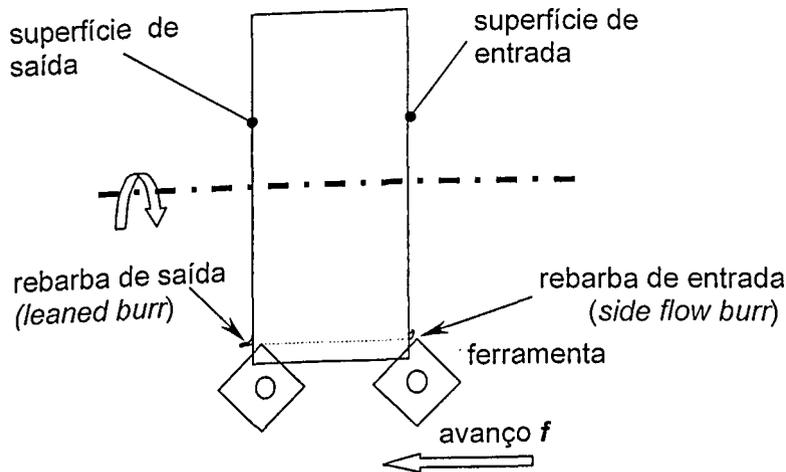


Figura 3.8 - Representação esquemática da localização das rebarbas observadas neste trabalho.

O valor efetivo da altura das rebarbas obtido no *cp* usinado é o resultado da média aritmética de medições feitas em seis posições separadas por 60°.

3.6.2 - Medição das dimensões e da microdureza das rebarbas nos corpos-de-prova metalográficos

A verificação de que a irregularidade de perfil das rebarbas impede a medição eficaz de suas dimensões com os métodos citados acima conduziu à preparação de *cp* metalográficos, como é sugerido em Stein e Dornfeld (1997) e Olvera e Barrow (1998).

Esse recurso permitiu a análise microscópica das rebarbas o que possibilitou a realização de medições da espessura e também da altura, além de permitir a extensão da investigação para a medição da microdureza e a observação da microestrutura do material na região de formação das rebarbas.

A medição de altura e espessura das rebarbas usando *cp* metalográficos foi feita no microscópio ferramenteiro do LEPU, com cabeçote micrométrico de resolução 0,001 mm. Na medição da espessura considerou-se a raiz da rebarba como a sua espessura significativa já

que em um processo de rebarbação é a porção que deve ser removida para se obter o acabamento superficial e a tolerância dimensional de projeto (Wang *et al.*, 1996).

A dureza do material na raiz das rebarbas foi medida através da medição de microdureza Vickers com uma carga de 10 gramas. As identações produzidas foram medidas no analisador de imagens acoplado ao banco metalográfico.

3.7 – Preparação dos corpos-de-prova metalográficos.

A necessidade da preparação de corpos-de-prova metalográficos para medição eficiente da espessura, observação da microestrutura e medição da microdureza das rebarbas conduziu ao manuseio cuidadoso dos *cp* usinados para se preservar a integridade das características geométricas das rebarbas. Esse cuidado foi tomado durante o corte feito para a retirada dos pedaços que foram usados nos embutimentos e também na escolha de um método de embutimento a frio, sem pressão, por meio do uso de uma resina de acrílico auto polimerizante.

Na preparação dos *cp* metalográficos, as amostras dos *cp* usinados foram dispostas longitudinalmente no interior de pedaços de tubo de aço galvanizado (diâmetro de 25,4 mm) e totalmente envolvidas pela resina de acrílico que foi introduzida ainda liquefeita.

Após a solidificação da resina, executou-se um corte transversal destes embutimentos para se obter os *cp* metalográficos. A resistência mecânica da resina foi adequada à preservação das características geométricas das rebarbas.

Os *cp* metalográficos permitiram a visualização dos perfis transversais das rebarbas de entrada e de saída, como mostrado nas Figuras 4.13 e 4.16, bem como a realização de ensaios metalográficos sobre os mesmos.

As medições da altura e espessura das rebarbas foram realizadas no microscópio ferramenteiro após lixamento e polimento final destes *cp*.

Para a observação e a obtenção de fotografias da microestrutura, como mostrada na Figura 3.9, fez-se o polimento com pasta de diamante de granulação 5 μ e o ataque químico com Nital 2%.

A análise da microestrutura mostrou uma região de grande deformação localizada na raiz da rebarba de saída o que despertou o interesse pela medição da microdureza nesta região. Essa medição exigiu a repetição de lixamento e polimento com pasta de diamante 5 μ para se eliminar as marcas do ataque químico o que, de outra forma, não permitiria a perfeita visualização das identações produzidas.

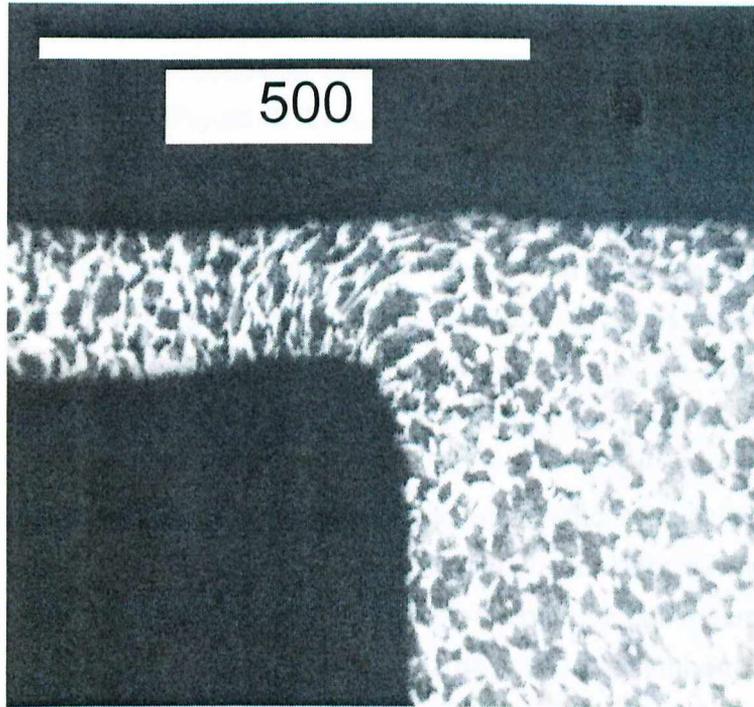


Figura 3.9 - Microestrutura de raiz da rebarba de saída obtida do ensaio nº 14 no analisador de imagens – ataque com Nital 2%.

3.7.1 – Procedimento para a medição da microdureza na raiz da rebarba de saída

A microdureza foi medida em aproximadamente 30 posições diferentes nos *cp* metalográficos de rebarba de saída, como está ilustrado na Figura 3.10. Foram realizadas as medições para todos os *cp* da Tabela 3.5, aplicando-se uma carga de 10 gramas.

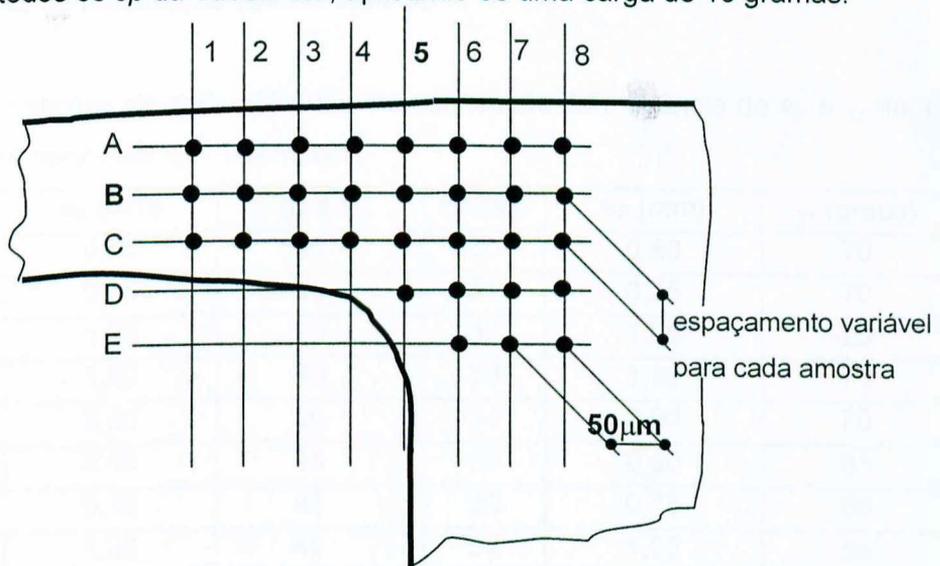


Figura 3.10 - Representação das posições de indentações na raiz de rebarba de saída, para a medição da microdureza.

A padronização das medições foi estabelecida utilizando-se a reta horizontal B e a reta vertical 5 como referenciais, Figura 3.10. A reta horizontal B foi fixada aproximadamente no eixo longitudinal do perfil da rebarba. Já a reta vertical 5 , por outro lado, é a reta tangente à face lateral do cp e situada o mais próximo possível da espessura da raiz da rebarba.

O afastamento aplicado entre as retas verticais foi de aproximadamente $50\ \mu\text{m}$ através do deslocamento micrométrico da mesa do microdurômetro. Entre as retas horizontais utilizou-se um espaçamento determinado visualmente, de forma que as retas A e C ficassem equidistantes da reta referencial B e afastadas das bordas das rebarbas. Procurou-se aplicar este mesmo espaçamento para as retas horizontais D e E .

As medidas em cada amostra foram iniciadas pelo ponto $B5$ evoluindo, a seguir, para os demais pontos sobre a reta B . Repetiu-se este procedimento para as medições sobre cada uma das demais retas horizontais, sempre iniciando pelo ponto 5 das mesmas. Desta forma, as medições de microdureza foram realizadas na raiz da rebarba e também na região próxima a esta, no material menos afetado pelas deformações, com o objetivo de comparar os seus respectivos valores e verificar a influência dos parâmetros de corte sobre esta propriedade.

3.8 - Ensaios para verificação do efeito da variação de a_p e χ_r

Realizaram-se 20 ensaios para verificar o efeito da interação da variação de a_p e de χ_r na altura da rebarba de entrada e da rebarba de saída. Nesse conjunto de ensaios manteve-se os demais parâmetros constantes (em f - $0,215\ \text{mm/volta}$ e v_c - $185\ \text{m/min}$). Na Tabela 3.4 apresentam-se as características desses ensaios.

Tabela 3.4 - Condições de corte utilizadas na verificação da influência de a_p e χ_r na altura da rebarba (f - $0,215\ \text{mm/volta}$; v_c - $185\ \text{m/min}$).

Ensaio	a_p (mm)	χ_r (graus)	Ensaio	a_p (mm)	χ_r (graus)
20	0,50	20	30	0,50	70
21	0,75	20	31	0,75	70
22	1,25	20	32	1,25	70
23	1,50	20	33	1,50	70
24	2,00	20	34	2,00	70
25	0,50	45	35	0,50	85
26	0,75	45	36	0,75	85
27	1,25	45	37	1,25	85
28	1,50	45	38	1,50	85
29	2,00	45	39	2,00	85

Foram aplicados os mesmos procedimentos utilizados anteriormente para a execução dos ensaios nº 20 ao nº 29, nas etapas de preparação dos *cp* de usinagem, na execução dos ensaios e na medição da altura das rebarbas. Estas medições foram desenvolvidas nos próprios *cp* usinados, em seis posições localizadas a cada 60°, através do procedimento que utiliza relógio comparador e que está ilustrado na Figura 3.7b.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em cada ensaio, foi realizado o torneamento cilíndrico externo em todo o comprimento do corpo de prova cp ($l = 10,0$ mm). Pôde-se observar a formação de dois tipos de rebarbas: um tipo formado na borda da superfície de entrada, e outro na borda da superfície de saída da ferramenta como ilustrado na figura 4.1. Neste trabalho, estas rebarbas foram denominadas de *rebarba de entrada* e *rebarba de saída*, respectivamente.

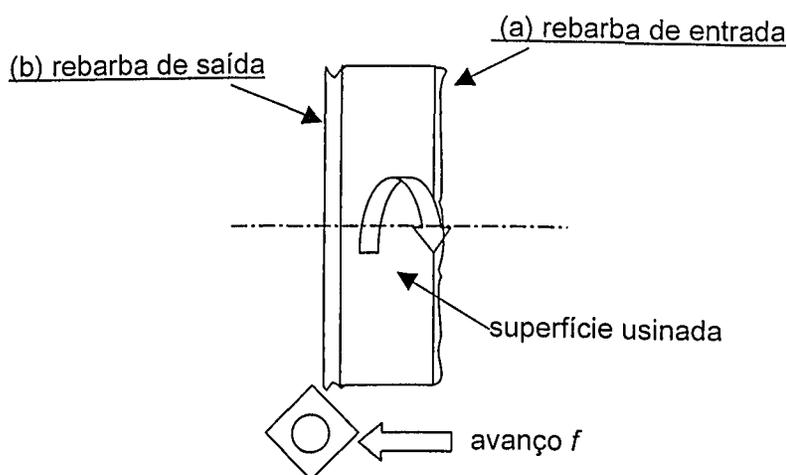


Figura 4.1 - Ilustração da formação de rebarbas observadas no torneamento cilíndrico externo.

Observou-se que os dois tipos de rebarba têm direção de projeção segundo a direção de avanço. A rebarba de saída projeta-se no sentido do avanço enquanto que a rebarba de entrada tem o sentido contrário deste.

4.1 - Formação da rebarba de entrada

As rebarbas de entrada observadas aqui foram identificadas por Gillespie (1973) como rebarba Poisson (*Poisson burr*). Segundo Nakayama e Arai (1987), esta rebarba de entrada é uma rebarba de fluxo lateral (*sideflow burr*).

A formação da *rebarba de entrada* pode ser analisada por meio dos mecanismos de rebarba Poisson explicados por Gillespie (1973) e discutidos no item 2.2.1. As rebarbas

Poisson são rebarbas produzidas por escoamento lateral de material devido ao efeito da compressão pela penetração de aresta de corte (Gillespie, 1973). Para explicar os mecanismos de formação deste tipo de rebarba, foi feita a analogia entre a aresta de corte, que mesmo afiada apresenta-se com um pequeno raio de arredondamento, e um cilindro fino e longo o qual é continuamente comprimido contra um bloco de material, conforme ilustração da Figura 2.6. Se o cilindro for mais longo do que bloco, após a sua penetração e durante o seu deslocamento através do material, ocorre uma formação de material na borda de contato do cilindro com a superfície livre, ao que foi chamado de rebarba Poisson. Essa formação pode ocorrer pelo deslocamento de material para a superfície livre, perpendicularmente à direção de penetração do cilindro (perpendicular à direção da velocidade de corte), ou devido ao fluxo de material da frente do cilindro para a direção paralela ao seu eixo axial, quando houver restrição ao escoamento desse material na direção radial. Ou seja, as características do material e as condições de corte podem criar elevada resistência ao deslocamento de material da frente do cilindro para a sua direção radial, direção do cavaco ou da peça, que escoar na direção menos restritiva que é a direção axial (Gillespie, 1973). Outro mecanismo que leva à formação de rebarba Poisson é o escoamento de material em torno de um corpo que o comprime. É um efeito semelhante ao abaulamento produzido em ensaios de dureza com indentadores esféricos, principalmente em materiais dúcteis.

O fluxo lateral de material, perpendicular à direção de corte que forma a rebarba de fluxo lateral (Nakayama e Arai, 1987), pode ser observado em riscos feitos em ensaios de esclerometria. A figura 4.2 mostra o perfil de uma superfície de alumínio usinada sob condições de corte especiais, por meio de ensaio em esclerômetro pendular com ferramenta de aço rápido. Foi utilizada uma profundidade de corte a_p aproximadamente de $100\mu\text{m}$. Conforme observado naquela figura, a altura da rebarba formada é de cerca de $120\mu\text{m}$. O material que forma a rebarba é o material deslocado pela ferramenta e também material deformado perpendicularmente à direção da velocidade de corte.

