

SAIMON VENDRAME

**ESTUDO DA INTEGRIDADE DA ARESTA DE
MACHOS DE CORTE DE HSS DURANTE A
RETIFICAÇÃO EM VÁRIAS CONDIÇÕES DE CORTE**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2015

SAIMON VENDRAME

ESTUDO DA INTEGRIDADE DA ARESTA DE MACHOS DE CORTE DE HSS DURANTE A RETIFICAÇÃO EM VÁRIAS CONDIÇÕES DE CORTE

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi - Unesp - Bauru

Uberlândia - MG
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

V453e
2015

Vendrame, Saimon, 1988-
Estudo da integridade da aresta de machos de corte de HSS durante a
retificação em várias condições de corte / Saimon Vendrame. - 2015.
152 f. : il.

Orientador: Rosemar Batista da Silva.
Coorientador: Eduardo Carlos Bianchi.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Usinagem - Teses. 3. Retificação
e polimento - Teses. 4. Rebarbagem - Teses. I. Silva, Rosemar Batista
da, 1974-. II. Bianchi, Eduardo Carlos, 1959-. III. Universidade Federal
de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
IV. Título.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este curso. Aos professores que contribuiram com minha formação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar o curso, pela bolsa e pelos recursos utilizados neste projeto.

Ao Prof. Rosemar Batista da Silva, pelo trabalho de orientação, pelos conselhos e por estar sempre disposto a colaborar.

À empresa OSG Sulamericana pela parceria estabelecida, e atenção recebida dos funcionários, pela doação das amostras e por viabilizar os ensaios. Em especial, pelo auxílio do Sr. Rodrigo Katsuda, Sr. Eduardo Hidekazu Doi, Sr. Énio Nicolau Sarachini e Sr. Jose Aguinaldo Lopes da Silva.

À Faculdade de Engenharia de Bauru e ao Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA). Em especial ao prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela co-orientação e atenção prestada; ao prof. Paulo Roberto de Aguiar, Me. Hamilton José de Mello pela dedicação e prestatividade, Me. Marcelo Marchi, ao aluno de iniciação científica Luiz Otávio e ao demais envolvidos no trabalho.

Ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), em especial ao prof. Dr. Washington Martins, Me. José Lúcio, Me. Vinícius Teles, ao aluno de iniciação científica Ricardo Spini e demais envolvidos.

Ao Laboratório de Próteses da Faculdade de Odontologia da UFU, e também ao Adalberto Caldeira Brant pela amizade e auxílio na etapa de preparação de amostras.

Ao estagiário Vinícius Barros Vieira, à aluna de iniciação científica Déborah de Oliveira e ao aluno José Renato que participaram mais diretamente deste trabalho.

Ao LEPU por me dar a oportunidade de realizar este trabalho e contribuir para o meu aperfeiçoamento profissional e engrandecimento pessoal dentro deste grupo. Em especial, aos meus amigos Cleudes, Armando, Jairo, Luciano, Janaina e aos demais membros.

A CAPES, CNPq e FAPEMIG pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro na realização deste projeto.

A minha família que sempre esteve ao meu lado, sempre compreensiva na minha ausência e apoiando meus sonhos (Meu pai Cláudio, minha mãe Marilisa e minha irmã Egídia).

VENDRAME, S., **Estudo da integridade da aresta de macho de corte de HSS durante a retificação em várias condições de corte** 2015. –142 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, Brasil.

RESUMO

Machos de corte são ferramentas de usinagem geralmente feitas em aços-rápidos por meio de várias etapas. Uma das etapas de fabricação é a retificação da superfície dos filetes. E neste contexto, uma empresa fabricante de machos detectou o problema de queima e formação de rebarbas durante a retificação dos filetes. O fenômeno de queima é um dano na integridade superficial e subsuperficial de origem térmica, levando geralmente queda da vida útil da ferramenta. A formação de rebarba também pode afetar a integridade das arestas dos machos de corte. Neste sentido, este trabalho apresenta o estudo dos fenômenos da queima e da formação de rebarba durante a retificação de machos de corte. Primeiramente, os problemas foram identificados nas condições reais de fabricação. Em seguida foram realizados ensaios em laboratório utilizando uma amostra especialmente projetada cuja geometria reproduz a geometria dos filetes dos machos de corte. As principais variáveis de entrada investigadas foram velocidade de corte, velocidade da peça, penetração de trabalho, direção de corte e a geometria do canal do filete. As variáveis de saída foram: a espessura da camada afetada, microdureza e análise das imagens arestas. Após esta etapa, foram realizados ensaios de usinagem na empresa utilizando a mesma metodologia dos ensaios em laboratório. Os resultados mostraram similaridade entre os ensaios em laboratório e os ensaios na empresa. A espessura da camada afetada aumentou com a penetração de trabalho, mas diminui com o aumento da velocidade da peça. Já os parâmetros velocidade de corte e direção de corte não apresentaram influência significativa na espessura desta camada. A influência dos parâmetros de usinagem na formação de rebarbas segue a seguinte ordem de importância: geometria da aresta, direção de corte, velocidade da peça, velocidade de corte e velocidade de mergulho. Em todas as condições, o aumento da velocidade da peça implicou na diminuição da rebarba, enquanto que o aumento da velocidade de corte provocou o aumento das rebarbas. Já nos ensaios de retificação na empresa, a velocidade de corte não exerceu influência significativa no tamanho das rebarbas observadas.

Palavras chave: Retificação, Machos de corte, Velocidade de trabalho, Camada afetada pelo calor, Rebarba.

VENDRAME, S., **Study of the integrity of the cutting edges of taps of HSS during grinding in various cutting conditions** 2015. -142 f. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

ABSTRACT

Taps are cutting tools usually made of high speed steel follows several stages. One of their manufacturing stage is the grinding of threads surfaces. Into this context, a manufacturer detected some problems such as grinding burning and burr formation on the machined surface. The burning phenomenon is considered a thermal origin damage on the surface and subsurface, that causes reduction in tap's life. Also, burr formation can adversely affect the integrity of the tap cutting edges. In this context, this work presents a study of the phenomena of burning and burr formation during grinding of HSS taps. Initially, the problems were identified in a real conditions during their fabrication in the industry. Secondly, laboratory trials were carried out in a specially designed HSS workpiece sample that can reproduce the geometry of the cutting taps threads. The input variables were grinding wheel speed, work speed, radial depth of cut, cutting direction and thread edge geometry. The output parameters investigated were: thickness of affected layer, microhardness and analysis of the sample edges. After this stage, machining trials were performed again in the industry using the same methodology employed during laboratory trials. The results showed similarity between laboratory and industry trials. In general, the thickness of affected layer of workpiece increased with work penetration but decreased with increase in work speed. The grinding wheel speed and cutting direction parameters did not show significant influence on the thickness of such layer. The order of importance of input machining parameters on the burr formation is as follows: thread edge geometry, cutting direction, work speed, wheel speed and radial depth of cut. The increase in work speed, in general, reduced the burr size, whereas the burr size increase with grinding speed. Also, no significant influence of work speed on burrs size was observed during grinding trials performed in the industry.

Keywords: Grinding, Cutting Taps, Work speed, Thermal affected layer, Burr.

Lista de Figuras

2.1	Classificação dos Principais Tipos de Retificação (MARINESCU <i>et al.</i> , 2006)	6
2.2	Principais parâmetros para retificação tangencial cilíndrica (a) de mergulho (b) de passagem (Adaptado de Rowe (2013))	7
2.3	Representação de retificação de mergulho: (a) plana de superfície, (b) cilíndrica externa. (Adaptado de (MARINESCU <i>et al.</i> , 2006))	8
2.4	Representação do diâmetro equivalente para três tipos usuais de retificação,(a) retificação externa, (b) retificação de superfície e (c) retificação interna. (ROWE, 2013)	9
2.5	Representação da região de contato na retificação tangencial cilíndrica (Adaptado de Nussbaum (1988))	10
2.6	Esquema dos mecanismos de corte na retificação (a) microsulcamento, (b) microcorte, (d) microfadiga e (e) microtrinca (ZUM GAHR, 1987)	15
2.7	Formação do cavaco na retificação (MARINESCU <i>et al.</i> , 2004)	17
2.8	Seção transversal de um cavaco produzido em um teste com um único grão (DOYLE, 1973)	18
2.9	Mecanismos de remoção em material com carbonetos: com partículas abrasivas duras contra: (a) carbonetos menores que os riscos, (b) carbonetos do tamanho dos riscos e (c) carbonetos maiores que os riscos, com partículas abrasivas moles contra: (d) carbonetos menores que os riscos, (e) carbonetos do tamanho dos riscos e (f) carbonetos maiores que os riscos (ZUM GAHR, 1987)	19
2.10	Ferramentas fabricadas em Aço-Rápido: (a) brocas, (b) cossinetes, (c) machos, (d) fresas, (e) alargadores, (f) bits Fonte: (a),(b),(c), Catálogo OSG, (d),(e),(f), Indaço.	22
2.11	Dureza dos constituintes do Aço-rápido e dos principais tipos de abrasivos utilizados em retificação de metais (BADGER, 2003)	23
2.12	Nomenclatura das partes do macho com: (a) haste passante, (b) haste reforçada (OSG, 2012)	25
2.13	Terminologia das dimensões de machos de corte (OSG, 2012)	25

2.14	Tipos de macho de corte utilizado em rosqueamento com máquinas: (a) Macho Ponta Helicoidal, (b) Macho Canal Helicoidal, (c) Macho Canal Reto e (d) Macho Laminador (Adaptado de OSG (2012)).	26
2.15	Etapas do processo de fabricação de machos de corte - (a) avanço do rebolo, (b) passagem da ferramenta pelo rebolo (c) recuo do rebolo (Fonte: Próprio Autor).	28
2.16	Marca de retificação em filetes retificados - (a) filetes retificados, (b) detalhe marca de retificação próxima a aresta da superfície retificada (BADGER, 2011).	31
2.17	Perfil de dureza abaixo da superfície retificada de um aço ferramenta para diferentes profundidade de corte (MALKIN; GUO, 2008).	32
2.18	Regiões de ocorrência de rebarba em superfícies após a retificação de passagem (SUDERMANN; REICHENBACH; AURICH, 2010).	35
2.19	Esquema da formação de rebarba na retificação próximo a aresta de saída da peça (AURICH; SUDERMANN; BIL, 2005).	35
2.20	Imagens de rebarbas formadas em aços ferramenta após o processo de retificação (Adaptado de Aurich, Sudermann e Bil (2005)).	36
2.21	Perfil de microdureza das rebarbas formadas em aço AISI O2 (90 MnCrV8) após o processo de retificação (AURICH; SUDERMANN; BIL, 2005).	37
2.22	Formação de rebarba no processo de retificação: (a) rebarbas formadas com parada do rebolo em diferentes distâncias da aresta, (b) espessura das rebarbas mostradas em (a), (c) espessura teórica da aresta de saída (SUDERMANN; REICHENBACH; AURICH, 2010).	38
3.1	Fluxograma das etapas do procedimento experimental.	40
3.2	Marca de retificação na formação de rebarba em machos de corte - (a) Filetes e canal de machos de corte, (b) Detalhe da aresta entre o filete e o canal, com presença de marca de retificação e rebarba.	41
3.3	Região de ocorrência das marcas de retificação onde foram feitas as medição através de software CAD e análises.	44
3.4	Geometria da aresta de saída no macho de corte de HSS-M3 - (a) seção entre a face e o canal (b) Vista lateral dos filetes	45
3.5	Geometria da amostra desenvolvida para os ensaios em laboratório.	45
3.6	Retificadora tangencial cilíndrica utilizada nos ensaios: (a) Retificadora, (b) montagem do rebolo-peça e fluido de corte, (c) detalhe do eixo da peça fixada entre-pontas	46
3.7	Amostra fixada durante os ensaios de retificação tangencial cilíndrica.	47

3.8	Presença de marca de retificação e rebarba após os ensaios preliminares com amostras de aço SAE4340 utilizando rebolo de óxido de alumínio de granulometria 220 mesh ($v_s = 32,2$ m/s, $v_w = 0,22$ m/s, $a_e = 3$ μm , $v_f = 0,5$ m/s).	47
3.9	Parâmetros de entrada e de saída nos ensaios de usinagem em laboratório	48
3.10	Ilustração da trajetória espiral do avanço do rebolo em relação ao eixo da amostra.	49
3.11	Ilustração da trajetória da peça em relação ao rebolo durante o ensaio, em (a) a peça altera o sentido de corte entre discordante e concordante, em (b) a peça é deslocada lateralmente para evitar que haja diferença de profundidade de corte entre os canais.	49
3.12	Quadro do arranjo para os ensaios de usinagem em laboratório.	51
3.13	Amostra de Aço-Rápido M-3 utilizada nos ensaios após a preparação através de lixamento com lixas de granulometria 220 mesh e 320 mesh.	52
3.14	Regiões selecionadas para análise no estereomicroscópio após os ensaios de retificação em laboratório.	53
3.15	Esquema de medição da espessura da marca de retificação, em (a) posição das regiões analisadas na amostra, (b) detalhe da medição utilizando software CAD.	53
3.16	Regiões selecionadas nas amostras para medição da microdureza nas amostras após os ensaios de retificação em laboratório.	54
3.17	Retificadora CNC utilizada nos ensaios na empresa.	56
3.18	Parâmetros de entrada e de saída no esnsaios de usinagem na empresa.	57
3.19	Amostra de macho de corte utilizada nos ensaios, fabricada em Aço-Rápido, classe M3.	58
3.20	Dimensões das amostras utilizadas nos ensaios na empresa (OSG, 2012).	58
3.21	Quadro do arranjo das condições de usinagem utilizadas nos ensaios de usinagem na empresa.	60
3.22	Esquema para preparação da amostra para medição de microdureza, em (a) região seccionada para remover um filete, em (b) ampliação da região de medição de microdureza indicando a distância entre as indentações.	61
3.23	Filete do macho de corte embutido em resina acrílica para medição de microdureza.	61
4.1	Fluxograma para apresentação dos resultados obtidos.	63
4.2	Imagens das várias regiões da amostra para análise da camada abaixo da superfície retificada de Aço-Rápido M3 na condição CL07: velocidade de corte (v_s) 21,4 m/s, velocidade de trabalho (v_w) 0,22 m/s, velocidade de avanço (v_f) 1,0 mm/s, profundidade de corte por volta ($a_e/volta$) 12 $\mu m/volta$ e direção de corte discordante.	64

4.3 Detalhes da medição da camada de marca de retificação na face lateral da amostra retificada sob a condição CL07: velocidade de corte (v_s) 21,4 m/s, velocidade de trabalho (v_w) 0,22 m/s, velocidade de avanço (v_f) 1,0 mm/s, profundidade de corte por volta ($a_e/volta$) 12 $\mu\text{m}/\text{volta}$ e direção de corte discordante.	65
4.4 Imagens da camada abaixo da superfície retificada observada após os ensaios de usinagem referente às 16 condições de ensaio em laboratório (CL), conforme planejamento da Tab.3.2.	67
4.5 Espessura da camada afetada em relação à direção de corte: concordante e discordante, conforme planejamento da Tab.3.2.	68
4.6 Espessura da camada afetada em relação a velocidade da peça no nível mais baixo (-1) e nível mais alto (1), conforme planejamento da Tab.3.2	69
4.7 Espessura da camada afetada em relação a velocidade de mergulho do rebolo no nível mais baixo (-1), e no nível mais alto (1), conforme planejamento da Tab.3.2.	70
4.8 Espessura da camada afetada em relação a velocidade de corte no nível mais baixo (-1), no nível mais alto, conforme planejamento da Tab.3.2.	72
4.9 Efeito médio dos parâmetros de corte entre os níveis mais baixo e mais alto para os Ensaios em Laboratório.	75
4.10 Espessura da camada afetada em relação a profundidade de corte por volta ($a_e/volta$), (a) nível mais baixo (3 $\mu\text{m}/\text{volta}$), (b) nível intermediário (6 $\mu\text{m}/\text{volta}$) e (c) nível mais alto (12 $\mu\text{m}/\text{volta}$).	76
4.11 Análise dos resultados comparando entre os níveis da profundidade de corte por volta ($a_e/volta$) e velocidade da peça (v_s).	77
4.12 (a) Região das indetações a partir da superfície, (b) ampliação da Fig. 4.12(a) e detalhe da distância entre as indentações - condição de usinagem CL04 da Tab.3.2.	78
4.13 Valores de microtureza a partir da superfície retificada sob a condição de usinagem CL07 da Tab.3.2.	79
4.14 Microtureza a partir da superfície para as condições (a) discordante e (b) concordante nos Ensaios em Laboratório.	80
4.15 Microtureza a partir da superfície para as condições com velocidade da peça: (a) 0,45 m/s e (b) 0,22 m/s nos Ensaios em Laboratório.	80
4.16 Microtureza a partir da superfície para as condições com velocidade de mergulho: (a) 0,5 mm/min e (b) 1,0 mm/min nos Ensaios em Laboratório.	81
4.17 Microtureza a partir da superfície para as condições com velocidade do rebolo: (a) 21,4 m/s e (b) 32,2 m/s nos Ensaios em Laboratório.	82

4.18	Imagens das superfícies laterais e das arestas de entrada do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL01 a CL04.	85
4.19	Imagens das superfícies laterais e das arestas de entrada do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL05 a CL08.	86
4.20	Imagens das superfícies laterais e das arestas de entrada do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL09 a CL12.	87
4.21	Imagens das arestas de entrada do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL13 a CL16.	88
4.22	Imagens das rebarbas das arestas de entrada com ângulo de 45° e direção de corte concordante, obtidas através de MEV para os Ensaios em Laboratório. . .	91
4.23	Imagens das rebarbas das arestas de entrada com ângulo de 45° e direção de corte discordante, obtidas através de MEV para os Ensaios em Laboratório. . .	92
4.24	Arestas de saída do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL01 a CL04 da Tab.3.2.	94
4.25	Arestas de saída do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL05 a CL08 da Tab.3.2.	95
4.26	Arestas de saída do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL09 a CL12 da Tab.3.2.	96
4.27	Arestas de saída do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL13 a CL16 da Tab.3.2.	97
4.28	Imagens obtidas através de MEV das rebarbas formadas nas arestas de saída com o ângulo de 45°, na direção de corte concordante nos Ensaios em Laboratório. . .	99
4.29	Rebarbas das arestas de saída com 45°, em corte discordante, obtidas através de MEV nos Ensaios em Laboratório.	100
4.30	Arestas entre o canal dos machos e a superfície retificada dos filetes nos ensaios de usinagem na empresa: (a) rebarbas formadas no processo e em (b) marca de retificação evidenciando a queima de retificação.	103
4.31	Marca de retificação após os ensaios de usinagem para 8 condições de ensaio na empresa (CE).	105
4.32	Espessura da marca de retificação para 8 condições de ensaio na empresa (CE).	106
4.33	Marcas de retificação nas arestas dos filetes retificados sob a condição CE02(a) e CE06(b).	107
4.34	Espessura da marca escurecida abaixo da superfície para as oito condições de ensaio na empresa em função da velocidade do rebolo: (a) velocidade do rebolo no nível mais baixo e (b) velocidade do rebolo no nível mais alto.	108
4.35	Espessura da marca escurecida abaixo da superfície para as oito condições de ensaio na empresa em função da velocidade da peça: (a) velocidade da peça no nível mais baixo e (b) velocidade da peça no nível mais alto.	109

4.36 Espessura da marca escurecida abaixo da superfície para as oito condições de ensaio na empresa em função da profundidade de corte para os ensaios na empresa: (a) profundidade de corte no nível mais baixo e (b) profundidade de corte no nível mais alto.	110
4.37 Variação da espessura da marca de retificação em torno da média em função dos parâmetros velocidade de corte, velocidade da peça e profundidade de corte nos ensaios na empresa (CE).	111
4.38 Espessura da marca de retificação em relação a velocidade do rebolo e velocidade de trabalho para os ensaios na empresa: (I) $v_w(-1)$ e $v_s(-1)$, (II) $v_w(+1)$ e $v_s(-1)$, (III) $v_w(-1)$ e $v_s(+1)$ e em (IV) $v_w(+1)$ e $v_s(+1)$	112
4.39 Valores de microdureza na região de camada mais escura abaixo da superfície para as condições (a) CE 01 e (b) CE 05.	113
4.40 Valores de microdureza na região de camada mais escura abaixo da superfície para as condições (a) CE 02 e (b) CE 06.	113
4.41 Valores de microdureza na região de camada mais escura abaixo da superfície para: (a) Condição CE 03 e (b) Condição CE 08.	114
4.42 Rebarbas na aresta dos machos após os ensaios de retificação na empresa, condições de CE 01 a CE 04.	116

Lista de Tabelas

2.1	Resumo dos efeitos dos principais parâmetros de corte em retificação na espessura de contato, na área de contato rebolo peça e no desgaste do rebolo (MALKIN; GUO, 2008)	12
3.1	Composição em massa dos elementos de liga do Aço-Rápido classe M-3 utilizado na fabricação de machos de corte (OSG - Sulamericana)	42
3.2	Parâmetros utilizados para retificação das amostras cilíndricas de Aço-Rápido em laboratório	50
3.3	Descrição das regiões de análise das amostras	55
3.4	Parâmetros Utilizados no Ensaio de Usinagem na Empresa	59
4.1	Valores medidos da espessura da marca de retificação das imagens das amostras da Fig. 4.4 (Ensaios em Laboratório)	66
4.2	Quadro ANOVA para as medições da camada de marca de retificação para os ensaios em laboratório	73
4.3	Quadro ANOVA para as medições da camada de marca de retificação desconsiderando as interações de segunda ordem para os ensaios em laboratório	74
4.4	Espessura da marca de retificação medida nas amostras após os ensaios na empresa (CE)	104
4.5	Quadro ANOVA para as medições da espessura da camada afetada	109
4.6	Quadro ANOVA para as medições da espessura da camada afetada sem as interações de seunda ordem da Tab. 4.5	110
4.7	Quadro de comparação entre os parâmetros dos ensaios em laboratório e na empresa	118

Lista de Símbolos e Abreviaturas

a_e	- Penetração de trabalho	μm
$a_e/volta$	- Avanço por rotação da peça	$\mu m/volta$
Al_2O_3	- Óxido de Alumínio	
ANOVA	- Análise de Variância	
a_p	- Avanço na direção do rebolo	μm
b	- Largura de retificação	mm
CAD	- <i>Computer Aided Design</i> , Desenho Assistido por Computador	
CBN	- Nitreto Cúbico de Boro	
CE	- Condição de Ensaio na Empresa	
CL	- Condição de Ensaio em Laboratório	
CNC	- Comando Numérico Computadorizado	
e_c	- Energia específica de corte	J/g
d_e	- Diâmetro de rebolo equivalente	mm
d_s	- Diâmetro de rebolo	mm
d_w	- Diâmetro da peça	mm
F_n	- Componente Força de corte normal	N
F_t	- Componente Força tangencial no rebolo	N
GL	- Graus de Liberdade	
HCl	- Ácido Clorídrico	
h_{eq}	- Espessura equivalente de corte	μm
HRC	- Dureza Rockwell C	
HSS	- <i>High-Speed Steel</i> , Aço-Rápido	
HV	- Dureza Vickers	
l_c	- Comprimento aparente de contato	μm
L.U.A	- Laboratório de Usinagem por Abrasão	
LEPU	- Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem	
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura	

P	- Potência de Usinagem	J/s
Q	- Taxa de remoção de material	mm^3/s
Q'	- Taxa de remoção de material por comprimento	$mm^3/mm.s$
QM	- Quadrado médio	
REG	- Região de Análise	
SQ	- Soma dos Quadrados	
SiC	- Carboneto de Silício	
t	- Tempo	s
u	- Energia total no processo	J
u_{ch}	- Energia para o corte	J
u_{pl}	- Energia de sulcamento	J
u_{sl}	- Energia de atrito, ou deslizamento	J
v_s	- Velocidade do rebolo	m/s
v_w	- Velocidade de Trabalho	m/s
v_c	- Velocidade de corte	m/s
v_{ft}	- Velocidade de avanço transversal	mm/min
v_f	- Velocidade de mergulho do rebolo na direção da peça	mm/min

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Classificação dos Tipos de Retificação	5
2.2	Principais Parâmetros de Retificação	6
2.3	Tipos de Contato na Retificação	7
2.4	Relações Cinemáticas Entre Rebolo e Peça	10
2.5	Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})	12
2.6	Taxa de Remoção de Material (Q)	13
2.7	Mecanismos de Corte na Retificação	14
2.7.1	Retificação de Materiais Dúcteis, Frágeis e Materiais com Carbonetos .	17
2.8	Aço-Rápido	20
2.9	Machos de Corte	24
2.10	Retificação de Machos de Corte	27
2.11	Integridade Superficial de Superfícies Usinadas	28
2.11.1	Queima de Retificação	30
2.11.1.1	Métodos de Detecção da Queima	31
2.11.2	Rebarba em Peças Retificadas	34
3	METODOLOGIA	39
3.1	Primeira Etapa - Identificação do Problema	41
3.1.1	Material dos Machos de Corte	42
3.2	Segunda Etapa - Ensaios de Usinagem em Laboratório	42
3.2.1	Desenvolvimento dos Corpos de Prova	43
3.2.2	Ensaios Preliminares e Definitivos no Laboratório	45
3.2.3	Procedimento para Verificação de Alteração na Estrutura Subsuperficial	52
3.2.4	Procedimento para Verificação da Microdureza	54
3.2.5	Procedimento para Análise das Rebarbas	55
3.3	Terceira Etapa - Ensaios de Usinagem na Empresa	56
3.3.1	Ensaios Preliminares e Definitivos na Empresa	56

3.3.2	Procedimento para Análise da Queima e Rebarba	60
3.3.3	Procedimento para Verificação da Microdureza	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	Considerações iniciais	62
4.2	Resultados dos Ensaios de Usinagem em Laboratório	62
4.2.1	Análise da Queima nas Amostras de Laboratório	64
4.2.1.1	Espessura da camada afetada nas amostras de laboratório . .	65
4.2.1.2	Perfil de Microdureza na Subsuperfície das Amostras de La- boratório	77
4.2.2	Investigação da Formação de Rebarba nas Arestas das Amostras Após Usinagem em Laboratório	83
4.2.2.1	Investigação das Rebarbas nas Arestas de Entrada	84
4.2.2.2	Análise das Rebarbas na Aresta de Entrada Através de MEV	89
4.2.2.3	Investigação das Rebarbas nas Arestas de Saída	92
4.2.2.4	Análise das Rebarbas na Aresta de Saída Através de MEV .	99
4.3	Resultados dos Ensaios de Usinagem na Empresa	102
4.3.1	Análise da Queima nos Machos de Corte	103
4.3.1.1	Espessura da Camada Queimada nos Machos de Corte	103
4.3.1.2	Perfil de Microdureza na Subsuperfície dos Machos	111
4.3.2	Investigação da Formação de Rebarba nos Machos de Corte	115
4.4	Comparação Entre os Ensaios no Laboratório e Ensaios na Empresa	117
5	CONCLUSÕES	119

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem que, em geral, visa conferir um melhor acabamento e tolerâncias mais estreitas dos componentes fabricados em relação aos outros processos de usinagem com geometria definida, como por exemplo, o fresamento (MALKIN; GUO, 2008). Dentre as varias aplicações, a retificação é empregada nas etapas finais da produção de ferramentas de corte, tais como brocas, fresas, alargadores e machos de corte. Estas ferramentas são normalmente fabricadas em materiais endurecidos ($>60\text{HRc}$), para geração das arestas de corte que possam usinhar metais.

Apesar de bastante estudado, ainda existem grandes desafios para indústria quanto ao processo de retificação. Em muitos casos apenas a observação e a experiência dos usuários não são suficientes para solucionar os problemas encontrados durante a afiação das ferramentas de corte. Assim, é importante recorrer a uma abordagem com metodologia científica para investigação dos fenômenos envolvidos na usinagem das ferramentas de corte e tentar encontrar as soluções para cada caso. Por outro lado, o processo de retificação pode ser um processo simples desde que se conheçam os parâmetros adequados para um dado conjunto material da peça - rebolo (BADGER, 2011).

Oliveira *et al.* (2009) apontam que muitas empresas não utilizam processos mais avançados de fabricação, como a retificação, por falta de conhecimento das técnicas e também da interação entre os parâmetros de corte. A princípio, sabe-se que a severidade dos defeitos em superfícies retificadas depende da interação da energia mecânica e energia térmica produzida e das propriedades do material da peça durante o processo de retificação. Alguns materiais que são considerados de fácil usinabilidade pelos processos convencionais com ferramenta de geometria definida apresentam diferente comportamento quando são retificados. Isso se deve às peculiaridades do processo de retificação e apresentam com frequência danos superficiais indesejáveis. Não se tem um conhecimento aprofundado da quantidade de energia mecânica

e térmica que age na peça nem da sensibilidade de todos os materiais em relação a energia produzida. É fundamental para as indústrias entender os efeitos da alteração dos parâmetros de corte antes de aplicar novas estratégias de retificação. A indústria necessita de modelos preditivos para garantir a integridade superficial, aperfeiçoar o processo de retificação existente, desenvolver novos processos de retificação e adotar novas tecnologias de retificação. Um dos desafios da retificação é garantir que o processo transcorra com confiabilidade e, para isso, é importante o estudo que busque, para cada caso, o equilíbrio entre a seleção dos parâmetros de corte e produtividade sem afetar a integridade da peça usinada.

Como apresentado por Saravanapriyan, Vijayaraghavan e Krishnamurthy (2003) o fenômeno de queima de retificação em aço-rápido pode afetar o funcionamento das peças em serviço, principalmente se estas forem aplicadas em condições que implicam em altas solicitações superficiais, como no caso de ferramentas de usinagem. Embora já venha sendo estudado há muito tempo por diversos autores, e de certa forma bem compreendido, ainda existem dificuldades em estabelecer relações diretas entre o processo de retificação e o fenômeno da queima. Não existe uma regra geral aplicável a todos os materiais retificados, pois, além dos vários materiais de peça e da possibilidade de empregar uma grande faixa de parâmetros de corte, são várias as máquinas ferramentas, muitos tipos de materiais abrasivos, várias estruturas de rebolos que levariam a um número muito grande de combinações e de uma solução única para todos os processos.

Neste sentido, este trabalho apresenta o estudo da influencia de vários parâmetros de corte de retificação na formação da camada escurecida (queima) e de rebarbas em amostras de machos de corte em aço rápido M3 produzidos por uma empresa brasileira fabricante de ferramentas de corte sediada no interior do Estado de São Paulo. Foram avaliados os efeitos dos parâmentros velocidade de corte, velocidade da peça e profundidade de corte na espessura da camada afetada e na formação de rebarba.

Desta forma, foi realizada a observação do fenômeno da formação de rebarba *in situ*, em condições reais de operação. Devido à geometria da peça e da particularidade do processo é muito difícil observar os fenômenos nos machos de corte durante a etapa de retificação. Por este motivo, algumas amostras em aço rápido M3, que reproduzissem de forma simplificada a mesma geometria dos machos de corte, foram projetadas e preparadas para serem usinadas em laboratório, e assim aproximar ao máximo das condições reais de corte empregadas na empresa. Ensaios na linha de produção da empresa também foram realizados em condições de reais de operação. Todos os ensaios, em laboratório e na empresa, seguiram um procedimento com condições de corte agrupadas em matriz fatorial. Ao realizar os ensaios em uma matriz experimental fatorial é possível identificar e discutir a influência de cada parâmetro utilizando a metodologia estatística de análise de variância (ANOVA) garantindo confiabilidade estatística dos resultados obtidos.

Um breve texto para descrever o processo de retificação dos machos e geração dos

problemas de queima e rebarbas é apresentado a seguir. Durante a fabricação de machos de corte de aço rápido M3, na etapa de geração dos filetes dos machos de corte pela retificação, foi observada a ocorrência de dois fenômenos que são considerados problemas em materiais retificados, a queima e a formação de rebarba.

Após a retificação de várias peças de diferentes lotes do mesmo fabricante de machos foram observadas marcas escurecidas próximas à aresta entre a superfície retificada e os canais dos machos. Esta aresta encontra-se na região de saída do filete, ou seja, no lado oposto da aresta de corte. Apesar da superfície retificada apresentar um aspecto brilhante, quando há a presença da marca escurecida nas arestas, é constatado que a dureza na superfície apresenta uma queda significativa em relação à dureza original do material. Atribui-se à queda de dureza e às marcas escurecidas observadas o aumento excessivo de temperatura na região de corte, que resulta em mudanças microestruturais e também na oxidação da superfície (normalmente coloração azulada). Assim, como a marca escurecida é em geral acompanhada de queda na dureza, quando ela é identificada em qualquer peça (macho de corte) após a retificação, ela será descartada, o que gera prejuízos.

Outro problema relacionado com a integridade das arestas dos machos de corte é a formação de rebarba após a retificação. Durante o processo, por causa da geometria dos machos de corte, o processo de corte é do tipo intermitente. Ao retificar a superfície dos filetes também são formadas rebarbas nas arestas dos machos de corte. Rebarbas estas observadas na mesma região em das marcas de retificação. E o desafio deste trabalho foi identificar as causas da queima e rebarbas geradas nos machos de aço rápido M3 por meio de ensaios de retificação em laboratório e, também, na linha de produção (empresa), em diferentes condições de corte.

Portanto, este trabalho visa realizar um estudo experimental em condições controladas para entender a influência dos parâmetros de corte na integridade superficial da aresta dos filetes de machos de corte em Aço-Rápido classe M3 durante o processo de retificação. Além disso serão discutidos fenômenos de usinagem a fim de fornecer subsídios para a empresa no sentido de identificar as condições de corte favoráveis à não ocorrência de queima e rebarbas nos machos retificados.

Este trabalho está subdividido em seis capítulos que serão discutidos a seguir. No capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho realizado. No Capítulo 2, uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos encontrados na literatura. Este capítulo aborda os principais parâmetros do processo de retificação cilíndrica e os mecanismos de remoção de material. Também será apresentada uma pequena revisão da literatura sobre as propriedades dos Aços-Rápidos e as características do processo de retificação estudado. Por fim, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre integridade superficial de peças retificadas, com destaque para os fenômenos de queima e formação de rebarbas. No Capítulo 3 será apresentada a metodologia adotada para a condução dos ensaios (em laboratório e empresa) desde a identificação do

problema, o fluxograma para o desenvolvimento dos experimentos de usinagem e caracterização dos ensaios em laboratório, dos ensaios na empresa, a descrição dos equipamentos e instrumentos utilizados, bem como, os detalhes das condições de usinagem empregadas para o desenvolvimento deste trabalho. No Capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de retificação em duas seções: ensaios de usinagem em laboratório e ensaios de usinagem na empresa. Em cada uma das seções serão apresentados os resultados de medição da camada afetada, valores de microdureza e imagens das rebarbas produzidas durante o processo de retificação. Em seguida, serão apresentados os resultados agrupados dos ensaios de laboratório e da empresa bem como a discussão e comentários da correlação entre eles. No capítulo 5 serão apresentadas as principais conclusões obtidas com base nos resultados obtidos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção será apresentada uma revisão teórica dos principais trabalhos desenvolvidos na área de retificação. Inicialmente são apresentados alguns aspectos básicos de retificação, incluindo os principais parâmetros de corte, grandezas físicas, geometria e equações. São abordadas também, as características tribológicas que afetam a retificabilidade do aço-rápido. Por fim, são apresentados alguns trabalhos que investigaram a presença da queima e da formação de rebarba.

2.1 Classificação dos Tipos de Retificação

Existem vários tipos de retificação, usualmente classificados, segundo Marinescu *et al.* (2006), em quatro tipos básicos. Esta classificação simples é baseada na posição de trabalho entre o rebolo e a peça. Por retificação tangencial entende-se o processo que utiliza a periferia do rebolo para promover a usinagem, como mostrado em Fig.2.1(a) e Fig.2.1(b). Retificação de superfície geralmente se refere à retificação em um plano ou em perfis mostrado em Fig.2.1(c) e Fig.2.1(d). A classificação abrange também a movimentação da peça. Quando a peça possui uma superfície plana e se desloca com movimento linear, a retificação é classificada como plana (Fig.2.1(a) e Fig.2.1(c)), enquanto peças cilíndricas que possuem um movimento de rotação durante a usinagem equadram-se no processo de retificação cilíndrica.

Na prática, o leque de possibilidades do processo de retificação é vasto e incluiem-se operações de geração de perfil, forma e acabamento, operações de cópia de perfil, corte e chanfragem. Em relação às operações de perfilamento, destaca-se a retificação de canais espirais, de rosas, de dentes de engrenagens diversas (MARINESCU *et al.*, 2006).

Outra classificação importante e bastante aceita é quanto à movimentação do rebolo durante o corte. Se o rebolo possui um movimento de avanço na direção da peça, o processo

é classificado como retificação de mergulho. Se a peça possui um movimento de passagem pelo rebolo, e este não se movimenta na direção da peça, a retificação é classificada como retificação de passagem (MARINESCU *et al.*, 2006).