Considerando a ferramenta com uma aresta de corte arredondada ao invés de uma cunha afiada, quando ocorre o seu contato com a peça e, portanto, inicia-se o corte, o movimento é similar à ação de uma partícula dura deslizando contra um corpo rígido plástico, (Hokkirigawa e Kato, 1988). Três modos de deslizamento podem ser distinguidos: com usinagem, com formação de cunha, e com risco. O ângulo de saída, as condições da interface e a penetração da partícula determinam a transição entre elas (Sedriks e Mulhearn, 1963). Assim, do momento em que a ferramenta toca a peça até iniciar a usinagem ocorrem estes três modos de deslizamento, ou seja, é necessária uma penetração mínima da ferramenta para que o material seja usinado.

Na situação real dos ensaios, a aresta de corte comprime o material a partir do início do

contato da ferramenta com o cp , principalmente pela ação da força de avanço F_f (e da força passiva F_p), até ocorrer a penetração inicial. Nesta situação, passa a existir, também, uma parcela de compressão devido à força de corte F_c . De modo geral, não há corte durante o contato inicial da ferramenta com o material da peça. É necessária uma penetração mínima da ferramenta no material para que o cavaco comece a se formar, caso contrário, haverá somente atrito entre ferramenta e peça (Sugawara e Inagaki, 1982). Isso é provocado pelo aumento da tensão de compressão de zero até atingir o limite de resistência do material da peça e então iniciar o corte. O aumento da tensão de compressão até atingir o limite à ruptura ao cisalhamento, ultrapassa as fases de comportamento elástico e plástico do material e, portanto provoca a deformação permanente do mesmo na região de interação ferramenta/ cp . O mecanismo da rebarba Poisson é iniciado quando é estabelecida esta deformação na região de contato ferramenta/peça.

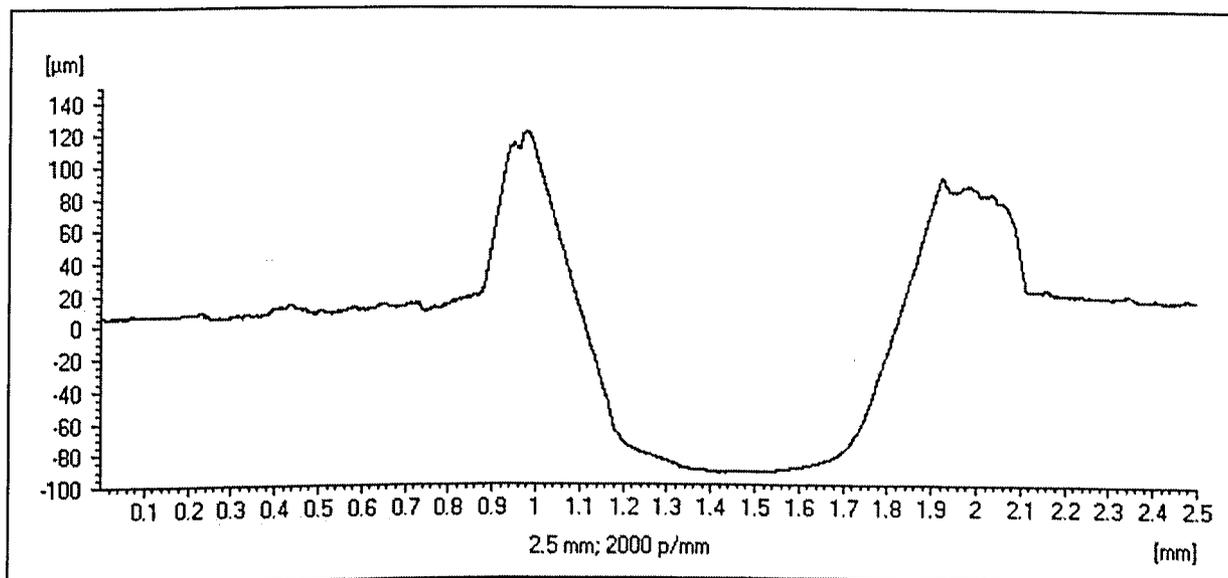


Figura 4.2 - Perfil de um risco produzido em uma superfície após esclerometria pendular (Maracini *et al.*, 2002).

Durante a fase de penetração da ferramenta até atingir a profundidade de corte a_p , há formação de rebarba Poisson nas regiões 1 e 2, como ilustrado na figura 4.3, de (a) a (c). A partir da posição em que há a penetração da ponta da ferramenta, observa-se a formação de rebarba de fluxo lateral somente na região 2, como ilustrado na figura 4.3.d. No entanto, na região 1 continua ocorrendo o fluxo lateral de material. Nesse caso, este material agora estará na superfície usinada, compondo a rugosidade.

Essa formação é denominada por "*side flow*" e pode ser observada na Figura 4.4 que ilustra uma superfície usinada, observada em MEV (Reis, 2000).

Na fase inicial do corte, as rebarbas formadas na região 1 e 2 numa determinada volta

do cp são removidas na volta subsequente devido à variação na penetração da ferramenta até atingir a profundidade de corte a_p . A cada volta dada, a circunferência da região 1 apresenta um diâmetro menor do que na volta anterior devido ao avanço f até que a penetração atinja a profundidade de corte a_p . Isso não ocorre apenas quando o ângulo de posição principal χ_r for igual a 90° e com ferramenta sem raio de ponta. Assim, as rebarbas de entrada e lateral das regiões 1 e 2, respectivamente, são removidas pelo cavaco durante esta fase. Sempre que a espessura da rebarba de entrada, na região 1, for menor do que o incremento na penetração radial da ferramenta, há a remoção da rebarba formada na volta anterior juntamente com o cavaco removido, a cada volta dada pelo cp .

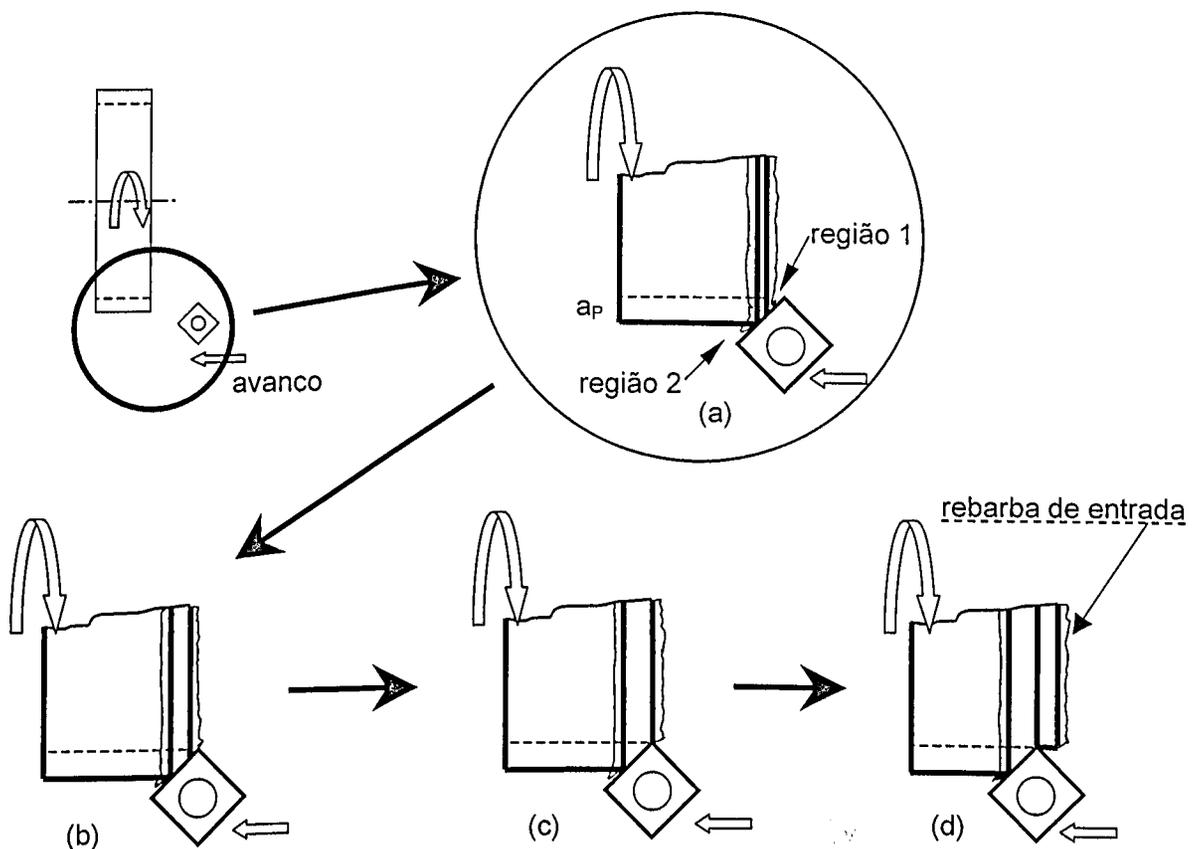


Figura 4.3 - Representação da formação de rebarba de entrada: (a) início da operação - penetração da ferramenta é menor do que a_p ; (b) penetração da ferramenta próximo do valor de a_p ; (c) entrada da ponta da ferramenta no material - penetração da ferramenta igual a a_p ; (d) desenvolvimento do corte após a penetração da ferramenta no cp .

Para cada volta do cp , o incremento na penetração radial da ferramenta com aresta de corte reta ou fora do seu arredondamento de ponta, aqui simbolizado por Δpr , pode ser calculado por:

$$\Delta pr = f \cdot \text{tg}\chi_r \quad (4.1)$$

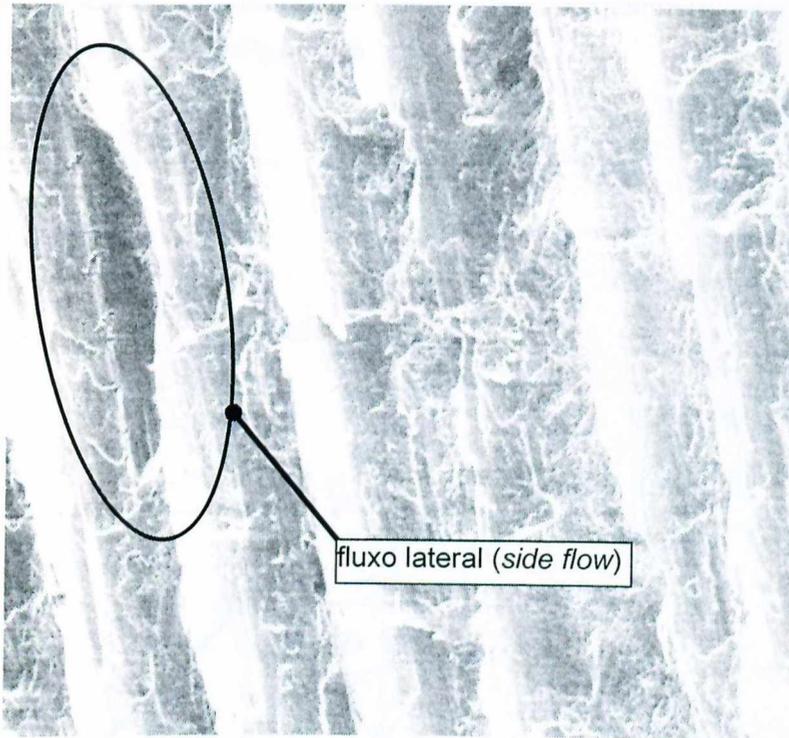


Figura 4.4 - Fotografia ilustrativa de superfície usinada obtida em MEV, mostrando a ocorrência de *side flow* (Reis, 2000).

Verificou-se por meio da Equação 4.1, com os valores utilizados de avanço f e de ângulo de posição principal χ_r , que o Δpr calculado para cada ensaio é sempre maior do que a maior medida de espessura da rebarba feita nos cp metalográficos. Entretanto, isso é válido para a parte reta da aresta de corte.

Após o início da ação da ponta da ferramenta com raio de curvatura r_n , pode-se demonstrar através da geometria representada na Figura 4.5, que a penetração radial da ferramenta pr_ϵ pode ser calculada através da Equação 4.2, cuja dedução está apresentada no Anexo 1.

$$pr_\epsilon = a_p - r_n \cdot [1 - \cos(\chi_r - \kappa)] \quad , \quad 0^\circ \leq \kappa \leq \chi_r \quad (4.2)$$

Da Figura 4.5, verifica-se que κ é o ângulo entre o segmento OC e a reta t que se interceptam no centro de curvatura da ponta, no ponto O, e ainda são paralelas ao plano de referência da ferramenta. A reta t é perpendicular à aresta principal de corte no ponto E', a reta s é perpendicular ao plano de trabalho em H e a reta u é paralela ao plano de corte e intercepta o plano de trabalho em D.

A penetração longitudinal da ferramenta, pl_ϵ , que é o correspondente da penetração

radial $pr\epsilon$ na direção de avanço, é calculada pela Equação 4.3 também deduzida no Anexo 1, igualmente obtida da geometria da Figura 4.5.

$$pl\epsilon = \frac{r_n + (a_p - r_n) \cdot \cos \chi_r}{\sin \chi_r} - r_n \cdot \sin (\chi_r - \kappa), \quad 0^\circ \leq \kappa \leq \chi_r \quad (4.3)$$

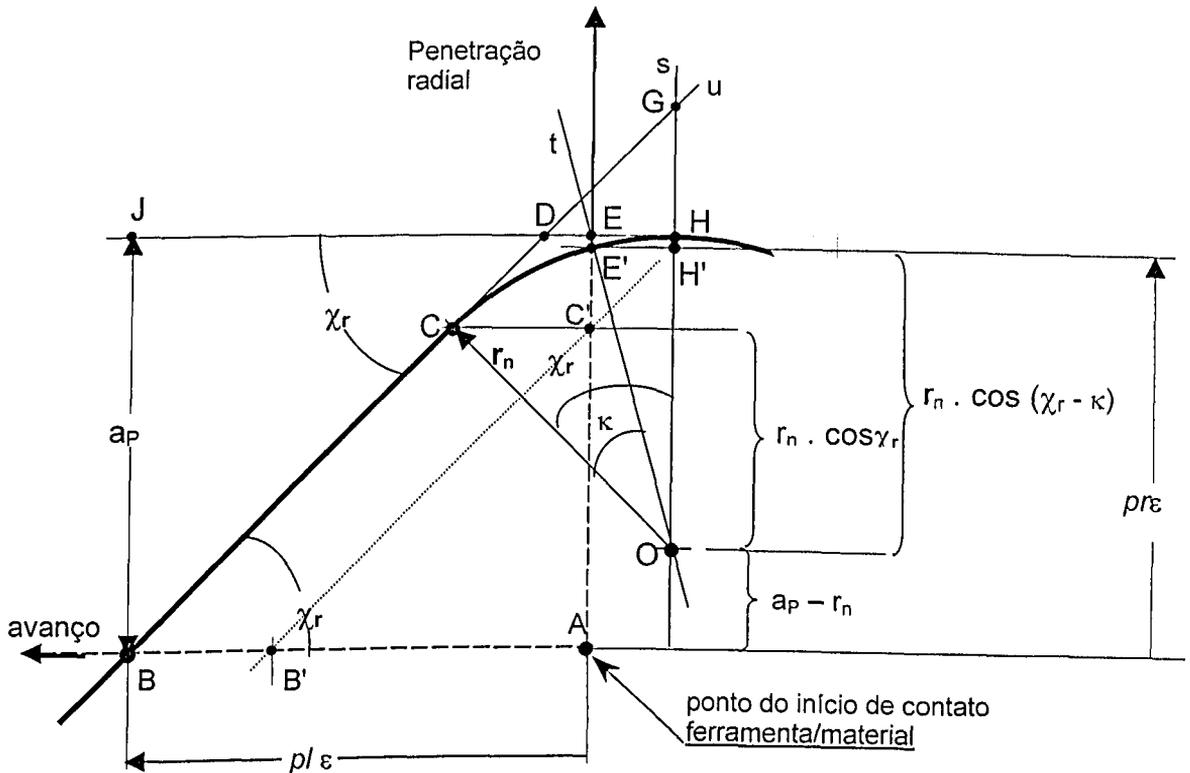


Figura 4.5 - Geometria da fase inicial do corte, durante a penetração da ferramenta, entre o contato inicial ferramenta/ cp ($pr\epsilon = 0$) e a profundidade de corte final ($pr\epsilon = a_p$).

A grandeza $pl\epsilon$ é fortemente influenciada pelo ângulo de posição principal χ_r . Valores altos de χ_r provocam uma entrada muito rápida da ferramenta no material.

Quando a penetração da ferramenta atinge a profundidade de corte a_p , a ponta da ferramenta com raio de ponta r_n é o extremo da aresta de corte e comprime o material na superfície de entrada devido às forças de avanço F_t e passiva F_p . Como discutido anteriormente, essa compressão causa o escoamento lateral do material na direção de menor resistência que é a direção contrária ao da penetração da ferramenta. Nas Figuras 4.6 e 4.7 ilustra-se detalhadamente a ação da ferramenta do início do contato até a penetração a_p . A geometria da entrada da ferramenta no cp em função do arredondamento de ponta e da variação do ângulo de posição principal são ilustrados nestas figuras.

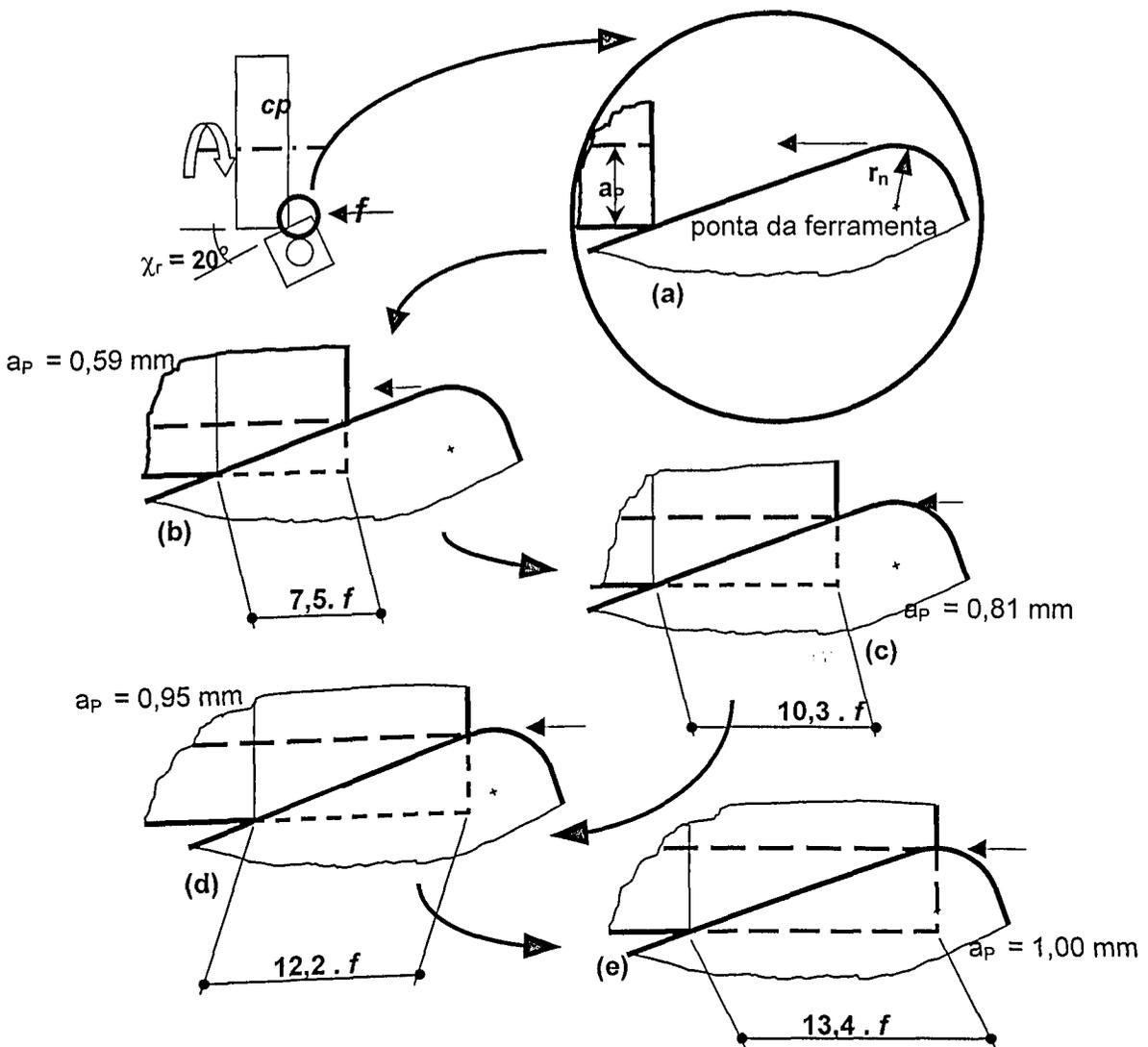


Figura 4.6 - Representação da fase inicial do corte com $\chi_r = 20^\circ$: (a) posição de contato inicial ferramenta/cp; (e) posição de penetração igual a a_p .

Pode-se sugerir, a partir do exposto acima, que a rebarba de entrada final é formada principalmente a partir da ação da ponta da ferramenta. Quando esta é comprimida contra o cp, Figuras 4.6d, 4.6e, 4.7c e 4.7d, é criada uma região de fluxo de material em sentido contrário ao avanço da ferramenta, sobre a sua superfície curva. A ação do raio de ponta r_n , do lado da aresta principal, provoca o início do escoamento e a aresta secundária determina o deslocamento final de material como pode ser visto na Figuras 4.8. Nesta, apresenta-se fotos obtidas em cp metalográficos, que foram retirados de posições diametralmente opostas.

Após a penetração da ponta da ferramenta, a superfície livre do cp que permanece em contato com a aresta de corte ocorre somente na região 2, Figura 4.3d. Se o corte for interrompido antes de se concluir a usinagem de todo o comprimento, pode-se observar uma rebarba na borda formada da interseção da superfície do cp com a superfície em usinagem

principal. Durante a usinagem do *cp*, a cada volta do mesmo há a remoção da rebarba formada na volta anterior até completar o corte. A derradeira formação desta rebarba na região 2 não é removida e torna-se residual na rebarba formada na superfície de saída da ferramenta, devido ao encurvamento do cavaco na direção de avanço ao final da operação.

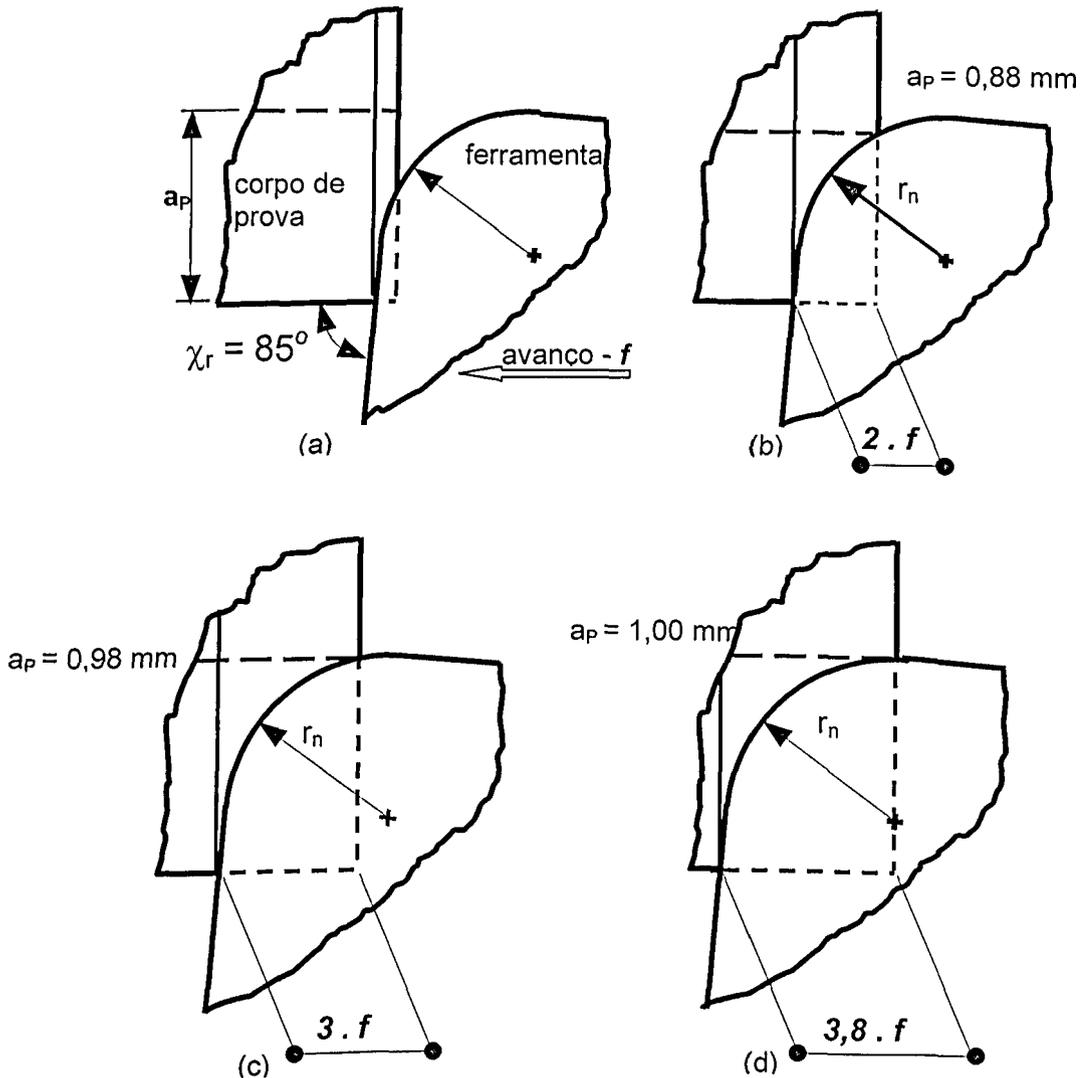


Figura 4.7 - Representação da fase inicial do corte com $\chi_r = 85^\circ$: (a) posição da ferramenta antes da primeira rotação do *cp* ; (b) e (c) representação das fases intermediárias com penetração longitudinal equivalente a $2f$ e $3f$, respectivamente; (d) posição de penetração igual a a_p - penetração longitudinal equivalente a $3,8f$.

Na figura 4.9 apresenta-se fotografias obtidas em MEV da rebarba de entrada em amostra de *cp* do ensaio nº 19, Tabela 3.3. Em (b) pode-se notar marcas na direção longitudinal da superfície usinada, formadas na penetração da ferramenta. Isso sugere o escoamento do material na direção de avanço coincidente com a direção perpendicular à

velocidade de corte. Observa-se, também, a formação irregular, mas aproximadamente cíclica da crista da rebarba que está relacionada à natureza também cíclica da formação de cavaco.

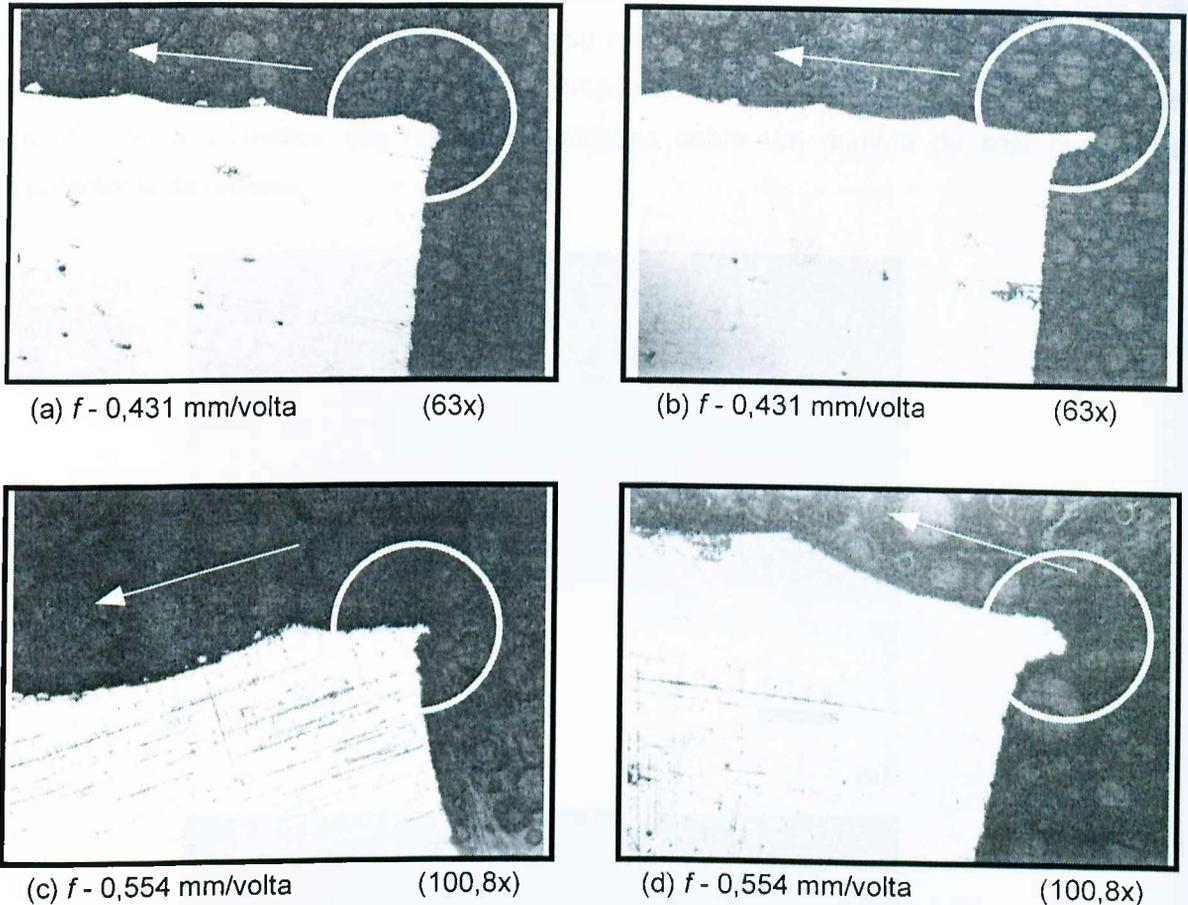


Figura 4.8 - Fotos da rebarba de entrada (em destaque) obtidas em microscópio metalúrgico NEOPHOT 21, (a) e (b) - ensaio nº 09, sendo (a) diametralmente oposto a (b); (c) e (d) - ensaio nº 10, sendo (c) diametralmente oposto a (d). Nota-se diferenças nos respectivos perfis em função da penetração longitudinal da ferramenta. As setas indicam a direção de avanço.

4.1.1 - Influência dos parâmetros de corte na formação da rebarba de entrada

Os resultados das medições de altura e espessura da rebarba em função dos parâmetros de corte são mostrados na Figura 4.10. Observa-se nessa figura que todos os parâmetros têm influência na geometria desta rebarba. Os gráficos apresentam, respectivamente, a relação entre a altura e a espessura da rebarba em função da variação dos parâmetros considerados. As medidas de altura e espessura obtidas dos *cp* metalográficos são a média aritmética entre quatro medições feitas nos embutimentos, enquanto que as medições

da altura diretamente nos *cp* usinado são a média de seis medições realizadas a cada 60°. Estes valores médios são apresentados separadamente nos gráficos da Figura 4.10.

A utilização desses procedimentos contribui para a análise porque a medição feita nos *cp* metalográficos é mais precisa, porém, ficou restrita a dois pontos do *cp* diametralmente opostos. E a medição diretamente nos *cp* usinado conduz ao valor médio da grandeza por meio da média aritmética das medidas realizadas sobre um mínimo de seis pontos na circunferência de rebarba.



Figura 4.9 - Fotografia obtida em MEV da rebarba de entrada do ensaio nº 19 (aumento de 200X): (a) superfície de entrada da ferramenta, tendo rebarba de entrada ao fundo ; (b) vista da rebarba de entrada na borda do *cp*, entre superfícies usinada e de entrada.