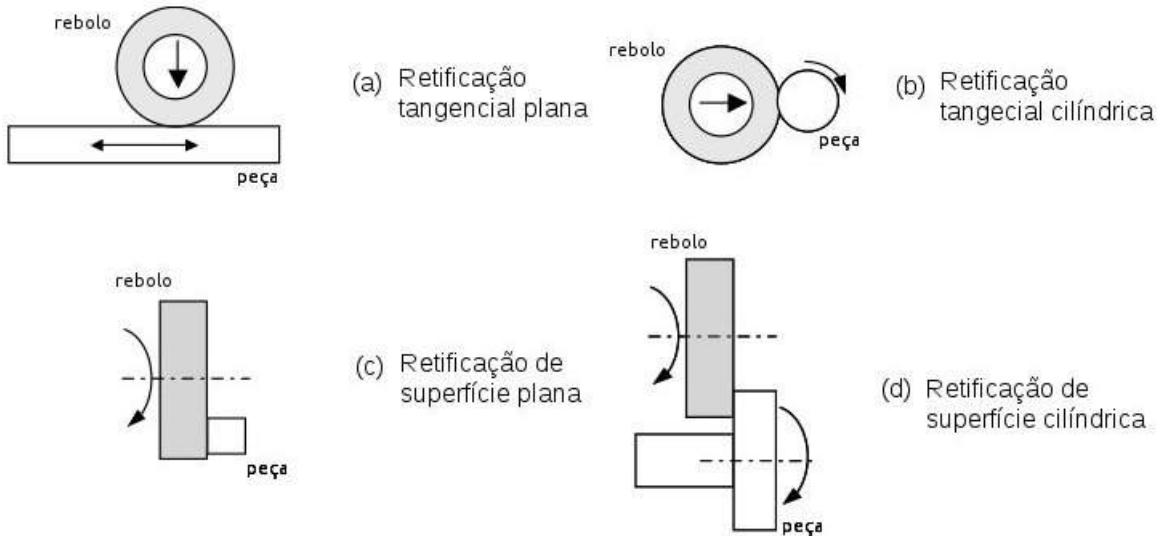


Figura 2.1: Classificação dos Principais Tipos de Retificação (MARINESCU *et al.*, 2006).

2.2 Principais Parâmetros de Retificação

Na usinagem, os parâmetros controláveis pelo operador para realização do movimento de corte são chamados parâmetros de corte, ou parâmetros de usinagem. Em retificação destacam-se quatro principais parâmetros: penetração de trabalho (a_e), velocidade de avanço (v_f), velocidade da peça (v_w) e velocidade de corte (v_s), sendo eles identificados de forma análoga ao processo de fresamento tangencial. Na Fig. 2.2 são ilustrados os parâmetros para retificação tangencial cilíndrica. Para retificação cilíndrica de mergulho, mostrada na Fig. 2.2(a), a velocidade de avanço (v_f) também é chamada de velocidade de mergulho, enquanto na retificação cilíndrica de passagem, mostrada em Fig. 2.2(b), velocidade de avanço longitudinal.

A grandeza medida no plano de trabalho e perpendicular ao avanço da peça é chamada de profundidade de corte (a_e), ou penetração de trabalho. Ressalta-se que a penetração de trabalho ajustada na máquina não é a de fato alcançada, se deve ao fato das deflexões do rebolo e da peça, devido ao desgaste do rebolo e ainda porque, apenas uma pequena parte do grão efetivamente remove material da peça. Normalmente na retificação tangencial plana, esta penetração é da ordem de dezenas de micrometros, cerca de $10 \mu\text{m}$ para operações de acabamento e $30 \mu\text{m}$ para operações de desbaste (MARINESCU *et al.*, 2006).

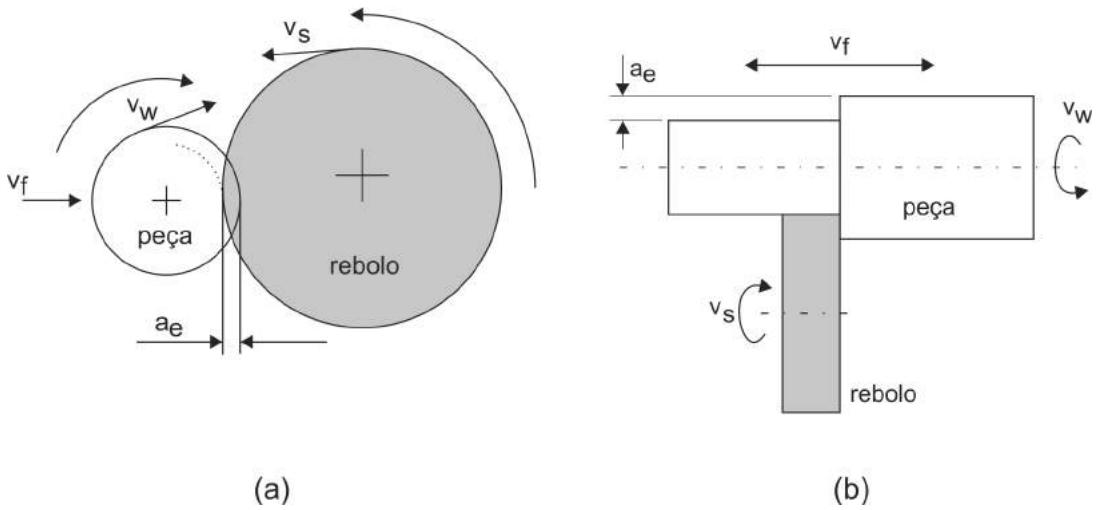


Figura 2.2: Principais parâmetros para retificação tangencial cilíndrica (a) de mergulho (b) de passagem (Adaptado de Rowe (2013)).

A velocidade da peça (v_w) é uma grandeza da retificação cilíndrica. Na retificação tangencial plana o termo equivalente é velocidade de avanço transversal ou velocidade da mesa (v_{ft}) (MARINESCU *et al.*, 2006). Esta velocidade representa a velocidade tangencial da peça expressa em m/s .

Na retificação cilíndrica de mergulho o parâmetro profundidade de corte é chamado avanço, ou penetração, por volta ($a_e/volta$). O tempo (t) necessário para uma rotação da peça de diâmetro (d_w) é calculado pela Eq.(2.1). Assim, a profundidade de trabalho por volta é definida conforme a Eq.(2.2), em que v_f é a velocidade de avanço do rebolo na direção da peça, ou velocidade de mergulho, dada em mm/s (ROWE, 2013).

$$t = \pi \cdot \frac{d_w}{v_w} \quad (2.1)$$

$$a_e/volta = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (2.2)$$

A velocidade tangencial do rebolo (v_s) também chamada de velocidade de corte é dada geralmente em m/s (ROWE, 2013). Para realizar o movimento de corte o rebolo descreve velocidades de rotação (10 a 60 m/s).

2.3 Tipos de Contato na Retificação

Na Figura 2.3 são mostrados dois diferentes tipos de retificação: Em 2.3(a) é representado uma retificação plana de superfície, onde o movimento de avanço coincide com

o movimento da peça. Em 2.3(b) é mostrada uma retificação cilíndrica de mergulho, onde existe a velocidade de avanço na direção da peça, ou apenas velocidade de mergulho (v_f). A penetração do rebolo na peça resulta em um comprimento aparente de contato l_c . Este comprimento de contato pode ser estimado através da Eq.(2.3) (MALKIN; GUO, 2008).

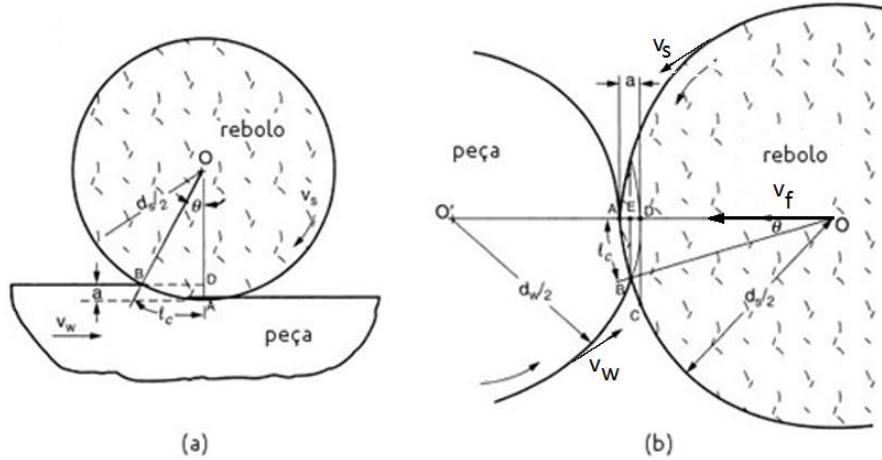


Figura 2.3: Representação de retificação de mergulho: (a) plana de superfície, (b) cilíndrica externa. (Adaptado de (MARINESCU *et al.*, 2006)).

$$l_c = \sqrt{a_e \cdot d_e} \quad (2.3)$$

Onde d_e é o diâmetro equivalente, conforme mostrado na Eq.(2.4). Através deste parâmetro é possível fazer uma analogia entre os diferentes tipos de retificação.

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm d_s/d_w} \quad (2.4)$$

O diâmetro d_e é chamado de diâmetro equivalente e a sua função é correlacionar a retificação cilíndrica com uma plana por meio do comprimento de contato. O sinal no denominador indica se a retificação é interna (-) ou externa (+). Este parâmetro indica para a retificação cilíndrica qual seria o diâmetro do rebolo na retificação plana tal que o comprimento de contato seja o mesmo. Quanto maior o rebolo, maior será o comprimento de contato (MALKIN; GUO, 2008).

Quando a retificação é cilíndrica externa, a região de contato é menor que na retificação de superfície plana. Assim ao se comparar por meio do diâmetro equivalente, o rebolo equivalente a uma retificação plana seria menor. No caso da retificação cilíndrica interna, a região de contato é maior que na de superfície plana, assim o diâmetro equivalente é maior que o diâmetro real do rebolo. Na Figura 2.4 são representados os três tipos de

retificação mencionados. Em Fig.2.4 (a) é mostrada uma retificação cilíndrica externa, em que o rebolo tangencia uma peça cilíndrica. Em Fig.2.4 (b) é representada a retificação de superfície, ou retificação tangencial plana, neste caso o rebolo tangencia uma peça plana. Por último em Fig.2.4 (c) é representada uma retificação cilíndrica interna, em que o maior comprimento de contato entre os três tipos comentados.

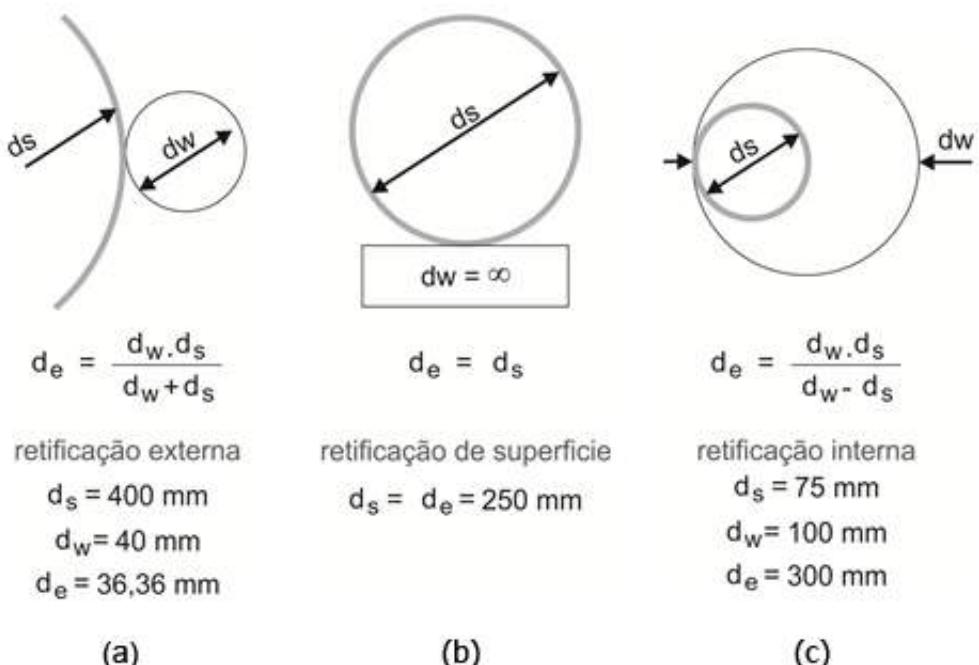


Figura 2.4: Representação do diâmetro equivalente para três tipos usuais de retificação,(a) retificação externa, (b) retificação de superfície e (c) retificação interna. (ROWE, 2013).

O processo de corte de material pode ocorrer em dois sentidos. Em um deles a velocidade tangencial do rebolo (velocidade de corte) possui direção contrária à direção da velocidade da peça, caracterizando corte no sentido discordante. No segundo caso, a velocidade de corte possui o mesmo sentido da velocidade da peça, assim é chamado de corte no sentido concordante.

Existem diferenças no corte de acordo com o movimento da aresta cortante após a penetração. No caso da retificação com corte concordante a espessura de cavaco é imediatamente o valor máximo na penetração, reduzindo continuamente até que o grão deixe a peça. No caso da retificação com corte discordante o contato da aresta cortante inicia-se aproximadamente tangencial à superfície anteriormente usinada e a espessura de cavaco aumenta continuamente até que o grão saia da peça. Isto traz consequências para as forças de retificação e interfere nas condições tribológicas do processo, lubrificação e desgaste do rebolo, particularmente em operações de desbaste (MARINESCU *et al.*, 2006).

Segundo Marinescu *et al.* (2006) e Rowe (2013) no sentido de corte concordante, devido o movimento de entrada da aresta, o grão penetra a peça com uma espessura de corte

máxima o que faz com que a formação de cavaco seja mais eficiente. Já para o sentido de corte discordante, as condições de lubrificação são melhoradas em relação ao corte concordante, assim são observadas menores temperaturas na região de contato entre o grão e a peça.

2.4 Relações Cinemáticas Entre Rebolo e Peça

A região de corte na retificação só existe quando há de fato o contato e uma movimentação entre a peça e o rebolo. Se a peça não se movimenta após um curto período de contato, o rebolo remove o material da região apenas, e assim não há mais material a ser removido. Se a área de contato existe por um período maior de forma contínua, as condições tribológicas serão regidas pela magnitude dos parâmetros de corte. Em outras palavras é importante se atentar para as relações cinemáticas existentes na retificação.

Para facilitar a compreensão dos fenômenos, considera-se o rebolo como sendo uma ferramenta com uma única aresta de corte, se comportando de forma similar a uma fresa tangencial. Nussbaum (1988) apresenta a teoria de Alden (1914), em que cada grão age como uma ferramenta removendo cavacos na forma de vírgula.

Na Figura 2.5 é ilustrada a região de contato para uma retificação tangencial cilíndrica com sentido de corte discordante. Ressalta-se que nesta figura as dimensões estão fora de proporção para que seja possível visualizar a região de contato. O grão do rebolo inicia a remoção de material no ponto O e desloca-se até o ponto A com velocidade v_s , em um tempo t . No mesmo tempo t a peça se desloca do ponto A para o ponto B com velocidade v_w . É possível, como demonstrado por Nussbaum (1988) e Malkin e Guo (2008), encontrar relações matemáticas para o comprimento de contato em função dos parâmetros de corte. Neste trabalho a principal preocupação é compreender de que forma cada parâmetro pode influenciar nesta região sem necessariamente determinar um valor numérico.

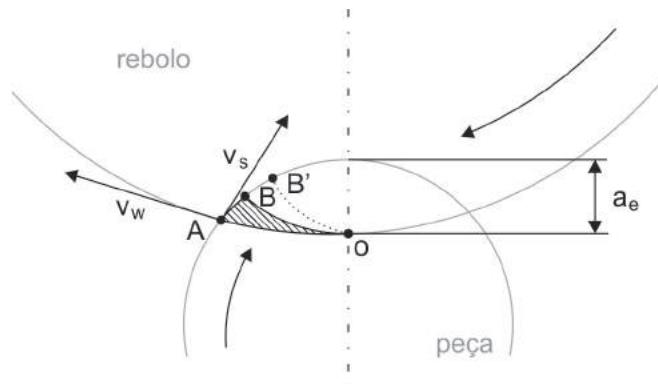


Figura 2.5: Representação da região de contato na retificação tangencial cilíndrica (Adaptado de Nussbaum (1988)).

Sabe-se que aumentar a velocidade da peça, no mesmo tempo que o rebolo percorre

a distância OA , representada na Figura 2.5, a peça irá se deslocar uma distância maior AB' ao invés de AB . Da mesma forma, ao aumentar a profundidade de corte (a_e), a região de corte também será aumentada.

Segundo Nussbaum (1988), quando aumenta-se a velocidade de corte v_s a espessura do cavaco é reduzida. O grão abrasivo estará submetido a esforços menores e a sua vida útil consequentemente será maior. O rebolo se comportará como mais duro. Mas ressalta-se que o aumento da velocidade do rebolo será limitada pela máquina e resistência do rebolo. Apesar do aumento da velocidade implicar em uma região de corte menor e menos esforços, o rebolo irá passar mais vezes na superfície da peça, o que pode representar um maior desgaste do rebolo. Assim, nem sempre esta a redução do desgaste é efetiva.

Nussbaum (1988) descreve ainda que um aumento da velocidade da peça (v_w), como grandeza ilustrada na Fig 2.5, move a região de contato para OAB' , que é maior do que sob velocidades mais baixas. Neste caso o grão penetra mais no material da peça, sofrendo atrito, compressão de forma que há elevação da temperatura na região. Tudo conjugado irá fazer que este grão descole-se da liga até mesmo antes que suas arestas de corte ou pontas ativas fiquem desgastadas. Nesta condição, o rebolo, diferente do caso anterior, se comportará como mais mole. Neste caso, a diferença do desgaste do rebolo em relação as velocidade de corte é que, para o aumento da velocidade de corte a área de contato e o comprimento do cavaco diminuem, assim, na entrada o grão sofre uma menor tensão, embora haja maior número de entradas do mesmo grão. Para o aumento de velocidade da peça, a porção de material a ser removida por cada grão é o que leva ao aumento da tensão e do comprimento de contato, embora também aumente o número de grãos ativos.

De acordo com Malkin e Guo (2008) a velocidade de avanço afeta consideravelmente o tempo total de usinagem na retificação de passagem. Ao aumentar a velocidade de avanço, resulta em aumento da espessura média e do comprimento de cavaco, como também nas forças de retificação e na temperatura de usinagem. A combinação das sucessivas entradas do rebolo na peça e a tensão no grão devido ao impacto, causam o aumento do desgaste do rebolo.

A rugosidade aumenta com a velocidade de avanço. Mas a rugosidade em geral diminui com um grande número de arestas em contato. Na retificação com baixas taxas de remoção de material (acabamento) a penetração máxima recomendada é de 5 a 10 μm (MALKIN; GUO, 2008).

Na tabela 2.1 está o resumo das principais relações entre parâmetros de corte e algumas variáveis de saída de retificação propostas por Malkin e Guo (2008). A tabela trata-se de uma generalização e como existem várias geometrias e vários tipos de retificação nem sempre o comportamento é o mesmo. É interessante perceber que a velocidade de corte, ao contrário dos outros parâmetros, ao ser aumentada provocou redução tanto na área de contato quanto na espessura de corte, assim como também reduz o desgaste do rebolo.

Tabela 2.1: Resumo dos efeitos dos principais parâmetros de corte em retificação na espessura de contato, na área de contato rebolo peça e no desgaste do rebolo (MALKIN; GUO, 2008).

Parâmetro	Espessura de Contato	Área de contato	Desgaste do rebolo
Velocidade da peça (v_w)	↑	↑	↑
Velocidade de corte (v_s)	↓	↓	↓
Velocidade de avanço (v_f)	↑	↑	↑
Profundidade de corte (a_e)	↑	↑	↑

Os parâmetros apresentados nesta sessão são os possíveis de serem controlados através do ajuste direto em máquina-ferramenta empregada em retificação. Embora seja possível chegar a algumas conclusões, os parâmetros quando analisados individualmente não são capazes de explicar os fenômenos peculiares da retificação. Para isto, são apresentadas na sequencia duas relações dinâmicas entre os parâmetros e como podem interferir no processo. São elas a espessura equivalente de corte (h_{eq}) e a taxa de remoção de material (Q).

2.5 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

Espessura de corte equivalente é um parâmetro cinemático que combina a profundidade de corte (a_e), velocidade da peça (v_w) e a velocidade de corte (v_s) como mostrado na Eq. (2.5). Ela pode ser considerada como uma profundidade de corte modificada. A profundidade real de corte é a espessura da camada de material removida em um passe ou revolução da peça. A espessura equivalente de corte é a espessura da camada de material removida em um passe ou revolução do rebolo. Ela pode ser visualizada como a espessura do fluxo de material emitido da zona de contato pelo rebolo (ROWE, 2013). Na Eq. (2.5) é mostrado a espessura de corte equivalente para retificação tangencial plana.

$$h_{eq} = a_e \cdot \frac{v_w}{v_s} \quad (2.5)$$

Substituindo a Eq.(2.2), que define a profundidade de corte para a retificação tangencial cilíndrica, na Eq. (2.5), obtém-se a Eq. (2.6) para a espessura equivalente de corte para retificação tangencial cilíndrica.

$$h_{eq} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \cdot \frac{v_w}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_s} \quad (2.6)$$

Como a espessura real do cavaco é muito difícil de ser medida, a espessura equiva-

lente de corte é frequentemente utilizada como uma aproximação, também pode ser chamada de espessura de cavaco equivalente. Ela é empregada por ser particularmente útil para correlacionar os parâmetros de retificação medidos com parâmetros de taxa de remoção para um dado tipo de rebolo. Pode ser observado que, ao se aumentar a profundidade de corte (a_e) e também a velocidade da peça (v_w), a tendência é aumentar a espessura equivalente de corte. Por outro lado, o aumento da velocidade de corte (v_s), reduz a espessura equivalente de corte. O aumento na espessura equivalente de corte implica no aumento da tensão nos grãos abrasivos, enquanto que a redução causa tensão mecânica nos abrasivos (ROWE, 2013).

Embora esta aproximação seja bem aceita no meio acadêmico é importante ressaltar que os resultados são aplicados somente para um rebolo e um material de peça em um limitado campo de condições de retificação. A espessura de cavaco equivalente não leva em consideração o número de grãos ativos de arestas cortantes no rebolo ou a conformidade do contato. Para isso é preciso examinar o contato das arestas cortantes e a geometria do contato do rebolo (ROWE, 2013).

2.6 Taxa de Remoção de Material (Q)

Taxa de remoção de material (Q) na retificação expressa o volume de material removido em um dado intervalo de tempo. Para retificação tangencial plana ela pode ser determinada pela Eq.(2.7). Para a retificação cilíndrica, substituindo-se o valor da profundidade de corte definida na Eq.(2.2), obtém-se a Eq.(2.8). A taxa de remoção de material por unidade de largura do rebolo é conhecida como taxa de remoção específica (Q'), sendo definida pela Eq.(2.9). Utilizando a taxa de remoção específica se reduz o número de variáveis, e permite uma comparação direta na eficiência de remoção para diversas operações (ROWE, 2013).

$$Q = b.a_e.v_w \quad (2.7)$$

$$Q = b \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \right) \cdot v_w = b \cdot \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (2.8)$$

Onde Q é a taxa de remoção de material, b é a largura de retificação, a_e é a profundidade de corte, d_w o diâmetro da peça, v_f a velocidade de mergulho e v_w a velocidade da peça.

$$Q' = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (2.9)$$

Onde Q' é a taxa de remoção de material específica, d_w é o diâmetro da peça e v_w a velocidade de mergulho.

Para valores muito baixos de Q' , os mecanismos de atrito e deformação predominam, mas aumentando o valor de Q' aumenta-se também a proporção de energia consumida para formação de cavaco. Mais especificamente, a energia consumida por atrito e deformação permanece constante, mas se tornam uma proporção menor do total de energia quando a taxa de remoção aumenta (MARINESCU *et al.*, 2006). Estes aspectos serão discutidos com mais detalhes na próxima seção.

2.7 Mecanismos de Corte na Retificação

Durante a retificação, na interface peça-ferramenta, os grãos abrasivos atuam contra a superfície da peça por meio de alguns mecanismos tribológicos de interação entre o grão e a peça. Embora mecanismos não sejam visíveis, a literatura tenta ilustrá-los para auxiliar na compreensão e estudo dos fenômenos de retificação. Eles são ilustrados na Fig.2.6. O que determina a maior ocorrência de um ou outro mecanismo é a combinação das características do rebolo, do material da peça e dos parâmetros de corte utilizados. Além disso, devido a natureza aleatória dos grãos, os mecanismos podem ocorrer simultaneamente, um grão pode estar removendo material enquanto outro ao lado apenas sulca o material, ou ainda, enquanto outro esteja apenas deslizando sobre a superfície da peça.

Os mecanismos ocorrem em escala microscópica, a apenas alguns micrometros da superfície, e por isso recebem os nomes de microsucalmeto (Fig.2.6(a)), microcorte (Fig.2.6(b)), microfadiga (Fig.2.6(d)) e microtrinca (Fig.2.6(e)). No caso ideal, o microsulcamento ocorre devido à passagem de uma única partícula abrasiva sem provocar deslocamento de material a partir da superfície desgastada (Fig.2.6(a)). Uma região é formada à frente da partícula abrasiva e material e quando a porção de material acumulado a frente é suficiente grande ocorre o cisalhamento. Durante microsulcamento, perda de material pode, contudo, ocorrer devido a muitas partículas abrasivas que atuam simultaneamente ou sucessivamente. O microcorte puro resulta em uma perda de material igual o volume do sulco de desgaste produzido (Fig.2.6(b)). O material pode ser sulcado de lado várias vezes pela passagem de partículas e pode romper por fadiga de baixo ciclo, sem que ocorra cisalhamento ou de fato remoção de cavaco. Este mecanismo é chamado de microfadiga (Fig.2.6(d)). A microtrinca por sua vez é característica de materiais frágeis, devido ao acúmulo de tensões trincas são nucleadas e propagadas perpendiculares aos riscos, quando as trincas se encontram causam o lascamento do material (Fig. 2.6(c)) (ZUM GAHR, 1987).

Embora exista a classificação teórica para os mecanismos de corte na retificação, o grão que entra em contato com a peça não começa imediatamente a remover material. Devido às características peculiares do processo de retificação os mecanismos do processo de

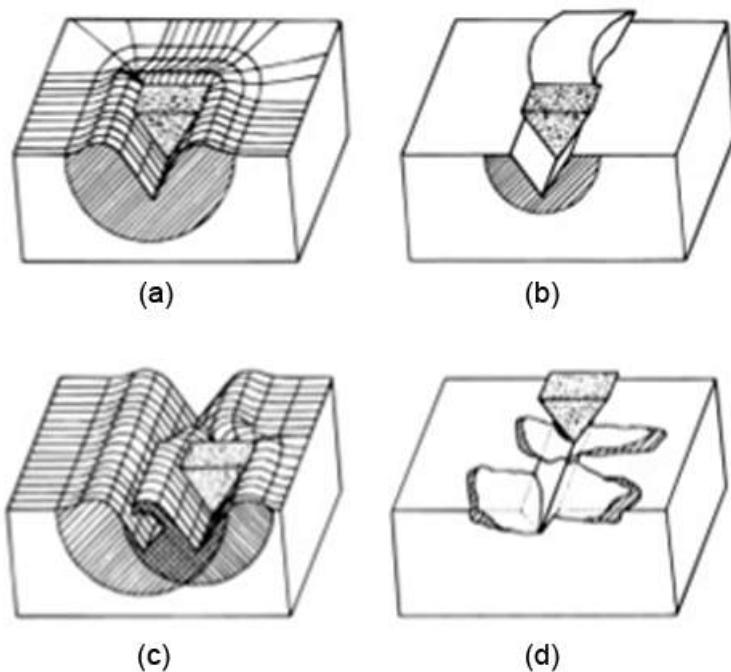


Figura 2.6: Esquema dos mecanismos de corte na retificação (a) microsulcamento, (b) microcorte, (d) microfadiga e (e) microtrinca (ZUM GAHR, 1987).

remoção podem ocorrer em um único passe do grão contra a peça. Além disso, os grãos são aleatórios e com geometria indefinida e por isso cada um deles desenvolve as fases de remoção independentemente.

Para a retificação de materiais dúcteis, o processo de formação de cavacos envolve seis fases descritas a seguir (MARINESCU *et al.*, 2004).

- i. No primeiro quarto do comprimento de contato o abrasivo promove um sulco, causando deformação elástica e plástica, empurrando material para a lateral do sulco. O cavaco não é formado inicialmente;
- ii. Com o avanço da aresta, um fluxo de cavaco é removido com uma seção transversal próxima a um paralelogramo. O cavaco é comprimido em um poro. O raio de ponta do grão é muito grande em relação a penetração de trabalho, o que gera um cavaco muito fino, de forma que dissipá a maior parte do calor por radiação e convecção. Se a profundidade e o avanço forem muito baixos, a formação se encerra por aqui formando cavaco em forma de fio;
- iii. No caso de valores maiores de penetração de trabalho e avanços, a aresta do grão penetra no material da peça mais profundamente. Isto promove uma zona de cisalhamento em aproximadamente três quartos do ponto de contato, resultando em uma grande geração de calor. Com o acúmulo de material e a alta pressão envolvida, a temperatura na zona

- de contato se eleva. Nesta região não há dissipação de calor, o grão é refratário e o fluido tem dificuldade de acessá-la. Isto leva a fusão do cavaco;
- iv. O movimento do grão abrasivo continua enquanto a profundidade de corte diminui devido a geometria do processo, formando cavacos em forma de girino;
 - v. O cavaco é arremessado para fora do poro;
 - vi. Como o cavaco está fundido, devido a tensão superficial, torna-se esférico depois de deixar a superfície de contato e entrar em uma zona onde há pouco ou nenhum fluido lubrificante.

Em relação a energia dispendida no movimento de corte, ela é dividida em três parcelas que dependem das etapas de formação do cavaco. A geometria circular da trajetória do grão na peça faz com que o cavaco seja formado após três estágios como mostrado na Fig. 2.7. O grão abrasivo atinge a superfície com uma velocidade de corte (v_c) igual a velocidade tangencial do rebolo (v_s). O grão se desloca com uma componente de força de corte tangencial (F_t) na direção de corte e uma outra componente de força perpendicular à (F_n), que é a componente normal a força de corte (F_n). A (F_n) exerce pressão na superfície da peça. No primeiro estágio a energia é convertida em deformação elástica e atrito. No segundo estágio, a tensão é suficiente para sulcar o material. Assim, além de atrito e deformação elástica, parte da energia é convertida em deformação no material da peça e também em atrito interno ao material que posteriormente se converte em calor. No terceiro e último estágio, a energia é efetivamente convertida para a remoção de material, porém as outras parcelas ainda estão presentes, além de existir o atrito entre o cavaco e o material da superfície da peça à frente da região de corte (MARINESCU *et al.*, 2004).

Contudo, é importante destacar que ao realizar um movimento de corte, não necessariamente devia ocorrer os três mecanismos para a formação do cavaco como descrito anteriormente. Pode acontecer do grão somente sulcar ou ainda nem atingir a tensão necessária para vencer o regime elástico, como também ele pode somente deslizar sobre a superfície sem remover material (MARINESCU *et al.*, 2004).

A fusão do cavaco também é um fenômeno reservado a alguns materiais pobres condutores de calor. Rajmohan e Radhakrishnan (1992) acrescentam ainda que os cavacos possuem tamanhos micrométricos e se resfriam em poucos milissegundos. O pico de temperatura acontece um pouco depois do cavaco se desprender da interface do grão do rebolo e a peça devido a uma reação exotérmica dos cavacos em que as temperaturas aumentam além do ponto de fusão, a reação de oxidação cessa e a temperatura diminui devido a convecção e radiação. A forma de esfera do cavaco é gerada devido a tensão superficial do cavaco que está momentaneamente fundido.

Na Figura 2.8 são mostrados os detalhes de um cavaco de aço carbono (AISI 1030, dureza 125HV30) Ele foi obtido por meio de um teste de quick-stop após a passagem de um

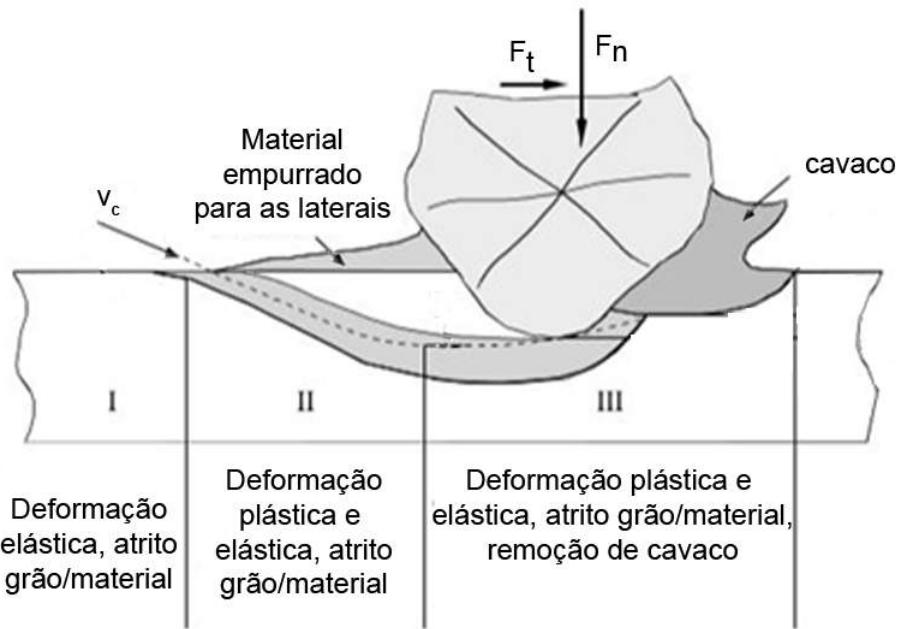


Figura 2.7: Formação do cavaco na retificação (MARINESCU *et al.*, 2004).

único grão abrasivo. Pela deformação da microestrutura, observa-se que o plano de cisalhamento não é constante. Quando há o primeiro acúmulo de material, conforme a protuberância cresce, o plano de cisalhamento diminui. Consequentemente, as dimensões do plano de cisalhamento cresce muito rapidamente. Assim, o cisalhamento é altamente restrito a pequenos limites e ocorre a fratura, levando à produção de cavacos descontínuos (DOYLE, 1973).

A formação do cavaco em planos de cisalhamento de processos de usinagem por abrasão é comparada por Marinescu *et al.* (2006) com a formação de cavaco de ferramentas com geometria definida mas com ângulo de saída muito negativo. Este tipo de formação é encontrado ao retificar materiais dúcteis. Para materiais frágeis, existe um acúmulo de tensões até que se propague uma trinca, causando a remoção do material em lascas.

2.7.1 Retificação de Materiais Dúcteis, Frágeis e Materiais com Carbonetos

Segundo Marinescu *et al.* (2006), na retificação existem dois tipos de remoção de material: a dúctil e a frágil, dependendo das características do material e dos parâmetros utilizados. Geralmente, a remoção do tipo dúctil é evidenciada pela formação de lamelas, enquanto que na do tipo frágil a remoção de material ocorre através de micro fraturas, com a indução de microtrincas. Embora o mecanismo de formação de cavaco esteja relacionado principalmente com as características do material da peça, podem ocorrer mecanismos frágeis em materiais dúcteis ou mecanismos dúcteis em material frágil. O comportamento dúctil em

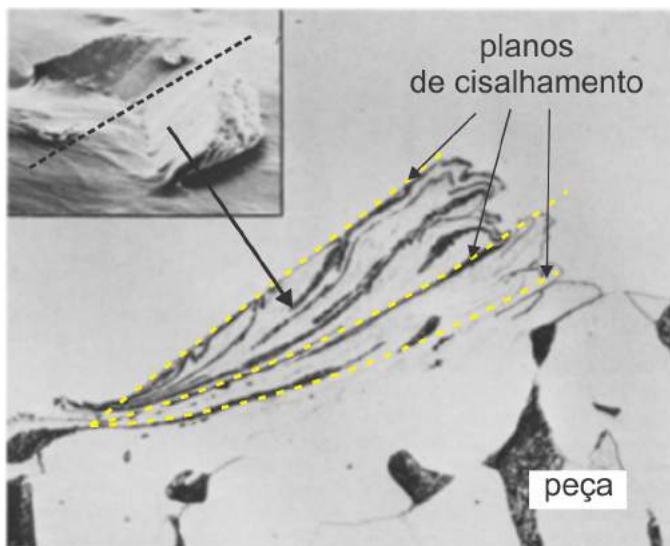


Figura 2.8: Seção transversal de um cavaco produzido em um teste com um único grão (DOYLE, 1973).

materiais frágeis durante a retificação é derivado pela suposição que a tensão empregada pelo grão é insuficiente para formação da trinca, e assim o material se deforma plasticamente.

Existem também materiais bifásicos, como o caso do aço-rápido, em que podem existirem fases de material dúcteis e frágeis, e assim o mecanismo de remoção assume um comportamento intermediário. Este comportamento pode afetar o desgaste do rebolo e também influenciar na variação na energia específica. Em geral ele está associado com a dureza, tamanho e forma do carboneto na matriz da peça.

Na Figura 2.9 são ilustrados as evidências dos mecanismos que Zum Gahr (1987) descreve para desgaste abrasivo em materiais que possuem carbonetos na estrutura. Na parte superior, na Fig.2.9(a), Fig.2.9(b) e Fig.2.9(c) é representado o desgaste causado por partículas abrasivas duras, enquanto que nas Fig.2.9(d), Fig.2.9(e) e Fig.2.9(f) é representado o desgaste causado por partículas abrasivas moles (ZUM GAHR, 1987). Na retificação pode-se considerar que o grão do rebolo é a partícula dura que causa desgaste, e geralmente é mais dura que o carboneto. Mas existem certos tipos de carbonetos que são mais duros que os grãos abrasivos do rebolo, de forma que estes últimos se comportam como uma partícula abrasiva mole. Além disso, deve ser considerada a dureza dinâmica do rebolo que, dependendo dos parâmetros de corte, ele pode se comportar como mais duro ou mais mole.