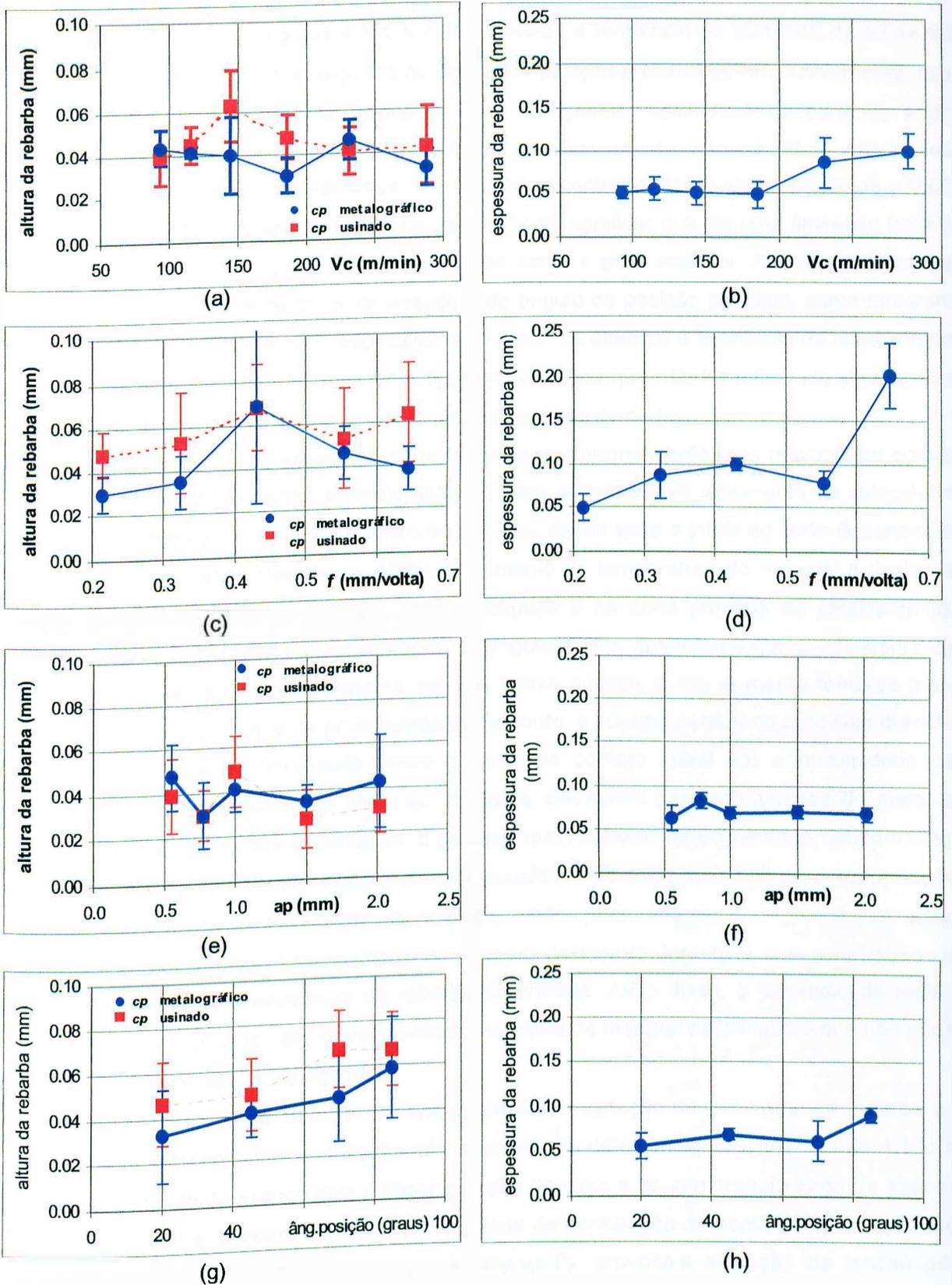


Figura 4.10 - Gráficos da altura e espessura da rebarba de entrada em função dos parâmetros de corte v_c , f , a_p e χ_r , mostrando barras de erro (desvio padrão).

Nos gráficos das figuras 4.10c e 4.10g, nota-se a tendência ao aumento da altura da rebarba com o aumento do avanço f e do ângulo de posição principal χ_r , respectivamente, nos dois métodos de medição. Os resultados com variação da velocidade de corte v_c e de profundidade de corte a_p , figuras 4.10a e 4.10e respectivamente, não permitem conclusões definitivas. Para ambos os parâmetros, as medidas encontradas têm valores próximos a 0,04 mm mas não indicam qualquer tendência, o que pode significar que há uma limitação para o tamanho da rebarba imposta pelas arestas de corte e pelo material. A espessura tem a influência da velocidade de corte, do avanço e do ângulo de posição principal, como mostram as figura 4.10b, 4.10d e 4.10h, respectivamente, pois se observa a tendência ao crescimento com o incremento destes parâmetros. A figura 4.10f indica que não há influência significativa na variação da espessura com o aumento da profundidade de corte.

A influência da velocidade de corte na usinagem normalmente está relacionada com a temperatura. No torneamento, a temperatura da peça aumenta com o aumento da velocidade de corte e depende, também, do número de rotações dadas após o início do corte (Machado e da Silva, 1999, citando Nakayama, 1956). O aumento de temperatura do material é devido à maior geração de calor na interface ferramenta/peça e na zona primária de cisalhamento, aumentando a ductilidade e amolecendo-o. Na Figura 4.10b, observa-se que a espessura da rebarba é aproximadamente constante até 200 m/min quando o seu aumento torna-se mais acentuado. Isto sugere que na proximidade deste ponto, a energia gerada no processo durante a fase de entrada da ferramenta, entre o ponto de contato inicial até a proximidade da penetração na profundidade de corte a_p , conduz a alterações nas propriedades do material usinado favorecendo a sua deformação. É provável que há maior aquecimento tornando-o mais dúctil em relação aos ensaios realizados com velocidade de corte mais baixas. A deformação causada pela ponta da ferramenta se propaga, então, para uma maior região à sua volta, provocando um aumento na espessura de material deslocado durante a sua penetração na peça e aumentando a espessura da rebarba de entrada. Além disso, a extensão da região afetada pelo aumento de calor deve influenciar na altura de material deformado o que não pôde ser verificado nos resultados obtidos.

Verificou-se que a variação do avanço provocou variação na geometria da rebarba de entrada aumentando tanto a altura quanto a espessura como mostrado nas figuras 4.10c e 4.10d. O aumento do avanço leva à maior geração de calor e ao aumento da força de avanço (Ferraresi, 1988) e, também, aumenta a velocidade de penetração da ponta da ferramenta até a profundidade a_p . O aumento da força de avanço F_F provoca a elevação da tensão de compressão sobre a região de entrada no cp . O material à frente da direção de penetração da ferramenta é comprimido entre a aresta de corte e o material da peça adjacente à região sob compressão (que não é afetada pelo corte) e sofre escoamento na forma de abaulamento

cedendo à penetração da ferramenta. Este abaulamento é proporcional à energia envolvida nessa interação e resulta no deslocamento de material em direção contrária à penetração da ferramenta.

Das observações das figuras 4.10e e 4.10f, a variação da profundidade de corte a_p apresentou menor influência nas características geométricas da rebarba de entrada do que os demais parâmetros. A cada aumento da profundidade de corte é necessário um maior número de voltas do cp , desde o início do contato, até atingir a penetração final da ferramenta. Isso deve provocar aumento da geração de calor na peça como discutido acima na análise da influência da velocidade de corte v_c . Entretanto, este aumento de calor pode não significar aumento de temperatura, como ocorre com a variação de v_c . Durante os ensaios sobre a influência de a_p , a penetração da ponta da ferramenta ocorre sob as mesmas condições (v_c , f e χ_r constantes) o que parece ter contribuído para manter as características da rebarba sem alterações significativas. O aumento de temperatura produzido pelo aumento no número de rotações do cp na fase inicial não deve ter sido suficiente para alterar as propriedades do material em cada caso.

Das Figuras 4.10g e 4.10h, verifica-se que o aumento de χ_r provocou o aumento da altura e da espessura desta rebarba. Observa-se, também, que em $\chi_r = 20^\circ$ houve redução na altura em relação ao valor médio de 0,04 mm encontrado nos ensaios realizados com os mesmos valores de v_c , f e a_p . Esta alteração não foi verificada para a correspondente espessura encontrada.

O efeito de χ_r nessas características da rebarba de entrada pode estar relacionado principalmente à alteração que este provoca na penetração da ponta da ferramenta até atingir a profundidade de corte a_p . Nas representações das Figuras 4.6 e 4.7, pode-se notar que, para a parte reta da aresta de corte, um pequeno valor de χ_r leva à variação da penetração radial Δp_r (Equação 4.1) muito mais gradual do que para grandes valores de χ_r . Isso significa que quando se utiliza menor valor de χ_r , o cp executa maior número de rotações até que a ferramenta atinja a_p , o que eleva mais a sua temperatura em relação ao uso de maiores valores de χ_r . Por outro lado, à medida que se aumenta χ_r , a ferramenta atinge a profundidade de corte a_p mais rapidamente a partir do contato inicial com o cp sendo muito brusca para valores próximos a 90° , o que provoca o aumento da área da ponta arredondada da aresta de corte que comprime a superfície de entrada do cp , e que deve provocar o deslocamento de maior volume de material durante o avanço da ferramenta. Assim, o aumento do ângulo de posição principal aumenta as dimensões da rebarba de entrada.

Outro efeito do aumento do ângulo de posição principal é o conseqüente aumento da força de avanço (Ferraresi, 1988) o que aumenta as dimensões da rebarba, conforme discutido

acima sobre a influência do avanço. Além disso, o aumento de χ_r como o realizado aqui, significa uma diminuição do ângulo de posição secundário χ_r' e assim, o aumento de χ_r aumenta os esforços na formação da rebarba de entrada resultando, portanto, no aumento da espessura e da altura.

A variação dos parâmetros investigada provoca alteração na geometria da rebarba de entrada. O avanço tem maior influência na espessura enquanto que χ_r tem maior efeito sobre a altura. Como a variação de χ_r foi realizada com ferramenta de duas arestas e ângulo de ponta $\epsilon_r = 90^\circ$, os resultados obtidos têm validade investigativa uma vez que a faixa usual de utilização de χ_r é de 45° a 75° (Ferraresi, D., 1988). Verificou-se, também, que a variação da profundidade de corte a_p não teve influência significativa na geometria final da rebarba de entrada. De maneira geral, com o aumento destes parâmetros há correspondente aumento do calor gerado na interface cavaco/ferramenta e o conseqüente aumento de temperatura do material usinado. Além disso, na fase inicial durante a penetração da ferramenta até a profundidade de corte a_p , há o proporcional aumento da seção de corte e , portanto, o aumento equivalente do calor gerado o que influencia nas propriedades do material.

Deve-se observar que as dimensões da rebarba de entrada não apresentaram alteração muito significativa com a variação dos parâmetros escolhidos, nas respectivas faixas verificadas. Isso é observado, principalmente, para v_c e a_p enquanto que, quando se variou f e χ_r houve uma pequena alteração. Os valores de f e χ_r podem ter levado a valores de γ_s em que ocorre o crescimento da rebarba ($3 < \gamma_s < 6$), enquanto que v_c e a_p podem ter produzido $\gamma_s > 6$ onde não há alteração significativa, como mostrado por Nakayama e Arai (1987) e discutido no item 2.3.1.

4.2 - Formação da rebarba de saída

Um outro tipo de rebarba foi observado na superfície esquerda da peça, na saída da ferramenta, indicada na ilustração da Figura 4.1. É a rebarba inclinada na direção de avanço. Gillespie (1973) identificou-a como rebarba de encurvamento relacionando-a às rebarbas encontradas na superfície onde a ferramenta sai da peça e correspondendo ao material que se curva na direção de saída da ferramenta. É o material que deveria sofrer cisalhamento para formar cavaco e se separar da peça e que, no entanto, sofre flexão e não é removido.

Essa rebarba é formada pela flexão da porção final do material a ser removido pela ação da ferramenta na direção da sua saída da peça. No torneamento cilíndrico, essa direção corresponde à direção de avanço.

Da observação da formação desta rebarba durante os ensaios, nota-se que quando a ferramenta se aproxima do final da usinagem do cp , o material é flexionado pela ferramenta a partir de determinada posição próximo do final do corte. Esta posição de início de formação da rebarba de saída foi prevista qualitativamente por Ko e Dornfeld (1989). Nessa fase do corte, a seção transversal do material à frente da ferramenta é reduzida a uma dimensão que não suporta o esforço da resultante entre a força de avanço F_F e a força passiva F_P exercidas pela ferramenta.

Na hipótese da formação contínua de cavaco até a remoção de todo o material limitado pela profundidade de corte a_p , seria necessário que essa porção final resistisse à ação da força resultante entre aquelas forças F_F e F_P para continuar o processo de cisalhamento. Entretanto, verifica-se que o material é encurvado na direção de saída da ferramenta no sentido do avanço, provavelmente desenvolvendo as etapas ilustradas na Figura 4.11.

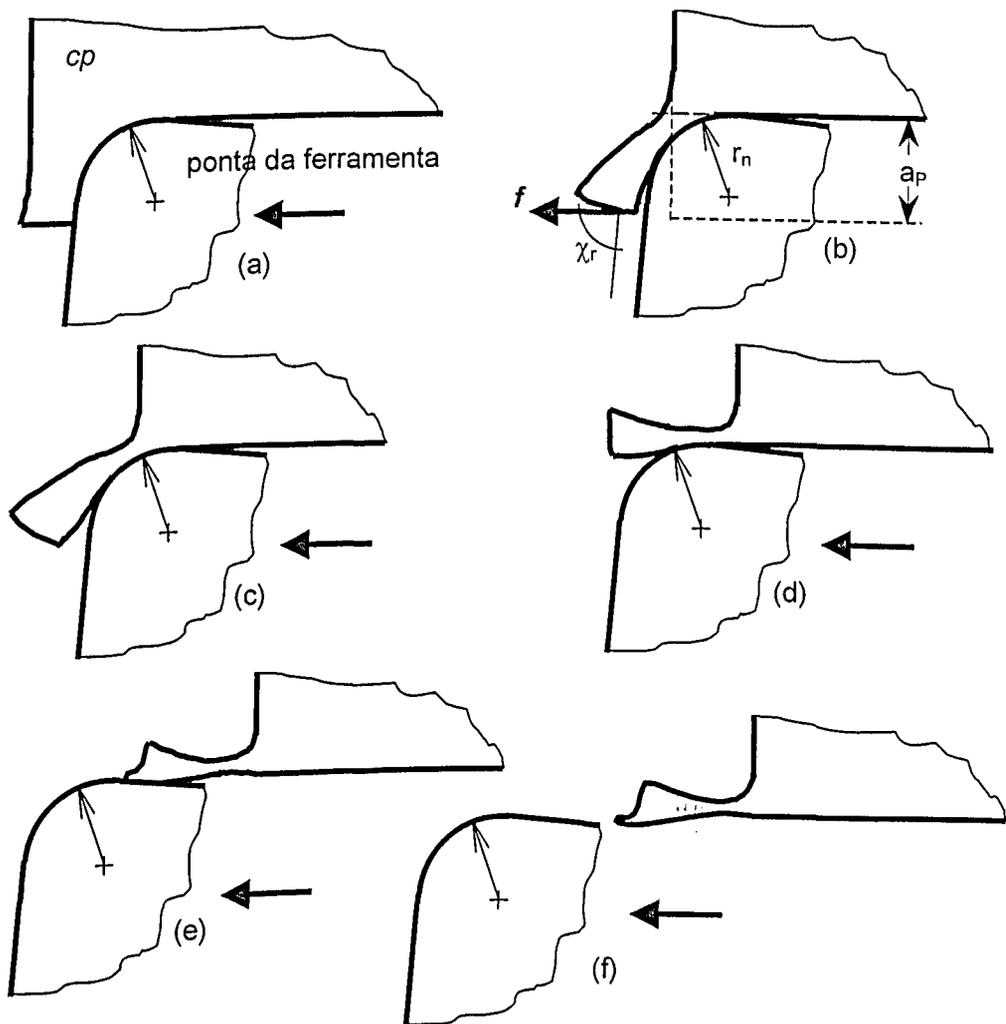


Figura 4.11 - Ilustração do mecanismo de formação da rebarba de saída no torneamento cilíndrico (Link, R., citado por Soares Filho, 1995).

O material deformado assume um formato cilíndrico em torno da circunferência externa da superfície onde a ferramenta sai do *cp*, devido à rotação do mesmo e ao avanço da ferramenta, com abertura voltada para a direção deste. A formação dessa rebarba assemelha-se a conformação mecânica de materiais em processos de fabricação por repuxamento sem mandril (Kang *et al.*, 1984). Na Figura 4.12 apresenta-se fotos ilustrativas da rebarba de saída formada no *cp* do ensaio n° 19 da Tabela 3.4.

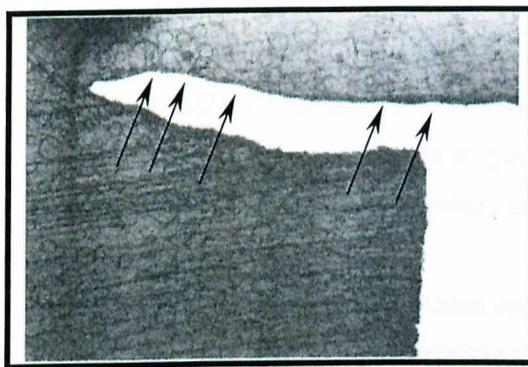


Figura 4.12 - Fotografias da rebarba de saída obtida do ensaio n° 19: (a) foto digital do perfil da rebarba de saída obtida em microscópio ferramenteiro (aumento de 40 vezes); (b) foto da rebarba de saída obtida em MEV.

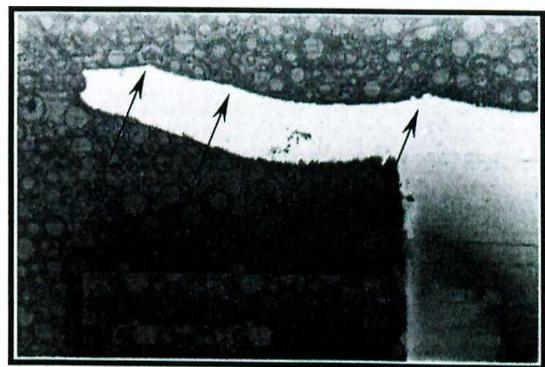
Pôde-se observar que não ocorre somente flexão do material durante a formação da rebarba de saída. As marcas de avanço indicam que durante o encurvamento do material há prosseguimento na formação do cavaco. Isso é mais visível nos *cp* metalográficos dos ensaios com maiores avanços. Enquanto a espessura de material é resistente ao avanço da ferramenta, há somente o regime de formação de cavaco. A penetração longitudinal da ferramenta reduz essa espessura e o material é gradualmente flexionado na direção do avanço, sofrendo rotação. A deformação do material nessa região aumenta a sua resistência à

flexão devido ao encruamento e permite a continuidade da formação de cavaco pela ponta da aresta de corte, com alteração na profundidade de corte a_p . Deve-se esperar que este processo seja contínuo até que termine o contato ferramenta/material mas, porém, é dependente das propriedades do material e das condições de corte.

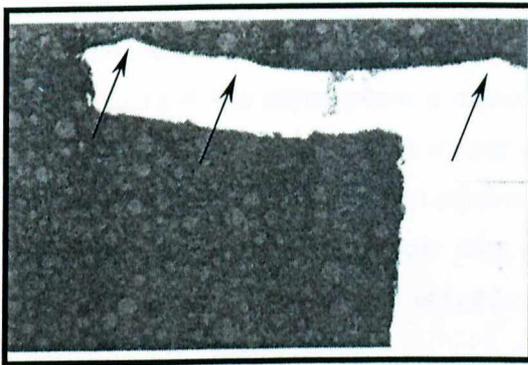
Após a flexão máxima do material, que é determinada pelas características do material, pela geometria da ferramenta e pelas condições de corte, a ferramenta continua a avançar e a resistência do material flexionado permite o prosseguimento do corte ao longo do comprimento da rebarba, como visto na Figura 4.13.



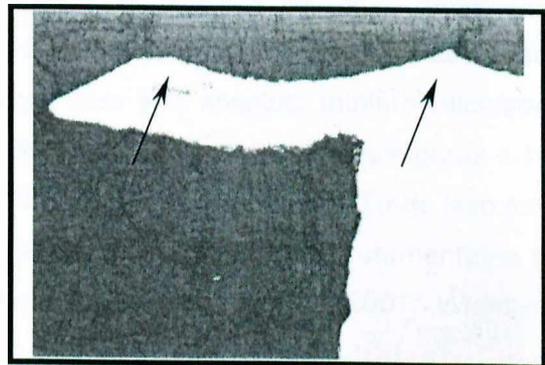
(a) $f - 0,323$ mm/volta (63,0x)



(b) $f - 0,431$ mm/volta (63,0x)



(c) $f - 0,554$ mm/volta (63,0x)



(d) $f - 0,646$ mm/volta (63,0x)

Figura 4.13 - Fotografias de rebarbas de saída - microscópio metalúrgico NEOPHOT 21. As setas indicam marcas da ferramenta ao longo do comprimento da rebarba ($v_c - 185$ m/min, $a_p - 1,0$ mm, $\chi_r - 45^\circ$).

Se o avanço da ferramenta aumentar a flexão do material e este atingir o limite de ruptura há seccionamento da rebarba ao longo do seu perfil. Permanece na peça uma rebarba de altura reduzida, chamada de rebarba secundária (Kishimoto *et al.*, 1981), mantendo a mesma espessura de raiz. Esse fenômeno foi observado no ensaio n° 11, com o maior valor

de avanço utilizado, $f - 0,646$ mm/volta. A rebarba formada no cp sofreu ruptura parcial ao longo da sua circunferência. Em outro ensaio, com $a_p - 2,0$ mm, $v_c - 185$ m/min, $\chi_r - 45^\circ$ e $f - 0,646$ mm/volta e a mesma ferramenta, ocorreu o seccionamento da rebarba ao longo de todo o seu comprimento, separando-se na forma de um anel. Este apresentou resistência elevada à remoção por cisalhamento com ferramenta manual, o que deve ser um grande empecilho caso ocorra na indústria, na produção de peças por este tipo de usinagem.

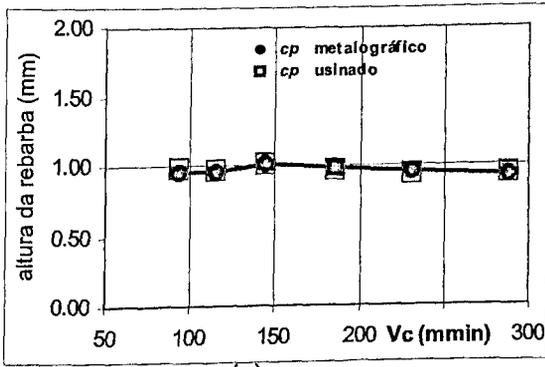
4.2.1 - Influência dos parâmetros de corte nas características geométricas da rebarba de saída

Na observação da formação da rebarba de saída, verificou-se que a variação do avanço f , da profundidade de corte a_p e do ângulo de posição principal χ_r têm grande influência nas suas características geométricas. A velocidade de corte v_c não apresentou efeito equivalente aos demais parâmetros.

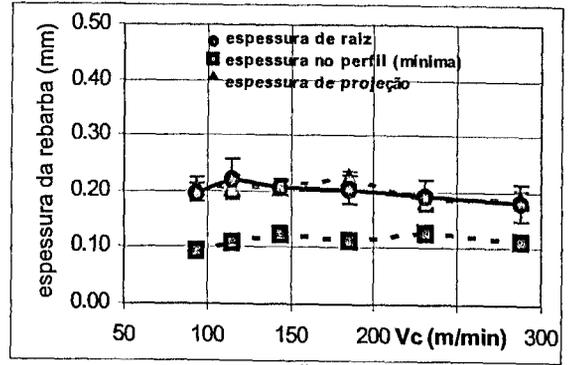
Na Figura 4.14, são apresentados os gráficos que relacionam as médias das medidas de altura e espessura, com os parâmetros analisados. Na Figura 4.15 ilustra-se a posição de medição de altura e espessura das rebarbas.

Praticamente não houve diferença relativa entre as medidas de altura feitas nos cp metalográficos e aquelas obtidas diretamente nos cp usinados. Os dados para elaboração do gráfico da Figura 4.14e apresentam a maior variação com erro absoluto mínimo calculado de 0,001 mm e máximo de 0,050 mm. A menor variação é verificada naqueles das Figuras 4.14a e 4.14c, onde o erro absoluto calculado mínimo é 0,001 mm e o máximo é 0,020 mm. Isso mostra que a utilização de relógio comparador para medição de altura de rebarba diretamente na peça é um procedimento eficiente, sendo utilizado em vários trabalhos (Souza Jr, 2001; Wang *et al.*, 1996; Soares Filho, 1995).

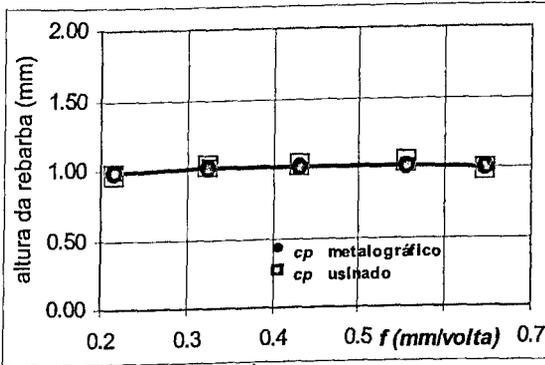
As espessuras das rebarbas foram medidas somente nos cp metalográficos e foram feitas sobre a superfície de saída como indicado na Figura 4.15. Foram realizadas medidas na base da rebarba, chamadas de espessura de raiz; na posição de espessura mínima ao longo do seu comprimento, a espessura mínima do perfil; e a distância entre duas retas perpendiculares à superfície de saída, onde cada uma é tangente ao perfil da rebarba em um ponto, sendo denominada de espessura de projeção. A espessura de projeção é a medida desta característica que é verificada quando se utiliza equipamento óptico e de contato, como micrômetros e paquímetros, para medição diretamente nos cp . A espessura de raiz é a sua característica que pode determinar a intensidade e a eficiência do método de rebarbação para se obter a qualidade de borda exigida (Wang *et al.*, 1996).



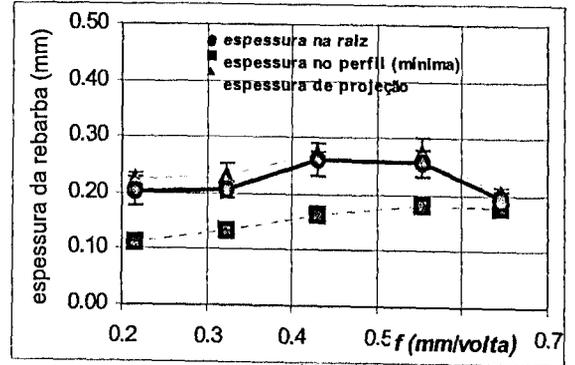
(a)



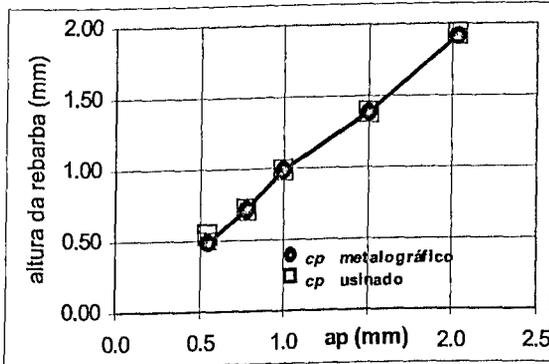
(b)



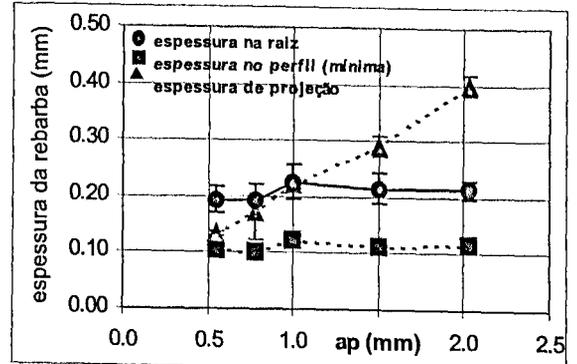
(c)



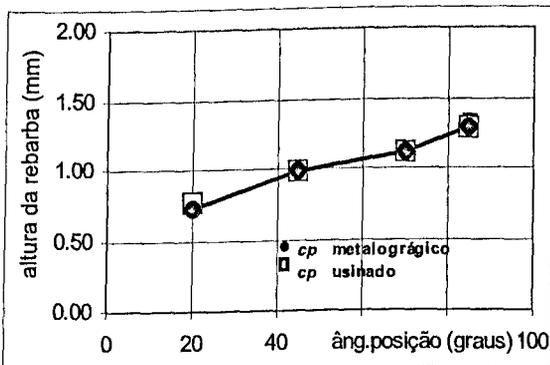
(d)



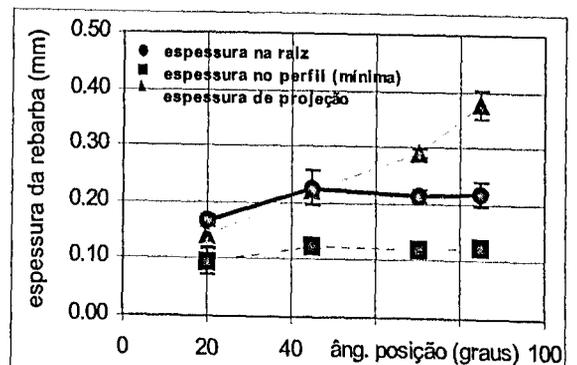
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 4.14 - Gráficos de altura e espessura de rebarba de saída em função dos parâmetros de corte v_c , f , a_p e χ_r , apresentando barras de erro (desvio padrão).

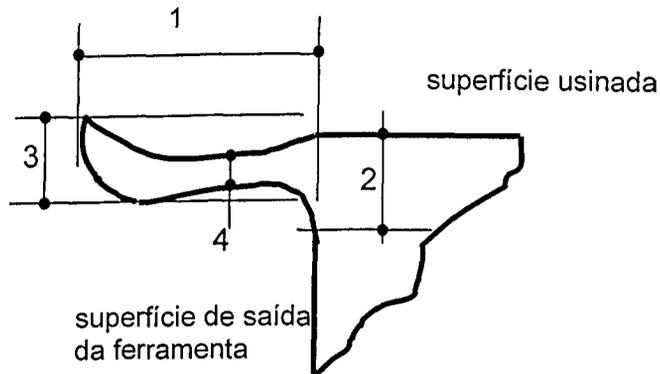


Figura 4.15 - Representação das medições na rebarba de saída: 1-altura da rebarba; 2-espessura da raiz; 3-espessura de projeção; 4-espessura mínima (do perfil). (Kishimoto *et al.*, 1981).

Considerando o conjunto dos ensaios, verifica-se que a altura da rebarba de saída tem o seu valor muito próximo da profundidade de corte a_p utilizada. Isso pode ser visto no gráfico 4.14e e durante a variação do avanço f , gráfico 4.14c. Observa-se quase uma identidade entre os valores encontrados para a altura e a profundidade de corte relacionada.

A variação do ângulo de posição principal χ_r provocou a alteração da altura, como visto na Figura 4.14g. O uso de χ_r menor do que 45° reduziu a sua dimensão e para χ_r maior houve aumento da mesma em relação ao seu valor próximo a $a_p = 1,0$ mm, no caso. Em todos os ensaios com $\chi_r = 45^\circ$, a altura da rebarba é muito próxima à profundidade de corte a_p , principalmente para a_p até 1,0 mm como se observa em 4.14a, 4.14c e 4.14e. Há exceção quando ocorre a formação de rebarba secundária pois a altura torna-se muito reduzida, como foi observado nos ensaios onde a mesma ocorreu. A ruptura deve ocorrer na seção de espessura mínima da rebarba (Kishimoto *et al.*, 1981).