Se os carbonetos são muito menores que o tamanho do sulco de desgaste, ocorre o fenômeno ilustrado na Fig.2.9(a) e Fig.2.9(d). A diferença é que como ilustrado na Fig.2.9(a), o material é cortado como se houvesse uma única fase, enquanto na Fig.2.9(d) o grão não consegue cortar um carboneto, então são formadas trincas entre eles. Nas Fig.2.9(b) e Fig.2.9(c) são ilustrados os dois casos em que o grão abrasivo corta o carboneto e este é maior que o tamanho do sulco de desgaste. Porém na Fig.2.9(c) o carboneto mostrado possui caracterís-

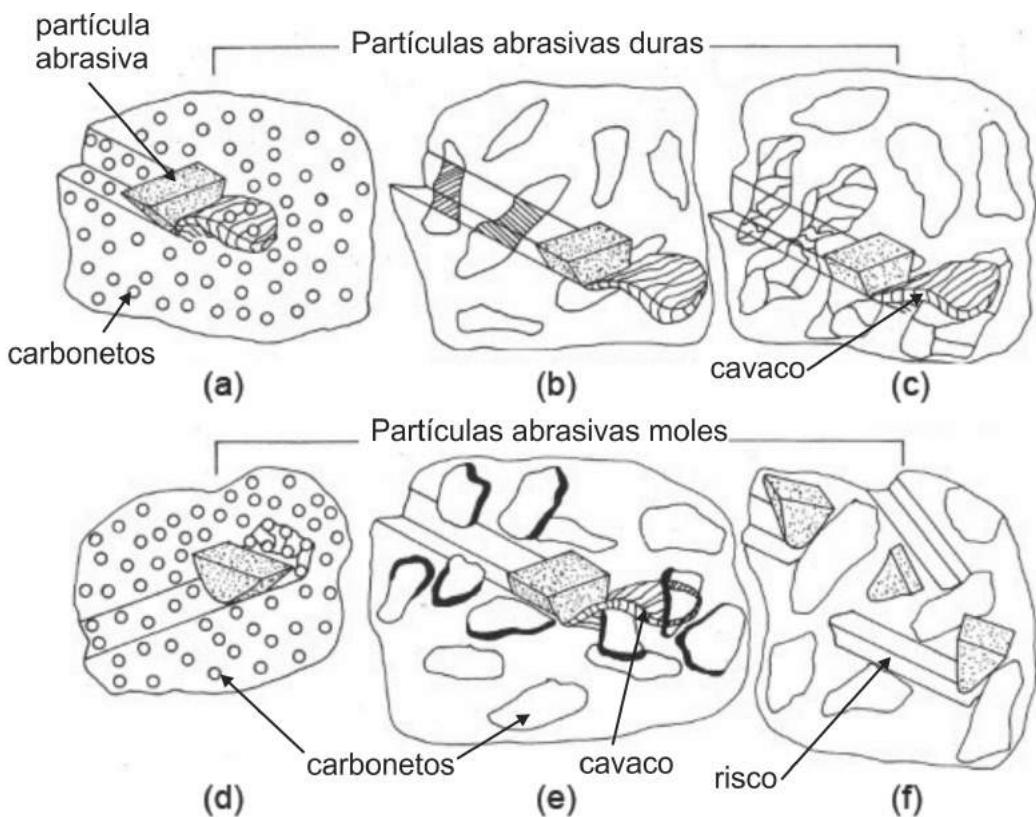


Figura 2.9: Mecanismos de remoção em material com carbonetos: com partículas abrasivas duras contra: (a) carbonetos menores que os riscos, (b) carbonetos do tamanho dos riscos e (c) carbonetos maiores que os riscos, com partículas abrasivas moles contra: (d) carbonetos menores que os riscos, (e) carbonetos do tamanho dos riscos e (f) carbonetos maiores que os riscos (ZUM GAHR, 1987).

tica mais frágil e, por isso, há o surgimento de trincas. Na Fig.2.9(e) em que é representada uma partícula abrasiva mole, o carboneto é arrancado da matriz por completo, enquanto na Fig.2.9(f) o grão não consegue usinar o carboneto e este desvia a rota do grão, fazendo com que ele o contorne.

O tipo de carboneto na microestrutura também afeta o mecanismo de remoção de material na retificação. A perda de abrasivos por desgaste é reduzida com o aumento do tamanho médio dos carbonetos em relação ao tamanho dos sulcos de desgaste. Quando os carbonetos são tão largos quanto à largura e à profundidade média dos riscos, eles não podem ser removidos da matriz pelos grãos abrasivos do rebolo (Fig.2.9(c) e Fig.2.9(f)). Os carbonetos são arrancados quando as suas dimensões são menores que os sulcos de desgaste (Fig.2.9(a) e Fig.2.9(d)). Apesar de carbonetos grandes serem mais difíceis de serem removidos, a trinca torna-se mais fácil com o aumento do tamanho do carboneto (Fig.2.9(f)). Assim, o equilíbrio de tamanho de carboneto para o tamanho do sulco de desgaste pode ser obtido através da taxa mínima de desgaste em volume obtida em ensaios tribológicos. Define-se taxa de desgaste como a quantidade (ZUM GAHR, 1987).

Uma taxa mínima de desgaste é esperada devido ao aumento do livre caminho médio na matriz. O livre caminho médio é a distância média entre carbonetos, quanto maior, mais exposta estará a matriz. Com o aumento do tamanho do carboneto, mantendo a fração volumétrica constante, aumenta-se o livre caminho médio. Grãos abrasivos muito duros podem cortar carbonetos maciços (ZUM GAHR, 1987).

Com uma fração volumétrica constante de carbonetos, a perda por desgaste pode variar para diferentes seções de amostras devido a diferenças na fração de área ocupada por carbonetos. O volume perdido por desgaste diminui com o aumento da dureza dos carbonetos. Isto é esperado quando microtrincas nos carbonetos não ocorrem. Microtrincas podem, no entanto, resultar em grande volume perdido por desgaste em uma estrutura que contém um grande volume de carbonetos maciços muito duros, porém frágeis (ZUM GAHR, 1987).

Como o material foco deste trabalho são os aços-rápidos, é preciso utilizar a descrição da relação dos carbonetos com os abrasivos de corte. Logo, é necessário avaliar em primeiro lugar o tamanho do carboneto em relação ao tamanho do risco que está sendo gerado pelo rebolo. Posteriormente deve-se observar se os riscos são uniformes ou se existem crateras, ou desvio dos riscos, o que pode indicar os casos as condições como aquelas ilustradas nas Fig.2.9(e) e Fig.2.9(f).

2.8 Aço-Rápido

Os aços rápidos compreendem (do inglês *High-Speed Steel - HSS*) uma classe de aços com aplicação principalmente para ferramentas de corte. O nome aço rápido é uma síntese dos dois seguintes fatores: (a) as ligas pertencerem ao sistema multicomponente Fe-C-X, onde X representa um grupo de elementos de liga, como Cr, W ou Mo, V e Co, são os principais; (b) as ligas são caracterizadas pela sua capacidade de manter um alto nível de dureza quando submetidas a elevadas temperaturas resultantes do corte de metais que no século XX eram considerados materiais de ferramentas que permitiam elevadas velocidades de corte quando comparados com os aços carbono utilizados em ferramentas (BOCCALINI; GOLDENSTEIN, 2001).

Segundo Chiaverini (2005) existem algumas características fundamentais ao selecionar um aço ferramenta. Elas são:

- i. Dureza a temperatura ambiente: a dureza da ferramenta deve ser superior a dureza da peça sobre a qual exercerá a ação de corte usinagem ou conformação;
- ii. Resistência ao desgaste: há aparentemente um grande número de fatores que afetam essa propriedade; a composição do aço, a suscetibilidade do aço em endurecer por encruamento da superfície, e a resistência mecânica do aço são alguns deles;

- iii. Temperabilidade: é um requisito imprescindível, pois uma maior penetração de dureza garante uniformidade de características mecânicas em secções apreciáveis. Nos aços carbonos comuns é difícil alcançar alta profundidade de endurecimento, sobretudo em secções superiores a 25mm; entretanto uma pequena adição de cromo resultará nessas condições em uma temperabilidade completa;
- iv. Tenacidade: geralmente, é uma característica desejável em qualquer ferramenta ou matriz. Entretanto, difícil é conciliar os conceitos de elevada tenacidade e alta dureza. Os fatores que podem afetar a tenacidade são: tensões internas, produzidas por têmpera drástica quando há o reaquecimento muito rápido dos aços, retificação inadequada porque pode provocar concentração de tensões e encruamento ou ainda dureza excessivamente alta;
- v. Dureza a quente: característica altamente desejável em certos aços para ferramentas e matrizes, utilizados em altas temperaturas, devido ao calor das próprias condições de trabalho ou ao que se desenvolve durante as operações de usinagem. A dureza a quente é a propriedade que os aços podem apresentar de reter a sua dureza a temperaturas elevadas (da ordem de 600°C para os aços rápidos). A composição química do aço é fator determinante dessa característica, sendo os elementos responsáveis diretamente na ordem de importância a seguir: tungstênio, molibdênio, cobalto, cromo e vanádio;
- vi. Tamanho de grão: geralmente é desejável um tamanho de grão pequeno, ou granulação fina, pois que esta se associa com características mecânicas superiores;
- vii. Usinabilidade: por serem materiais de elevada dureza ($>58\text{HRc}$), comparadas ao aços endurecidos, possuem usinabilidade satisfatória. Eles em geral são usinados por ferramentas abrasivas com dureza acima de 1800HV, como as cerâmicas. Rebolos de óxido de alumínio branco são os mais comumente empregados.

Em princípio, há duas categorias de aços rápidos: a categoria T que compreende os tipos predominantemente ao tungstênio, e a categoria M que compreende os tipos predominantemente com teor de molibdênio (CHIAVERINI, 2005).

A característica principal dos aços rápidos é a capacidade de operar em velocidades de corte e outras condições de corte que podem elevar a temperatura do gume cortante da ferramenta a cerca de 550°C - 600°C, durante a operação de usinagem com boa tenacidade. Nessas temperaturas, os aços em estudo retêm a dureza que lhes permite ainda continuar na operação de usinagem; ao resfriarem-se após realizada essa operação, eles readquirem a dureza original. Essa característica é chamada de "dureza a quente" e constitui a mais importante propriedade dos aços rápidos. Além disso, devido ao alto teor de carbono e ao elevado teor de elementos de liga formadores de carbonetos, forma-se um elevado número de carbonetos de liga, o que confere ao aço uma resistência ao desgaste superior a de outros tipos de aços para ferramenta, e consequentemente aumenta a sua vida útil. Sua composição é tal que os

torna facilmente endurecíveis por têmpera através da secção inteira, mesmo pelo resfriamento em óleo ou em banhos de sal; nessas condições, a tendência a empenamento ou ruptura, no resfriamento por têmpera, é menor (CHIAVERINI, 2005).

Por outro lado, todos os aços rápidos, devido ao excesso de elementos de liga que resulta em excesso de carbonetos complexos na estrutura tratada, pode-se endurecer a 63HRC. Sua temperatura de têmpera é muito elevada, geralmente cerca de 65°C abaixo do seu ponto de fusão; sua temperabilidade é excelente, a ponto de peças até 300 mm de diâmetro terem toda sua secção endurecida (CHIAVERINI, 2005).

A principal aplicação do aço rápido é na fabricação de várias ferramentas de corte como brocas, fresas de vários tipos, serras, bedames, bits de usinagem, machos, dentre outras. Na Figura 2.10 são mostradas algumas aplicações dos aços-rápido, na Fig. 2.10(a) brocas de várias dimensões, na Fig. 2.10(b) cossinete, na Fig. 2.10(c) machos de corte, na Fig. 2.10(d) fresas, na Fig. 2.10(e) alargador e na Fig. 2.10(f) bits.

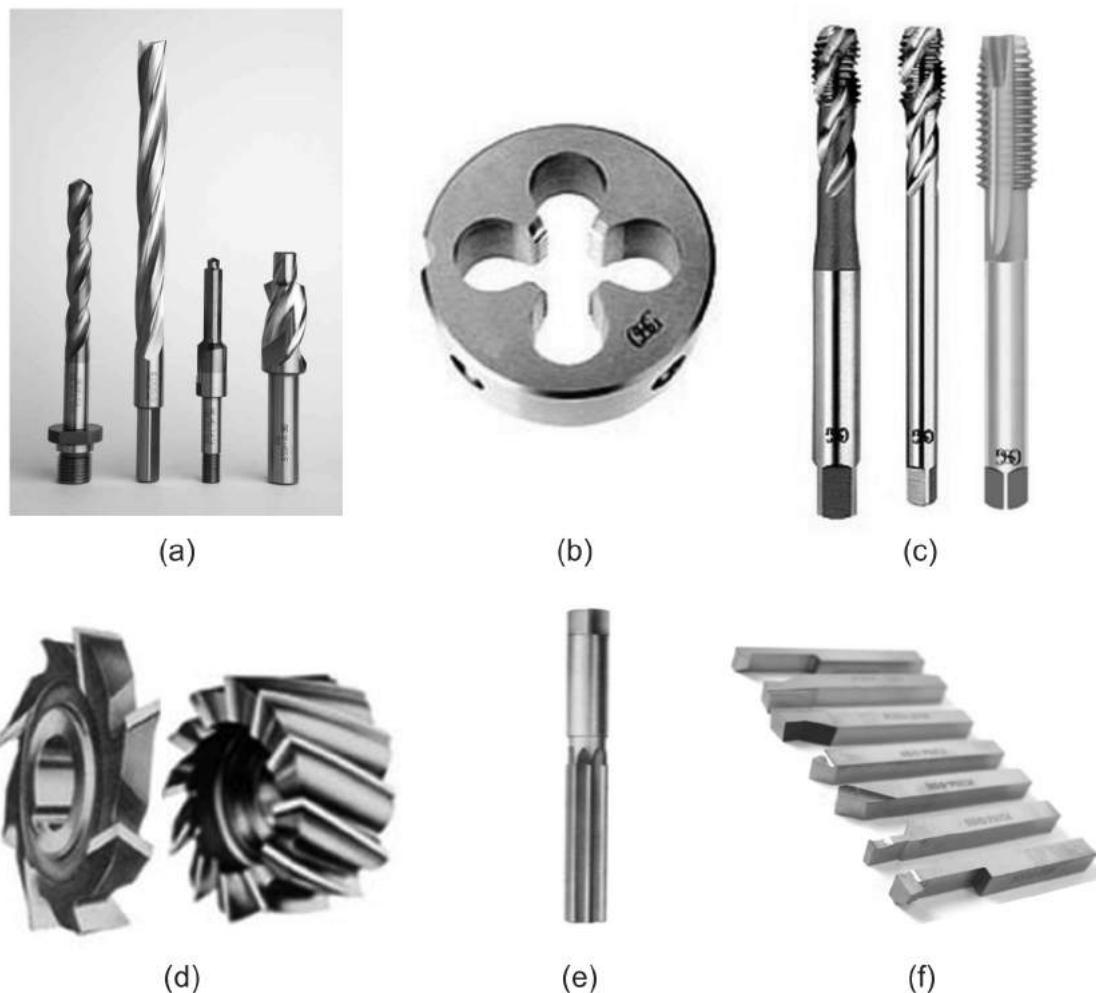


Figura 2.10: Ferramentas fabricadas em Aço-Rápido: (a) brocas, (b) cossinetes, (c) machos, (d) fresas, (e) alargadores, (f) bits Fonte: (a),(b),(c), Catálogo OSG, (d),(e),(f), Indaço.

Um dos desafios da retificação dos aços rápidos são os diferentes carbonetos presentes em sua estrutura que dificultam a remoção de material. Na Fig. 2.11 são mostrados valores de dureza dos diferentes constituintes do aço-rápido e das ferramentas abrasivas empregadas na retificação. Observa-se que os carbonetos presentes na microestrutura dos aços-rápidos possuem dureza próximas a do óxido de alumínio e do carboneto de silício, utilizados na fabricação de rebolos abrasivos convencionais.

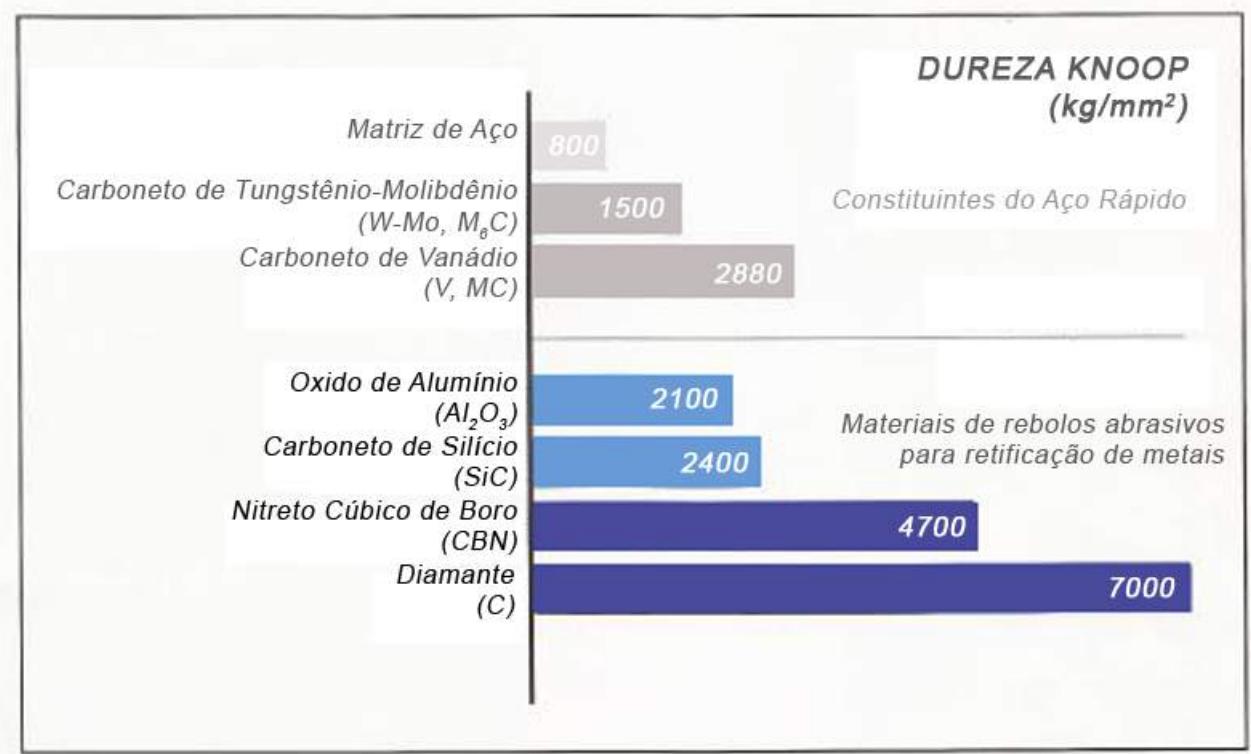


Figura 2.11: Dureza dos constituintes do Aço-rápido e dos principais tipos de abrasivos utilizados em retificação de metais (BADGER, 2003).

A quantidade de carbonetos traz impactos para as propriedades dos aços-rápidos. Cada uma das classes contém um ou mais elementos de liga de cromo, tungstênio, molibdênio e vanádio e um tratamento térmico especial para controlar sua granulometria, como já comentado anteriormente. O material resultante pode assumir valores de dureza superiores a 67 HRc. Os carbonetos de maior interesse são com ligações do tipo M₆C de molibdênio e tungstênio, e MC de vanádio, onde o M se substitui pelo elemento formador de carboneto. Basicamente, os carbonetos proporcionam resistência ao desgaste enquanto uma matriz de metal mais macio proporciona tenacidade (BADGER, 2003).

Apesar dos carbonetos precipitados conferirem ao material boas características de dureza e resistência ao desgaste, eles podem também prejudicar a retificabilidade. Segundo Marinescu *et al.* (2004), a quantidade e o tamanho dessas partículas podem interferir nos mecanismos de retificação. Os aços-rápidos apresentam difícil usinabilidade com os rebolos

convencionais. Na Fig. 2.11 o carboneto de vanádio excede a dureza dos grãos de óxido de alumínio.

É importante ressaltar que o desgaste dos grãos abrasivos não é somente devido a quantidade de carbonetos presentes, mas também em função do tamanho das partículas de carboneto, como apresentado na Fig. 2.6. Uma alternativa considerada é a utilização de aços rápidos produzidos através de metalurgia do pó, os quais apresentam menores tamanhos de carboneto (MARINESCU *et al.*, 2004).

König e Messer (1981) estudaram a influência da composição de diversos materiais na retificação. Eles afirmam que para materiais que apresentam carbonetos, um aumento da quantidade desses carbonetos provoca o aumento do desgaste do rebolo. O comportamento do desgaste é causado pela fratura dos grãos quando se colidem contra um carboneto. O carboneto de vanádio possui elevada dureza o que por sua vez exerce grande influência no desgaste do rebolo.

2.9 Machos de Corte

Macho é uma ferramenta de corte utilizada para executar rosca interna em furos pré-usinados, sendo considerado uma das ferramentas mais complexas na usinagem devido à sua geometria peculiar. No Brasil, a norma de referência para a fabricação dessas ferramentas é a ABNT NBR ISO 5967 - 2010.

Na Fig. 2.12 é apresentada a nomenclatura das partes de machos de corte. O chanfro na ponta da ferramenta permite o início do corte do material a ser removido. A parte que contém a rosca pode ser feita em diferentes dimensões para gerar furos roscados com diferentes passos de rosca. O canal auxilia na expulsão do cavaco para fora do furo usinado, e pode ser canal do tipo reto ou canal helicoidal. É possível produzir furos roscados passantes ou cegos com estas ferramentas.

Para realizar furos passantes, deve-se utilizar um macho com haste passante, como o mostrado na Fig. 2.12(a). Neste tipo de macho o diâmetro externo da rosca é maior que o diâmetro da haste. Para furos roscados cegos, utilizam-se machos com haste reforçada, (Fig. 2.12(b)). Nestes machos, a região entre o final dos canais e o início da haste é chamado de pescoço. A haste pode assumir uma extensa faixa de dimensões, permitindo fazer furos com diferentes profundidades. O quadrado em um dos extremos da ferramenta permite a transmissão do torque realizado por uma máquina, ou manualmente com auxílio de um suporte, para a ferramenta. Além da nomenclatura das partes do macho, existe uma terminologia correta para identificar as dimensões, conforme aquela apresentada na Fig. 2.13.

Os machos de corte para utilização manual são todos de canais retos. Já os machos para rosquear em máquinas são definidos em relação ao tipo de furo (cego ou passante) e ao tipo de cavaco que é gerado durante o processo. São quatro os principais tipos, como

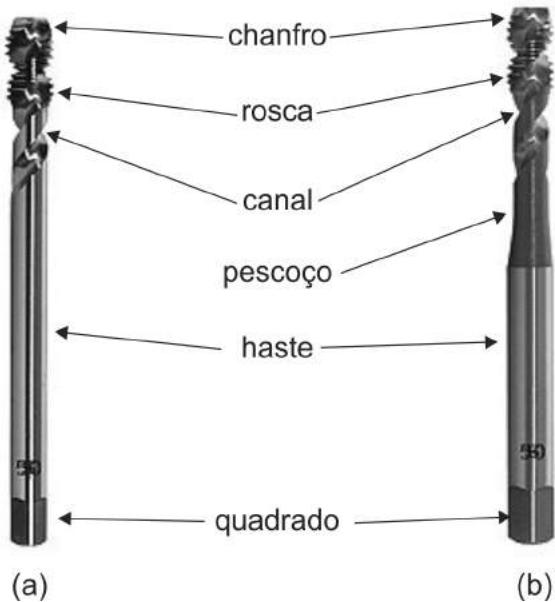


Figura 2.12: Nomenclatura das partes do macho com: (a) haste passante, (b) haste reforçada (OSG, 2012).

mostrado na Fig. 2.14. Para materiais que geram cavacos contínuos há a necessidade de expulsar o cavaco do furo gerado, assim utilizam-se geometrias helicoidais. O macho de ponta helicoidal (Fig. 2.14(a)) expulsa o cavaco para frente ferramenta, e por isso, são utilizados em furos passantes. Nos machos com canais helicoidais, Fig. 2.14(b), o cavaco é expulso em direção a haste, sendo indicado para a usinagem de furos cegos. Em materiais que geram

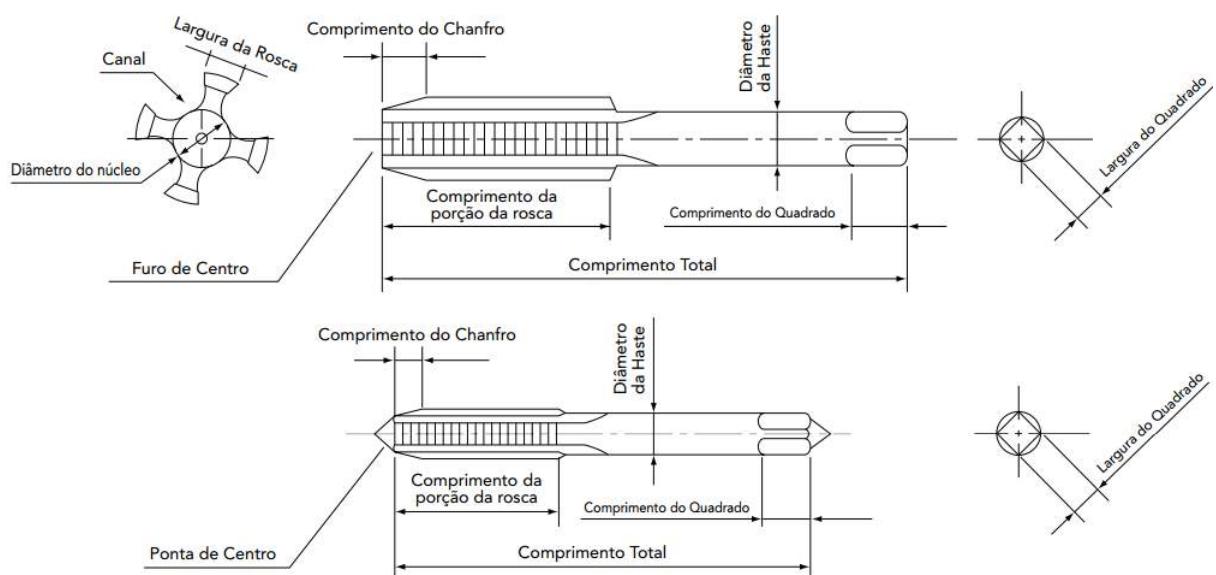


Figura 2.13: Terminologia das dimensões de machos de corte (OSG, 2012).

cavacos em forma de pó, como por exemplo o ferro fundido cinzento, são utilizados machos de canais retos (Fig. 2.14(c)). Existem ainda os machos laminadores que não atuam pelo princípio de cisalhamento (usinagem), mas deformam o sobremetal existente e assim formam os filetes (conformação mecânica). Para este último tipo de macho (Fig. 2.14(d)), não há formação de cavaco.

Tipo	Características	Aplicação
(a) Macho Ponta Helicoidal 	<ul style="list-style-type: none"> Ponta helicoidal (direciona o cavaco); Empurra o cavaco para frente com baixo torque de corte; Canal Raso de formato único proporciona uma estrutura resistente; Boa ação de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> Furos passantes; Para materiais em que o cavaco gerado é de forma espiral contínua; Alta velocidade de rosqueamento.
(b) Macho Canal Helicoidal 	<ul style="list-style-type: none"> Canal Helicoidal; Empurra o cavaco em direção à haste; Torque de rosqueamento baixo e aplicável para rosqueamento até o fundo do furo; Boa ação de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> Furo cego; Para materiais em que o cavaco gerado é na forma espiral contínua.
(c) Macho Canal Reto 	<ul style="list-style-type: none"> Canal Reto; Arestas de corte resistentes; Reafiação é menos complexa 	<ul style="list-style-type: none"> Para furos: cego e passante; Para materiais onde o cavaco é gerado na forma de pó; Para materiais duros.
(d) Macho Laminador 	<ul style="list-style-type: none"> Sem canal; Não produz cavaco; Uniformidade precisa do limite da rosca feita; Excelente rigidez. 	<ul style="list-style-type: none"> Para furos: cego e passante; Para materiais com elevado regime plástico.

Figura 2.14: Tipos de macho de corte utilizado em rosqueamento com máquinas: (a) Macho Ponta Helicoidal, (b) Macho Canal Helicoidal, (c) Macho Canal Reto e (d) Macho Laminador (Adaptado de OSG (2012)).

A escolha dos parâmetros de corte ao realizar a operação de rosqueamento com machos de corte influenciam nos esforços de usinagem e também na precisão dimensional dos furos produzidos. Pereira (2010) verificou que, ao usinar ferros fundidos cinzentos, o aumento da velocidade de corte causou a diminuição do torque e o aumento da força axial. Além disso, o desalinhamento destas ferramentas em relação ao eixo da máquina podem causar aumentos significativos no torque.

Mota (2006) avaliou o comportamento de machos de corte de aço-rápido na usinagem com alta velocidade de ferro fundido cinzento. Através de ensaios de vida de ferramenta, ele observou que os tipos de desgaste predominantes nestas ferramentas são adesão e abrasão. Uma queda na dureza dos filetes dos machos de corte podem acentuar estes mecanismos evidenciados. Assim, é bastante importante compreender o processo de fabricação para garantir a integridade destes filetes.

2.10 Retificação de Machos de Corte

Durante a fabricação de machos de corte, inicialmente, é feito a geometria quadrada da haste e os canais por meio de processos de usinagem com geometria definida. Posteriormente, são feitos o chanfro e o pescoço (indicados na Fig. 2.12). A parte da rosca é deixada com sobremetal e a ferramenta segue para etapa de tratamento térmico. Somente após ao tratamento térmico é feita a retificação dos filetes das roscas.

O processo de retificação é empregado quando é preciso usinar materiais de elevada dureza e que são requeridas tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas. Nesta etapa de fabricação, os machos estão endurecidos através de tratamento térmico de têmpera e revenimento, podendo alcançar dureza entre 64 e 67 HRc, devido ao endurecimento secundário característico dos aços-rápidos.

Os filetes de um macho de corte são formados por meio de um rebolo com o perfil determinado, de acordo com o diâmetro e o passo de rosca. Esta é uma das vantagens da utilização da retificação para a fabricação de machos, por ser possível adaptar o processo para diversos diâmetros e passos de rosca alterando apenas o perfil do rebolo e os movimentos de usinagem, o que torna o processo versátil. A outra alternativa a este processo é a fundição ou a metalurgia do pó, porém mesmo através destes processos seria necessário realizar o acabamento por retificação. Além disso, a produção desta ferramenta em aço-rápido traz um resultado satisfatório quanto ao custo-benefício, pois são mais baratos de serem produzidos que as ferramentas de metal duro. Na Fig.2.15 estão ilustradas as etapas de fabricação dos machos de corte.

Conforme mostrado na Fig.2.15(a), a peça antes da usinagem já possui os canais helicoidais em uma região com sobremetal onde serão formados os filetes. O rebolo avança sem contato com a peça enquanto esta rotaciona. O avanço que o rebolo realiza é a profundidade de corte do passe que irá realizar. A quantidade de passes necessários é definido automaticamente através da programação CNC. Dependendo da quantidade de sobremetal, são realizados passes de desbaste e, ao chegar próximo as dimensões finais, são necessários alguns passes de acabamento. O número de passes e a profundidade pode variar conforme o diâmetro da peça, porém o controlador pode definir a profundidade de corte máxima para os passes de desbaste e acabamento, e o rebolo irá adentrar em duas sequências. A velocidade de rotação da peça também pode variar entre os passes de desbaste e acabamento.

Após o rebolo avançar, a peça se desloca no sentido paralelo ao eixo do rebolo e em sua direção, Fig.2.15(b). A velocidade de avanço do rebolo (velocidade de avanço longitudinal) é sincronizada com sua rotação para que sejam formados filetes com o passo correto. Desta forma, o que define esta velocidade de avanço longitudinal é a velocidade de rotação da peça.

Em seguida, após o rebolo passar pela região com sobremetal, o movimento de deslocamento da peça cessa e então o rebolo se afasta, como ilustrado na Fig.2.15(c). Após

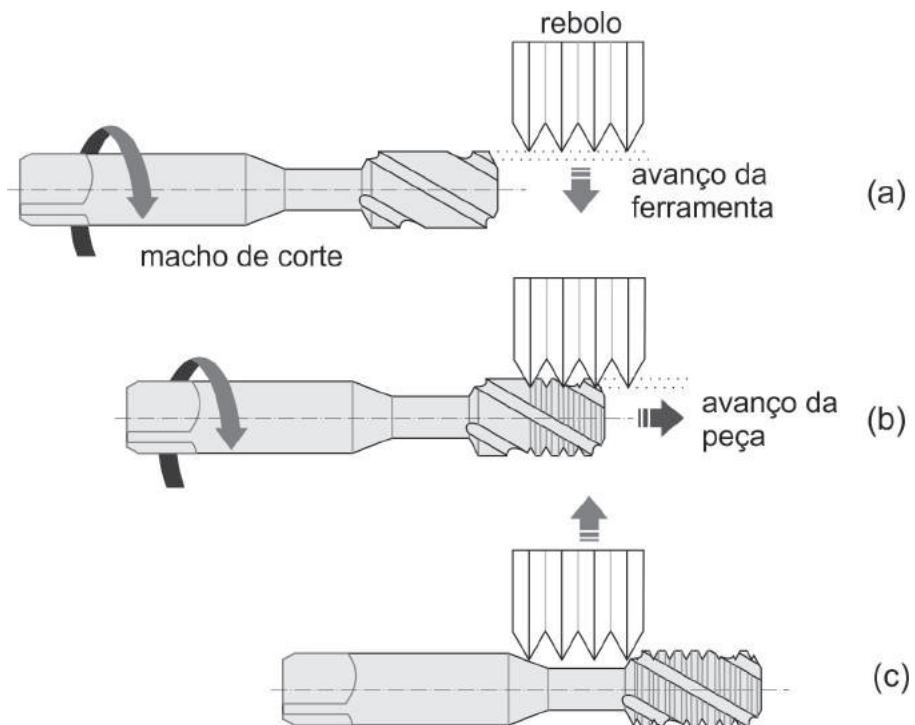


Figura 2.15: Etapas do processo de fabricação de machos de corte - (a) avanço do rebolo, (b) passagem da ferramenta pelo rebolo (c) recuo do rebolo (Fonte: Próprio Autor).

a passagem e retorno do rebolo, ele é dressado com um dessador do tipo rotativo conhecido como *rotary dress*. Para cada geometria de macho de corte existe um dressador específico com o perfil do rebolo desejado, que define a geometria dos filetes formados. A dressagem é feita por um eixo independente que se localiza na parte posterior do rebolo. A peça se desloca até a sua posição inicial e o processo se repete novamente desde a primeira etapa (Fig.2.15(a)). O processo se completa ao atingir as dimensões desejadas.

Devido ao sentido de rotação da peça, a entrada do rebolo sempre ocorre em uma aresta de corte do macho. Este tipo de processo tem como característica o corte interrompido devido a presença dos canais dos machos de corte. Os principais defeitos encontrados ocorrem nas arestas, no momento em que o rebolo penetra e sai da peça. Segundo observações dos engenheiros do fabricante de machos de corte, alguns problemas como queima e rebarbas ocorrem com maior frequência nas arestas de saída, onde o rebolo se movimenta da peça em direção do canal.

2.11 Integridade Superficial de Superfícies Usinadas

O termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície e, portanto, engloba um grande número de alterações sofridas por ela após ser usinada por uma ferramenta. Dessa forma, o conceito de integridade superficial não pode ser definido

apenas em uma dimensão e não abrange somente a textura da peça e sua forma geométrica. Esse termo engloba também outras características da superfície em serviço e de camadas abaixo desta. De forma geral, tais superfícies podem ser classificadas em alterações na superfície (acabamento) e alterações em camadas internas da peça (alterações subsuperficiais) (MACHADO *et al.*, 2011).

Todas as várias tecnologias modernas dependem, para o funcionamento satisfatório de seus processos, das propriedades especiais de alguns sólidos. Dependendo da aplicação é requerida maior resistência mecânica, como em componentes estruturais, enquanto que em outras maior tenacidade, como componentes sujeitos a solicitações com impactos. Estas propriedades destacadas são propriedades de volume, mas para um grupo importante de aplicações, as propriedades desejáveis são as propriedades de superfície. Uma das aplicações são componentes resistentes ao desgaste, tais que suas superfícies executam várias funções de engenharia em uma variedade de ambientes complexos. Este é o caso das superfícies das ferramentas de usinagem, que devem possuir elevada dureza e ainda ser resistentes ao desgaste durante a usinagem. Portanto, nestes casos, o comportamento do material irá depender fortemente da superfície do material, da área de contato da superfície e do ambiente em que esse material é utilizado (DAVIM *et al.*, 2010).