A velocidade de corte v_c foi o parâmetro que apresentou menor influência dentro da faixa de valores experimentados, como mostra o gráfico 4.14a. Vê-se que a altura da rebarba sofre discreta redução com o aumento de v_c . Como exposto acima, o aumento da velocidade de corte provoca o aumento da temperatura, o que aumenta a ductilidade do material. No entanto, como a maior parcela do calor gerado no corte é removida pelo cavaco, provavelmente o incremento no aquecimento do material do cp não é muito acentuado. Com o conseqüentemente aquecimento, a resistência à penetração da aresta de corte é reduzida. A combinação da geometria da ferramenta e o seu ângulo de posição principal χ_r devem provocar uma pequena redução na profundidade de corte sobre a superfície de saída, reduzindo, proporcionalmente, a altura da rebarba.

Com o aumento de v_c houve, também, uma pequena redução na espessura de raiz da rebarba, como visto na Figura 4.14b. O material aquecido é encurvado com menor resistência o

que reduz a deformação na base da rebarba, sobre a superfície de saída da ferramenta.

A variação do avanço f provocou as maiores alterações na dimensão da espessura de raiz da rebarba de saída do que os outros parâmetros, Figura 4.14d. O incremento no avanço leva ao aumento da força de avanço F_F e, assim, o material ao final do corte começa a ser flexionado com uma espessura *proporcionalmente maior*. À medida que o volume de material encurvado aumenta, ocorre o prosseguimento na remoção de material ao longo do seu comprimento, como discutido anteriormente. Dependendo do avanço e da geometria da ponta de corte pode ocorrer a usinagem de um chanfro no final da peça o que reduz a espessura da rebarba remanescente, como mostra a Figura 4.13d. Isso é observado quando se comparam os gráficos obtidos para espessura mínima, onde esta aumenta continuamente com o avanço como é previsto, e a curva da espessura de raiz que mostra uma redução para avanços maiores, o que é observado na Figura 4.14d.

Na Figura 4.14h, observa-se que a espessura de raiz da rebarba para ângulo de posição principal χ_r pequeno é menor do que nos demais ensaios realizados. Isso é consequência da geometria de corte correspondente que reduz a profundidade de corte a_p e a seção do material que é encurvado ao final do corte. Naquele gráfico, verifica-se que a espessura de projeção cresce como o aumento de χ_r devido à deformação do material ao longo do comprimento da rebarba pela ação da ferramenta, conforme ilustração da Figura 4.11.

Na Figura 4.16 apresenta-se fotos ilustrativas (em ampliações diferentes) de rebarbas obtidas nos ensaios onde se variou o ângulo de posição principal χ_r . Nota-se que, para $\chi_r = 20^\circ$, o perfil é retilíneo onde as espessuras medidas (de raiz, de projeção e a mínima) têm valores aproximados enquanto que para $\chi_r = 85^\circ$, a espessura de projeção é muito maior do que as demais.

Observa-se que, de um modo geral, a espessura de raiz e a espessura mínima do perfil têm valores em torno de 0,20 mm e 0,12 mm, respectivamente, com exceção dos ensaios que verificam a influência do avanço. É provável que as propriedades do material e a geometria da ferramenta sejam o fator determinante para estes fatos.

4.3 - Influência da interação entre profundidade de corte a_p e ângulo de posição principal χ_r na altura da rebarba de saída

Os ensaios nº 20 a nº 39, conforme Tabela 3.5, foram executados para se verificar a influência da interação entre a_p e χ_r na altura das rebarbas de saída.

As medições foram feitas diretamente no c_p usando-se de relógio comparador porque este método mostrou-se eficaz para esta aplicação como visto no item 4.2. Como já citado, as

medições foram feitas sobre a circunferência formada pelas rebarbas, em posições igualmente espaçadas de 60° .

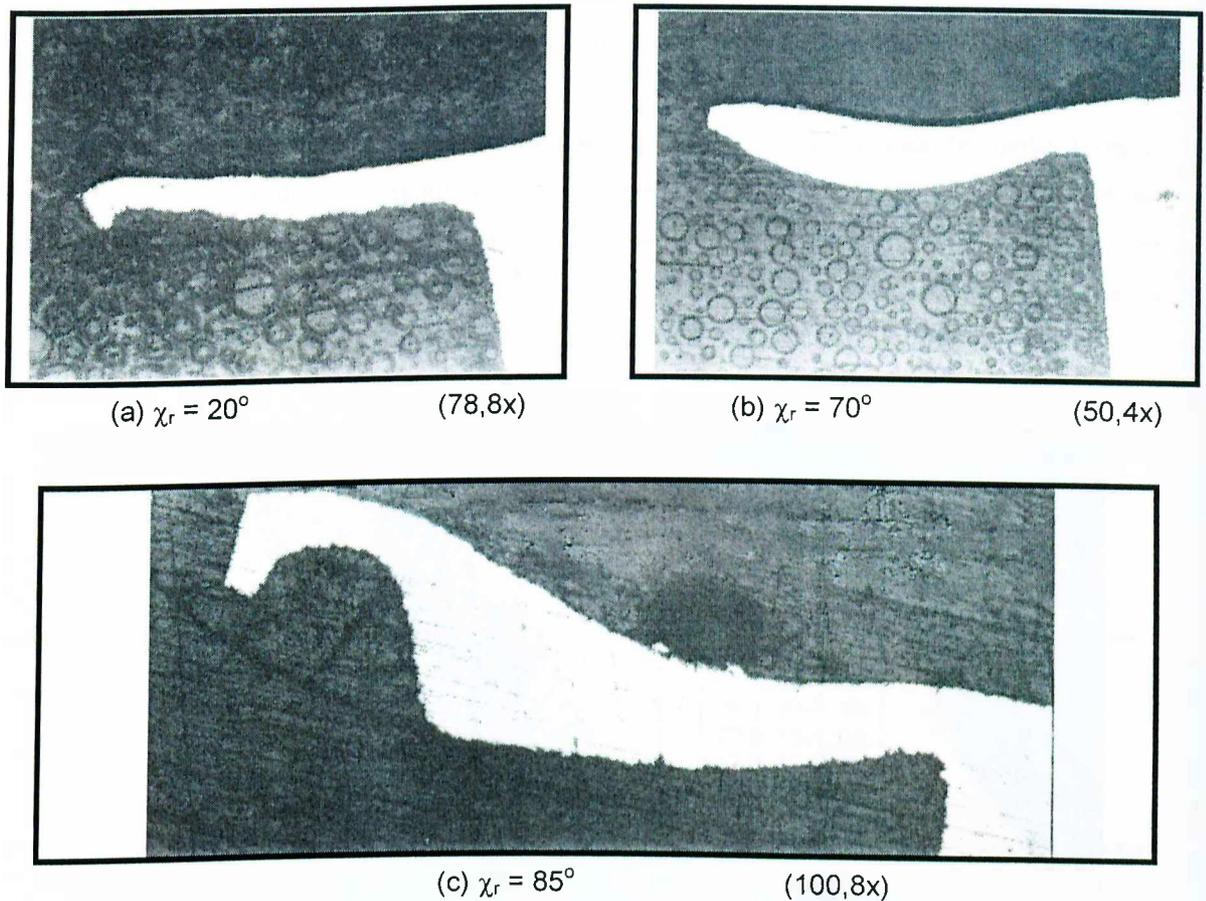


Figura 4.16 - Fotografias de rebarba de saída obtidas nos ensaios com variação do ângulo de posição principal χ_r .

É esperado que o gráfico em questão contenha distorções causadas pelo uso dos valores de a_p apresentados na Tabela 3.5, porque as condições experimentais não permitiam a fixação daqueles parâmetros com exatidão. Por outro lado, a variação máxima verificada entre a_p nominal, fixada na máquina-ferramenta através do ajuste de a_p , e o seu correspondente valor medido indiretamente (pela diferença de diâmetros) foi de 6%. O valor de a_p de um determinado ensaio é a metade da diferença entre os diâmetros do cp medidos antes e após cada ensaio. Assim, os resultados apresentados neste gráfico são satisfatórios para uma análise qualitativa, para as faixas de valores de a_p e χ_r utilizados nos ensaios.

Não se desenvolveu um gráfico semelhante para a verificação do efeito destes parâmetros na altura da rebarba de entrada devido à pequena influência dos parâmetros de corte sobre este tipo de rebarba, principalmente, sob a variação de a_p como pode ser observado nos gráficos 4.10e e 4.10f.

Da Figura 4.17, pode-se observar de imediato que:

- O valor de a_p é determinante para a altura da rebarba de saída. Valores pequenos de a_p levam à formação de rebarba cuja altura tem aproximadamente o valor de a_p para qualquer χ_r verificado. Esta tendência diminui com o aumento de a_p . Para valores de a_p maiores, a altura das rebarbas depende de χ_r .
- Os maiores valores de χ_r têm maior influência sobre a altura da rebarba de saída. Para χ_r acima de 45° , nota-se que há a tendência da formação de rebarba com altura maior do que a_p . Além disso, observa-se que o efeito de a_p depende de χ_r . Esta altura aumenta juntamente com o aumento vinculado de a_p e de χ_r . Observa-se no gráfico da Figura 4.14g que houve aumento da altura da rebarba com o incremento de χ_r , mesmo mantendo-se a_p constante.

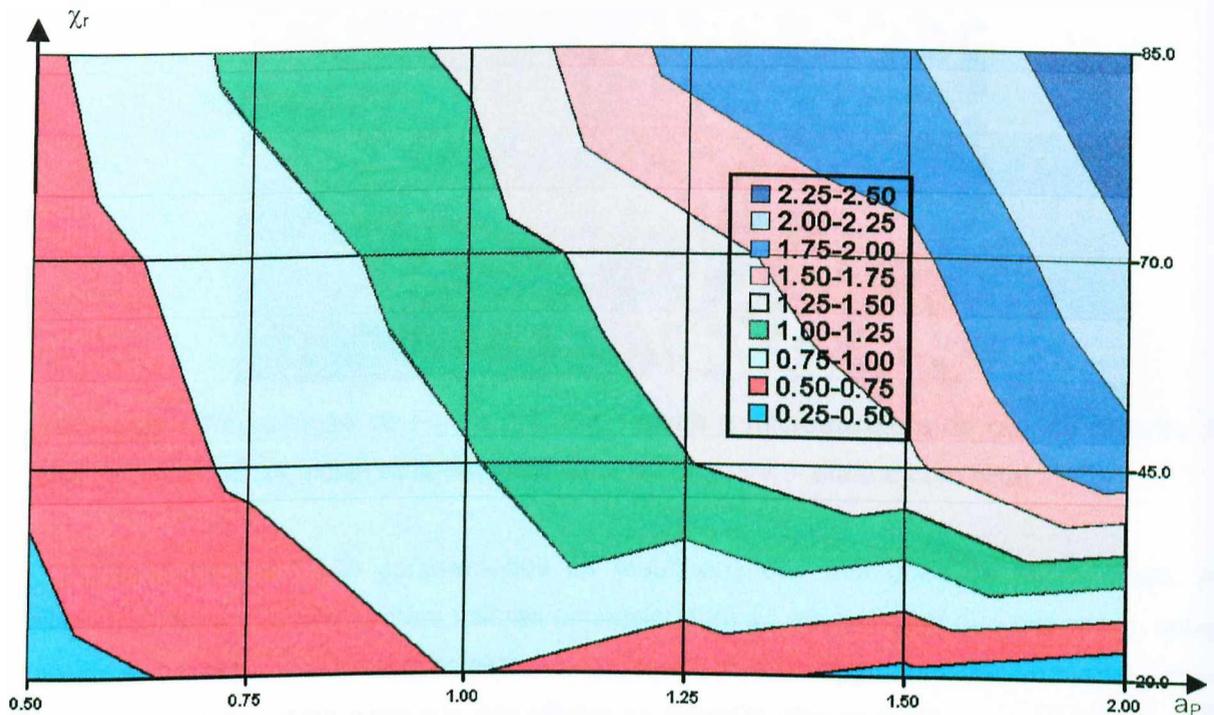


Figura 4.17 - Gráfico bi-dimensional da altura da rebarba de saída em função de a_p e de χ_r .

4.4 - Resultados das medições de microdureza na raiz da rebarba de saída

A raiz da rebarba é considerada uma região que caracteriza a sua espessura e que pode determinar a qualidade de uma operação de rebarbação (Wang *et al.*, 1996). Na Figura 4.18 reproduz-se a Figura 3.9 que mostra uma fotografia ilustrativa da microestrutura da raiz de rebarba de saída de amostra do *cp* n° 14.

Pode-se observar a grande deformação que ocorre na região da raiz da rebarba. Essa

verificação sugeriu a medição da microdureza nessa região usando-se os *cp* metalográficos, com o objetivo de se investigar a influência dos parâmetros de corte nas propriedades mecânicas do material da rebarba.

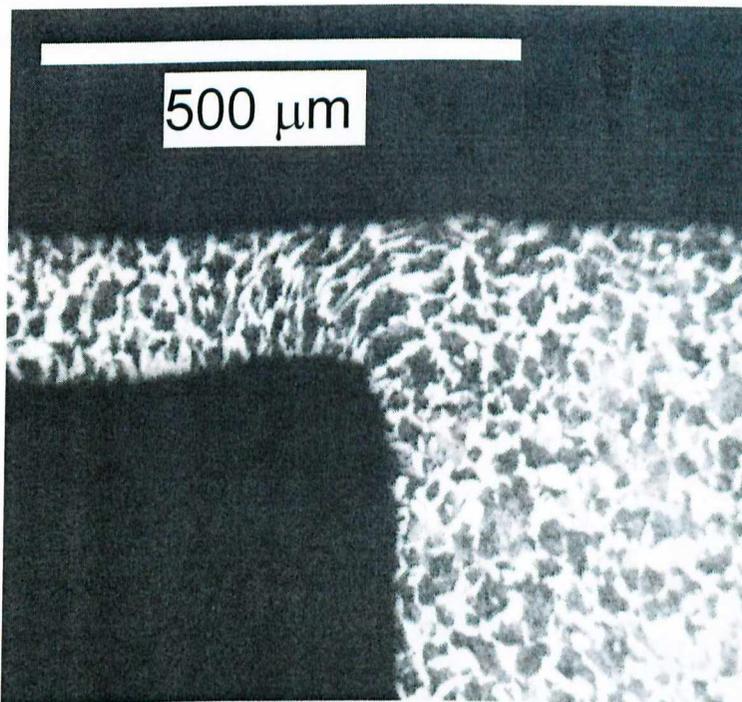


Figura 4.18 – Reprodução da Figura 3.9, que mostra a microestrutura de raiz da rebarba de saída do ensaio n° 14, observada em analisador de imagens – ataque com Nital 2%.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados das medições de microdureza. As células da tabela que não contêm valores correspondem às medidas em que ocorreram falhas durante a indentação no microdurômetro, tais como sobrecarregamento, ou correspondem a pontos inexistentes, como a maioria das células da linha D5 (Figura 3.10).

Os resultados mostrados na Tabela 4.1 devem ser analisados juntamente com a Figura 3.10 que fornece uma ilustração do posicionamento de cada medição. A observação superficial destes resultados, sem a utilização de recursos gráficos, aparentemente não indica qualquer tendência na variação da microdureza em função dos parâmetros investigados.

Da Figura 4.18, observa-se que naquela amostra há uma pequena região com maior deformação na raiz da rebarba, na direção entre a superfície usinada e a superfície lateral do *cp*. A imagem sugere que nessa região ocorre a rotação do material que é flexionado durante a formação da rebarba (como relatado por Ko e Dornfeld, 1991). No caso do torneamento, pressupõe-se que há uma circunferência imaginária na superfície lateral em torno da qual ocorre a rotação do material, ponto a ponto, durante sua flexão pela ferramenta.

Os resultados de microdureza, Tabela 4.1, sugerem uma distribuição de dureza similar

àquela mostrada na Figura 4.19, que foi desenvolvida com os resultados obtidos dos cp metalográficos dos ensaios 17, 18 e 19. O parâmetro variado para estes testes foi o ângulo de posição principal χ_r (20° , 70° e 85° , respectivamente) e as distribuições são mostradas esquematicamente, considerando a rebarba com uma forma perfeitamente retangular, apenas para observar-se o efeito na microdureza.

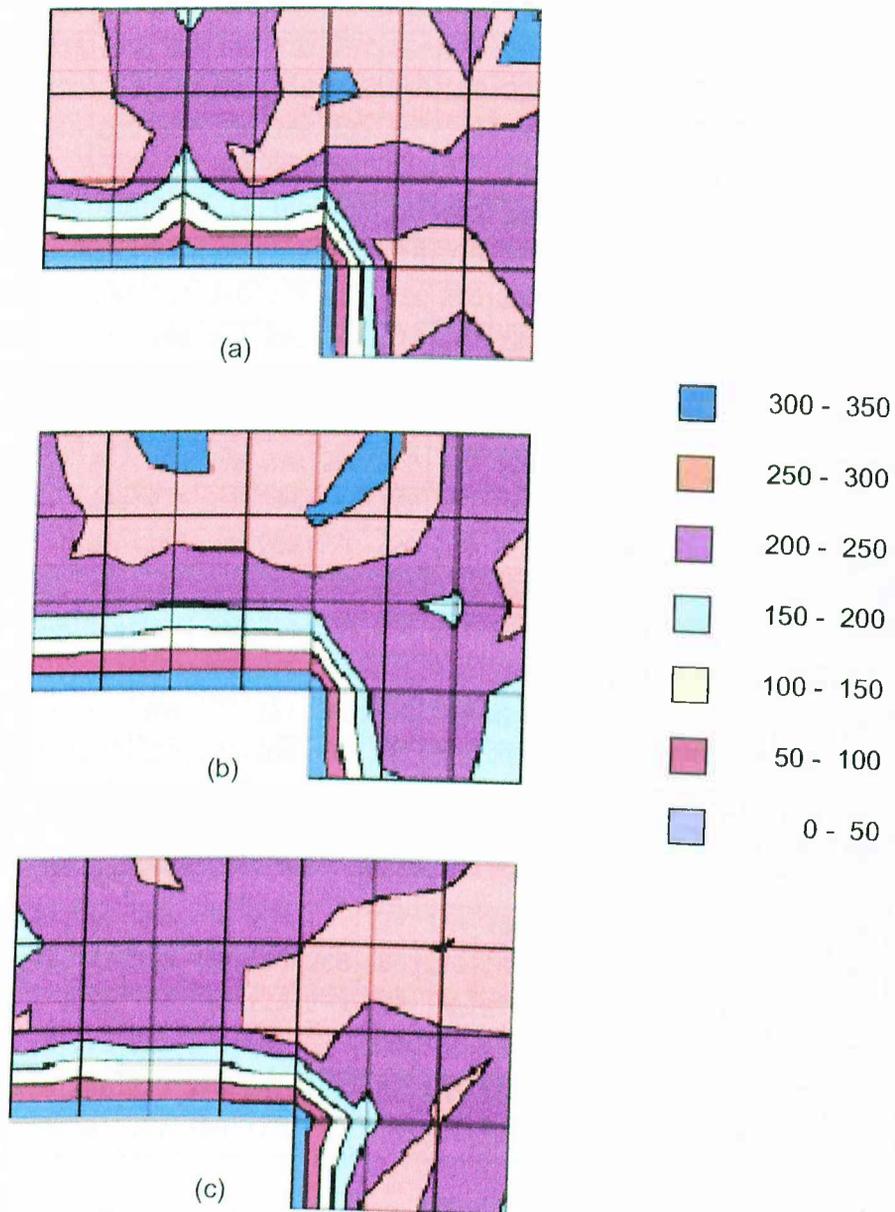


Figura 4.19 - Representação da microdureza $HV_{0,01}$ (Kgf/mm^2) no perfil esquemático da rebarba de saída: (a) ensaio n° 17 ($\chi_r = 20^\circ$); (b) ensaio n° 18 ($\chi_r = 70^\circ$); (c) ensaio n° 19 ($\chi_r = 85^\circ$).

Resultados e Discussões

Tabela 4.1 - Medições da microdureza HV_{0,01} na região da raiz da rebarba de saída (kgf/mm²)

Posição	ensaios																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
A1	265	243	209	220	227	247	242	285	270	231	322	221	291	261	306	268	268	238	222
A2	316	244	270	267	298	275	296	215	256	213	289	201	222	284	219	284	244	289	234
A3	306	214	338	256	293	284	314	335	356	220	291	211	261	256	333	268	189	324	259
A4	335	310	338	284	228	280	294	369	222	230	292	256	236	333	270	264	235	267	200
A5	261	296	316	272	308	268	308	267	304	304	302	265	329	318	278	193	282	267	200
A6	289	285	320	255	252	291	212	292	316	272	238	284	268	277	204	267	282	316	215
A7	285	268	215	239	277	285	268	335	356	221	192	209	231	300	259	235	199	231	227
A8	246	209	-	267	277	308	240	265	300	217	296	177	298	278	278	377	359	228	285
B1	243	247	235	270	194	243	187	267	228	282	320	183	259	220	289	190	264	221	182
B2	304	253	261	289	249	268	209	391	228	275	324	195	267	275	202	220	249	261	223
B3	308	175	205	280	231	240	277	261	232	275	282	220	144	284	249	289	230	273	231
B4	316	230	246	267	296	214	268	344	273	242	289	262	214	259	249	252	217	273	235
B5	235	282	182	240	318	249	-	284	259	249	302	338	191	249	246	300	308	306	247
B6	242	322	320	329	267	250	-	326	230	277	204	292	230	255	221	261	291	285	289
B7	333	226	273	312	243	209	239	296	273	277	300	187	234	249	209	197	261	228	302
B8	287	255	-	284	275	249	195	284	179	262	242	300	261	270	219	261	259	249	275
C1	273	275	211	230	282	186	262	270	220	268	278	174	189	214	236	186	243	238	261
C2	236	223	255	198	292	289	225	236	200	310	262	211	247	249	249	242	275	234	220
C3	231	207	243	318	291	226	235	338	284	261	226	220	202	344	242	316	176	203	249
C4	285	238	284	252	270	264	275	318	302	236	292	338	232	250	284	268	265	212	238
C5	282	201	236	335	306	275	291	242	302	186	221	234	300	214	270	-	212	222	285
C6	268	253	282	267	220	277	268	282	312	323	235	314	186	273	316	265	214	205	226
C7	329	244	186	243	292	231	291	275	304	180	201	316	223	209	215	239	231	193	244
C8	255	220	-	291	222	242	178	255	285	256	163	278	220	220	284	282	199	270	249
D5	-	-	214	284	239	-	-	-	-	-	-	-	-	292	285	-	331	-	-
D6	349	222	188	292	268	236	284	-	277	174	230	209	242	268	272	231	267	242	186
D7	255	195	177	277	333	175	289	268	268	220	249	214	249	236	235	258	267	219	253
D8	293	183	-	256	194	242	223	273	289	199	275	242	168	225	195	226	223	180	209
E6	191	264	236	275	298	275	291	-	209	188	261	246	280	298	308	182	253	195	262
E7	275	219	275	209	226	275	247	243	182	235	166	259	234	255	230	244	234	209	246
E8	240	225	217	291	177	180	173	289	211	262	191	191	212	225	242	242	262	175	195

Observa-se na Figura 4.19 que, apesar do aumento da microdureza do material na região próxima à superfície usinada e, principalmente, naquela correspondente à região mais deformada vista na Figura 4.18, os resultados obtidos não são definitivamente conclusivos. É evidente que há aumento da microdureza na região de formação da rebarba de saída, mas não há evidência quanto ao efeito do parâmetro de corte sobre a mesma.

Apesar da tentativa de se fazer a medição desta propriedade abrangendo toda a região

da raiz da rebarba procurando-se, aproximadamente, os mesmos pontos através da utilização de duas retas referenciais (reta horizontal B e reta vertical 5, na Figura 3.10), a natureza microscópica deste procedimento juntamente com a variação na espessura das rebarbas impediram que tais medidas fossem realmente tomadas na mesma posição.

Talvez por isso, observando os resultados da Tabela 4.1 pode-se notar que há a elevação da microdureza para alguns pontos de uma mesma reta horizontal, da ilustração da Figura 3.10, o que pode significar que tal ponto de medição encontra-se na região de maior deformação. Por outro lado, os pontos de maior microdureza obtidos sobre uma reta horizontal nem sempre têm valores correspondentes aos medidos em pontos próximos localizados em uma das retas horizontais adjacentes, o que leva a uma descontinuidade de resultados.

É provável, ainda, que os pontos de indentação tenham coincidido exatamente com uma das regiões existentes na estrutura do material usinado – ferrita ou perlita - o que levaria àquela descontinuidade devido às diferentes propriedades mecânicas destes constituintes. Essa hipótese é levantada a partir de observações das imagens da microestrutura, como mostradas nas Figuras 3.1 e 3.9 (ou 4.18), e da verificação de que as indentações têm as diagonais com dimensões entre $7,0 \mu\text{m}$ e $9,5 \mu\text{m}$ (da amostra do *cp* n° 14), as quais podem ser menores do que as dimensões lineares dos grãos de ferrita (claros) e de perlita (mais escuros) vistos naquelas figuras.

A princípio, espera-se que o aumento na deformação do material durante a formação da rebarba provoque o aumento da dureza, ou da microdureza, como pôde ser preliminarmente sugerido na ilustração da Figura 4.20.

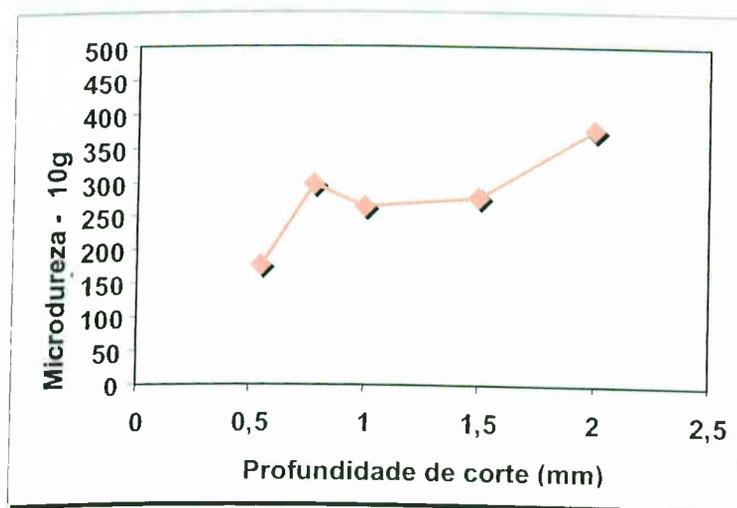


Figura 4.20 - Ilustração da variação da microdureza com a profundidade de corte observada em um mesmo ponto de medição.

A Figura 4.20 foi obtida utilizando-se de resultados da Tabela 4.1 (valores da linha A8, colunas 12, 13, 14, 15 e 16). Correspondem à medição de número 8, sobre a reta horizontal A da Figura 3.10, que foi feita nos *cp* metalográficos dos ensaios 12, 13, 14, 15 e 16.

Nesta figura verifica-se um efeito da profundidade de corte a_p na microdureza, porém, é necessário um aprofundamento desses estudos para se certificar da sua influência sobre a microdureza na raiz da rebarba de saída, assim como, da influência dos demais parâmetros de corte observados neste trabalho sobre esta propriedade.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Pode-se estabelecer as seguintes conclusões após o desenvolvimento deste trabalho:

- A realização dos ensaios produziu dois tipos de rebarba que puderam ser observadas nos *cp* após a usinagem. A rebarba de entrada, do tipo *rebarba de fluxo lateral* ou *rebarba Poisson*, na face de entrada da ferramenta na peça; e a rebarba de saída, do tipo *rebarba de encurvamento* ou *rebarba inclinada na direção de avanço*, na face de saída da ferramenta.
- A rebarba de entrada forma-se em toda a circunferência da peça e projeta-se na direção contrária à direção de avanço.
- A variação dos parâmetros de corte v_c , f , a_p e χ_r influenciaram a geometria da rebarba de entrada. A maior alteração ocorreu com as variações do avanço f e do ângulo de posição principal χ_r e a menor, com a variação da profundidade de corte a_p . A velocidade de corte v_c apresentou pequena influência, principalmente, sobre a altura da rebarba.
- Nas alterações da geometria da rebarba de entrada com os parâmetros de corte, a sua espessura sofreu maiores variações enquanto que a altura variou pouco, mantendo-se próximo a um valor característico de 0,04 mm.
- A rebarba de saída é formada sobre a superfície posterior da peça, em toda a sua circunferência, na borda da interseção daquela com a superfície usinada, com a direção de projeção voltada para a direção de avanço.
- A altura da rebarba de saída é diretamente proporcional à profundidade de corte a_p mantendo, aproximadamente, uma relação de identidade, exceto quando utiliza-se χ_r acima e abaixo de 45° . Nos ensaios onde se variou v_c e f , mantendo-se a_p constante, a altura encontrada mostrou-se, também, aproximadamente constante e muito próxima à profundidade de corte estabelecida. A alteração do ângulo de posição principal χ_r produziu variação na altura desta rebarba onde um pequeno valor de χ_r proporcionou uma rebarba

menor do que a_p utilizado. Para χ_r acima de 45° a altura encontrada é maior do que o valor de a_p .

- O mecanismo de formação da rebarba de saída é a flexão gradual do material restante ao final do comprimento da peça, próximo do final do corte, cuja espessura é continuamente reduzida até tornar-se insuficiente para suportar as forças exercidas pela ferramenta na direção do avanço e que, então, curva-se naquela direção.
- A medição da espessura de raiz das rebarbas de saída mostra que esta se encontra em torno de 0,20 mm em quase todos os ensaios, provavelmente em função do raio de ponta da ferramenta e do avanço mantido constante. As exceções ocorreram naquele ensaio com χ_r pequeno onde tal espessura é um pouco menor do que este valor e a geometria da saída da ferramenta é muito alterada, e quando variou-se o avanço em que esta espessura aumentou significativamente com avanços maiores.
- Para grandes avanços, a espessura do material que é encurvado durante a formação da rebarba aumenta proporcionalmente. No entanto, esta porção encurvada oferece resistência suficiente à ação da ferramenta e o corte do material prossegue após este encurvamento o que reduz a espessura de raiz final desta rebarba.
- O aumento do avanço, mantendo-se as demais condições de corte constantes, leva a ruptura da rebarba de saída em sua seção transversal, que deve ser a de menor espessura segundo Kishimoto *et al.* (1981). A extensão dessa ruptura evolui a partir de determinado avanço de apenas uma parte da rebarba ao longo da circunferência que constitui, até a condição da separação de toda a rebarba na forma de um anel de difícil remoção e prejudicial operação de corte.
- A microdureza do material na região da raiz da rebarba apresentou variações que são relacionadas ao encruamento provocado pela deformação, durante o encurvamento do mesmo. Entretanto, os resultados não possibilitaram analisar a influência dos parâmetros de corte sobre essa propriedade devido à aparente descontinuidade, sem qualquer tendência das medições. É muito provável que muitas das identificações tenham sido realizadas exatamente sobre os constituintes do material, ferrita ou perlita, os quais têm dureza diferente e a mesma ordem de grandeza das identificações produzidas, conduzindo à descontinuidade verificada.