Segundo Jackson e Davim (2010), integridade superficial é um dos aspectos das condições ótimas de retificação, definidos quando se busca a máxima taxa de remoção de metal, com objetivo de aumentar a produtividade, enquanto se mantém a qualidade exigida. Os principais parâmetros de controle de integridade superficial de uma peça são o acabamento da superfície e a tensão residual. Mas definir as condições ideais de retificação requer habilidade, experiência e tempo.

Sabe-se que no processo de retificação são empregados abrasivos que possuem arestas cortantes para remover material da peça. De um modo geral, o processo de retificação envolve quatro grupos de variáveis que podem afetar a integridade superficial de um componente usinado (JACKSON; DAVIM, 2010). Essas variáveis são:

- i. As características de desempenho da máquina de retificação: rigidez, precisão de posicionamento, estabilidade térmica e deformação;
- ii. As características do rebolo: tamanho dos abrasivos, propriedades dos materiais dos abrasivos, estrutura, concentração, porosidade, dureza e as propriedades do material do ligante;
- iii. As propriedades do material da peça: tensão de escoamento, resistência à fratura e a resistência à transformação de fase;
- iv. Parâmetros de retificação: velocidade do rebolo, a velocidade da mesa, profundidade de corte, penetração de trabalho, tipo de fluido e seu método de aplicação, as condições de dressagem e as propriedades dos dressadores.

Para a fabricação dos machos de corte é importante que a superfície fabricada por retificação esteja isenta de qualquer dano superficial, pois qualquer alteração na superfície e subsuperfície pode afetar significativamente o desempenho destas ferramentas durante a usinagem. Este trabalho inverstiga dois fenomenos relacionados com a integridade superficial, a queima e a formação de rebarba. Estes dois fenômenos que são considerados os dois principais problemas que ocorrem em peças retificadas serão melhor descritos nos tópicos a seguir.

2.11.1 Queima de Retificação

Durante a retificação de peças de aços endurecidos e temperados, a taxa de remoção de material é limitada pelo risco de dano térmico no componente usinado. A severidade deste dano, também conhecido como queima de retificação, que depende da temperatura a qual a superfície da peça foi aquecida (DAVIM *et al.*, 2010).

Segundo Malkin e Guo (2008) queima da peça é o dano mais comum de ocorrência em materiais retificados (Figura 2.16). Este fenômeno tem sido investigado principalmente para ligas de aço ao carbono e aços liga, embora seja também um problema que pode ocorrer com outros materiais metálicos durante a retificação. Visualmente, a queima da peça em aços é caracterizada pelas cores azuladas, que são consequência da formação de uma camada de óxido. Em geral, se a camada afetada (queima) não for muito profunda pode ser removida pela própria retificação, mas apenas deixando o rebolo usinando a superfície sem aumentar a profundidade de corte. É um processo conhecido como fiscamento ou *spark-out*.

O processo de fiscamento pode remover a camada com alteração da coloração da superfície, mas para retificação de filetes esta marca pode ser evidenciada nas laterais da superfície retificada. Esta marca de retificação pode indicar uma queima quando é acompanhada de alteração microestrutural. Na Fig. 2.16(a) é mostrada uma superfície de filete retificado com coloração escurecida em relação a subsuperfície. Em Fig. 2.16(b) é mostrada uma vista lateral do filete que apresenta marca de retificação na subsuperfície retificada.

Para aços endurecidos que são retificados, mesmo sem apresentarem queima visível, geralmente são acompanhados de uma queda na dureza devido à retêmpera que ocorre próxima à superfície. Alguns exemplos deste amolecimento para diferentes penetrações de trabalho são mostrados na Fig. 2.17. Observa-se que o grau de retêmpera aumenta com o aumento da profundidade de corte (a_e), ou penetração de trabalho, sendo que a maior queda de dureza foi observada para a_e de $50 \mu m$. Essa modificação pode ser observada em uma camada extensa abaixo da superfície (cerca de 1 mm) (MALKIN; GUO, 2008).

Uma queima visível também pode ser encontrada acompanhada pela reaustenitização da peça e retêmpera devido ao rápido resfriamento. Normalmente para um aço endurecido retificado sem nenhuma queima, há geralmente alguma queda de dureza devido ao recocimento próximo a superfície (MALKIN; GUO, 2008), e pode ser quantificadas por meio da medição e determinação do perfil de microdureza.

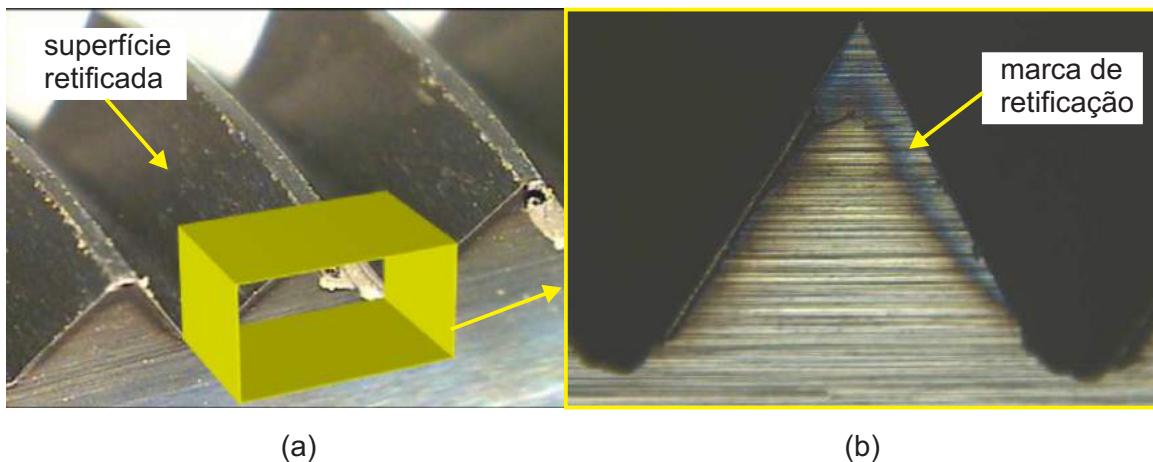


Figura 2.16: Marca de retificação em filetes retificados - (a) filetes retificados, (b) detalhe marca de retificação próxima a aresta da superfície retificada (BADGER, 2011).

Saravanapriyan, Vijayaraghavan e Krishnamurthy (2003) provaram em seu trabalho que a queima altera significativamente o desempenho da ferramenta de corte. Ao realizarem o torneamento com ferramentas com e sem queima eles monitoraram a força e o desgaste das ferramentas. Os autores observaram que para ambas variáveis de saída os resultados mostraram-se piores para as ferramentas com queima proveniente do processo de retificação.

Como já discutido, a queima é um problema a ser controlado em processos de retificação por alterar o desempenho das peças ou ferramentas de corte retificadas. A principal dificuldade é que a queima está relacionada com o aumento de temperatura na região de corte durante a retificação, que é muito difícil de ser medida. Por esta razão, são aceitos os modelos que tentam relacionar a temperatura com os parâmetros de corte de forma direta. Alguns modelos são aqueles propostos por Mayer *et al.* (2002), Lavine e Jen (1991), Shaw (1996), Malkin e Guo (2008) dentre outros. Alguns modelos são acompanhados com ensaios experimentais para validação com aqueles obtidos indiretamente como os propostos por Dotto (2004) e Ren, Zhang e Zhou (2009).

2.11.1.1 Métodos de Detecção da Queima

As taxas de retificação utilizadas atualmente são limitadas pelas máximas temperaturas permitidas no processo de retificação. Quando estas temperaturas são excedidas, ocorre a deterioração da qualidade da peça. O aumento da tensão residual em uma superfície usinada pode ser causada pela transformação de fase, tensão de origem térmica devido ao aquecimento e resfriamento irregular da camada superficial que causa tensão de tração, ou devido a deformação mecânica que conduz à geração de tensão residual de compressão (SILVA *et al.*, 2012).

A queima é identificada quando há a alteração das propriedades do material, na

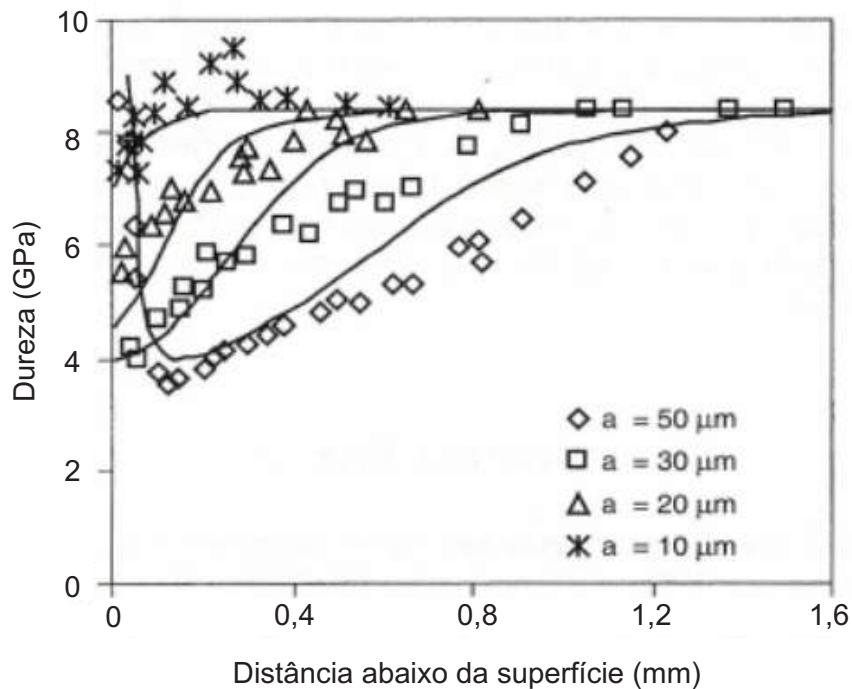


Figura 2.17: Perfil de dureza abaixo da superfície retificada de um aço ferramenta para diferentes profundidade de corte (MALKIN; GUO, 2008).

superfície e subsuperfície. Em alguns casos a análise visual não é suficiente para identificar a queima no material e por isso é preciso utilizar outros métodos para detectar alterações na integridade da peça.

Se por meio de estudo experimental for determinado o nível de dano na microestrutura, associado aos parâmetros de entrada do processo, é possível explorar taxas mais severas de retificação e aumentar a produtividade, sem comprometer a qualidade da peça. Métodos de análise microestrutural podem ser utilizados para caracterizar a superfície e subsuperfície de peças usinadas. Assim, nesta seção são apresentados alguns métodos normalmente empregados para a identificação da queima.

- Ataque ácido: a peça é submersa em ácido clorídrico (HCl) a uma determinada temperatura, normalmente inferior a 80°. No caso da presença de tensão residual na superfície da peça retificada, aparecem redes de trincas típicas. Este método é utilizado para comprovação de esforços de tração e permite uma avaliação sobre a possibilidade de trincas em componentes afetados termicamente. É muito empregado para detectar trincas em componentes para rolamento (aço SAE 52100). Segundo Callister e Rethwisch (2007), a revelação dos detalhes da microestrutura é obtida mediante a preparação cuidadosa da superfície (lixamento e polimento), seguida de um tratamento de superfície que emprega um regente químico apropriado e em tempo pré-determinado. Ressalta-se que se o ataque ultrapassar um certo tempo, a estrutura não poderá ser observada. O ataque químico

produz uma textura diferente para cada fase do material, de modo que as diferentes fases podem ser distinguidas umas das outras;

- ii. Microdureza: pela medição do perfil da microdureza na subsuperfície de aços endurecidos, uma queima de aspecto visível ou não pode ser detectada por estar acompanhada de re-austenitização da peça ou retêmpera devido ao rápido resfriamento em camadas abaixo da superfície usinadas. Para um aços que são tratados termicamente a dureza decaí devido ao recozimento próximo a superfície (MALKIN; GUO, 2008). Podem ocorrer também mudanças microestruturais durante a retificação da mesma forma que ocorre no revenimento, devido às altas temperaturas atingidas na região de corte. Aços de liga mais alta são geralmente revenidos a temperaturas suficientes para causar endurecimento secundário e para mudar a natureza dos carbonetos presentes (VOORT; JAMES, 2004). Em alguns casos, logo abaixo da superfície pode haver endurecimento pois se há um resfriamento rápido, não haverá tempo de reorganização dos grãos da estrutura;
- iii. Análise da centelha: esta técnica consiste em analisar a centelha da retificação e correlacionar a sua temperatura com a temperatura na zona de retificação. Ren, Zhang e Zhou (2009) utilizaram esta técnica para a predição da queima na retificação sem a necessidade de ensaios destrutivos. Porém, em geral a temperatura observada é maior que a real porque há um processo exotérmico de oxidação do cavaco assim que ele deixa a região de corte;
- iv. Emissão acústica: o princípio do ensaio por Emissão Acústica consiste em receber os sinais provenientes da perturbação mecânica, através de sensores piezelétricos estaticamente posicionados no equipamento em teste, que transforma esta energia em pulso elétrico. Através de um sensor de emissão acústica é possível verificar quando o processo atinge níveis críticos do sinal, a partir dos quais a peça é queimada. Dotto (2004) utilizou dois parâmetros obtidos através de emissão acústica para monitorar o processo de retificação via internet. O parâmetro DPO é o sinal da potência de retificação enquanto o sinal FKS utiliza os parâmetros Skewness e Kurtosis para definir os níveis críticos para queima. Ele também utilizou um método de identificação automático através da coloração da queima. Apesar de demandar algumas melhorias no processo de identificação do nível crítico, este processo tem se mostrado eficiente na predição da queima;
- v. Ruído de Barkhaousen: As mudanças microestruturais causadas pelos danos térmicos induzem a mudanças nas propriedades ferromagnéticas do material. O ruído de Barkhaousen é capaz de identificar as regiões com diferentes propriedades ferromagnéticas. Santa-aho *et al.* (2012) retificaram aços endurecidos (48HRc) utilizados em engrenagens, com rebolo de óxido de alumínio. Os autores mostraram que é possível verificar alteração na dureza e tensão residual por meio deste método.

2.11.2 Rebarba em Peças Retificadas

Como resultado dos processos de usinagem ou de conformação mecânica muitas vezes são geradas rebarbas nas arestas das peças. A norma ISO:13715 (2000) define rebarba como sendo o material grosso e sobressalente encontrado fora das dimensões nominais de uma borda externa, deixado como resíduo de usinagem ou de outro processo de fabricação. A rebarba torna-se indesejável quando compromete a funcionalidade ou a qualidade da aresta em que ela se encontra. Desta forma há motivação para estudos a fim de tentar eliminá-la como resíduo do processo.

Uma vez que a geração de rebarba na usinagem não pode ser evitada completamente, o principal objetivo das pesquisas é controlar a geração e reduzi-la a fim de criar rebarbas com dimensões e formas toleráveis, que são aceitáveis, respeitando portanto a funcionalidade da peça ou ainda que aconteça um subsequente processo de rebarbação seguro, o qual garanta um comportamento de separação adequado (AURICH; SUDERMANN; BIL, 2005).

Gillespie e Blotter (1976) analisaram a formação da rebarba em processo retificação de passagem, sem fluido refrigerante e detectaram diferentes rebarbas macroscópicas nas arestas das peças. Eles explicaram este fenômeno de acordo com o contato de um único grão, como segue:

- i. Nas arestas laterais de um único grão uma rebarba é formada como consequência das forças atuantes nas laterais dos grãos. Uma superposição de numerosos contatos com grãos distribuídos aleatoriamente provoca de forma contínua a formação lateral de rebarba;
- ii. A rebarba do tipo “*rollover*” ocorre na aresta de saída. Devido ao final do contato de um único grão a formação do cavaco cessa, e o material da peça é plasticamente dobrado em torno da aresta de saída. Uma rebarba de entrada acontece na aresta de entrada devido à deformação plástica do material oposta ao movimento de direção de um único grão.

Na Fig.2.18 é ilustrado um esquema do local de ocorrência de rebarbas formada durante o processo de retificação de passagem com sentido de corte discordante que foram observadas por Aurich, Sudermann e Bil (2005) após a retificação de aço SAE4140 com rebolo de CBN. São mostradas rebarbas em diferentes arestas da peça que, dependendo da localização, são classificadas como rebarbas laterais, rebarbas de entrada e rebarbas de saída.

Kawamura e Yamakawa (1989) realizaram um trabalho experimental no processo retificação plana sem fluido refrigerante e também observaram que entre as arestas nas entradas analisadas, em que ocorreram rebarbas laterais e de saída, as rebarbas de saída foram aquelas que apresentaram as maiores dimensões. Portanto, as investigações subsequentes foram concentradas no mecanismo de formação das rebarbas de saída. No final do passe de retificação, uma zona de deformação plástica foi observada na aresta de saída. Pelo aumento

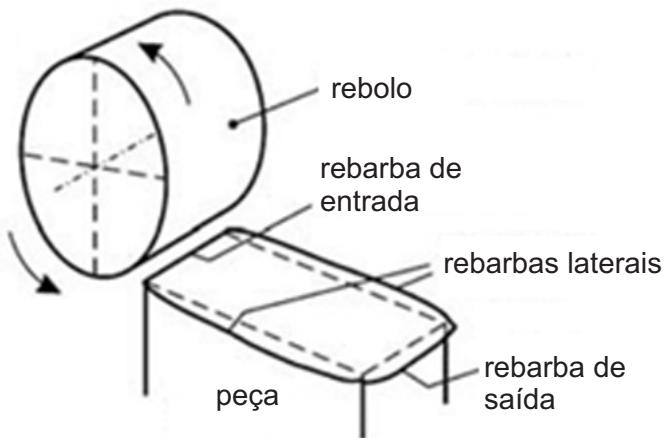


Figura 2.18: Regiões de ocorrência de rebarba em superfícies após a retificação de passagem (SUDERMANN; REICHENBACH; AURICH, 2010).

do ângulo de saída da aresta de saída, a expansão desta zona plástica pode ser diminuída. Ao mesmo tempo a rebarba de saída é reduzida.

A formação de rebarba na saída é explicada por uma deformação plástica do material próxima a aresta de saída. Uma pequena área de material a ser teoricamente removida da peça é dobrada em torno da aresta de saída devido ao material não oferecer mais resistência contra aquele movimento de corte. Passes de retificação consecutivos causam uma acumulação da rebarba de saída (SUDERMANN; REICHENBACH; AURICH, 2010). Na Fig.2.19 é ilustrado o fenômeno de formação de rebarba. Observa-se que o tamanho da rebarba é diretamente relacionado com a profundidade de corte devido a geometria da saída.

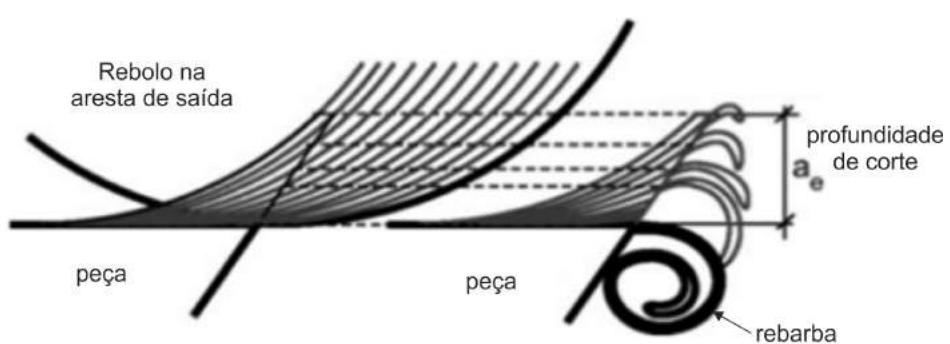


Figura 2.19: Esquema da formação de rebarba na retificação próximo a aresta de saída da peça (AURICH; SUDERMANN; BIL, 2005).

As rebarbas em geral são prolongadas e em formas de espiral. Na Fig.2.20 são mostradas rebarbas típicas obtidas na retificação de um aço endurecido. Neste caso é possível observar que a rebarba é menos espessa para menores penetrações de trabalho (a_e).

Na Fig.2.21 é mostrado o perfil de microdureza obtido ao longo da seção de uma

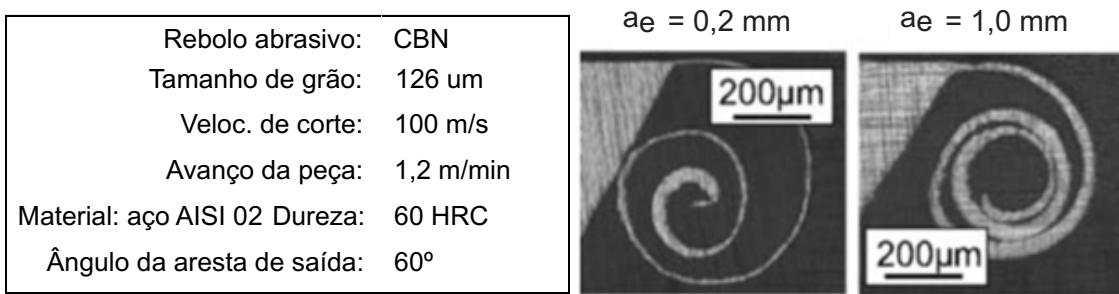


Figura 2.20: Imagens de rebarbas formadas em aços ferramenta após o processo de retificação (Adaptado de Aurich, Sudermann e Bil (2005)).

rebarba de retificação observada em aço para ferramentas AISI O2 (90 MnCrV8), com dureza de 60 HRc. A área triangular próxima a aresta indica que a ocorrência de endurecimento de material com formação de martensita gerado por uma rápida taxa de resfriamento. Se a temperatura do material antes do processo de refrigeração for tão alta quanto a temperatura de austenitização do material, a rápida taxa de resfriamento será responsável por um auto-endurecimento juntamente com o efeito do fluido de corte. Para o material da peça da Fig.2.21, esta temperatura é aproximadamente 800°C. Em alguns casos, a camada afetada pelo calor (queimada) pode ser vista na raiz da rebarba. Durante um curto período de retificação com um volume de rebarba pequeno, a temperatura na rebarba aumenta em grande proporções. A combinação do auto endurecimento e a ausência de fluido refrigerante leva a uma alta taxa de resfriamento e, consequentemente, a um aumento da dureza imediatamente após o término do processo de retificação (AURICH; SUDERMANN; BIL, 2005).

Ramesh e Han (2003) realizaram ensaios de retificação monitoraram a força de corte e avaliaram as dimensões da rebarba para diferentes velocidades de corte. Os resultados mostraram que o aumento da velocidade de corte resulta na redução da componente da força normal e da espessura da rebarba. Segundo estes autores, ao aumentar a velocidade de corte uma parcela menor de energia é gasta para o fenômeno de sulcamento (*ploughing*). Eles afirmam ainda que o fenômeno de sulcamento tem relação direta com a espessura da rebarba formada.

Sudermann, Reichenbach e Aurich (2010) investigaram a formação de rebarba na lateral e na saída das peças próximo a superfície retificada. Nos ensaios o rebolo foi parado a uma distância conhecida da aresta, de forma que foi possível observar imagens que representam a sequência de formação da rebarba completa (Fig.2.22(a)). Além disso, ao medir o comprimento a cada parada de retificação foi possível observar que a dimensão teórica do material remanescente na aresta da peça (Fig.2.22(b)) é equivalente a espessura e comprimento da rebarba medida para cada parada de retificação (Fig.2.22(c)).

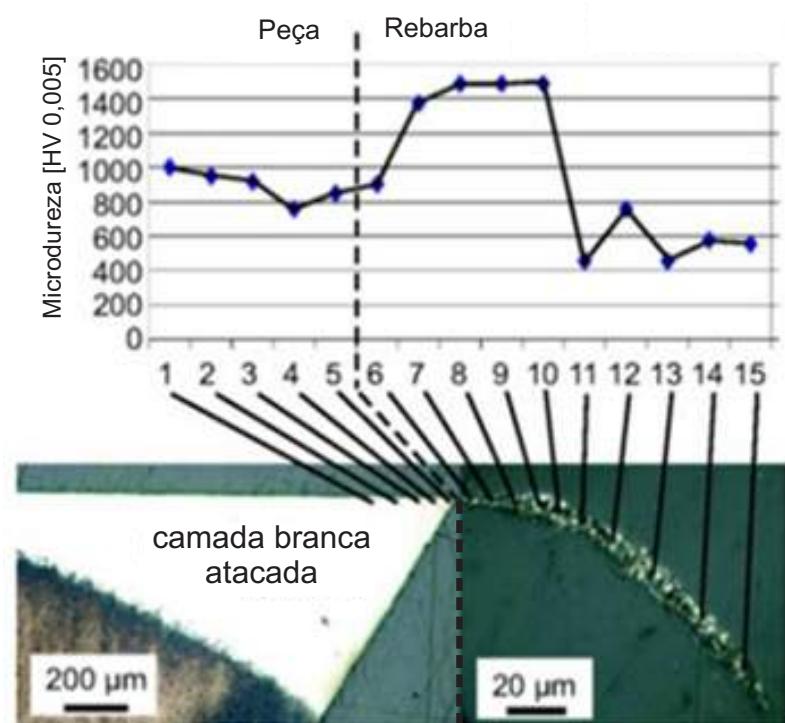


Figura 2.21: Perfil de microdureza das rebarbas formadas em aço AISI O2 (90 MnCrV8) após o processo de retificação (AURICH; SUDERMANN; BIL, 2005).

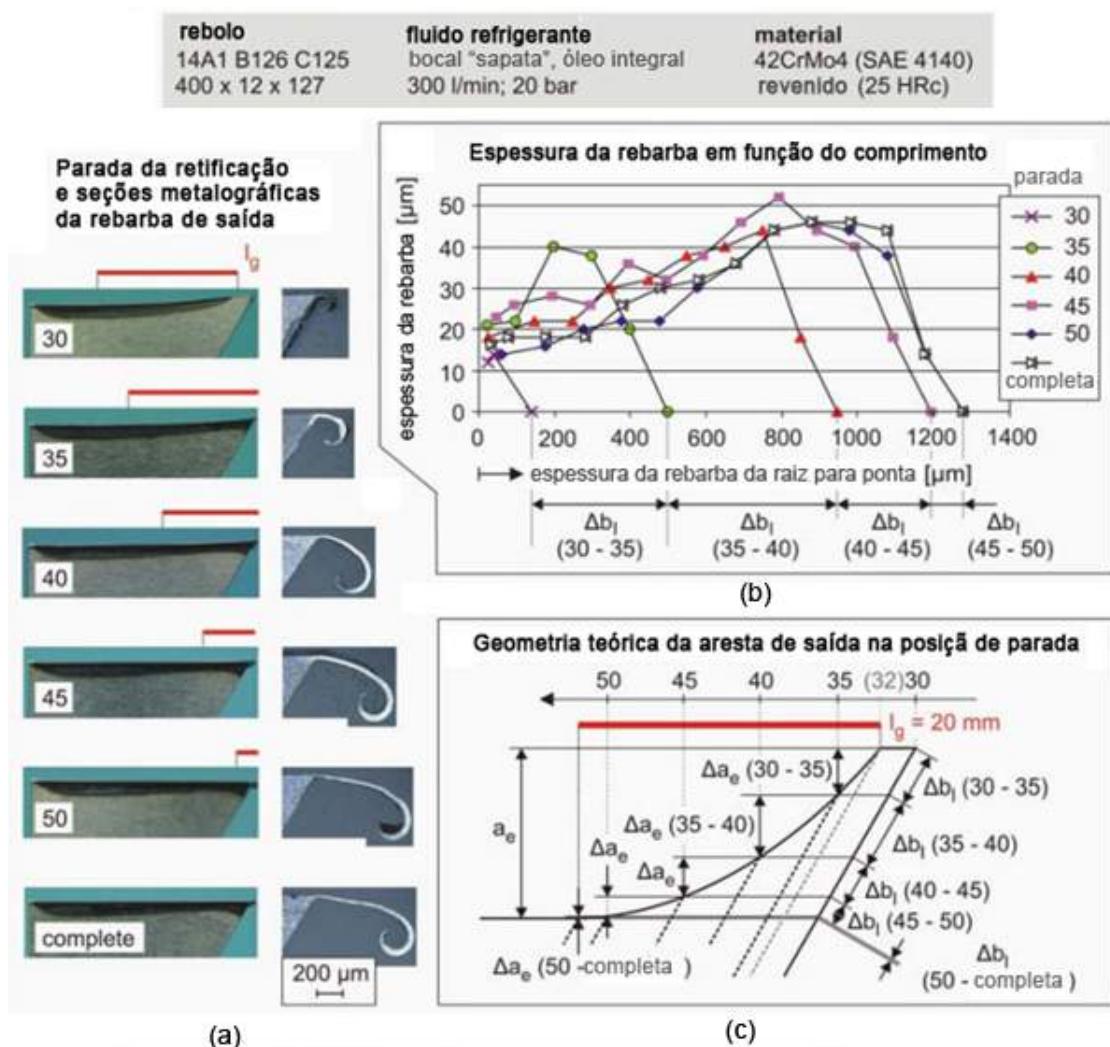


Figura 2.22: Formação de rebarba no processo de retificação: (a) rebarbas formadas com parada do rebolo em diferentes distâncias da aresta, (b) espessura das rebarbas mostradas em (a), (c) espessura teórica da aresta de saída (SUDERMANN; REICHENBACH; AURICH, 2010).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os materiais, equipamentos e metodologia utilizados neste trabalho. Com o objetivo de investigar o fenômeno de queima e formação de rebarba durante a retificação, parte do trabalho foi realizada em laboratório e a outra parte na empresa fabricante de ferramentas de corte OSG Sulamericana. Para isso, o trabalho foi divido em três etapas, identificação do problema, ensaios de usinagem em laboratório e ensaios de usinagem na empresa, como mostrado na Fig.3.1.

A primeira etapa consistiu na identificação dos problemas relacionados com o processo de fabricação de machos de corte na linha de produção da empresa. A partir das observações realizadas nesta etapa, foram desenvolvidas as atividades das etapas de ensaios de usinagem subsequentes.

A segunda etapa consistiu em realizar os ensaios de usinagem em laboratório no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Universidade Estadual Paulista (Unesp)-campus Bauru. Nestes ensaios foram reproduzidas as condições de corte próximas àquelas utilizadas na empresa, porém com um número reduzido de variáveis. Baseado nas observações realizadas durante a identificação do problema foi desenvolvido um corpo de prova para esta etapa. Na sequência, foram realizados ensaios preliminares e ensaios definitivos.

A terceira etapa consistiu nos ensaios de usinagem realizados na empresa. Nesta etapa foram realizados testes nas condições reais de fabricação (*in-situ*) para identificar a influência dos parâmetros de corte (Etapa 3.3.1 da Fig.3.1). Posteriormente, através de um planejamento fatorial, foram realizados ensaios de usinagem na empresa e as amostras (machos de corte) levadas para análise em laboratório. Os resultados desta etapa foram comparados com os obtidos em laboratório.

Nas próximas seções serão detalhadas as metodologias utilizadas nas três etapas experimentais para o desenvolvimento deste trabalho.

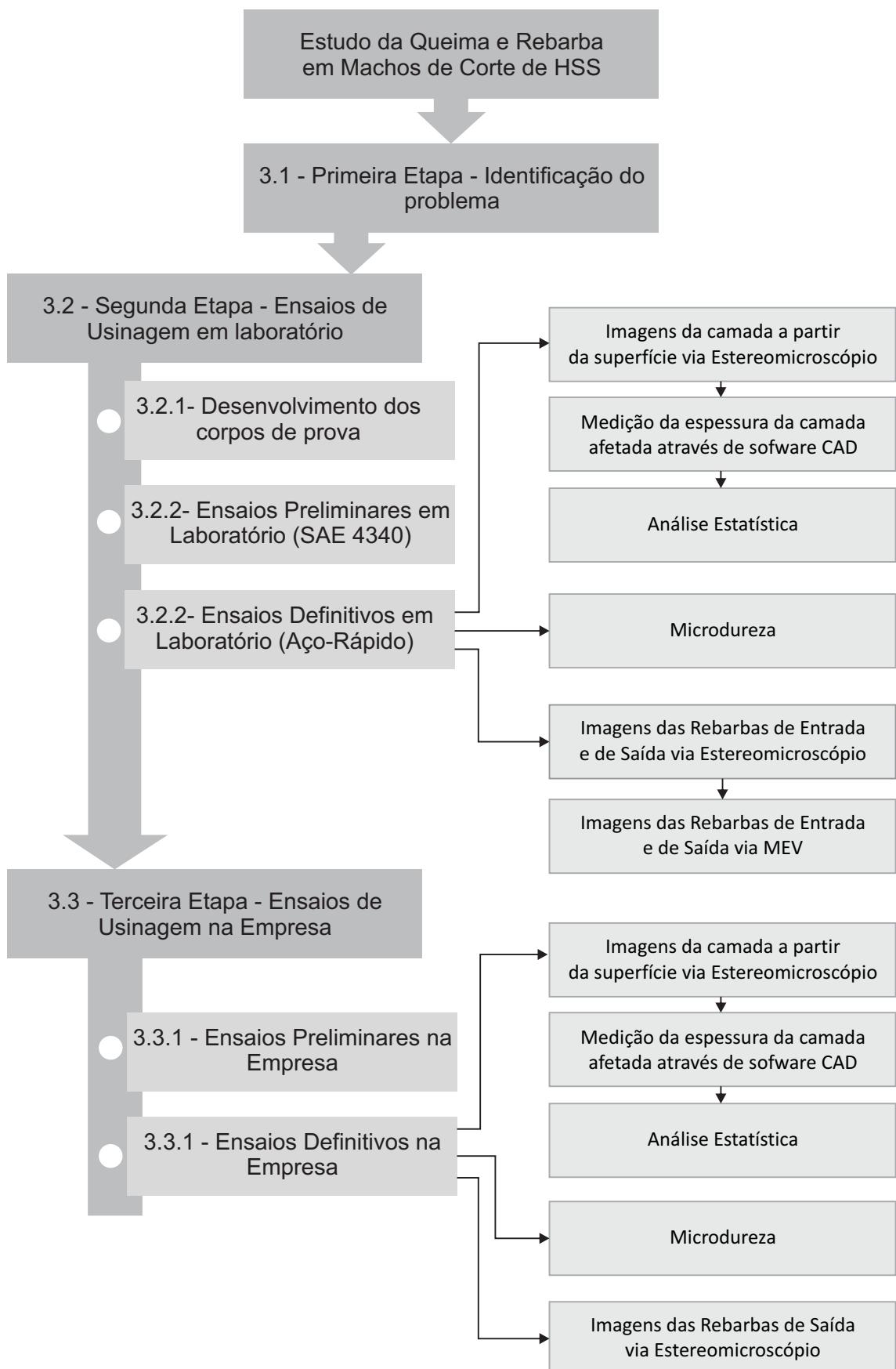


Figura 3.1: Fluxograma das etapas do procedimento experimental.

3.1 Primeira Etapa - Identificação do Problema

A primeira etapa de investigação foi a identificação do problema relatado pelos engenheiros da empresa OSG - Sulamericana. Foram realizadas varias visitas e trabalhos de campo, por meio das quais foi observado o processo de retificação de machos de corte a fim de colher os dados do processo, como parâmetros de corte, cinemática do processo, dentre outros. Em seguida foram coletadas amostras com presença de queima e de rebarba.

Durante o acompanhamento do processo de retificação dos filetes das ferramentas (machos) observou-se a ocorrência de alteração na cor na região próxima a aresta de saída do filete. Esta alteração provoca a cor mais escura com tom acobreado e é chamada popularmente de queima. Esta queima prejudica o desempenho da ferramenta, pois é acompanhada de quena na dureza. Neste caso, as ferramentas são descartadas. Na Fig.3.2 é mostrado um macho de corte recolhido da linha de produção após a etapa de retificação.

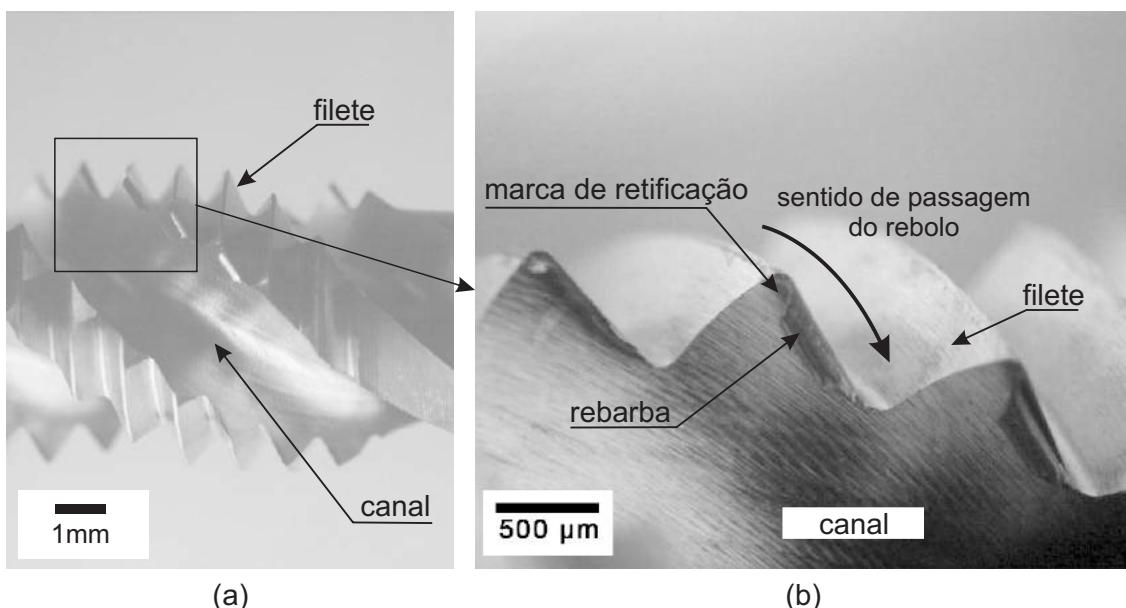


Figura 3.2: Marca de retificação na formação de rebarba em machos de corte - (a) Filetes e canal de machos de corte, (b) Detalhe da aresta entre o filete e o canal, com presença de marca de retificação e rebarba.

O processo de retificação do macho investigado é realizado em uma das etapas finais da fabricação, quando ele já está próximo a sua geometria final e já foi submetido ao tratamento térmico de têmpera e revenimento. Foi nesta etapa em que se observou a presença de queima e o surgimento da rebarba em geometrias com canais helicoidais.

A região de ocorrência da marca de retificação (queima) é na aresta, entre a superfície retificada dos filetes e o canal da ferramenta, conforme indicado na Fig.3.2(a). A marca de retificação, mostrada com mais detalhes em Fig.3.2(b), possui como característica uma mancha escurcida e acobreada, observada na região perpendicular a superfície retificada.

Mesmo com a presença da marca na aresta, não é observada alteração na coloração da face retificada dos filetes, provavelmente por ter sido removida durante os passes de acabamento. A rebarba também ocorre na mesma região de ocorrência da marca de retificação. É possível observar na Fig.3.2(b) que tanto a rebarba quanto a marca de retificação ocorrem em apenas uma das arestas dos filetes e na região de saída do rebolo para o canal, indicando que há uma possível correlação entre queima e rebarba com a geometria dos machos de corte.

Segundo informações relatadas pelos engenheiros da empresa, a presença destas marcas indica alguma alteração microestrutural. Quando elas estão presentes, geralmente ocorre a queda de dureza na superfície retificada. De acordo com a classificação da empresa, é considerada uma peça com presença de alteração microestrutural (queima) quando a dureza encontrada na face retificada do filete apresenta uma diferença de 30HV0,3 em relação a dureza original de uma região não retificada. Apesar de identificar esta queda de dureza na superfície, é difícil determinar qual espessura que a camada alterada atinge.

Através das observações, foi possível verificar que há uma forte influência da escolha dos parâmetros de corte a geração das marcas escuras (queima). Assim, com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros, o trabalho foi dividido em duas etapas experimentais de usinagem. Uma das etapas foi realizada no laboratório em ambiente controlado e outra na empresa, com as condições reais de operação.

3.1.1 Material dos Machos de Corte

Para produção de machos de corte pela empresa OSG-Sulamericana são utilizados aços rápidos classe M3. Uma das características desta classe é a presença de alta quantidade de vanádio. Na Tab.3.1 é mostrada a composição química (em massa) dos elementos de liga constituintes, segundo o fornecedor da empresa. Os elementos molibdênio (Mo), tungstênio (W) e vanádio (V) são formadores de carbonetos, responsáveis por conferir a esta classe de aço-rápido elevada dureza e resistência ao desgaste.

Tabela 3.1: Composição em massa dos elementos de liga do Aço-Rápido classe M-3 utilizado na fabricação de machos de corte (OSG - Sulamericana).

% em massa dos elementos					
C	Cr	Mo	W	V	Fe
1,21	4,25	5,00	6,00	3,00	Balanço

3.2 Segunda Etapa - Ensaios de Usinagem em Laboratório

A segunda etapa consistiu nos ensaios de usinagem realizados em laboratório. Os testes foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) pertencente a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp) - campus Bauru. O objetivo desta

etapa foi reproduzir, através de testes de retificação, condições próximas aquelas realizadas na empresa (observadas na primeira etapa), mas com um número reduzido de variáveis para simplificar o processo e permitir a compreensão do processo de formação de queima e rebarba. Ressalta-se que a geometria do macho é bem peculiar. Desta forma, a expectativa é relacionar as variáveis de entrada do ensaio de retificação com os fenômenos de queima e formação de rebarba. A metodologia deste ensaio foi desenvolvida em sub-etapas, conforme as fases de desenvolvimento, desde o projeto da amostra até os resultados do ensaios.

Nesta seção serão apresentadas as metodologias de cada uma das três sub-etapas que compõem a segunda etapa. Buscou-se compreender o fenômeno de retificação dos filetes de machos de corte e fazer uma correlação entre os parâmetros de fabricação e os problemas identificados na primeira etapa. Inicialmente foi projetada uma amostra que pudesse reproduzir a geometria dos machos de corte (Etapa 3.2.1 em Fig.3.1). Após o projeto, foram confecionadas amostras em aço endurecido (SAE 4340) e em seguite a realização dos esnsaios preliminares para validar a amostra e definir os parâmetros de corte dos ensaios definitivos (Etapa 3.2.2 na Fig.3.1). Os ensaios definitivos foram realizados no aço-rápido, classe M-3, o mesmo material utilizado na fabricação dos machos de corte pela OSG - Sulamericana. Após os ensaios, cada amostra foi analizada e realizada a medição da camada de marca de retificação na superfície perpendicular à superfície usinada da amostra, por meio de software CAD. Em seguida, os valores foram tratados estatisticamente. A medição de microdureza na região com marca de retificação também foi realizada e permitiu verificar a ocorrência de alterações microestruturais. A medição realizada permitiu visualizar a extensão da queima. Além da queima, as rebarbas nas arestas da amostra também foram investigadas através da comparação das rebarbas formadas em cada condição de usinagem e para diferentes geometrias de saída. Em algumas amostras também foram obtidas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) a fim de permitir observar com mais detalhes as rebarbas formadas e permitir análises.

3.2.1 Desenvolvimento dos Corpos de Prova

Como já descrito na primeira etapa, em apenas uma das arestas dos machos de corte eram observadas as marcas de retificação e a formação de rebarba. A diferença entre as duas arestas está no ângulo formado entre as faces. Em função disso, o corpo-de-prova foi projetado para apresentar diferentes ângulos de aresta durante o movimento de saída e entrada do rebolo, assim como é a geometria real dos macho de corte.

Segundo as observações realizadas na empresa a rebarba ocorre principalmente na aresta entre a face retificada do filete e a parede do canal durante o movimento de saída do rebolo. Apesar do rebolo usinar ambas as faces do filete, a aresta com menor ângulo na saída do rebolo para o canal apresenta uma rebarba mais pronunciada. As marcas de queima também são encontradas com maior frequência nas arestas com menor ângulo. Na Fig. 3.3

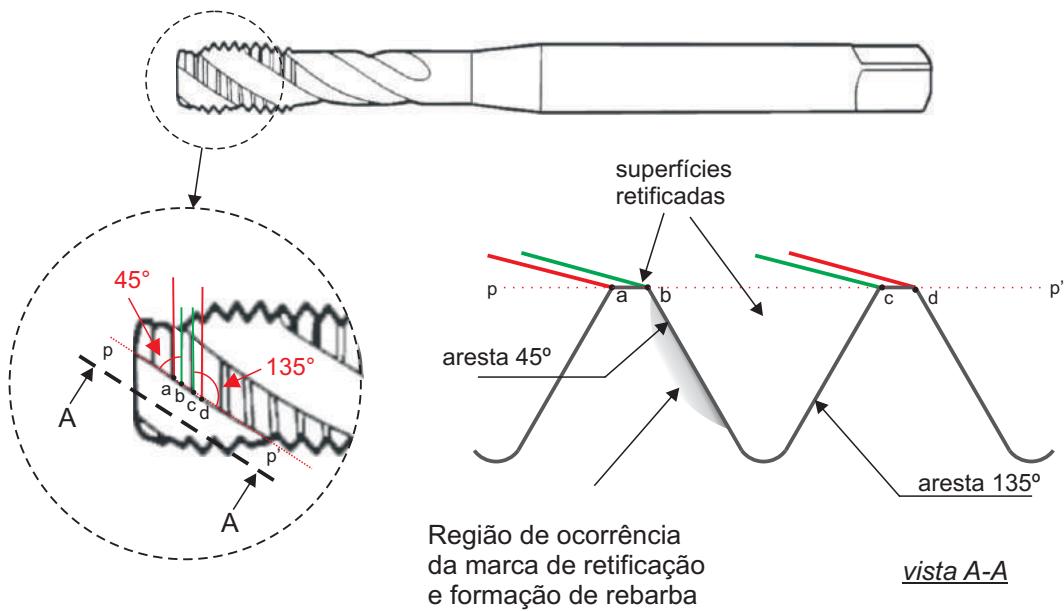


Figura 3.3: Região de ocorrência das marcas de retificação onde foram feitas as medição através de software CAD e análises.

é mostrada a região de ocorrência da queima nas arestas dos filetes. Desta figura observa-se que ao traçar uma linha paralela a parede do canal ($p-p'$), a superfície retificada que contém o ponto "b" forma um ângulo de 45° com esta linha. No lado oposto, a superfície retificada que contém o ponto "c", forma um ângulo de 135° com esta linha.

Na Fig.3.4(a) é mostrado um macho de corte após o processo de retificação , destacando a região onde se encontram as rebarbas. Ao deslocar a peça no microscópio de forma a se obter uma vista perpendicular à face do filete, indicada por *vista A*, obteve-se a imagem da Fig.3.4(b). Nesta Fig.3.4(b) é mostrado o ângulo formado entre a parede do canal e a face do filete. Nesta aresta está presente uma típica rebarba formada durante o processo de retificação. O ângulo mostrado é a projeção da inclinação do canal helicoidal e pode variar entre 42° e 47° dependendo do projeto da ferramenta. As amostras foram projetadas para reproduzir um valor médio do ângulo desta aresta igual a 45° .

Para que a geometria da amostra pudesse representar a aresta dos filetes dos machos, ela foi projetada com geometria cilíndrica e com dois canais diametralmente opostos. Desta geometria são gerados os ângulos de 45° e 135° das arestas dos filetes do macho de corte. Além disso, dois canais de 90° foram usinados para se permitir comparação com as outras arestas. Na Fig.3.5 é mostrado o projeto da amostra. Os ensaios são de retificação cilíndrica externa de mergulho, de forma que o rebolo tangencia a amostra. A cada rotação da amostra, o rebolo passa pelos canais, descrevendo movimentos de entradas e saídas em arestas com diferentes ângulos, semelhante ao movimento descrito entre o rebolo e a peça durante a retificação de machos de corte. Desta forma, a amostra permite comparar arestas

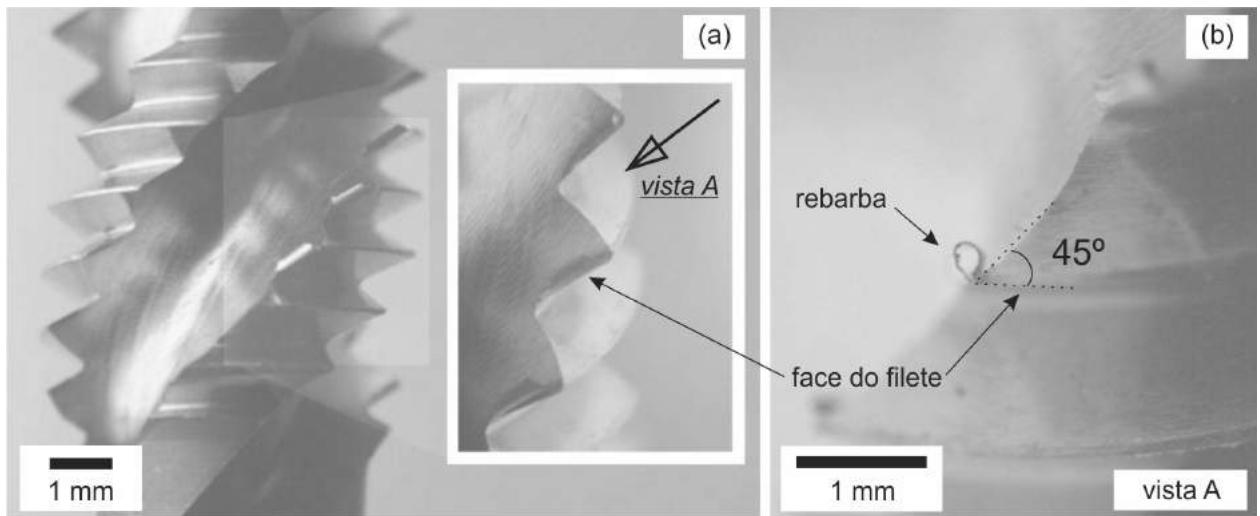


Figura 3.4: Geometria da aresta de saída no macho de corte de HSS-M3 - (a) seção entre a face e o canal (b) Vista lateral dos filetes

de diferentes ângulos que foram retificadas em uma única volta da amostra e em apenas um ensaio. Outra vantagem da amostra é permitir a análise da subsuperfície sem a necessidade de seccioná-la.

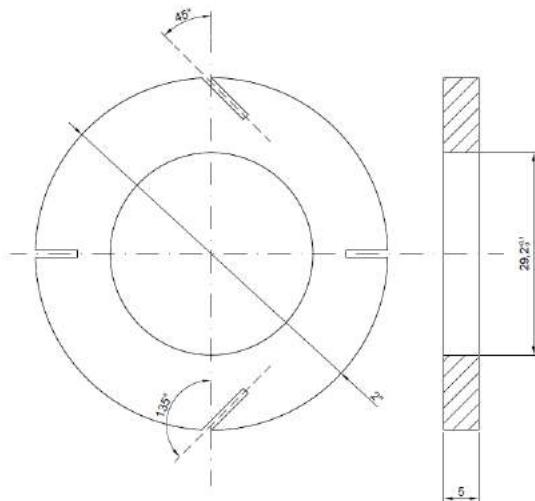


Figura 3.5: Geometria da amostra desenvolvida para os ensaios em laboratório.

3.2.2 Ensaios Preliminares e Definitivos no Laboratório

Os ensaios de usinagem em laboratório foram realizados em uma retificadora cilíndrica marca SULMECÂNICA, modelo RUAP 515 H-CNC, equipada com comando numérico CNC do fabricante Fagor mostrada na Fig.3.6(a). Durante a operação, enquanto a peça gira em um eixo acionado por um motor independente, o rebolo acoplado a outro eixo, tangencia a

peça (Fig.3.6(b)), podendo ser utilizada a aplicação de fluido refrigerante. A peça por sua vez é fixada em um mandril de suporte em um sistema entre-pontas como mostrado na Fig.3.6(c).

Na Fig.3.7 é mostrado de forma mais detalhada o sistema de fixação da amostra. A amostra é fixada em um mandril suporte por meio de uma porca. Este mandril suporte é preso entre-pontas, e é rotacionado por um motor independente do rebolo. O rebolo, por sua vez, tangencia a peça e avança na direção do eixo do suporte. Este movimento de avanço, conhecido como mergulho, é controlado pelo sistema CNC.

Foram realizados ensaios preliminares para validar a geometria da amostra e o procedimento do ensaio de retificação cilíndrica. Como citado anteriormente, o material utilizado foi o aço SAE 4340 temperado e revenido com dureza de 54HRC, disponível no laboratório. Nesta etapa foram definidos também os níveis dos parâmetros de usinagem para os ensaios definitivos. Após os ensaios preliminares, nas arestas da amostra foi observada a presença de rebarba e também de marcas de retificação em diferentes condições. Na Fig.3.8 é mostrada uma imagem da aresta da amostra após os ensaios preliminares, utilizando velocidade de corte de 32,2 m/s, velocidade da peça de 0,22 m/s, profundidade de corte de $3 \mu\text{m}$, e velocidade de mergulho de 0,5 mm/min (sem utilização de fluido de corte).

Observando os efeitos da velocidade da peça (v_w), velocidade de corte (v_s), velocidade de mergulho (v_f) e da direção de corte, em relação a espessura da marca de retificação na lateral das amostras, foi definido um planejamento fatorial 2^k , com variação de quatro

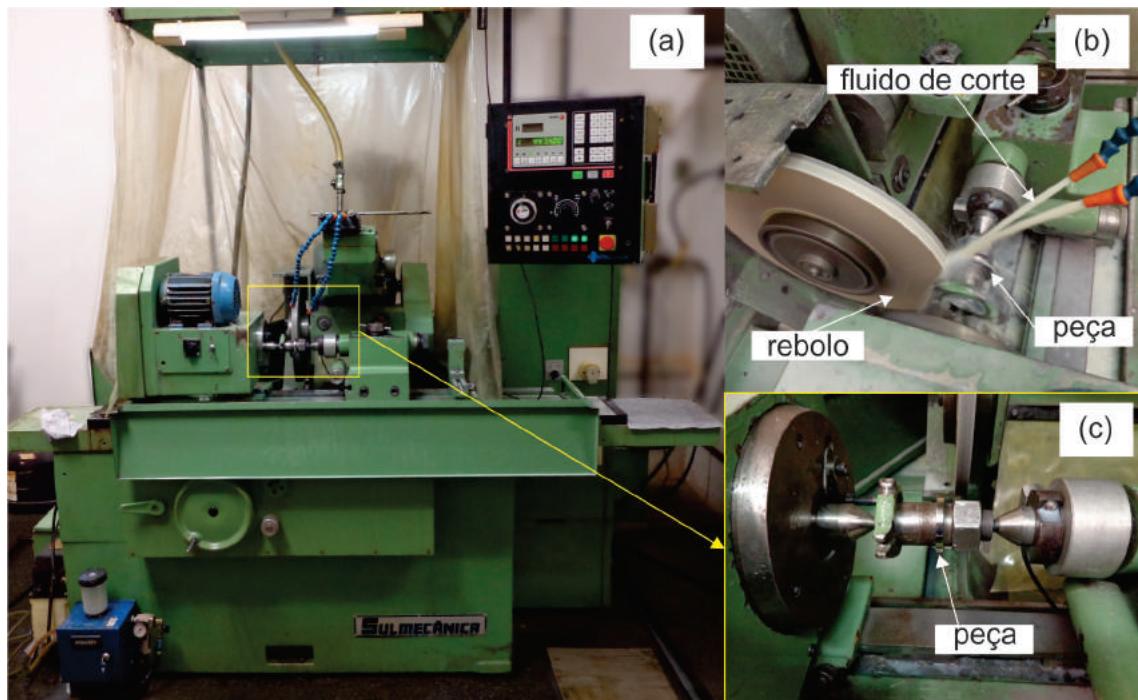


Figura 3.6: Retificadora tangencial cilíndrica utilizada nos ensaios: (a) Retificadora, (b) montagem do rebolo-peça e fluido de corte, (c) detalhe do eixo da peça fixada entre-pontas

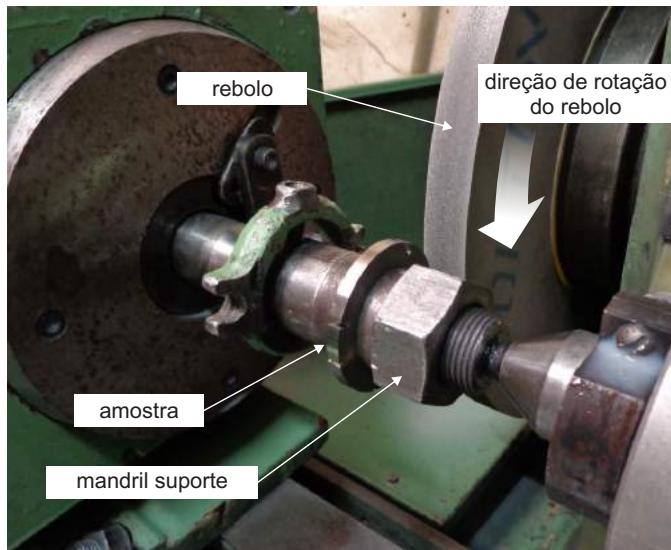


Figura 3.7: Amostra fixada durante os ensaios de retificação tangencial cilíndrica.

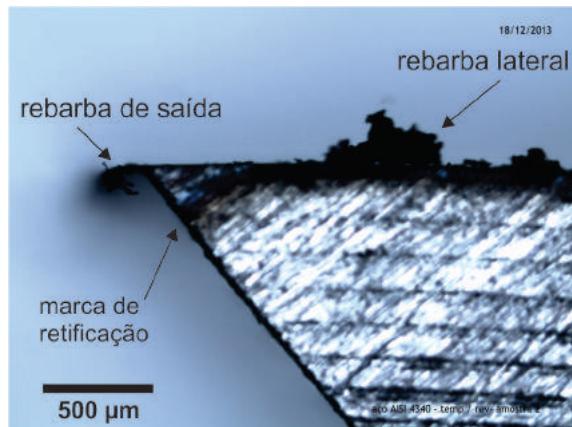


Figura 3.8: Presença de marca de retificação e rebarba após os ensaios preliminares com amostras de aço SAE4340 utilizando rebolo de óxido de alumínio de granulometria 220 mesh ($v_s = 32,2 \text{ m/s}$, $v_w = 0,22 \text{ m/s}$, $a_e = 3 \mu\text{m}$, $v_f = 0,5 \text{ m/s}$).

parâmetros. Desta forma, esta etapa determinou os níveis para cada um dos parâmetros definitivos, de forma que os efeitos pudessem ser observados dentro de uma variação significativa. Foi desenvolvido também um código de CNC para ser utilizado nos ensaios definitivos, que será melhor abordado na próxima seção.

O objetivo dos ensaios definitivos foi reproduzir condições próximas àquelas observadas durante a fabricação de machos de corte. Na Fig.3.9 são apresentados os parâmetros de entrada e de saída selecionados para os ensaios de usinagem em laboratório.

O processo de fabricação dos filetes do macho é classificado como retificação tangencial cilíndrica de passagem. O processo de retificação utilizado nos ensaios em laboratório também é tangencial cilíndrica, porém de mergulho. A diferença entre as duas é que no pri-

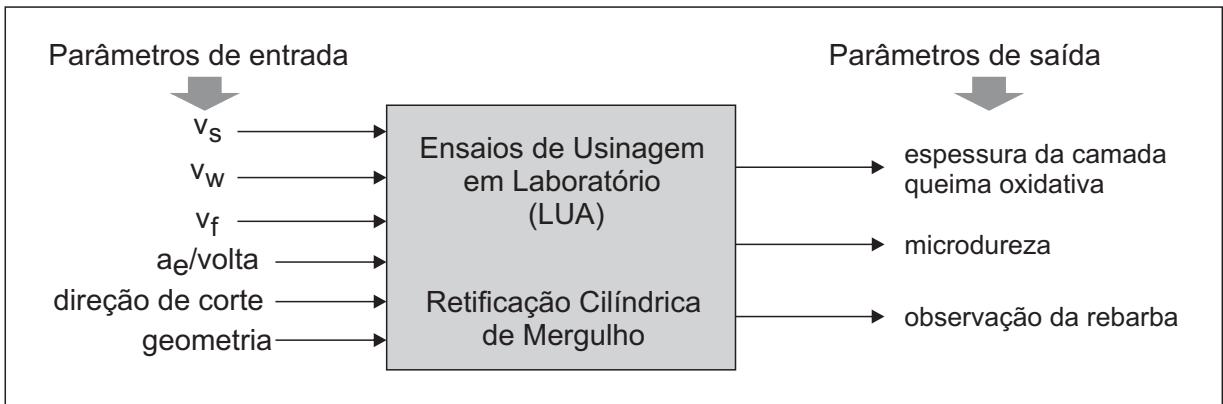


Figura 3.9: Parâmetros de entrada e de saída nos ensaios de usinagem em laboratório

meiro caso o avanço ocorre fora da peça e o rebolo passa mantendo a profundidade de corte constante (conforme Fig.2.15). No segundo caso, o rebolo penetra continuamente na peça à uma velocidade de mergulho (v_f).

É importante notar que a profundidade de corte não é a mesma para canais diametralmente opostos. Como a velocidade de mergulho (v_f) é constante, ao passar por um dos canais o rebolo está a uma profundidade de corte. Entretanto ao passar pelo que está no lado oposto, defasado de 180° , existe uma diferença que é exatamente metade do parâmetro $a_e/volta$. Na Fig.3.10 está ilustrada a diferença existente antes da primeira volta completa. Para evitar esta diferença da profundidade de corte entre os diferentes canais, a peça foi deslocada lateralmente em uma velocidade aproximadamente constante; e ao chegar próximo a lateral do rebolo ela foi deslocada rapidamente para que a saída dela em relação ao rebolo ocorresse enquanto a região de corte estivesse entre dois canais. Se a velocidade de mergulho é simplesmente interrompida, a diferença entre as profundidades de corte dos canais irá permanecer.

Na Fig.3.11 é mostrada uma representação do ensaio de usinagem desta etapa. Na Fig.3.11(a) é ilustrado que, enquanto a peça permanece fixa em seu eixo de rotação, o rebolo avança com a velocidade mergulho (v_f). Como já sabido, para alterar a direção de corte de discordante para concordante, é preciso alterar o sentido de rotação da peça. Na Fig.3.11(b) é mostrado que o rebolo avança na direção da peça, e ao mesmo tempo a peça é deslocada para esquerda, de forma que a face polida da amostra deixe primeiro o rebolo. Nesta face foram realizadas as imagens para observar as camadas afetadas pelo calor (explicado com maiores detalhes na próxima sessão).

O experimento foi planejado de tal forma que se pudesse verificar o efeito de cada um dos parâmetros de usinagem, direção de corte, velocidade da peça (v_w), velocidade de mergulho (v_f) e velocidade de corte (v_s) em um planejamento fatorial completo 2^4 . Na Tab.3.2 é apresentado o planejamento fatorial utilizado e os níveis de cada um dos parâmetros. Foram

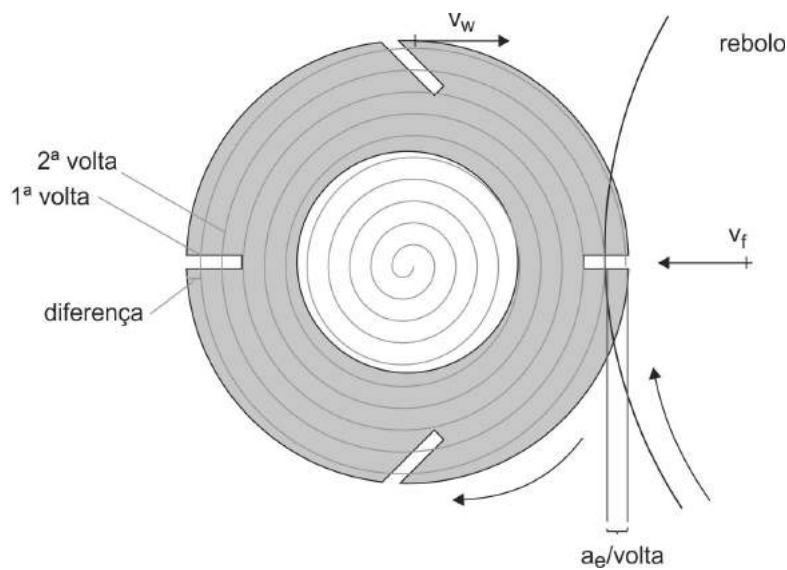


Figura 3.10: Ilustração da trajetória espiral do avanço do rebolo em relação ao eixo da amostra.

realizados ensaios em 16 condições de laboratório (CL), em duas réplicas (A e B), totalizando 32 ensaios. O parâmetro $a_e/volta$ não é apresentado no planejamento fatorial porque os parâmetros devem ser independentes, e no caso, $a_e/volta$ depende da velocidade da peça (v_w) e da velocidade de mergulho (v_f), conforme mostrado na Eq.2.5, assim será analisado separadamente.

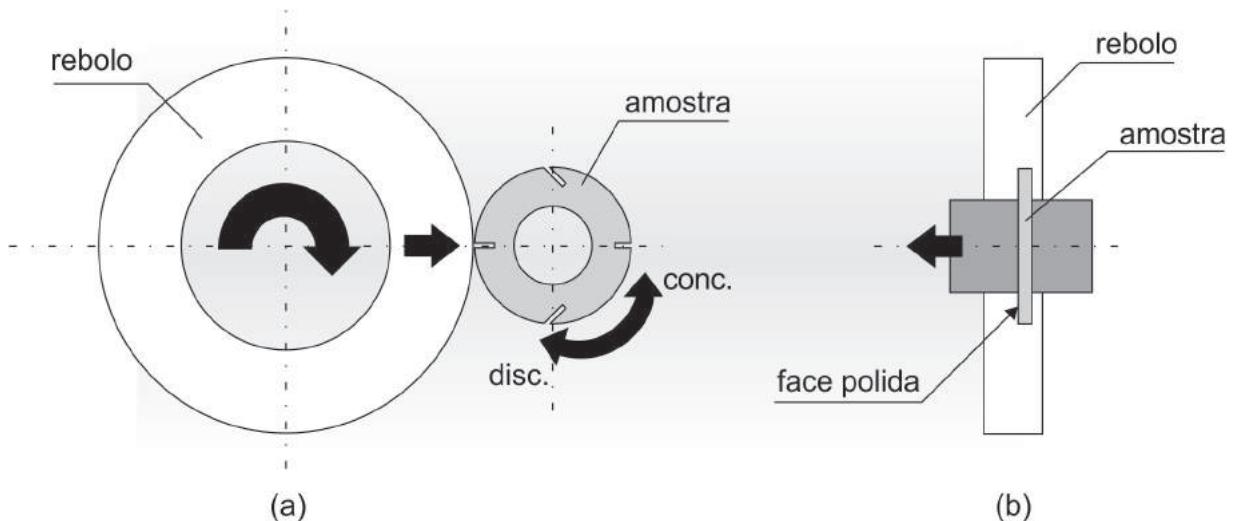


Figura 3.11: Ilustração da trajetória da peça em relação ao rebolo durante o ensaio, em (a) a peça altera o sentido de corte entre discordante e concordante, em (b) a peça é deslocada lateralmente para evitar que haja diferença de profundidade de corte entre os canais.

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados para retificação das amostras cilíndricas de Aço-Rápido em laboratório.

Condição Laboratório (CL)	Níveis			
	Direção de corte		(-)	(+)
	discordante	concordante		
	Velocidade da peça (m/s)	0,22	0,45	
	Velocidade de mergulho (mm/min)	0,5	1,0	
	Velocidade de corte (m/s)	21,4	32,2	
Parâmetros				
Condição Laboratório (CL)	Direção de corte	Velocidade da peça (v_w)	Velocidade de mergulho (v_f)	Velocidade de corte (v_s)
	-	+	-	-
1	-	+	-	-
2	+	+	-	-
3	-	-	-	-
4	+	-	-	-
5	-	+	+	-
6	+	+	+	-
7	-	-	+	-
8	+	-	+	-
9	-	+	-	+
10	+	+	-	+
11	-	-	-	+
12	+	-	-	+
13	-	+	+	+
14	+	+	+	+
15	-	-	+	+
16	+	-	+	+

Para realização dos ensaios definitivos, a empresa forneceu amostras do mesmo material dos machos de corte, Aço-Rápido classe M-3, e com o mesmo tratamento térmico, têmpera e revenimento de um macho de corte convencional. Antes do início de cada ensaio, o rebolo tangenciou a amostra, com uma velocidade de mergulho muito baixa (0,05 mm/min) e na presença de fluido de corte. Após o tangenciamento, foi aguardado um período de faíscamento (*spark-out*) de 6 segundos e então o rebolo foi referenciado. Na sequência foram ajustados os parâmetros da máquina-ferramenta e cessado a aplicação de fluido de corte. Antes de cada ensaio o rebolo foi dressado com um dressador do tipo fliese, da fabricante Master Diamond. Foram realizados dois passes de $40 \mu\text{m}$ à uma velocidade de passagem de aproximadamente 16 mm/min. Nestes ensaios foi utilizado um rebolo de Óxido de Alumínio com granulometria 220 mesh, com especificação 38A220-KVS do fabricante Norton, com dimensões: 350 mm de diâmetro externo, 127 mm de diâmetro interno e 25 mm de largura.

Para comparação do parâmetro $a_e/volta$, as condições de usinagem foram organi-

zadas em um quadro de arranjo experimental mostrado na Fig.3.12. As condições de usinagem são identificadas com número de 1 a 16, e estão dispostas entre quatro subgrupos desta forma para facilitar a comparação entre as variáveis de cada condição. A linha vertical (Lv) representa a mudança de nível na velocidade de corte. À esquerda desta linha estão as condições de usinagem com menor velocidade de corte (v_s), enquanto à direita as condições de maiores velocidades. A linha horizontal (Lh) divide as condições de usinagem em relação ao sentido de corte em que, acima estão as de sentido concordante (números pares), e abaixo, aquelas com sentido discordante (números ímpares). As linhas tracejadas (Lv e Lh) também dividem as condições em quatro sub-grupos, como por exemplo, o grupo de condições 01, 03, 05 e 07 (1º sub-grupo). Em cada sub-grupo a mudança da linha superior para inferior indica queda da velocidade da peça, enquanto a mudança de coluna, da esquerda para direita indica aumento na velocidade de mergulho do rebolo. Por exemplo, a condição 07 (no 1º sub-grupo) representa uma condição de velocidade da peça (v_w) de 0,22 m/s, velocidade de mergulho (v_f) 1,0 mm/s, velocidade de corte (v_s) de 21,4 m/s e direção de corte discordante (Fig.3.12).

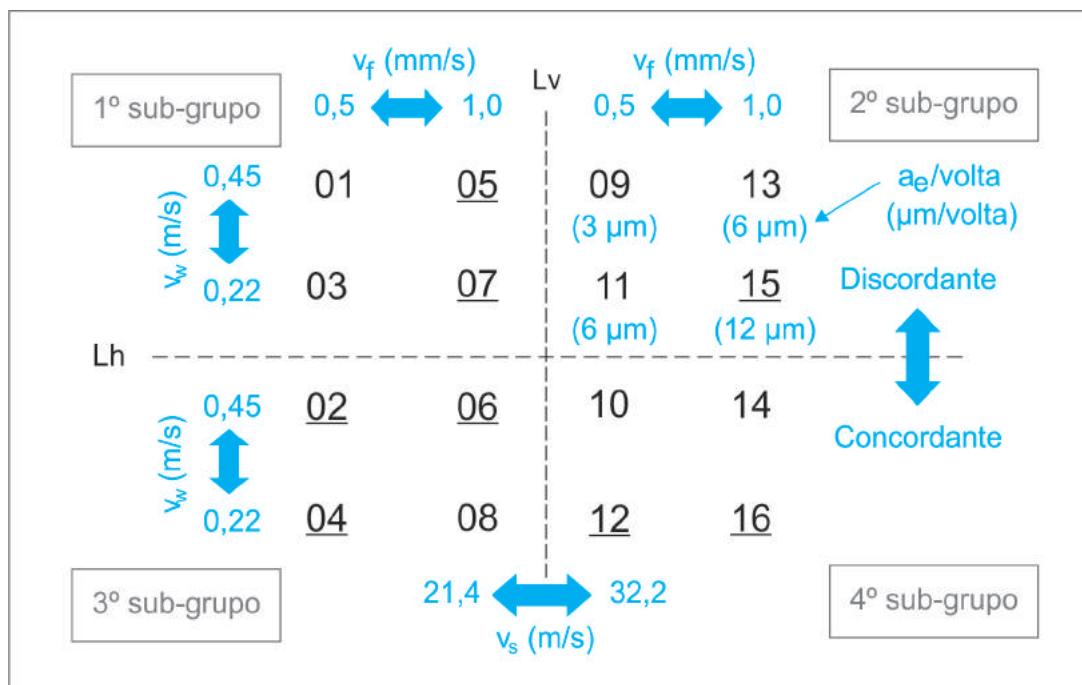


Figura 3.12: Quadro do arranjo para os ensaios de usinagem em laboratório.

No quadro da Fig.3.12 também é indicado o parâmetro $a_e/volta$ cujo valor é representado abaixo das condições 09, 13, 11 e 15 (2º sub-grupo). Este parâmetro representa a profundidade de corte por volta da amostra. Ele depende da velocidade de mergulho e da velocidade da peça (Eq.2.5). Ao aumentar a velocidade de mergulho aumenta-se também a profundidade de corte por volta, como por exemplo, da condição 09 para a 13. De forma análoga, ao reduzir v_w , para a mesma v_f , também se aumenta a profundidade de corte por volta, como por exemplo, da condição 13 para 15. As condições 13 e 11 possuem o mesmo

$a_e/volta$ porque da condição 11 para a condição 13 dobrase a velocidade de mergulho, mas a velocidade da peça também é dobrada. O mesmo se repete para os outros quatro sub-grupos, as condições que estão na mesma posição dentro do sub-grupo apresentam o mesmo $a_e/volta$. Por exemplo, para a condição 01 o parâmetro $a_e/volta$ possui o mesmo valor da condição 09 ($3 \mu m$), a condição 04 o mesmo da condição 11 ($6 \mu m$). Este arranjo experimental permitiu analisar isoladamente a influência tanto da velocidade de mergulho quanto da profundidade de corte.

3.2.3 Procedimento para Verificação de Alteração na Estrutura Subsuperficial

Anteriormente à realização dos ensaios de usinagem em laboratório, as amostras foram polidas com lixas de carboneto de silício na sequência granulometria 220 mesh e 320 mesh. Assim, a camada escura formada durante o tratamento térmico foi removida, permitindo portanto a visualização da marca de retificação na lateral da amostra. Na Fig.3.13 é mostrada uma amostra antes dos ensaios de retificação.