- A eliminação da formação das rebarbas no torneamento cilíndrico de um material dúctil não é possível devido, principalmente, à deformação plástica que leva a essa formação. A quantidade de material que é deslocado na deformação plástica depende da geometria da ferramenta, das condições de corte e das propriedades do material usinado. Assim, mesmo na hipótese do uso de ferramentas com características ideais (grande ângulo de saída, raio de ponta e raio de arredondamento da aresta de corte infinitesimalmente pequenos, coeficiente de atrito nulo), e da utilização das condições de corte também ideais como a redução adequada da taxa de avanço ao final do corte, haveria a redução das dimensões das rebarbas, porém, não ocorreria a sua completa eliminação.
- A medição direta da altura das rebarbas de entrada e de saída formadas na usinagem do aço-carbono ABNT 1045 produziu resultados idênticos aos obtidos com correspondentes ensaios metalográficos. A medição de espessura, por outro lado, necessita da preparação de corpos-de-prova metalográficos.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho deu origem a algumas questões que merecem ser investigadas futuramente. Pode-se propor as seguintes sugestões:

- Estudar a formação de rebarbas no torneamento de material frágil e em outro mais dúctil como o alumínio. Num material frágil, como o ferro fundido cinzento deve-se verificar as ocorrências de fratura na rebarba de saída e o lascamento de borda (*breakout*).
- Estudar o efeito do raio de ponta da ferramenta e de curvatura da aresta de corte sobre a formação das rebarbas de entrada e de saída, em usinagem a seco e com fluido de corte.
- Estudar a influência de fluidos de corte na formação das rebarbas de entrada e de saída, desenvolvendo os ensaios realizados neste trabalho com ferramenta de corte de mesma especificação.
- Estudar o efeito da redução progressiva do avanço ao final do corte em função do raio de ponta da ferramenta e do ângulo de posição principal, sobre a formação da rebarba de saída.
- Analisar a formação da rebarba de saída em várias fases do seu desenvolvimento através de ensaios de *quick-stop* e filmagens de alta resolução, com o objetivo de compreender as etapas da sua formação e estudar as transformações do material durante o encurvamento, variando-se o avanço e o ângulo de posição principal.
- Introduzir a análise da deformação cisalhante para se verificar a sua relação com a formação da rebarba de entrada.
- Alterar a metodologia de medição da microdureza para se verificar efetividade da influência dos parâmetros de corte sobre esta propriedade. Sugere-se esta medição em cada um dos constituintes do material, antes do corte e após a formação da rebarba, o que pode levar a uma verificação da variação da microdureza com exatidão.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chern, G.; Dornfeld, D. A. **Burr/breakout model development and experimental verification.** Journal of Engineering Materials and Technology, v. 118, p. 201-206, April 1996.
- Ferraresi, D. **Fundamentos da Usinagem do Metais**, São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1977, 751p. v.1
- Gillespie, L. K. **The Formation and Properties of Machining Burrs.** 1973. 130 f. Dissertação (Ms thesis). Utah State University, Logan, Utah, 2 microfichas, p&b.
- Gillespie, L. K.; Blotter, P. T. **The formation and properties of machining burrs.** Trans. ASME, Journal of Engineering fo Industry, v.98, p. 66-74, Feb. 1976.
- Hashimura, U.; Dornfeld, D.; Manabe, K. **Analysis of three-dimensional burr formation in oblique cutting.** Annals of the CIRP, v.44/1, p.27-30. 1995.
- Hashimura, U.; Chang, Y. P.; Dornfeld, D. A. **Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting.** Journal of Manufacturing Science and Engineering, v.121, p.1-7, Feb. 1999a.
- Hashimura, U.; Hassamontr, J.; Dornfeld, D. A. **Effect of in-plane exit angle and rake angles on burr height and thickness in face milling operation.** Journal of Manufacturing Science and Engineering, v.121, p.13-19, Fev. 1999b.
- Hokkirigawa, K.; Kato, K., **An Experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear.** Tribology International, v.21, n. 1, p.51-57, February, 1988.
- Kang, D. C.; Wang, Z. R.; Li, S. D.; Cheng, Q. M.; **Spinning conical workpiece without mandrel.** In: 3rd International Conference on Rotary Metalworking Process. September 8-10 Setember, 1984, Kyoto, Japan. Proceedings ... pp.165-171.

Kaminise, A. K.; Silva, M. B.; Gonçalves, R. A., Guilherme, J. J.; **Study on burr formation in turning of carbon steel ABNT 1045**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 16., 2001, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. Anais...2001. p. 105-111, CD-ROM.

Kaminise, A. K.; Silva, M. B.; Gonçalves, R. A.; **Study on burr formation in turning**. In: 5th International Conference on Behaviour of Material in Machining, 12-13 November 2002, Chester, UK. P. 269-272.

Kaminise, A. K.; Machado, A. R.; Silva, M. B.; Gonçalves, R. A.; **Study on burr formation in turning**. In: 17TH International Congress of Mechanical Engineering, Manufacturing Process, November 10-14, 2003, São Paulo, SP, Brazil. Proceedings ... 2003, v.14, CD-ROM.

Kishimoto, W.; Miyake, T.; Yamamoto, A.; Yamanaka, K.; Takano, K. **Study of burr formation in face milling - conditions for the secondary burr formation**. Bull. Japan Soc. Of Prec. Eng., v. 15, n. 1, p.51-52, mar. 1981.

Ko, S.; Dornfeld, D. A. **Analysis and modelling of burr formation and breakout in metal**. Mechanics of Deburring and Surface Finishing Processes. New York: ASME, v.38, p. 79-91, 1989.

Ko, S.; Dornfeld, D. A. **A study on burr formation mechanism**. Journal of Engineering Materials and Technology, v.113, p.75-87, 1991.

Ko, S.; Dornfeld, D. A. **Analysis of fracture in burr formation at the exit stage of metal cutting**, Journal of Materials Processing Technology v.58, p.189-200, 1996a.

Ko, S.; Dornfeld, D. A. **Burr formation and fracture in oblique cutting**. Journal of Materials Processing Technology, v.62, p.24-36, 1996b.

Maracini, R. F.; Machado, A. R.; Franco, S. D.; **Efeito da temperatura sobre a energia específica de riscamento do alumínio comercialmente puro**, In: II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, 12 a 16 de Agosto de 2002, Tema 02 – Tribologia e Desgaste, Artigo CPB 0044, Anais em CD-ROM.

Machado, A. R.; da Silva, M. B. **Usinagem dos Metais**, Uberlândia-MG, Faculdade de Engenharia Mecânica - UFU, 2004, 8ª versão, 174p. Apostila.

- Nakayama, K.; Arai, M. **Burr formation in metal cutting**. Annals of the CIRP, v. 36/1, p. 33-36, 1987.
- Olvera, O.; Barrow, G. **An experimental study of burr formation in square shoulder face milling**. International Journal of Machining Tools and Manufacturing. v.36, n.9, p.1005-1020. Sept. 1996.
- Olvera, O.; Barrow, G. **Influence of exit angle and tool nose geometry on burr formation in face milling operations**. Proc. Instn. Mech. Engrs, v.212, part B, p.59-72, 1998.
- Pekelharing, A. J. **The exit failure in interrupted cutting**. Annals of the CIRP, v. 27/1, p.5-10. 1978.
- Reis, A. M. **Influência do Ângulo de Posição Secundário da Ferramenta, Raio de Ponta e Lubrificação na Usinagem em Presença de Aresta Postiça de Corte**. 2000. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil. Abril, 2000.
- Santos, S. C. **Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Aço-rápido e de Metal Duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido cinzento**. 2002, 200f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil. Abril, 2002.
- Sedriks, A. J.; Mulhearn, T.O. **Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive process**. Wear, v.6, p.457-466, 1963.
- da Silva, L. C. **Estudo da rebarba no fresamento de faceamento em blocos de motores de ferro fundido cinzento utilizando insertos de cerâmica e PCBN**. 2004, 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil. Abril, 2004.
- Soares Filho, M. **Estudo da Formação de Rebarbas no Processo de Furação**. 1995. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, Dezembro, 1995.

Souza Jr, A. M. **Estudo da Utilização de PCBN e Cerâmica Mista no Fresamento de Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento**. 2001. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil. Março, 2001.

Stein, J. M.; Dornfeld, D. A. **Burr formation in Drilling Miniature Holes**. Annals of the CIRP, v.46/1, p.63-66, 1997.

Sugawara, A.; Inagaki, K. **Effect of workpiece structure on burr formation in micro-drilling**. Precision Engineering, v.4, n.1, p.9-14. Jan, 1982.

Trent, E. M. **"Metal Cutting"**. Butterworths & Co Ltd., 2nd Edition, London, 1984.

Valente, C. M. O. **Implementação de Sistema para Eliminação Automática de Rebarbas Resultantes de Processos de Usinagem**. 271f, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil. Setembro, 2003.

Wang, G.; Wang, S.; Wang, J. **Cutting-direction burr formation in orthogonal cutting**. In: ICPCG - International Conference on the Progress of Cutting and Grinding, JSPE, 19-22 Nov. 1996, Osaka, Japão, Anais , p.90-95.

Yeo, B. S. H.; Ngoi, B. K. A.; Chua, L. Y. **Ultrasonic Deburring**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.13, p333-341, 1997.

ANEXO 1

Dedução das equações 4.2 e 4.3

A dedução das Equações 4.2 e 4.3 é desenvolvida utilizando-se da geometria exposta na Figura A1.1 que é uma reprodução da Figura 4.5.

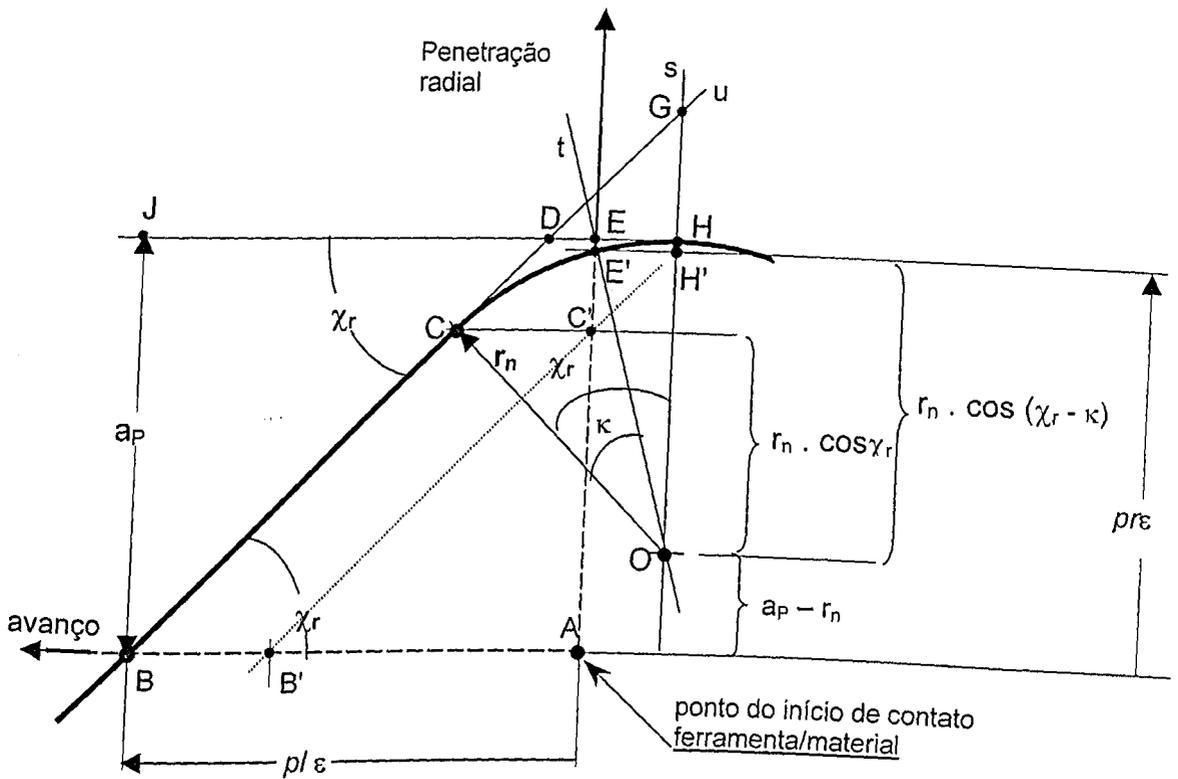


Figura A1.1 - Reprodução da Figura 4.5 utilizada na dedução das Equações 4.2 e 4.3.

- **Dedução da Equação 4.2 - expressão para o cálculo de $pr\epsilon$:**

Da Figura A1.1, verifica-se imediatamente que a penetração radial $pr\epsilon$ é calculada pela seguinte expressão:

$$pr\epsilon = a_p - r_n [1 - \cos(\chi_r - \kappa)] \quad 0^\circ \leq \kappa \leq \chi_r \quad \text{Equação 4.2}$$

- **Dedução da Equação 4.3 - expressão para o cálculo de $pl \epsilon$:**

A expressão para o cálculo da penetração longitudinal $pl \epsilon$ é obtida conforme está apresentado abaixo.

Da Figura A1.1, verifica-se que:

$$AB = JD + DE \quad (1)$$

Observa-se, também, que:

$$DE = DH - EH \quad (2)$$

Pode-se observar que:

$$\operatorname{tg} \chi_r = \frac{HG}{DH} \Rightarrow DH = \frac{HG}{\operatorname{tg} \chi_r} \quad (3)$$

Mas,

$$OG = HG + OH \Rightarrow HG = OG - OH \Rightarrow HG = OG - r_\eta \quad (4)$$

Pode-se verificar que:

$$\cos \chi_r = \frac{OC}{OG} \Rightarrow OG = \frac{r_\eta}{\cos \chi_r} \quad (5)$$

Substituindo (5) em (4), tem-se:

$$HG = \frac{r_\eta}{\cos \chi_r} - r_\eta \Rightarrow HG = \frac{r_\eta \cdot (1 - \cos \chi_r)}{\cos \chi_r} \quad (6)$$

Substituindo (6) em (3), tem-se:

$$DH = \frac{\left[\frac{r_\eta \cdot (1 - \cos \chi_r)}{\cos \chi_r} \right]}{\operatorname{tg} \chi_r} \Rightarrow DH = \frac{r_\eta \cdot (1 - \cos \chi_r)}{\operatorname{sen} \chi_r} \quad (7)$$

Da Figura A1.1, pode-se verificar também que:

$$\operatorname{sen}(\chi_r - \kappa) = \frac{E'H'}{OE'} \Rightarrow \operatorname{sen}(\chi_r - \kappa) = \frac{EH}{r_\eta} \Rightarrow EH = r_\eta \cdot \operatorname{sen}(\chi_r - \kappa) \quad (8)$$

Substituindo (7) e (8) em (2), tem-se:

$$DE = \frac{r_\eta \cdot (1 - \cos \chi_r)}{\operatorname{sen} \chi_r} - r_\eta \cdot \operatorname{sen}(\chi_r - \kappa) \quad (9)$$

Na Figura A1.1, observa-se também que:

$$\operatorname{tg} \chi_r = \frac{BJ}{JD} \Rightarrow JD = \frac{BJ}{\operatorname{tg} \chi_r} \Rightarrow JD = \frac{a_p}{\operatorname{tg} \chi_r} \quad (10)$$

Substituindo (9) e (10) em (1), obtém-se:

$$\begin{aligned}
 AB &= \frac{r_\eta \cdot (1 - \cos\chi_r)}{\text{sen}\chi_r} - r_\eta \cdot \text{sen}(\chi_r - \kappa) - \frac{a_p}{\text{tg}\chi_r} \Rightarrow \\
 AB &= \frac{r_\eta - r_\eta \cdot \cos\chi_r}{\text{sen}\chi_r} + \frac{a_p \cdot \cos\chi_r}{\text{sen}\chi_r} - r_\eta \cdot \text{sen}(\chi_r - \kappa) \Rightarrow \\
 AB &= \frac{r_\eta + (a_p - r_\eta) \cdot \cos\chi_r}{\text{sen}\chi_r} - r_\eta \cdot \text{sen}(\chi_r - \kappa) \quad (11)
 \end{aligned}$$

O cálculo da penetração longitudinal pl_ε durante a fase de penetração da ferramenta é, assim, expressado pela equação (11). Substituindo pl_ε por AB, tem-se:

$$pl_\varepsilon = \frac{r_\eta + (a_p - r_\eta)}{\text{tg}\chi_r} - r_\eta \cdot \text{sen}(\chi_r - \kappa), \quad 0^\circ \leq \kappa \leq \chi_r$$