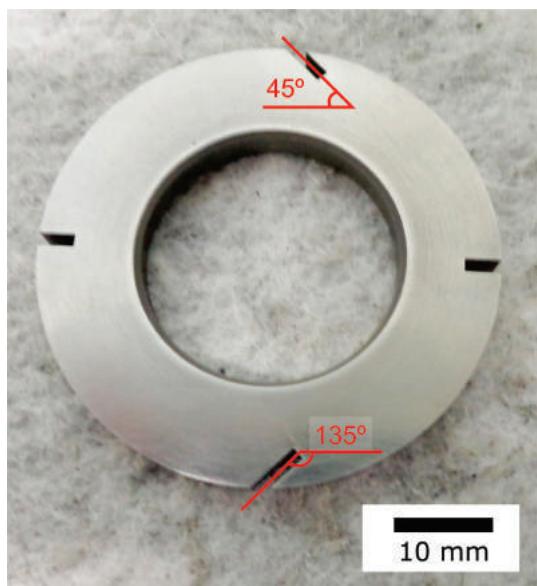


Figura 3.13: Amostra de Aço-Rápido M-3 utilizada nos ensaios após a preparação através de lixamento com lixas de granulometria 220 mesh e 320 mesh.

Após a realização dos ensaios de usinagem em laboratório, as amostras foram analisadas para observar a ocorrência ou não do fenômeno da queima e formação de rebarba. Para cada uma das amostras foram realizadas imagens no estereomicroscópio em 10 regiões diferentes como mostrado na Fig.3.14. As regiões REG03 e REG08 foram utilizadas para medir a espessura da camada afetada pela retificação e também a microdureza. As demais regiões representam as arestas de entrada e saída do rebolo e foram analisadas para verificar a formação da rebarba.

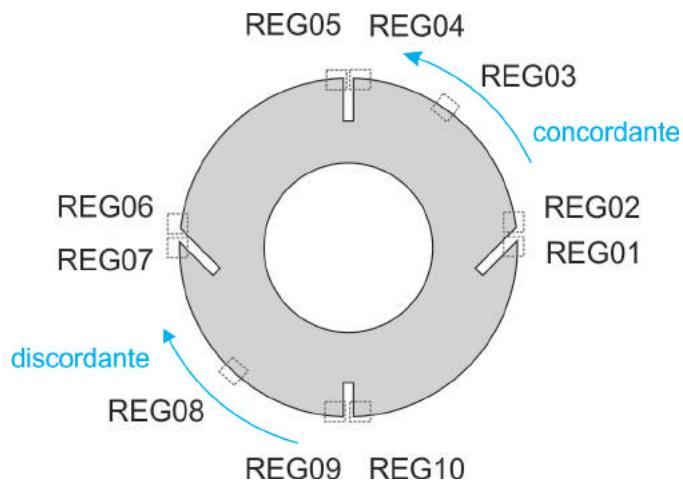


Figura 3.14: Regiões selecionadas para análise no estereomicroscópio após os ensaios de retificação em laboratório.

As imagens foram obtidas através de um estereomicroscópio *SZ6145TR - OLYMPUS*, utilizando o software de captura de imagens *Imagen Pro-Express*. As imagens foram catalogadas e comparadas de acordo com os parâmetros de corte empregados. Para a realização da medição da espessura da camada afetada abaixo da superfície, observadas nas imagens das regiões REG03 e REG08 (Fig.3.15(a)), utilizou-se um software CAD (*DraftSight - 3DS*). Na Fig.3.15(b) é mostrada a medição desta camada. Durante a utilização do software foi traçado um arco para delimitar a superfície retificada, um primeiro arco delimitando a região de queima mais escura e um segundo delimitando a região onde não havia mais sinal de oxidação. Traçados os arcos, foram projetadas linhas perpendiculares a eles e então realizada a medição utilizando a escala da imagem.

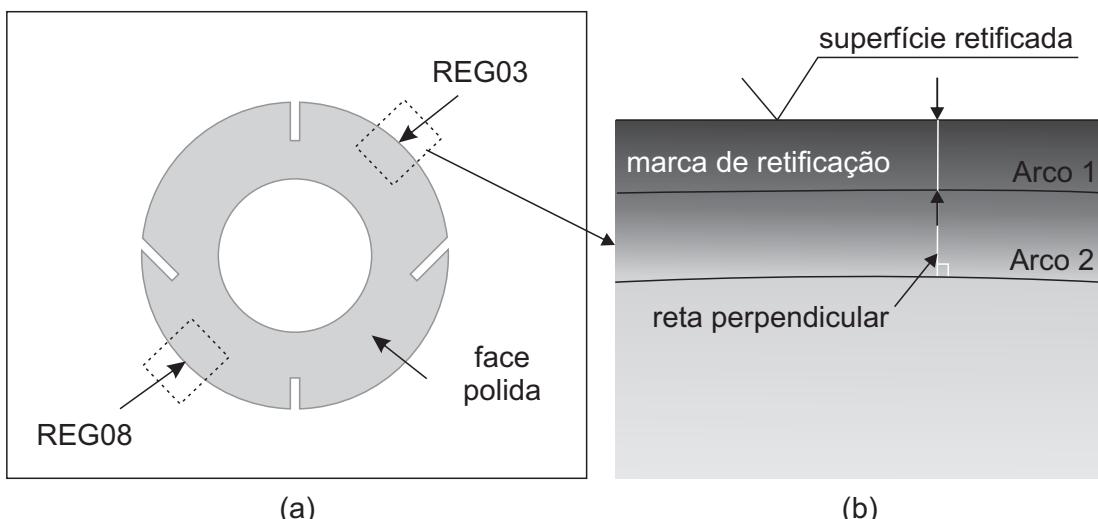


Figura 3.15: Esquema de medição da espessura da marca de retificação, em (a) posição das regiões analisadas na amostra, (b) detalhe da medição utilizando software CAD.

Os valores da camada mais escura foram utilizados para representar a dimensão da camada afetada pela retificação. A análise com abordagem estatística foi realizada em linguagem "R" com auxílio do software interpretador *RStudio*. Foi utilizado o pacote *DanielPlot* para análise de variância.

3.2.4 Procedimento para Verificação da Microdureza

A presença da marca de retificação na peça não significa necessariamente que houve queima. Para comprovar uma alteração microestrutural foram realizadas medições de microdureza na mesma região que foram medidas a espessura da camada de marca de retificação. As condições analisadas estão sublinhadas na Fig. 3.12 (CL02, CL04, CL05, CL07, CL12, CL15, CL16). O equipamento utilizado para a medição é um microdurômetro da marca *SHIMADZU* - série *HMV-2* pertencente ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Universidade Federal de Uberlândia. Foi utilizado um penetrador Vickers com carga de 0,98 Kgf, com tempo de indentação de 15 s. Em seguida, efetuou-se a análise para identificar se a marca de retificação realmente era uma alteração microestrutural.

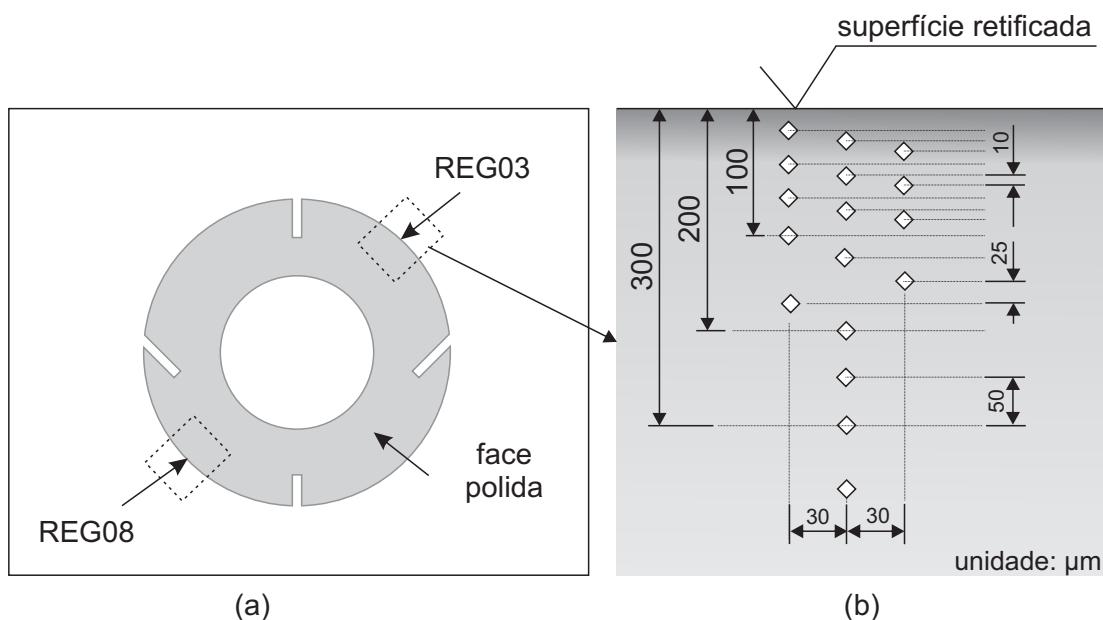


Figura 3.16: Regiões selecionadas nas amostras para medição da microdureza nas amostras após os ensaios de retificação em laboratório.

A medição da microdureza foi realizada na face lateral, perpendicular à superfície retificada conforme indicado na Fig. 3.16(a). A distância mínima entre indentações consecutivas é de duas vezes e meia o tamanho da maior diagonal, conforme recomendado. Para isso, a primeira penetração foi feita o mais próximo possível da aresta entre a superfície lateral (Fig.3.16(b)) e a superfície superior, onde ocorreu a usinagem. A segunda ocorreu 10 μm abaixo da primeira, porém 30 μm à esquerda, e a terceira 10 μm abaixo da segunda e com

$30\mu m$ à esquerda. Como a quarta medição já situava-se a $30\mu m$ da primeira, ela foi realizada na mesma coluna da primeira, para evitar grande dispersão da região de medição. A distância entre as medições pode ser mostrada na Fig.3.16. Assim, foram feitas medições de microdureza com intervalos $10\mu m$ até atingir a distância final de $100\mu m$ da aresta. De $100\mu m$ até $200\mu m$ a medição ocorreu em intervalos de $25\mu m$. Para valores acima de $200\mu m$ o intervalo foi de $50\mu m$.

3.2.5 Procedimento para Análise das Rebarbas

As rebarbas foram observadas e analisadas em todas as regiões indicadas na Fig.3.16, exceto para as regiões REG03 e REG08. Para cada condição de usinagem foram analisadas oito (8) arestas, sendo que as regiões REG04 e REG09 são equivalentes, o mesmo ocorre para as regiões REG05 e REG10, conforme mostrado na Tab. 3.3. Se a direção de corte for concordante, a aresta na região REG01 é de saída enquanto que a região REG02, é uma região de entrada do rebolo. Quando a direção de corte é discordante, ocorre o contrário. Assim, um total de seis (6) diferentes arestas por condição de corte foram investigadas.

As rebarbas mais representativas foram analisadas via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O microscópio utilizado é do fabricante *HITACHI*, modelo *TM-3000*, pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Tabela 3.3: Descrição das regiões de análise das amostras.

Região	Direção de corte	
	Condordante	Discordante
REG01	Saída 45°	Entrada 45°
REG02	Entrada 135°	Saída 45°
REG03	Superfície retificada	Superfície retificada
REG04	Saída 90°	Entrada 90°
REG05	Entrada 90°	Saída 90°
REG06	Saída 135°	Entrada 135°
REG07	Entrada 45°	Saída 45°
REG08	Superfície Retificada	Superfície Retificada
REG09	Saída 90°	Entrada 90°
REG10	Entrada 90°	Saída 90°

3.3 Terceira Etapa - Ensaios de Usinagem na Empresa

Nesta etapa foram realizados os ensaios de usinagem na empresa OSG - Sulamericana através de duas sub-etapas: Ensaios Preliminares na Empresa (Etapa 3.1 em Fig. 3.1) e Ensaios Definitivos na Empresa (Etapa 3.2 em Fig. 3.1). Na primeira sub-etapa foi realizado o acompanhamento da produção e coletadas amostras de machos de corte, como também definidos os níveis a serem utilizados nos ensaios definitivos. Na segunda sub-etapa, Ensaios Definitivos na Empresa, foram realizados um ensaios com planejamento fatorial completo 2^3 . Em seguida foram realizadas a medição da marca de retificação, da microdureza e a análise das rebarbas formadas.

3.3.1 Ensaios Preliminares e Definitivos na Empresa

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios preliminares é a mesma utilizada para produção de machos (Fig.3.17). A máquina-ferramenta é exclusividade da OSG Corporation (Grupo OSG).

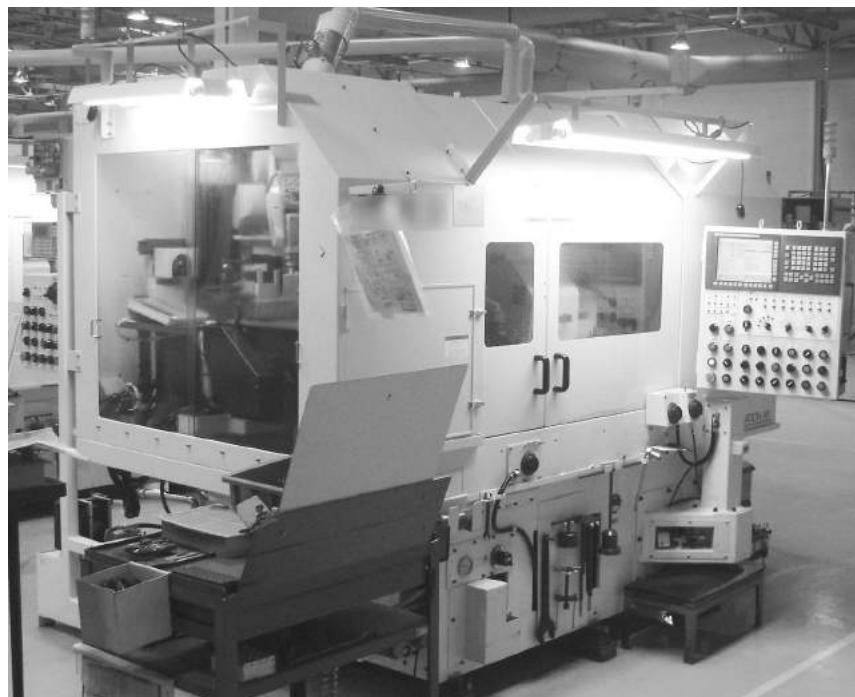


Figura 3.17: Retificadora CNC utilizada nos ensaios na empresa.

Inicialmente foi realizado um acompanhamento da produção que permitiu observar o grau de influência dos parâmetros de corte na visualização e espessura da marca de retificação e rebarba. Esta etapa foi definida como Ensaios Preliminares. Segundo as observações, durante a produção dos filetes, enquanto o rebolo avança na direção da peça, esta gira ao mesmo tempo em que se desloca no eixo longitudinal (conforme mostrado na Fig.2.15). Estes

dois movimentos devem ser sincronizados para que o passo de rosca do macho seja formado corretamente. O fluido de corte (óleo mineral integral) é aplicado por dois bocais, um superior e outro inferior. O comando numérico é ajustado com os parâmetros utilizados nos diferentes passes. Em geral, são realizados três passes em condições de desbaste e dois em condições de acabamento. A velocidade de corte é mais baixa no desbaste (cerca de 50 m/s) e mais alta no acabamento (cerca de 60 m/s). A velocidade da peça, por sua vez, é mais alta nos passes de desbaste (aprox. 500 rpm) e mais baixa no acabamento (aprox. 400 rpm). A profundidade de corte total ao final é a somatória das profundidades de corte de cada um dos passes do rebolo. Assim, para produção de machos, utiliza-se penetração de trabalho maiores em passes de desbaste ($50 \mu\text{m}$), e menores para os passes de acabamento ($20 \mu\text{m}$). O rebolo é dressado antes de cada passe através de um dressador rotativo de com abrasivo de diamante (*rotary dress*).

A partir destas observações, realizou-se um planejamento fatorial 2^3 para realização dos Ensaios Definitivos. O nível mais baixo foi definido a partir de uma peça que não apresentasse queima de retífica visível. O nível mais alto foi definido com as condições que resultassem na queima severa. Cada um dos níveis, baixo e alto, apresenta um par de parâmetros, que são as condições de desbaste e as condições de acabamento respectivamente.

A etapa de Ensaios Definitivos na Empresa objetivou quantificar e avaliar o efeito médio de cada um dos parâmetros mais influentes na espessura da camada afetada. Foi avaliada também a microdureza próxima a superfície retificada e também a formação de rebarba nas arestas. Na Fig.3.18 são mostrados os parâmetros de entrada: velocidade do rebolo (v_s), velocidade da peça (v_w) e a penetração de trabalho (a_e), e também os parâmetros de saída: espessura da camada afetada, a microdureza próximo a superfície e a observação das rebarbas formadas.

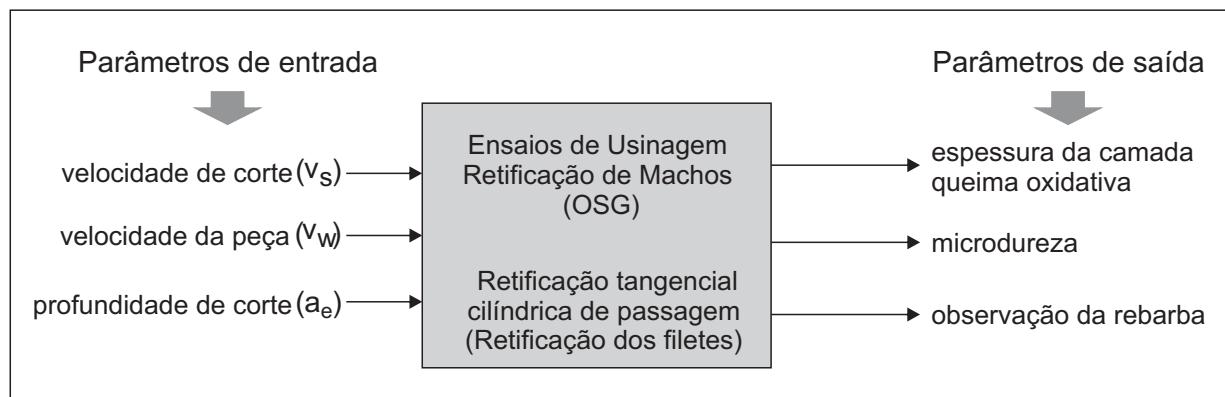


Figura 3.18: Parâmetros de entrada e de saída no esnsaios de usinagem na empresa.

Para estes ensaios foi utilizado um rebolo de óxido de alumínio com granulometria 320 mesh, de especificação CS33A320HH4VB1, do fabricante *Tyrolit*. Foi utilizado óleo integral mineral como fluido de corte. Mas não foi o foco deste trabalho avaliar a influência do fluido de corte.

As amostras utilizadas são de aço rápido M3 pertencentes a um mesmo lote de fabricação (especificação do material na Tab.3.1). Na Fig 3.19 é mostrada uma amostra de macho de corte utilizadas nos ensaios. Na Fig. 3.20 são mostradas as dimensões e detalhes da geometria dos machos utilizados nos ensaios.



Figura 3.19: Amostra de macho de corte utilizada nos ensaios, fabricada em Aço-Rápido, classe M3.

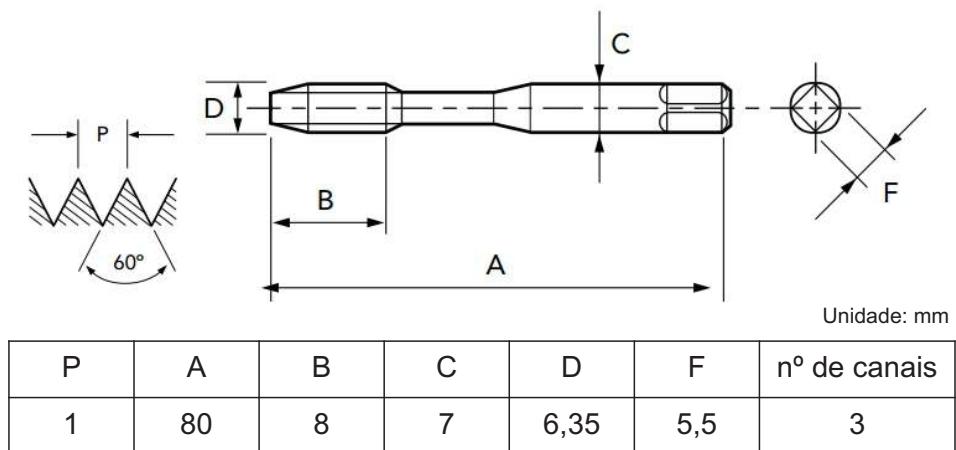


Figura 3.20: Dimensões das amostras utilizadas nos ensaios (OSG, 2012).

O planejamento experimental adotado é do tipo fatorial completo 2^3 , e foram realizadas duas réplicas (A e B), em 8 diferentes condições, denominadas de Condição Empresa (CE) neste trabalho, totalizando 16 ensaios. Na Tab.3.4 são mostrados os níveis mais baixo (-) e mais alto (+) para as variáveis v_s , v_w e a_e .

Durante o processo de retificação, o sistema CNC é programado para executar duas condições de usinagem na sequência, uma de desbaste e outra de acabamento. A retificação

Tabela 3.4: Parâmetros Utilizados no Ensaio de Usinagem na Empresa

Níveis		(-)	(+)
Velocidade do rebolo (m/s)		45(d)/50(a)	75(d)/80(a)
Velocidade de trabalho (rpm)		300(d)/200(a)	700(d)/650(a)
Penetração de trabalho (μm)		0,07(d)/0,02(a)	0,05(d)/0,03(a)
Condição Empresarial (CE)		Parâmetros	
		Velocidade do rebolo (v_s)	Velocidade de trabalho (v_w)
			Penetração de trabalho (a_e)
1	-		+
2	+		+
3	-		-
4	+		-
5	-		+
6	+		+
7	-		+
8	+		+

é realizada em vários passes, e de acordo com o sobremetal total que a operação deve remover são definidos os números de passes necessários para se completar o ciclo de retificação. Desta forma a máquina é programada para executar automaticamente os primeiros passes em operação de desbaste, e em seguida para operação de acabamento. Desta forma, para realizar estas operações, devem ser definidos previamente os valores para dos parâmetros de corte em desbaste e de acabamento. Na Tab.3.4, para cada um dos níveis é indicado um par de valores, sendo um dos valores a condição de desbaste (d) e outro a condição de acabamento (a). Assim para o nível mais baixo (-) foram definidas condições mais brandas em desbaste e em acabamento, quando comparadas com o nível mais alto (+). Para o parâmetro profundidade de corte (a_e), considerou-se o valor nos passes de acabamento, uma vez que representa o valor no último passe.

Para facilitar a comparação entre os parâmetros utilizados nos ensaios na empresa, é apresentado na Fig. 3.21 um quadro comparativo entre as condições. As condições estão dispostas na seguinte forma: à esquerda da linha vertical (Ly) estão as condições com menores velocidades de corte, enquanto que na direita desta, estão as condições de maior velocidade de corte. Na linha superior (Ls) estão as condições com maiores velocidades da peça. Na linha inferior (Li) estão aquelas com menores velocidades da peça. Dentro do grupo da esquerda, a mudança de coluna representa mudança no nível de profundidade de corte. O mesmo se repete para o grupo da direita.

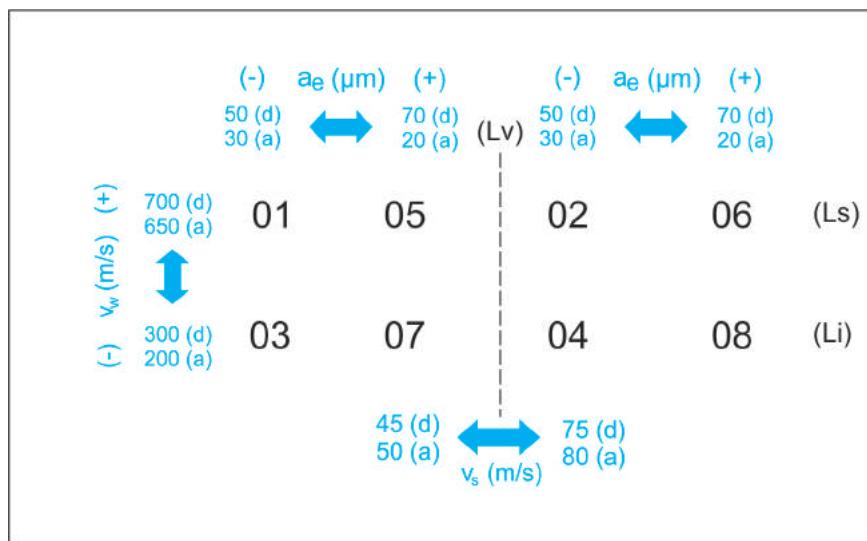


Figura 3.21: Quadro do arranjo das condições de usinagem utilizadas nos ensaios de usinagem na empresa.

3.3.2 Procedimento para Análise da Queima e Rebarba

Após a realização dos ensaios, as amostras foram armazenadas em óleo e levadas para observação em um estereomicroscópio e então adquiridas as imagens dos filetes dos machos. Este microscópio pertence ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. Na Fig.3.3 é mostrado, em destaque, a posição de observação dos filetes, a amostra foi posicionada para observação a partir da vista A-A indicada nesta figura.

Inicialmente foram observadas as rebarbas. Em seguida com auxílio de uma pinça removeu-se a rebarba e realizou-se a medição da camada da marca de retificação. Assim como nos ensaios em laboratório, foram encontrados dois níveis de marca de retificação, um mais escuro e outro acobreado. Foi considerada a espessura da camada mais escura observada para comparação entre as camadas consideradas como afetadas pela retificação, ou aqui chamadas de camada queimada.

Após a medição da marca de retificação em CAD, os resultados foram comparados para cada um dos níveis dos parâmetros de corte. Os resultados encontrados foram comparados com aqueles obtidos nos ensaios realizados em laboratório.

3.3.3 Procedimento para Verificação da Microdureza

Para confirmar a alteração microestrutural da queima foi seccionado um filete, conforme mostrado na Fig.3.22(a). Este procedimento contou com auxílio de uma microretífica contendo um disco de corte de carboneto de silício que é empregado na fabricação de próteses odontológicas do Laboratório de Próteses da Faculdade de Odontologia da UFU.

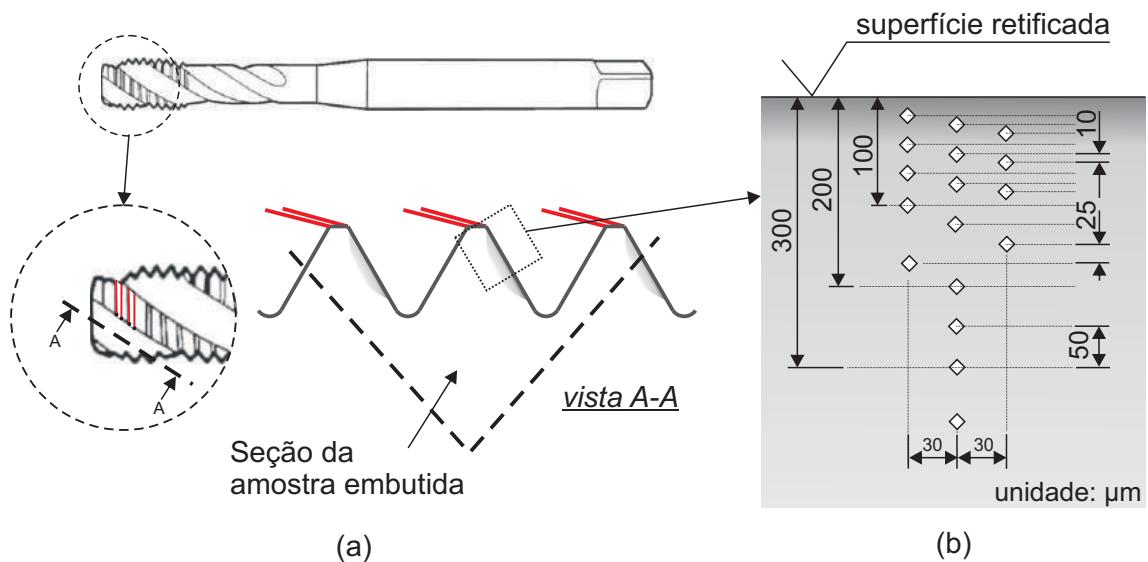


Figura 3.22: Esquema para preparação da amostra para medição de microdureza, em (a) região seccionada para remover um filete, em (b) ampliação da região de medição de microdureza indicando a distância entre as indentações.

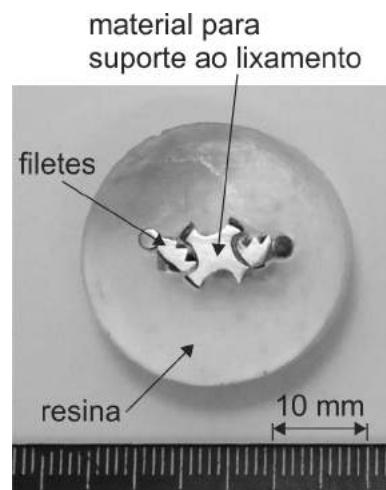


Figura 3.23: Filete do macho de corte embutido em resina acrílica para medição de microdureza.

O filete removido do macho foi embutido em resina acrílica juntamente com a parte do próprio macho de corte para evitar abaulamento próximo às bordas (Fig. 3.23). Após o embutimento, a amostra foi lixada com lixa de carboneto de silício granulometria 80, 120, 320, 400 mesh e em seguida com lixas de diamante aglomerado com granulometrias 600 e 1200 mesh, modelo *Aka-Piatto*, do fabricante *Akasel*, devido a elevada dureza das amostras de HSS-M3 (65 HRc).

O procedimento para medição de microdureza foi semelhante adotado para as amostras dos Ensaios em Laboratório, conforme mostrado na Fig. 3.22(b).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados de medições da espessura de camada da peça afetada e de microdureza, como também das rebarbas formadas durante o processo de retificação do Aço-Rápido M3, tanto para os ensaios de usinagem sob condições de corte realizadas em laboratório (Segunda Etapa), quanto para os ensaios de usinagem realizados na linha de produção da empresa fabricante de machos de corte, Ensaio na Empresa (Terceira Etapa), sob as mesmas condições reais de fabricação dos machos de corte. Imagens das superfícies usinadas também são apresentadas e discutidas na sequência. Ressalta-se que a primeira etapa consistiu na identificação do problema, conforme já descrito na sessão 3.1. Os resultados nesta sessão são apresentados conforme a sequência apresentada no fluxograma da Fig. 4.1 e de acordo com o procedimento descrito no fluxograma da Fig. 3.1.

4.2 Resultados dos Ensaios de Usinagem em Laboratório

Conforme apresentado na Fig. 4.1, esta seção está subdividida em duas frentes de análise. Na primeira serão apresentados os resultados utilizados para análise da queima e em seguida, na segunda, os resultados para análise das rebarba.

Por meio dos ensaios realizados em Laboratório e apresentadas na Tab. 3.2 foram investigadas 16 condições de corte mais replica, que totalizam 32 amostras. Os ensaios seguiram um arranjo fatorial completo 2^3 , como descrito no capítulo III (Metodologia). Para cada uma das amostras foram obtidas imagens em dez regiões identificadas por REG01 à REG10. Detalhes destas são descritos na Tab. 3.3 e representam entradas ou saídas do rebolo nas arestas, de acordo com o movimento de corte.

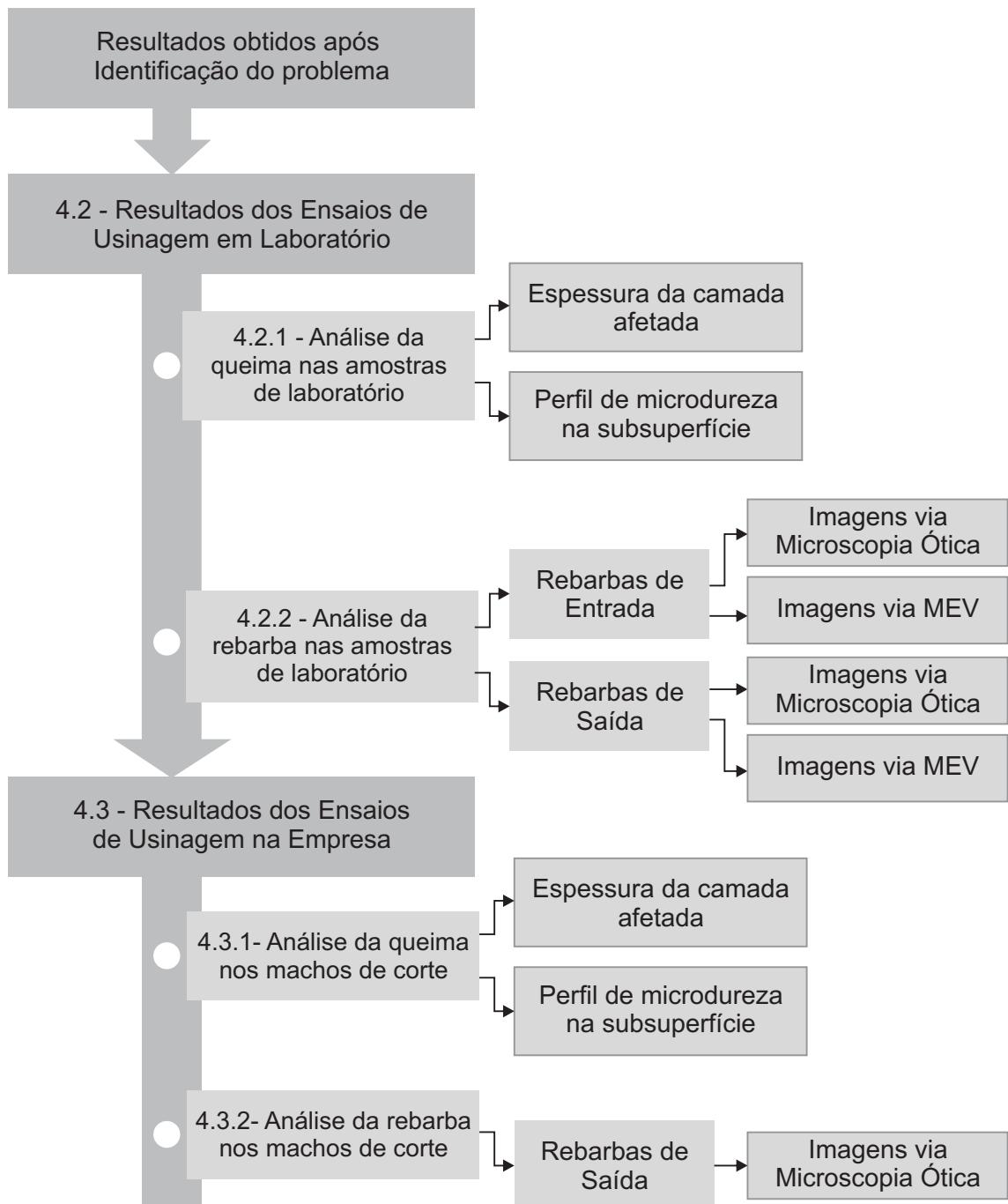


Figura 4.1: Fluxograma para apresentação dos resultados obtidos.

Na Fig. 4.2 são apresentadas imagens obtidas para cada uma das regiões após os ensaios de retificação utilizando a condição de laboratório CL07. Na Fig. 4.2 devido ao sentido de passagem do rebolo em relação a peça, na região REG01 ilustrada a aresta de saída com 45°, enquanto que na região REG02 é identificada uma aresta de entrada à 135°. Além das imagens obtidas para cada região, foi também medida a espessura da camada alterada e para análise da queima via software CAD que será apresentada na sessão a seguir.

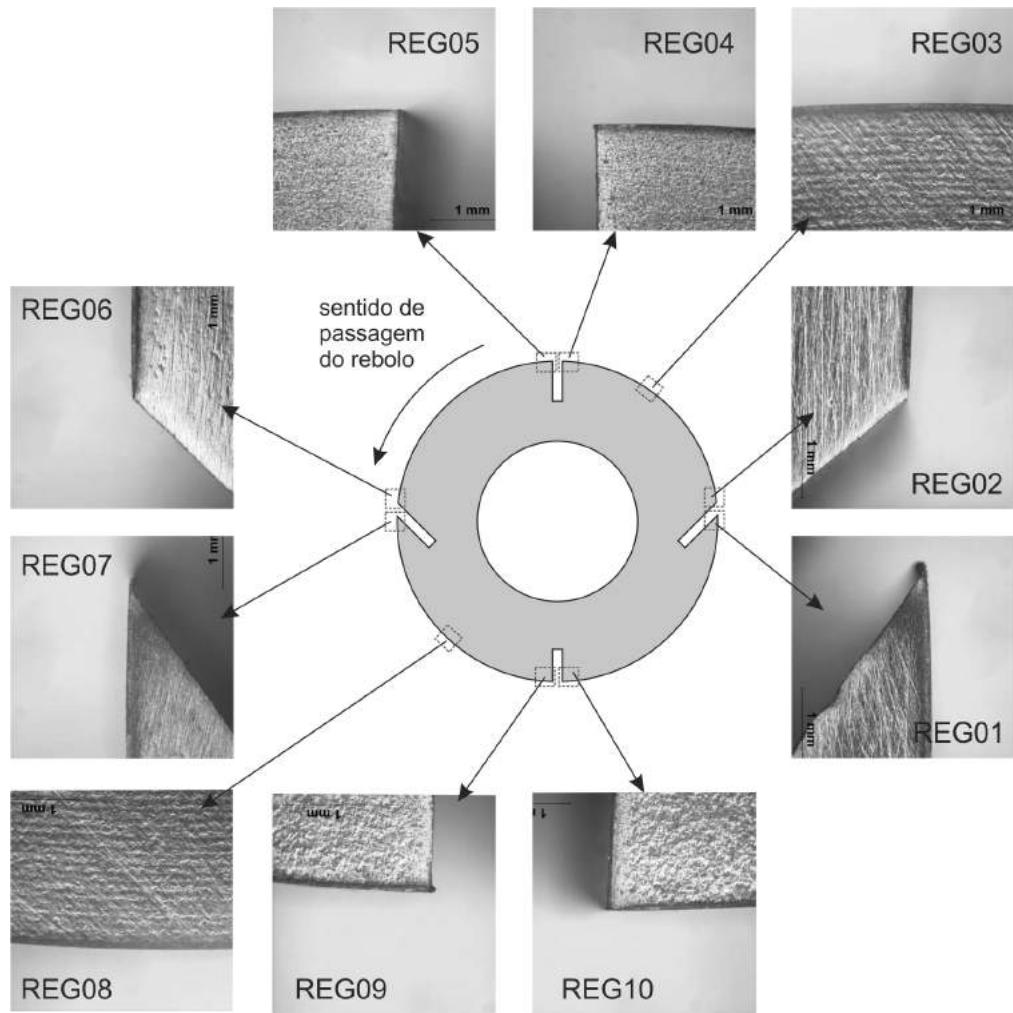


Figura 4.2: Imagens das várias regiões da amostra para análise da camada abaixo da superfície retificada de Aço-Rápido M3 na condição CL07: velocidade de corte (v_s) 21,4 m/s, velocidade de trabalho (v_w) 0,22 m/s, velocidade de avanço (v_f) 1,0 mm/s, profundidade de corte por volta ($a_e/volta$) 12 $\mu\text{m}/volta$ e direção de corte discordante.

4.2.1 Análise da Queima nas Amostras de Laboratório

As imagens da sub-superfície após retificação permitiram realizar a análise da queima nas amostras usinadas nas condições em laboratório. Os resultados obtidos serão apresentados a seguir.

4.2.1.1 Espessura da camada afetada nas amostras de laboratório

A partir das imagens obtidas via MEV da face perpendicular à superfície retificada das amostras foi possível realizar a medição da espessura da marca mais escura com auxílio de um software CAD. Foram traçados arcos para delimitar a fronteira da região com marca visível da região sem marcas. Em seguida foi traçada uma linha perpendicular aos arcos. A distância de um arco ao outro é a espessura da camada.

Na Fig. 4.3 é mostrado o procedimento detalhado e sequência de medição da espessura da camada em uma amostra após a retificação para a condição de usinagem CL07. Todas as demais amostras (Figs.4.2 a) a p)) passaram pelo mesmo procedimento após a usinagem incluindo os ensaios principais (A) e réplica (B) na região mais representativa REG03 ou na REG08 (Fig. 4.2). Os valores das espessuras das marcas de retificação estão apresentadas na Tab.4.1.

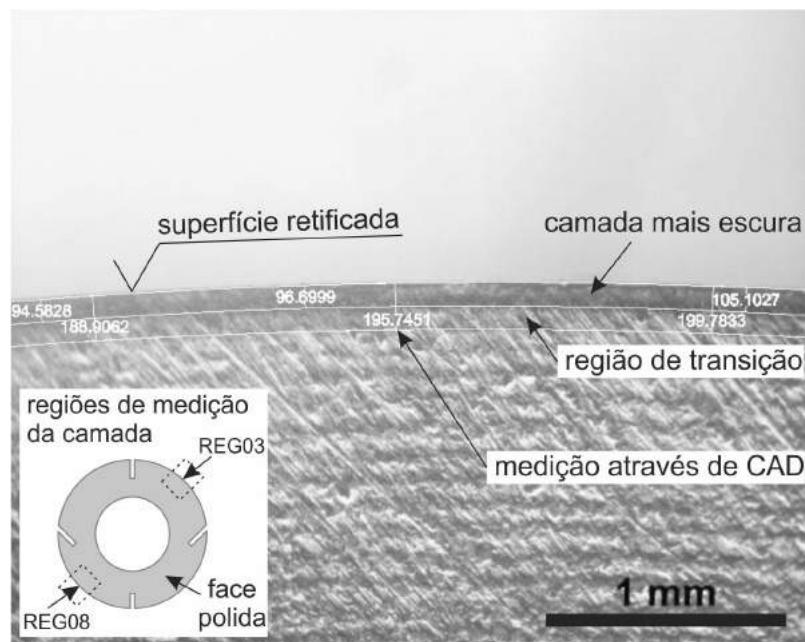


Figura 4.3: Detalhes da medição da camada de marca de retificação na face lateral da amostra retificada sob a condição CL07: velocidade de corte (v_s) 21,4 m/s, velocidade de trabalho (v_w) 0,22 m/s, velocidade de avanço (v_f) 1,0 mm/s, profundidade de corte por volta ($a_e/volta$) 12 $\mu\text{m}/\text{volta}$ e direção de corte discordante.

Conforme Tab. 4.1 os valores mais baixos foram para as condições CL01, CL02, CL09 e CL10, enquanto os mais altos foram encontrados para as condições CL07, CL08 e CL16.

Das imagens apresentadas nas Fig. 4.4(a), Fig. 4.4(b), Fig. 4.4(i) e Fig. 4.4(j), observa-se que praticamente não há diferenças nas cores das camadas próximas a superfície retificada. Estas imagens correspondem às condições mais brandas de retificação (CL01, CL02, CL09 e CL10 respectivamente), que resultaram nos menores valores da espessura da marca na

Tab. 4.1. Por outro lado, ao usinar em condições severas (CL07, CL08, e CL16) observou-se diferença significativa de coloração, indicando que a camada abaixo da superfície sofreu influência dos parâmetros de corte na retificação. As imagens destas condições são mostradas respectivamente nas Fig. 4.4(g), Fig. 4.4(h) e Fig. 4.4(p).

Tabela 4.1: Valores medidos da espessura da marca de retificação das imagens das amostras da Fig. 4.4 (Ensaios em Laboratório).

Condição Laboratório (CL)	Espessura da marca de retificação (μm)			
	Réplica		Média (\bar{x})	Desvio padrão (σ)
	A	B		
1	22,9	0,0	11,4	16,2
2	33,1	37,7	35,4	3,3
3	54,6	48,3	51,4	4,5
4	53,4	48,5	50,9	3,5
5	44,6	40,4	42,5	3,0
6	44,8	45,9	45,3	0,8
7	93,9	95,3	94,6	1,0
8	99,9	79,8	89,8	14,2
9	27,5	24,4	25,9	2,2
10	37,8	28,3	33,0	6,7
11	96,8	78,8	87,8	12,7
12	56,1	70,9	63,5	10,5
13	41,3	39,8	40,5	1,1
14	29,6	40,7	35,15	7,8
15	84,4	80,6	82,5	2,7
16	124,0	130,4	127,2	4,5

Para melhor visualização dos resultados apresentados na Tab. 4.1, eles foram plotados nos gráficos e apresentados nas Figs. 4.5 a Fig. 4.8. Em cada gráfico as condições são organizadas conforme o nível dos parâmetros, tornando possível comparar a variação entre cada um dos níveis.

Na Fig. 4.5 são apresentados os valores das espessuras da camada de marca de retificação. Ao lado esquerdo estão os valores das condições com sentido de corte concordante, e à direita as condições de corte discordante, conforme o agrupamento da Fig. 3.12. Dessa forma, a sequência de análise é comparar a condição CL02 com a condição CL01, a condição CL04 com a CL03, e assim sucessivamente.

Os resultados da Fig. 4.5 mostraram que houve diferença apenas para os resultados entre os seguintes pares de condições: CL02 com CL01, CL12 com CL11, e CL16 com CL15. O resultado mais expressivo foi observado da comparação entre condições CL16 com CL15, em que em média a espessura da camada diminuiu de 36%. Já para as demais condições a direção de corte praticamente não influenciou nos resultados. Segundo a literatura, normalmente

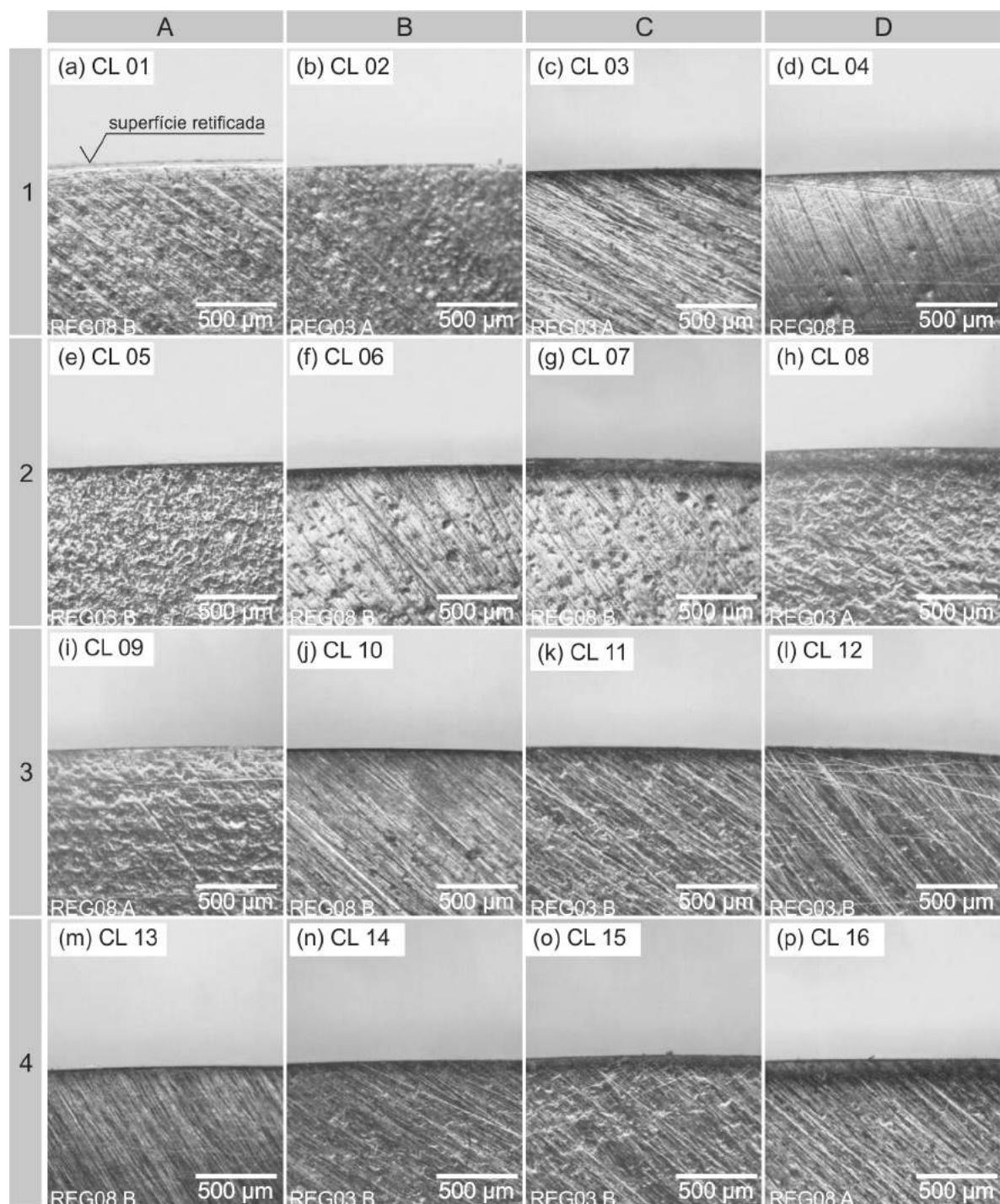


Figura 4.4: Imagens da camada abaixo da superfície retificada observada após os ensaios de usinagem referente às 16 condições de ensaio em laboratório (CL), conforme planejamento da Tab.3.2.

ocorre diminuição da espessura de camada afetada ao alterar a direção de corte concordante para discordante. Wager e Gu (1991) estudaram a influência da direção de corte na ocorrência de marcas de retificação para um aço carbono. Segundo os autores, para o corte no sentido discordante a temperatura máxima atingida na superfície é um pouco menor, quando comparada com o sentido concordante. Devido a distribuição do fluxo de calor, no corte discordante o ponto de maior temperatura é deslocado em relação a região de corte. Este fenômeno é uma possível explicação para a condição CL15 (sentido discordante) apresentar uma camada escurecida menor que a CL16 (sentido concordante). Estas condições são aquelas com maior valor de profundidade de corte e, consequentemente, um maior comprimento de contato. Um maior comprimento de contato implica em maior área para transferência de calor para peça. Assim, a espessura da camada foi mais sensível à mudança na direção de corte do que as demais condições.

Já o aumento de 38% na espessura da camada observado nas peças após a usinagem nas condições CL12 e CL11, é contraditório com a literatura. Contudo deve-se levar em conta os valores de desvio padrão elevado das medições de espessura.

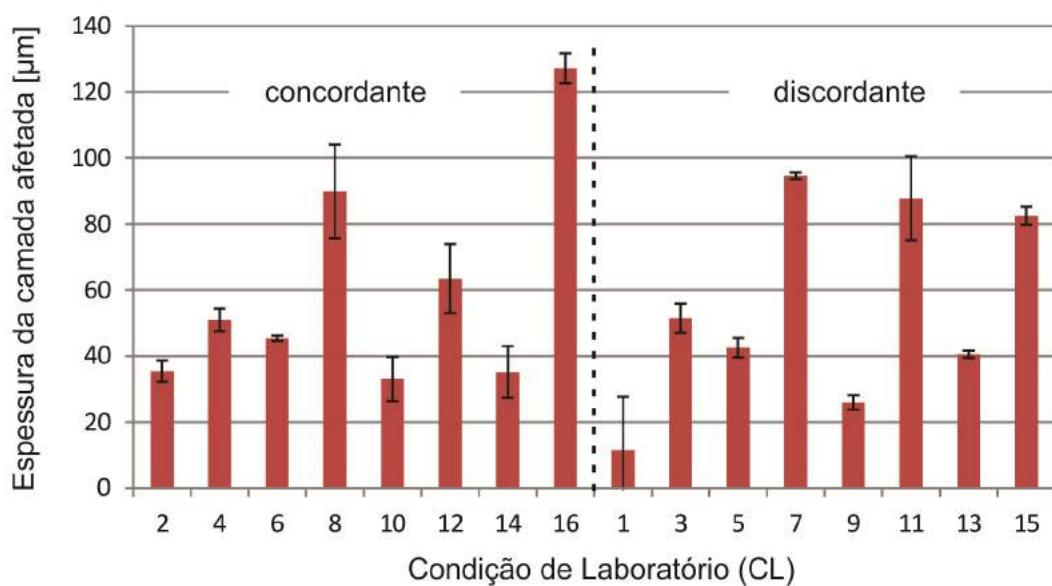


Figura 4.5: Espessura da camada afetada em relação à direção de corte: concordante e discordante, conforme planejamento da Tab.3.2.

A direção de corte também pode ser comparada entre as condições com números pares (direção concordante) e ímpares (direção discordantes) conforme Tab.3.2. Por exemplo, a condição CL01 (Fig. 4.4(a)) refere-se ao parâmetro com sentido de corte discordante enquanto que a condição CL02 (Fig. 4.4(b)) refere-se ao sentido de corte concordante.

Ao comparar as imagens da coluna A com aquelas da coluna B para uma mesma linha na Fig. 4.4, assim como as imagens da coluna C com aquelas da coluna D, em que

apenas o sentido de corte é alterado, observa-se que praticamente não há diferença significativa visual entre a espessura das camadas. Estas observações indicam que o sentido de corte nas condições testadas em laboratório não exerceu influência significativa na espessura da marca de retificação, exceto entre a condição CL15 (Fig. 4.4(o)) e CL16 (Fig. 4.4(p)), em que esta última apresenta uma maior camada escurecida.

Na Fig. 4.6 os valores das espessuras estão organizados em função do valor da velocidade da peça (v_w) para condições de corte da Tab.3.2 (ensaios em laboratório): à esquerda condições com nível mais baixo (-1), ou $v_w = 0,22 \text{ m/s}$, e à direita as condições com nível mais alto (+1), $v_w = 0,45 \text{ m/s}$. Observa-se que o grupo que apresenta as condições de corte com maior velocidade da peça apresentou valores de espessura das camadas após retificação. Ao aumentar a velocidade da peça de $0,22 \text{ m/s}$ para $0,45 \text{ m/s}$ observou-se uma redução média de 57% na espessura da camada.

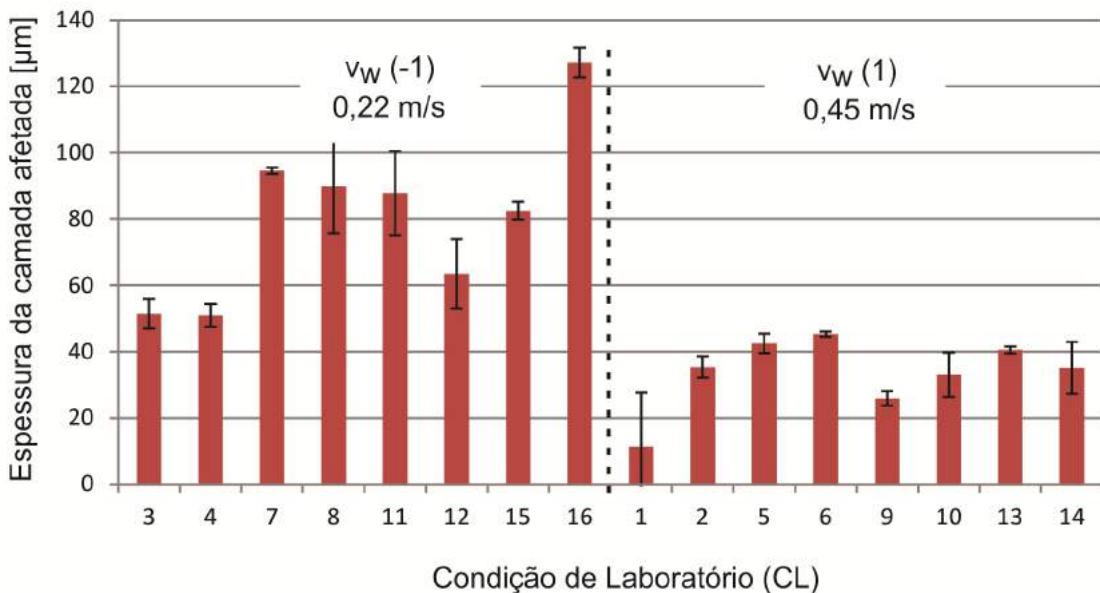


Figura 4.6: Espessura da camada afetada em relação a velocidade da peça no nível mais baixo (-1) e nível mais alto (1), conforme planejamento da Tab.3.2

O efeito de velocidade da peça na espessura da camada após retificação também pode ser observado ao comparar as imagens obtidas após a usinagem com o maior valor de velocidade da peça ($0,45 \text{ m/s}$) nas condições CL01 (Fig. 4.4(a)) e com menor valor ($0,22 \text{ m/s}$), CL03 (Fig. 4.4(c)). Seguindo a mesma lógica, na Fig. 4.4 e Tab.3.2 pode ser feita comparação entre a coluna A, com nível mais alto, e a coluna C, com o nível mais baixo, ou ainda entre as colunas B e D. É possível observar que as condições com nível mais baixo de velocidade (colunas C e D) apresentam maiores espessuras de marca escurecida que as de nível mais alto (colunas A e B). Destas imagens e com os valores da Fig. 4.6 pode-se inferir que ao aumentar a velocidade da peça, a espessura da camada afetada diminui após os ensaios em

laboratório nas condições investigadas.

A redução da camada afetada com o aumento da velocidade da peça pode ser explicada pela ação conjunta de dois efeitos. Segundo Klocke, Eh e Kuchie (2009), para retificação cilíndrica de mergulho, o aumento da velocidade da peça reduz a área da seção transversal do cavaco e também o comprimento de contato. Com a diminuição do comprimento de contato o número momentâneo de arestas cortantes é reduzido, assim, há uma menor taxa de calor gerada na superfície. Além disso, com o aumento da velocidade da peça o tempo em que a região de fluxo de calor fica sobre a superfície é reduzido, consequentemente transferindo menor quantidade de energia térmica para a peça. Estes dois fenômenos em conjunto favorecem a geração de menores temperaturas na região de contato. De acordo com os autores, juntamente com as condições de lubrificação, a velocidade da peça é a variável mais importante a ser considerada quando o objetivo é evitar, ou reduzir, influência térmica na camada superficial.

Na Fig. 4.7 são apresentados os valores da espessura da camada após retificação organizados de acordo com a velocidade de mergulho do rebolo (v_f) (conforme Tab.3.2), divididos em dois grupos: à esquerda os valores com condições em que a v_f é mais baixa (0,5 mm/s) e à direita aqueles com v_f mais alta (1,0 mm/s). Comparando os valores obtidos para condições agrupadas duas a duas CL01 com CL05 e CL02 com CL06, e assim sucessivamente, o aumento da velocidade de mergulho resultou no aumento da espessura da camada afetada em todos os casos. A espessura da camada em média aumentou 34% com a velocidade de mergulho. Apenas para as condições agrupadas CL10 com CL14 e CL11 com CL15 não foram observadas diferenças significativas entre os valores da espessura das camadas após retificação.

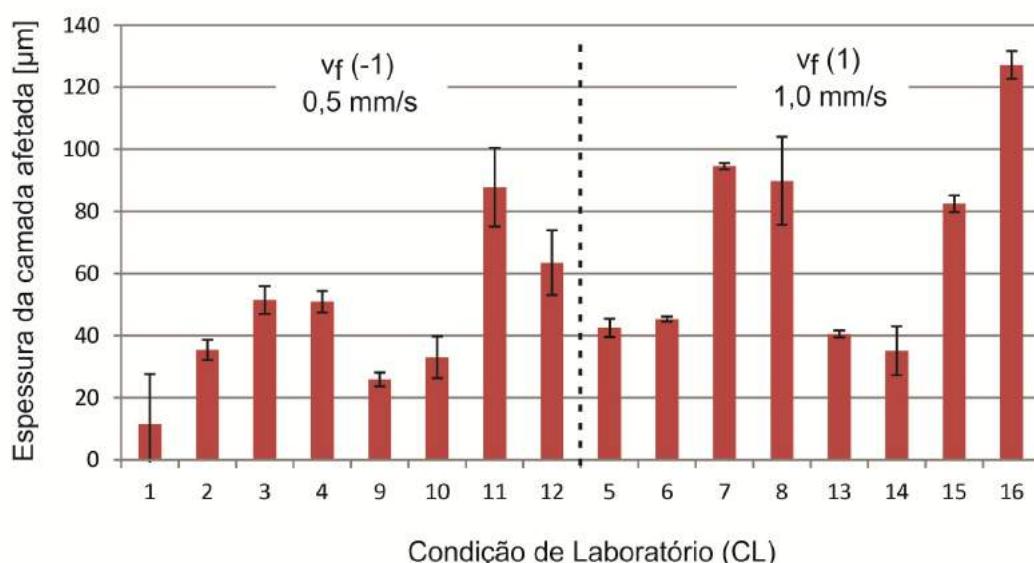


Figura 4.7: Espessura da camada afetada em relação a velocidade de mergulho do rebolo no nível mais baixo (-1), e no nível mais alto (1), conforme planejamento da Tab.3.2.

Ao comparar os valores das espessuras da Fig. 4.7 com as imagens das espessuras na Fig. 4.4 (conforme Tabela 3.2) e analisar as imagens da linha 1 com aquelas da linha 2 (onde apenas há variação apenas velocidade de mergulho), e também aquelas da linha 3 com linha 4, em que há o aumento da velocidade de mergulho de $0,5 \text{ mm/min}$ para $1,0 \text{ mm/min}$, observa-se que a espessura da camada também aumentou. Por exemplo, ao passar da condição CL03 (Fig. 4.4(c)), menor valor de v_f , para condição com a condição CL07 (Fig. 4.4(g)), maior v_f , a espessura da camada escurecida praticamente dobrou. As camadas escurecidas da Fig. 4.4 em geral foram mais espessas nas condições em que a retificação ocorreu com maiores valores de v_f .

O aumento da velocidade de mergulho resulta no aumento da taxa específica de remoção de material (Eq.(2.9)). A taxa de remoção de material está diretamente relacionada com a geração de calor na região de retificação. Desta forma maior quantidade de calor é transferido para a peça durante o processo. O aumento da velocidade de mergulho também é responsável pelo aumento da espessura equivalente de corte (Eq.(2.6)). O formato do cavaco gerado é modificado o que também resulta em maiores taxas de geração de calor na região de contato.

Pode-se relacionar com este parâmetro também, o aumento da taxa de desgaste do rebolo. Quanto maior a velocidade de mergulho, e por consequência maior profundidade de corte, há a tendência de os grãos fraturarem. Esta fratura, do ponto de vista da queima, pode ser benéfica. Ao quebrar os grãos, novas arestas cortantes são geradas, mantendo o rebolo afiado durante o processo. Por outro lado, a qualidade da superfície gerada é prejudicada, especialmente em processos que o perfil da peça depende do perfil do rebolo (KLOCKE; EH; KUCHIE, 2009).

Na Fig. 4.8 são apresentados os valores de espessura da camada após retificação em ensaios de laboratório os quais foram agrupados em função das do valor da velocidade de corte (v_s): à esquerda o grupo com condições em que a velocidade de corte é menor e à direita o grupo de condições com usinagem com maior valor vs. Comparando as condições uma a uma, por exemplo, CL01 com CL09 (Tab.3.2), CL02 com CL11 e assim por diante, observa-se que a espessura foi maior para condições com velocidade de corte mais alta. Apenas para as condições CL07 e CL15 é que a tendência foi oposta, o aumento da velocidade de corte causou a redução de 13% na camada afetada.

Ao observar as imagens usinadas com diferentes valores de velocidade de corte (v_s), por exemplo condições da linha 1 da Fig. 4.4, menor valor de vs igual a $21,4 \text{ m/s}$, com aquelas da linha 3, maior valor de $vs = 32,2 \text{ m/s}$, não é possível observar diferenças significativas os valores das espessuras. De forma análoga, ao observar as imagens das condições CL04 (Fig. 4.4(d)) e CL12 (Fig. 4.4(l)), percebe-se que as marcas escurecidas são bastante parecidas. O mesmo é observado na comparação da segunda com a quarta linha. Estes resultados evidenciam que não há influência da velocidade de rebolo (v_s) nas camadas afetadas abaixo

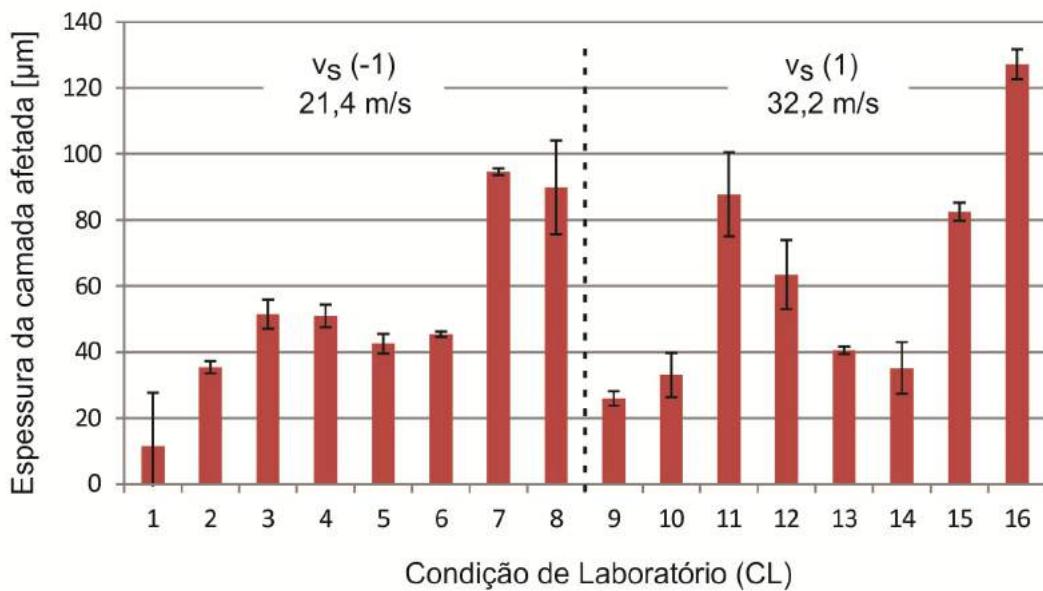


Figura 4.8: Espessura da camada afetada em relação a velocidade de corte no nível mais baixo (-1), no nível mais alto, conforme planejamento da Tab.3.2.

da superfície nas condições investigadas.

Segundo a literatura, o aumento da velocidade de corte afeta a espessura equivalente de corte (MALKIN; GUO, 2008). Quanto maior a velocidade, menor será a espessura do cavaco gerado. Este efeito, porém, pode ser superado pelo aumento do atrito entre grãos sem afiação e a superfície. A energia empregada para remover material diminui, mas a energia de atrito por deslizamento aumenta.

Entretanto ao analisar a influência da velocidade de corte na espessura da camada afetada para as amostras usinadas nas condições CL07 e CL15 observa-se uma redução da espessura da camada de 13%, contrariando a tendência geral. Elas apresentam menor velocidade da peça e maior velocidade de mergulho. Neste caso, devido severidade das condições, o aumento da velocidade de corte causa a redução da espessura de corte e isso exerce um efeito positivo por compensar o aumento da velocidade de mergulho. Entre as condições CL08 e CL16 não se observa este mesmo efeito devido o sentido de corte ser concordante. Ao empregar este sentido de corte, o início do contato é justamente o deslizamento do grão pela superfície, e o aumento da velocidade de corte aumenta a tendência do deslizamento.

A fim de verificar se houve influência significativa dos parâmetros de corte na espessura da camada afetada foi realizado um tratamento estatístico dos resultados utilizando a metodologia de Análise de Variância (ANOVA). Esta metodologia é valiosa para verificar se a diferença entre os níveis mais baixos (-1) e mais altos (1) de cada um dos parâmetros pode ser considerada estatisticamente significante. Um resultado é considerado significante quando

a diferença da média entre os grupos de nível mais baixo e mais alto é superior ao desvio em torno da média dentro cada nível. Além disso, essa análise considera as possíveis interações entre os parâmetros. Na Tab.4.2 é apresentado o quadro ANOVA para as espessuras das marcas de retificação medidas.

Tabela 4.2: Quadro ANOVA para as medições da camada de marca de retificação para os ensaios em laboratório.

Parâmetro	Graus de Liberdade (GL)	Soma dos Quadrados (SQ)	Quadrado Médio (QM)	Valor F	Valor p (>F)
<i>Direção</i>	1	119	119	0,412	0,5493
v_w	1	8952	8952	30,970	0,0025*
v_f	1	2454	2454	8,490	0,0332*
v_s	1	344	344	1,189	0,3252
<i>Direção: v_w</i>	1	11	11	0,038	0,8522
<i>Direção v_f</i>	1	61	61	0,210	0,6660
<i>Direção: v_s</i>	1	0	0	0,000	0,9937
$v_w: v_f$	1	428	428	1,480	0,2780
$v_w : v_s$	1	344	344	1,189	0,3253
$v_f : v_s$	1	144	144	0,497	0,5121
<i>Resíduos</i>	5	1445	289		

*estatisticamente significativos

Da Tab.4.2 o valor F é o resultado da divisão do parâmetro Quadrado Médio (QM) pelo parâmetro QM do resíduo , enquanto o valor p é a probabilidade do parâmetro correspondente ao valor F na curva de distribuição de probabilidade para o dado grau de liberdade. O valor p para o parâmetro v_w destacado na Tab.4.2 significa que o parâmetro velocidade de trabalho ao passar do nível -1 para o +1 causa uma variação de aproximadamente 30 vezes a mais que aquela dos resíduos. Já o parâmetro v_f exerce um efeito de 8,5 vezes maior. O valor $p < 0,05$, encontrado para os dois parâmetros, indica que existe evidência estatística, ao nível de significância de 95%, entre os níveis -1 e +1 para estes parâmetros. Como o valor p dos parâmetros v_w e v_f são menores que 0,05, pode-se afirmar que eles influenciam significativamente na espessura da camada afetada.

Da mesma Tab.4.2, as interações de segunda ordem significam o quanto a variação de um parâmetro influencia na variação de outro parâmetro (efeito combinado). Por exemplo, o fator *direção: v_w* é a influência da velocidade de trabalho quando se muda o sentido de corte. É possível observar na Tab.4.2 que as interações de segunda ordem podem ser consideradas não significativas, nestes casos o valor de p é bem superior a 0,05. Assim, desconsiderando estes valores da análise é obtido o quadro ANOVA apresentado na Tab.4.3.

Da tabela 4.3 é possível confirmar que o parâmetro velocidade da peça (v_w) influencia na espessura da marca de retificação com um nível de significância de 95%. O segundo

Tabela 4.3: Quadro ANOVA para as medições da camada de marca de retificação desconsiderando as interações de segunda ordem para os ensaios em laboratório.

Parâmetro	Graus de Liberdade (GL)	Soma dos Quadrados (SQ)	Quadrado Médio (QM)	Valor F	Valor p (>F)
<i>Direção</i>	1	119	119	0,538	0,4784
v_w	1	8952	8952	40,485	$5,35 \cdot 10^{-5} *$
v_f	1	2454	2454	11,099	0,0067 *
v_s	1	344	344	1,555	0,2383
<i>Resíduos</i>	11	2432	221		

*estatisticamente significativos

fator mais influente foi a velocidade de mergulho do rebolo (v_f). Os demais parâmetros não apresentaram significância estatística.

Através do pacote *Danielplot* utilizando o interpretador *RStudio* foi elaborado o gráfico, apresentado na Fig. 4.9, para demonstrar graficamente os efeitos médios de cada parâmetro ao se mover do nível mais baixo para o mais alto. Na Fig. 4.9 quando a velocidade da peça passa do nível mais baixo ($0,22 \text{ m/s}$) para o mais alto ($0,45 \text{ m/s}$), a espessura média da camada afetada diminui aproximadamente 60% (de aproximadamente $80 \mu\text{m}$ para $30 \mu\text{m}$). Já em relação a velocidade de mergulho do rebolo, quando esta é aumentada ($0,5 \text{ mm/min}$ para $1,0 \text{ mm/min}$) aumenta a espessura da camada em aproximadamente $30 \mu\text{m}$ (cerca de 40%).

Como descrito na seção metodologia, o parâmetro profundidade de corte por volta (a_e/volta) é o resultado da combinação das variáveis velocidade da peça (v_w) e velocidade de mergulho (v_f), conforme Eq.(2.2). Para realizar ANOVA, as variáveis precisam ser aleatórias e independentes. Como o parâmetro é dependente, a análise será feita de forma separada.

Similarmente à metodologia empregada nos gráficos apresentados anteriormente para cada um dos parâmetros, na Fig. 4.10 são apresentados graficamente os resultados das espessuras das camadas organizadas em três grupos: $3 \mu\text{m/volta}$ (Fig. 4.10(a)), $6 \mu\text{m/volta}$ (Fig. 4.10(b)) e $12 \mu\text{m/volta}$ (Fig. 4.10(c)). Estes grupos são os níveis do parâmetro profundidade de corte por volta (a_e/volta).

Da Fig. 4.10, à primeira vista é possível observar a diferença entre a média dos três grupos (a), (b) e (c). O grupo na Fig. 4.10(a) é aquele que apresenta condições com os menores valores da média de espessuras ($26,5 \mu\text{m}$) e também menor a_e/volta , igual a $3 \mu\text{m}$. Os valores do grupo na Fig. 4.10(b), $6 \mu\text{m}$ por volta, são em geral o dobro em relação aquele do grupo Fig. 4.10(a) e a média das espessura da marca de retificação é aproximadamente 50% maior ($52,2 \mu\text{m}$). Já os valores do grupo Fig. 4.10(c), o a_e igual a $12 \mu\text{m}$ por volta é o dobro do grupo Fig. 4.10(b) e quatro vezes maior que o grupo Fig. 4.10(a). Para este grupo, os valores médios praticamente dobraram em relação ao grupo intermediário (de $52,2$

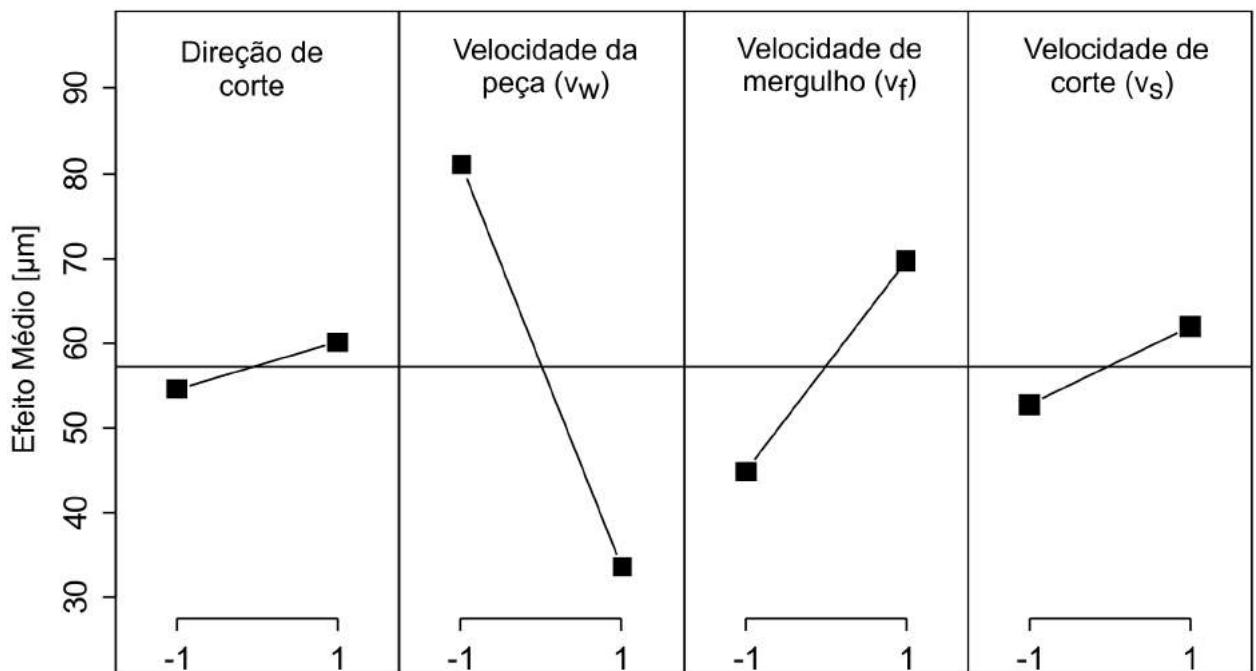


Figura 4.9: Efeito médio dos parâmetros de corte entre os níveis mais baixo e mais alto para os Ensaios em Laboratório.

μm para $98,5 \mu\text{m}$), representando um aumento de 89,3%) e triplicou em relação ao primeiro grupo (de $34,4 \mu\text{m}$ para $98,5 \mu\text{m}$, com um aumento de 186%). Desta forma, a profundidade de corte por volta influenciou significativamente na espessura da marca de retificação, com tendência diretamente proporcional.

Na primeira análise foi identificado que a velocidade da peça (v_w) e a velocidade de mergulho (v_f) exercem grande influência na marca de retificação que pode ser comprovado através da análise estatística. Posteriormente foi verificado que o parâmetro a_e/volta também exerce influência nas espessuras das camadas afetadas. Ao agrupar as condições pela velocidade da peça na Fig. 4.10, obtém-se a configuração de resultados apresentados na Fig. 4.11. No primeiro grupo (Fig. 4.11(a)) estão as condições com menor a_e/volta e v_w no nível mais alto. Os grupos nas Figs. 4.11(b) e Fig. 4.11(c) apresentam a_e/volta intermediário (6 $\mu\text{m}/\text{volta}$), porém o da esquerda, Fig. 4.11(b), está com velocidade da peça no nível mais baixo enquanto que aqueles na Fig. 4.11(c) (à direita), estão no nível mais alto. O último grupo (Fig. 4.11(d)) compreende as condições com maior a_e/volta e nível mais baixo de v_w . Nesta figura é mostrado que dentro do grupo com mesmo a_e/volta , o efeito da velocidade da peça ainda é presente.

O aumento da profundidade de corte influencia diretamente na taxa de remoção de material. Quanto maior a profundidade de corte maior a remoção e maior a energia específica. Assim, como a energia é convertida em calor na interface entre os grãos abrasivos e o material, uma menor geração de energia resulta em um processo com menor dano térmico (MALKIN;

GUO, 2008).

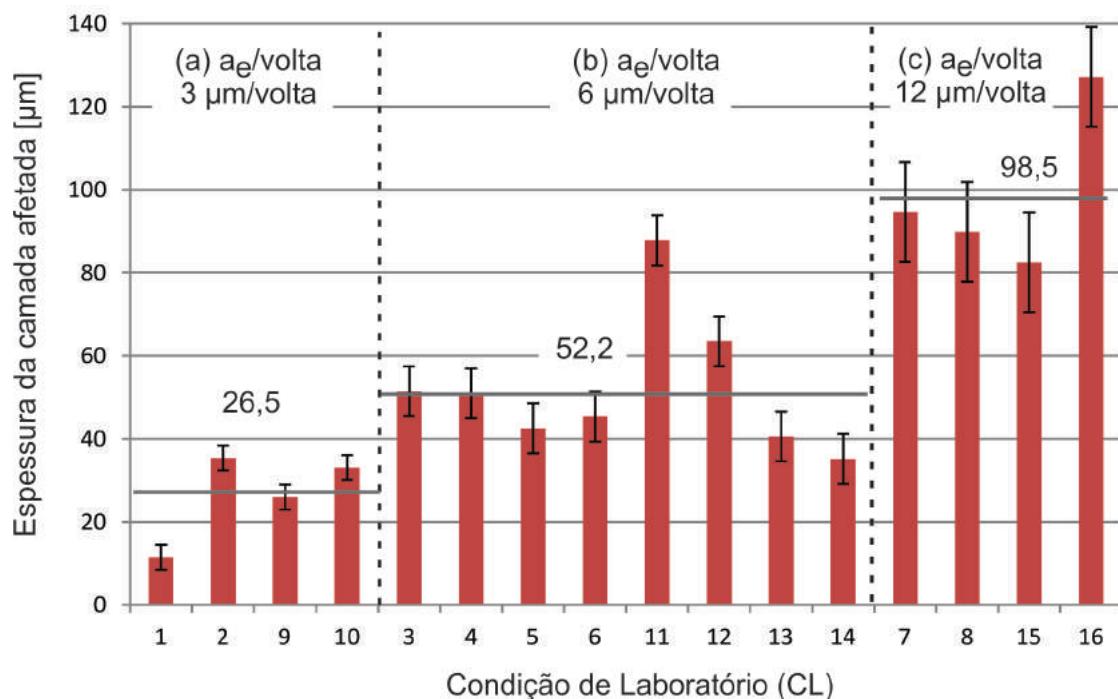


Figura 4.10: Espessura da camada afetada em relação a profundidade de corte por volta ($a_e/volta$), (a) nível mais baixo (3 $\mu m/volta$), (b) nível intermediário (6 $\mu m/volta$) e (c) nível mais alto (12 $\mu m/volta$).

Os grupos Fig. 4.11(a) e Fig. 4.11(b) possuem a mesma taxa específica de remoção de material (Q'), mas diferentes velocidades da peça. O mesmo ocorre entre os grupos Fig. 4.11(c) e Fig. 4.11(d). Nesta comparação é possível observar que mantendo a taxa específica de remoção de material, ao aumentar a velocidade da peça há a redução da espessura da camada afetada. Dentre estes grupos, o grupo (c) representado na Fig. 4.11(c) apresenta as condições de corte mais vantajosas, pois apresenta a maior taxa de remoção de material, e ao mesmo tempo menor espessura de camada afetada em relação ao grupo (b), Fig. 4.11(b).

Os resultados da medição da espessura da camada mostraram que o parâmetro mais influente é a velocidade da peça (v_w). Como já discutido anteriormente, este parâmetro além de diminuir o contato entre o grão e a peça, diminui também a seção transversal do cavaco e o comprimento de contato. Ele também influencia diretamente na profundidade de corte. A profundidade de corte por volta ($a_e/volta$) mostrou ser bastante influente na espessura da camada. Quando se analisa em grupos (Fig. 4.10), é observado que existe bastante distinção entre os valores de espessura de camada. A velocidade de mergulho (v_f) está relacionada tanto com a taxa específica de remoção de material quanto a espessura equivalente de corte. Ainda que ao diminuir v_f resulte na diminuição da espessura da camada, o aumento da velocidade da peça exerce influência predominante. A direção de corte e a velocidade de corte demonstraram

exercer pouca influência sobre a espessura da camada afetada. Desta forma, estes últimos parâmetros devem ser selecionados para priorizar o acabamento em operação de retificação nas condições investigadas.

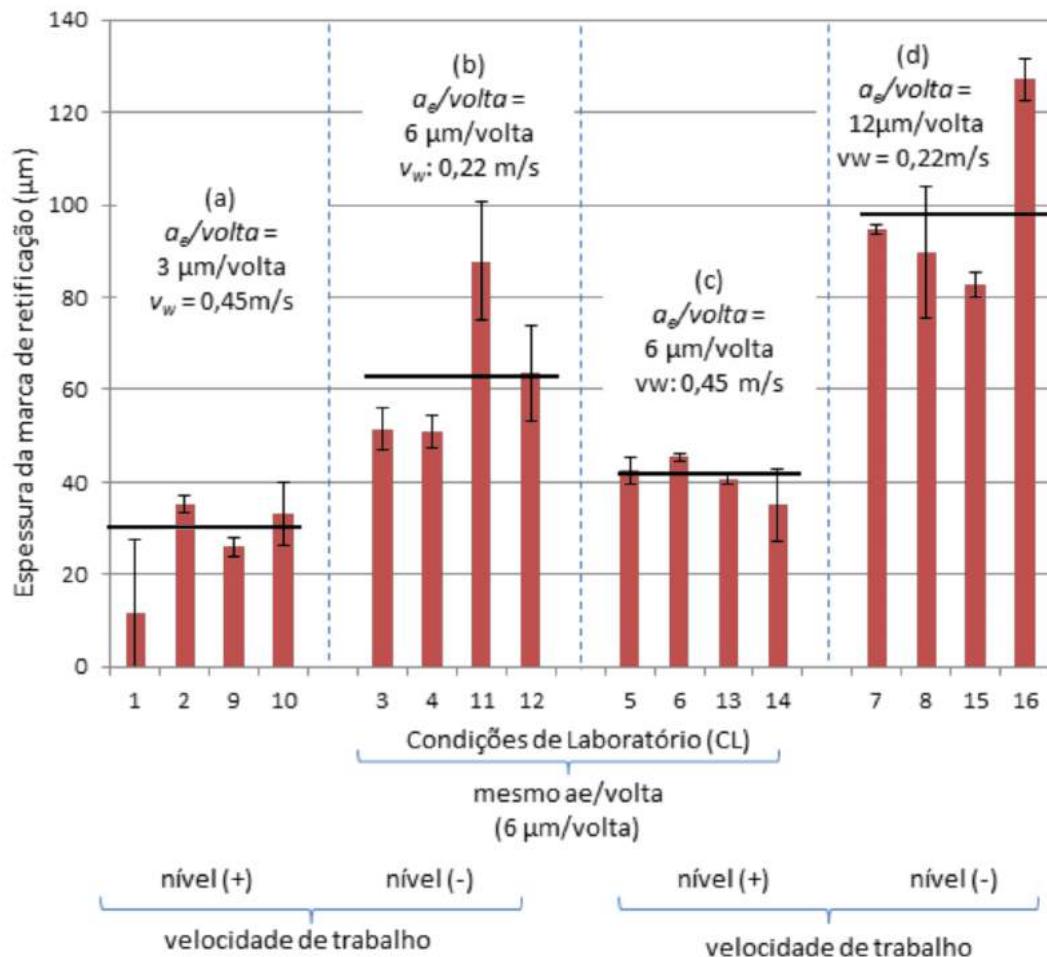


Figura 4.11: Análise dos resultados comparando entre os níveis da profundidade de corte por volta (a_e/volta) e velocidade da peça (v_w).

4.2.1.2 Perfil de Microdureza na Subsuperfície das Amostras de Laboratório

Os comentários e análises realizadas na sub-sessão anterior foram baseadas no pressuposto que as marcas escurecidas ou manchas são indicativos que houve alterações na microestrutura, caracterizando assim a queima de retificação ou camada afetada pelo calor. Porém, nem sempre a mudança de coloração está associada com a alteração microestrutural. Este fenômeno dependerá do material e a qual temperatura estará susceptível à oxidação. Além disso, apenas pela análise visual não é possível afirmar qual a característica desse dano, ou seja, se é retêmpera, resultando em um aumento da dureza, ou um segundo revenimento (que resulta em diminuição da dureza). Assim, foram realizadas medições de microdureza na

subsuperfície retificada para auxiliar na análise da integridade superficial. Os resultados são apresentados a seguir.

Conforme descrito na metodologia, foram realizadas medições de microdureza para avaliar a existência da correlação entre a alteração microestrutural na subsuperfície e a camada com diferente coloração medida. Apenas para as amostras usinadas nas Condições de Laboratório (CL) 4, 5, 6, 7, 12, 15 e 16, sublinhadas na Fig. 3.12, foram medidas as microdurezas.

Na Fig. 4.12(a) são mostradas as marcas da indentações na superfície avaliada na amostra sob a condição CL04. Na Fig. 4.12(b) é mostrada uma ampliação da região destacada em Fig. 4.12(a). As indentações foram feitas a cada $10 \mu\text{m}$ a partir do ponto mais próximo possível da superfície. Entre duas indentações foi obedecida a distância de $30 \mu\text{m}$, que é um valor três vezes maior que a largura da indentação, conforme recomendado pela literatura.

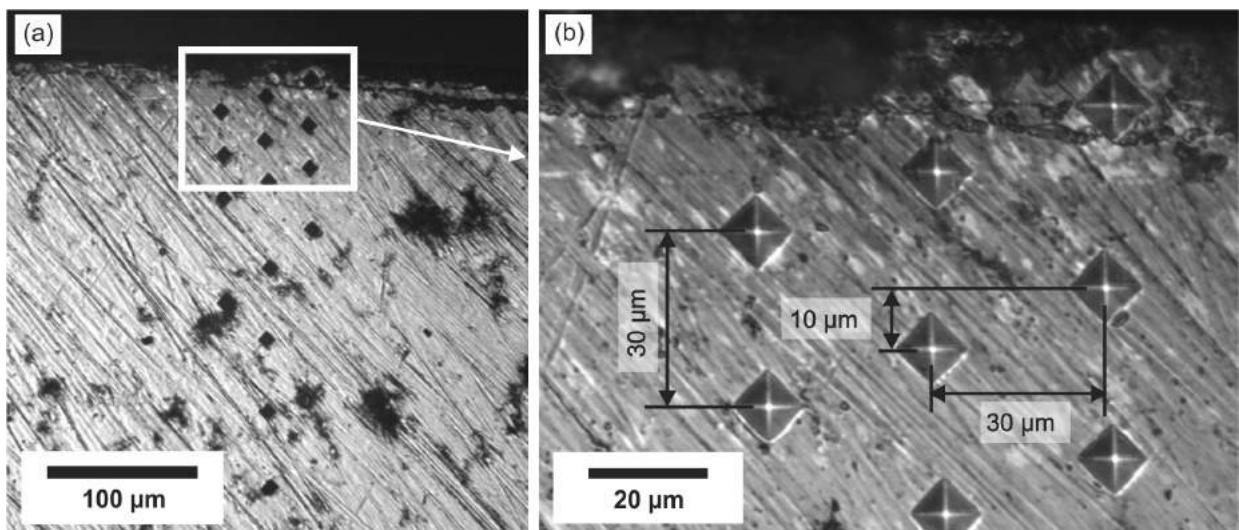


Figura 4.12: (a) Região das indentações a partir da superfície, (b) ampliação da Fig. 4.12(a) e detalhe da distância entre as indentações - condição de usinagem CL04 da Tab.3.2.

Através das medições, foi verificado que na região com coloração escura (possível queima) visível a dureza é menor que na região em que a cor é igual a da região do centro da amostra (sem marca). Na Fig. 4.13 é mostrado o resultado da medição de microdureza, com a imagem em escala da respectiva amostra. Entre 130 e 140 μm é traçada uma linha que delimita a região com alteração e sem alteração na microdureza. Esta linha coincide com o limite da região mais escura abaixo da superfície retificada da amostra. Existe também uma região de transição em que parte está escura e parte é a cor padrão do material. Na região de transição a dureza já começa a estabilizar.

Em geral, o perfil de microdureza a partir da superfície usinada pode indicar alteração na dimensão da camada afetada, mas em virtude da faixa de medição da espessura via CAD ser bem mais abrangente (cerca de 3 mm), contra uma faixa bem pequena para a medição de microdureza (0,060 mm ou $60 \mu\text{m}$), é natural a presença de dispersão dos resultados.

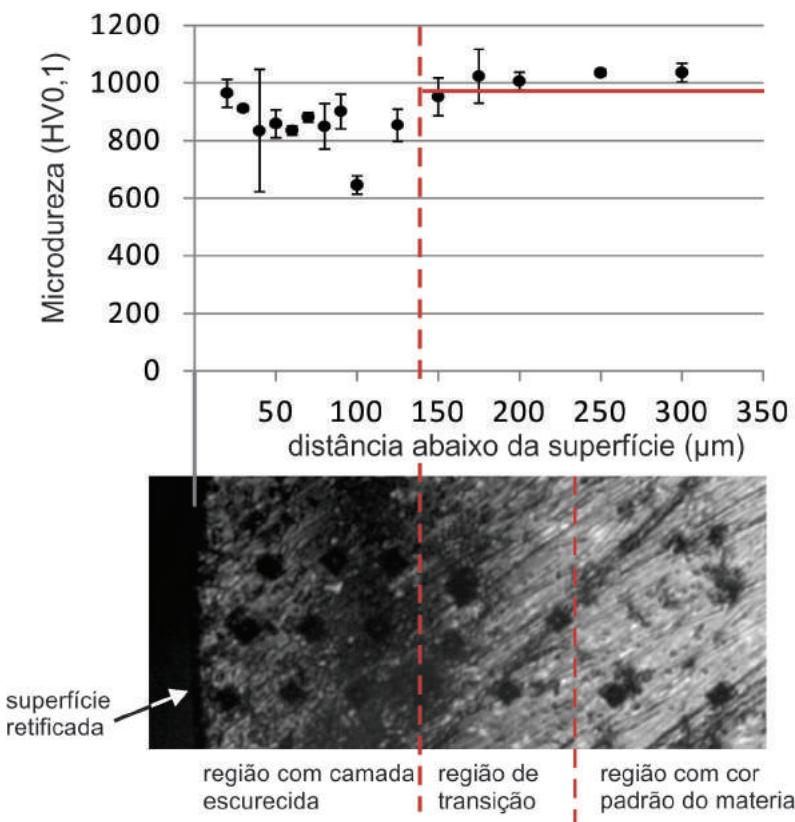


Figura 4.13: Valores de microdureza a partir da superfície retificada sob a condição de usinagem CL07 da Tab.3.2.

É bem provável que se a microdureza for medida em regiões adjacentes aquela inicialmente medida, valores diferentes poderão ser obtidos.

A seguir serão apresentados os resultados dos valores de microdureza obtidos para várias condições de corte na forma gráfica. Foram selecionadas oito condições de corte com base no critério para comparar cada um dos quatro parâmetros de entrada avaliados.

Na Fig. 4.14(a) e (b) são mostrados os valores de microdureza para as condições CL15 e CL16 (Conforme Tab. 3.2). A condição CL 15 representa uma condição de corte discordante, enquanto a CL16 concordante. Para ambas condições foi detectada diminuição da dureza próximo a superfície. Para a condição CL15 (Fig. 4.14(a)) é observada uma queda até aproximadamente 700 HV0,1 a 20 μm da superfície, o que representa cerca de 30% em relação a região de referência de dureza do material. Para condição CL16 também há uma queda de aproximadamente 30% na dureza a 20 μm da superfície. Na condição CL15 a dureza permanece abaixo do valor de referência até cerca de 60 μm da superfície, enquanto para a CL16 a recuperação da dureza foi mais rápida, chegando ao valor de referência a 40 μm da superfície. Assim como para a medição da camada escurecida, não há uma diferença significativa entre o perfil de microdureza das amostras entre as duas condições.

Para comparação entre as condições com diferentes níveis de velocidade da peça

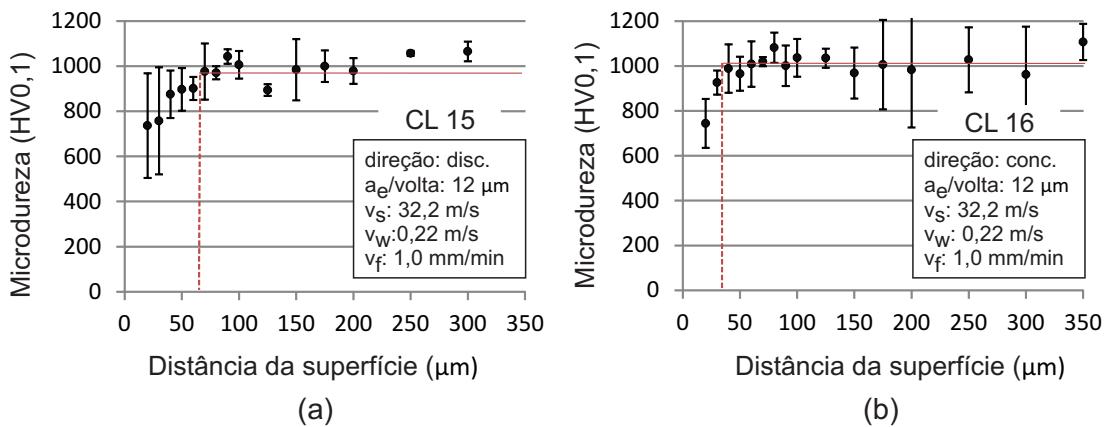


Figura 4.14: Microdureza a partir da superfície para as condições (a) discordante e (b) concordante nos Ensaios em Laboratório.

(v_w), são apresentados os resultados da medição da microdureza na Fig. 4.15(a) e (b), para as condições CL05 (nível de v_w maior) e CL07 (nível de v_w menor). Para a condição CL05 (a), o valor de microdureza situou-se próximo de 800HV0,1 a 30 μm da superfície, representando 20% de queda em relação a dureza de referência (onde não houve retificação). A condição CL07, Fig.4.15(b), apresentou uma queda mais acentuada de microdureza a 100 μm da superfície, situando-se próximo de 600HV0,1, que equivale em torno de 40% de queda em relação a referência. A microdureza para a condição CL07 apresenta alterações até cerca de 140 μm , enquanto para condição CL05 até 30 μm . Dessa forma a camada com alteração na microdureza é quatro vezes maior para a condição com menor velocidade de trabalho (CL07) em comparação com a condição com maior velocidade (CL05). Em linhas gerais, a velocidade da peça causou alterações metalúrgicas nas condições investigadas em laboratório. Este resultado acompanha as medições da marca de retificação na sessão anterior.

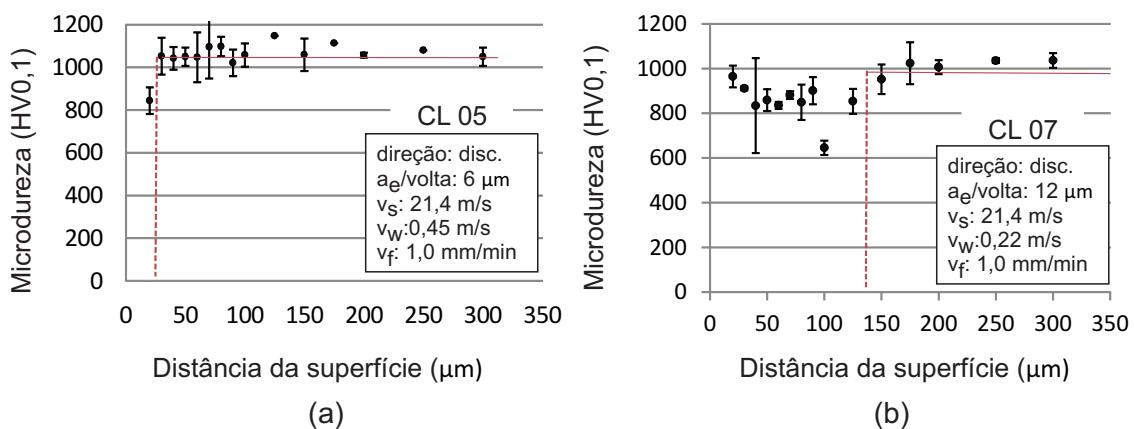


Figura 4.15: Microdureza a partir da superfície para as condições com velocidade da peça: (a) 0,45 m/s e (b) 0,22 m/s nos Ensaios em Laboratório.

Na Fig. 4.16 são apresentados os resultados da medição de microdureza para condições com diferentes velocidades de mergulho (v_f). Na Fig. 4.15(a) são mostrados os resultados para a condição com velocidade de mergulho no nível mais baixo (CL02), enquanto em Fig. 4.15(b) a condição em com nível mais alto (CL06). Nos resultados da condição CL06 foram encontradas microdurezas 20% mais baixa em relação a referência enquanto para a condição CL02 apenas 10%. Além disso, a camada com a microdureza abaixo da referência é maior para condição CL06 (até 70 μm) do que para CL02 (até 40 μm). Desta forma, pode-se afirmar que para estes resultados, o aumento da velocidade de mergulho, gerou maiores camadas com microdureza afetada. Como discutido anteriormente, o aumento da velocidade de mergulho aumenta a espessura equivalente de corte, a taxa de remoção de material e a profundidade de corte. Nesta comparação, provavelmente está relacionado de forma mais direta com o aumento da profundidade de corte por volta ($a_e/volta$), com valor de 3 $\mu m/volta$ para a condição CL02 e 6 $\mu m/volta$ para condição CL06.

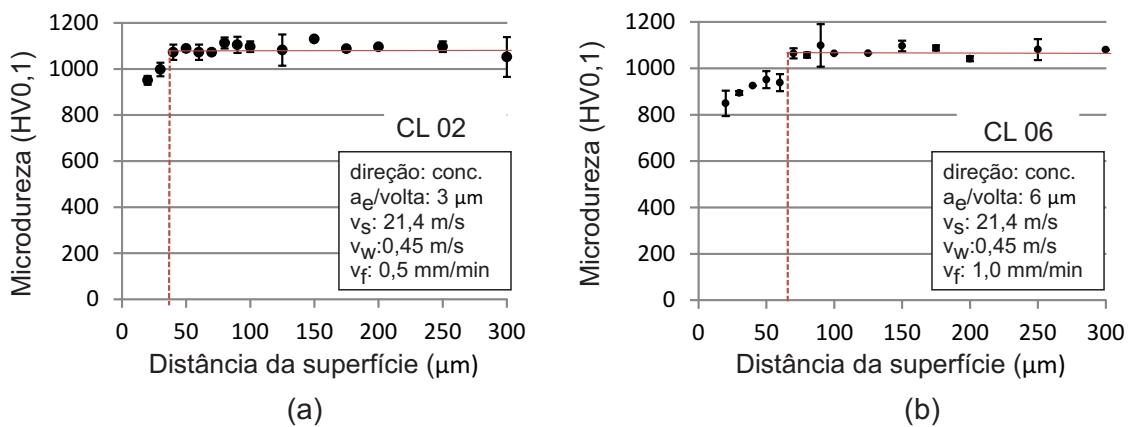


Figura 4.16: Microdureza a partir da superfície para as condições com velocidade de mergulho: (a) 0,5 mm/min e (b) 1,0mm/min nos Ensaios em Laboratório.

Na Fig. 4.17(a) e (b) são apresentados os resultados da medição de microdureza para condições com diferentes velocidades de corte (v_s). Em Fig. 4.17(a) são mostrados os resultados em peça usinadas sob a condição CL04, com nível mais baixo de velocidade de corte, e em Fig. 4.17(b), resultados para a condição CL12, com nível mais alto. Para a condição CL04 houve queda até 800HV0,1 a cerca de 20 μm da superfície. Para a condição CL 12 os valores mais baixo foram encontrados entre 30 e 40 μm . Os resultados para ambas condições apresentam uma camada afetada até uma distância entre 60 e 70 μm da superfície. A diferença entre o nível de velocidade de corte não apresentou influência significativa para estes resultados.

Os parâmetros mais influente nos resultados de medição de microdureza são na ordem de influência: a velocidade da peça (v_w), velocidade de mergulho (v_f), velocidade do rebolo e direção de corte. Este resultado é semelhante ao encontrado para medição da espessura da

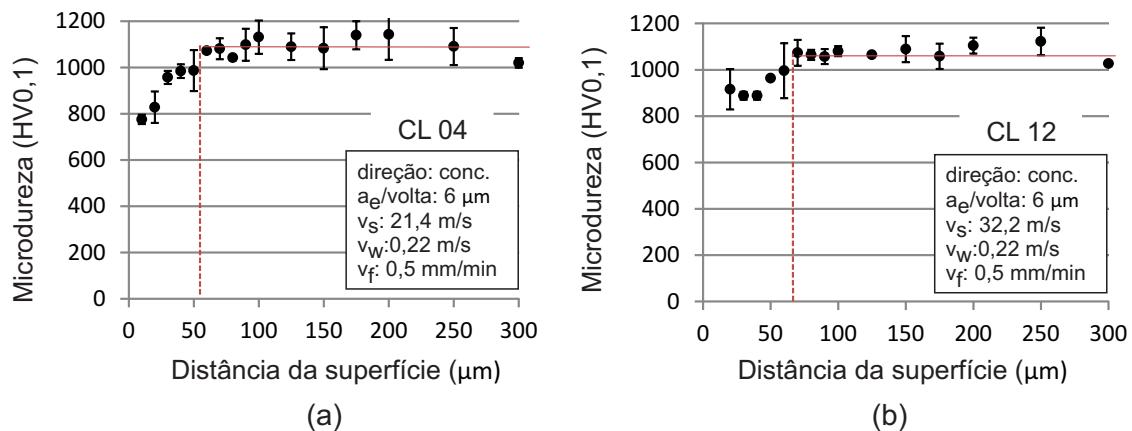


Figura 4.17: Microdureza a partir da superfície para as condições com velocidade do rebolo: (a) 21,4 m/s e (b) 32,2 m/s nos Ensaios em Laboratório.

camada afetada através de software CAD. Foi observado que a queda de microdureza ocorre na região que apresenta marca escurecida, e que a camada afetada tem a mesma dimensão da marca escurecida. Desta forma pode se afirmar que a marca escurecida representa o fenômeno de queima de retificação. Não foi observada camada endurecida de retempera próximo à superfície. Segundo Rowe (2013), geralmente é observado um amolecimento da superfície após a retificação de materiais que podem ser tratados termicamente, como o Aço-rápido.

Confrontando os resultados de medição da camada afetada e medição de microdureza, é possível inferir a velocidade da peça como o parâmetro de corte mais importante a ser controlado em ensaios de laboratório. Assim, para evitar a queima decorrente de retificação recomenda-se manter empregar altas velocidades da peça, mas sem deixar de se atentar para a vibração do sistema. Ou seja, preciso aumentar a velocidade da peça, mas controlando seus efeitos sobre o acabamento.

O segundo parâmetro mais influente é a velocidade de mergulho. Ao aumentar este parâmetro, aumenta-se também a espessura equivalente de corte, a profundidade de corte e a taxa de remoção de material (TRM). A taxa de remoção por sua vez é um parâmetro relacionado com a eficiência do processo. Ao aumentar a TRM, é possível produzir mais peças em um mesmo intervalo de tempo. A velocidade de mergulho deve ser a maior possível, observando o limite de queima do material.

A direção de corte e a velocidade de corte não exerceram um efeito expressivo na espessura de camada afetada. No entanto, estes parâmetros estão relacionados com acabamento da peça. O aumento na velocidade de corte causa redução da espessura da corte que em geral proporciona um melhor acabamento da peça. O sentido de corte concordante também proporciona um corte mais eficiente, o que também confere melhor acabamento a superfície usinada.

Sob o ponto de vista da queima, a combinação ideal dos parâmetros é aquela

que emprega alta velocidade da peça com baixa velocidade de mergulho. Estas condições são encontradas no grupo (a) da Fig. 4.11. Priorizando o acabamento, dentro deste grupo, a condição ideal seria aquela que emprega o sentido corte concordante combinado com velocidade de corte mais alta, condição esta que mais se aproxima da CL10. Na Fig. 4.11, comparando o grupo de condições (a) com o grupo (c) não se observa uma diferença tão grande entre as condições. As condições do grupo (c) representam o dobro da taxa de remoção de material daquelas do grupo (a). Desta forma, considerando o quesito produtividade, é preferível explorar condições com maior taxa de remoção de material, e a condição que mais adequada seria a condição CL14, sem abrir mão da integridade superficial e subsuperficial.

Estas observações contudo, não apontam os parâmetros que devem ser utilizados para garantir que não haja danos térmicos. Observa-se que nas duas condições apontadas, CL10 e CL14, estes danos ainda estão presentes. Estes resultados mostram que é possível explorar maiores velocidades de mergulho para baixas rotações da peça.

Samulewski (2006) após realizar ensaios de retificação do aço SAE 5160 temperado com dureza 57,5HRC com rebolo de óxido de alumínio (38A46L6VH), verificou a ocorrência de queimas abaixo da superfície retificada em média entre $100 \mu m$ e $140 \mu m$. Através de análise de variância ele também observou que a queima diminui com o aumento da velocidade de trabalho, mas que aumentou com a profundidade de corte. Os resultados deste autor são semelhantes aqueles obtidos neste trabalho.

Mayer *et al.* (2002) estudaram as causas da ocorrência queima para aços endurecidos após a retificação e observaram que ela depende da energia específica do processo. Eles atestaram que é possível estabelecer um limite entre queima e não queima com base no estudo do diâmetro do rebolo, da penetração de trabalho e da velocidade de trabalho. Porém, o controle do desgaste do rebolo não é tarefa simples. Ressalta-se que neste trabalho em questão não foi avaliado o desgaste do rebolo. Para um estudo mais aprofundado é recomendado considerar este parâmetro também.

4.2.2 Investigações da Formação de Rebarba nas Arestas das Amostras Após Usinagem em Laboratório

A seguir serão apresentados os resultados obtidos através de microscopia ótica, utilizando estereomicroscópio, e microscopia eletrônica de varredura (MEV). As imagens obtidas são das arestas de entrada e de saída de cada uma das 16 condições de laboratório (CL), conforme a Tab. 3.2. As regiões analisadas dependem do direção de corte, conforme Tab. 3.3. Esta sessão é subdividida em investigação das rebarbas formadas na entrada do rebolo (rebarbas nas arestas de entrada) e das rebarbas de formadas na saída do rebolo (rebarbas nas arestas de saída).

4.2.2.1 Investigaçāo das Rebarbas nas Arestas de Entrada

Nas figuras Fig. 4.18 a Fig. 4.21 são apresentadas as imagens das arestas de entrada dos canais das amostras de laboratório. Para cada condição de usinagem são mostradas arestas de entrada em diferentes ângulos, 45°, 90° e 135°. Estes ângulos são formados entre superfície retificada e a face frontal sobre a qual o rebolo penetra. As imagens foram obtidas nas regiões indicadas na Fig. 4.2 e descritas na Tab.3.3.

Na Fig. 4.18(a) a (l) observa-se a presença de rebarbas formadas predominantemente para o ângulo de 45° (condições CL01 a CL04). Elas são maiores quando a direção de corte é concordante, condições CL02 e CL04, mostradas nas Fig. 4.18(b) e Fig. 4.18(d), respectivamente. Não foram observadas rebarbas nas arestas com 135°.

Na Fig. 4.19(a) a (l) são mostradas as condições de CL05 a CL08, respectivamente. Observa-se presença de rebarbas formadas predominantemente para arestas com ângulo de 45°. Para estas condições, a maior rebarba está presente na aresta de 45° da condição CL08 (Fig. 4.19(d)). As condições CL06 e CL07, mostradas em Fig. 4.19(b) e Fig. 4.19(d), também apresentaram rebarbas mais pronunciadas. Nas arestas com 90° é observada uma pequena rebarba para a condição CL05 (Fig. 4.19(e)) e CL08 (Fig. 4.19(h)). Não foram observadas rebarbas para arestas com 135°.

Na Fig. 4.20(a) a (l) são mostradas as arestas das amostras retificadas sob as condições de CL09 a CL12. A maior rebarba é observada para a aresta de 45° da condição CL10 (Fig. 4.20(b)), seguida da aresta de mesmo ângulo para a condição CL12 (Fig. 4.20(d)), ambas condições concordantes. Nas arestas de 90° de todas as condições são observadas pequenas projeções de material. Não são observadas rebarbas nas arestas com 135°.

Na Fig. 4.21(a) a (l) são mostradas as arestas das amostras retificadas sob as condições CL13 a CL16, respectivamente. Estas são as condições de corte mais severas utilizadas no ensaios de usinagem em laboratório. Nestas condições foram observadas rebarbas maiores que aquelas nas demais condições. A maior rebarba é para a condição CL16, como mostrado na Fig. 4.21(d). Rebarbas de dimensões maiores foram observadas também nas arestas com 45° das condições CL13 (Fig. 4.21(a)), CL14 (Fig. 4.21(b)) e CL15 (Fig. 4.21(c)). Para as arestas com 90° são observadas rebarbas nas condições CL14 e CL16, mostradas nas Fig. 4.21(f) e (Fig. 4.21(h)), respectivamente. Novamente não foi observado formação de rebarba nas arestas com ângulo de entrada de 135°.

Dentre as condições de usinagem as que apresentaram maiores rebarbas são condições de usinagem pares, que são condições com direção de corte concordante. Comparando por exemplo as condições CL03 (Fig. 4.18(c)) e CL04 (Fig. 4.18(d)), a condição CL04 apresenta uma rebarba maior, sendo que a diferença entre as duas condições é apenas a direção de corte. O mesmo ocorre quando comparadas as condições CL15 (Fig. 4.21(c)) e CL16 (Fig. 4.21(d)).

O ângulo da aresta de entrada é bastante influente na formação das rebarbas. Em

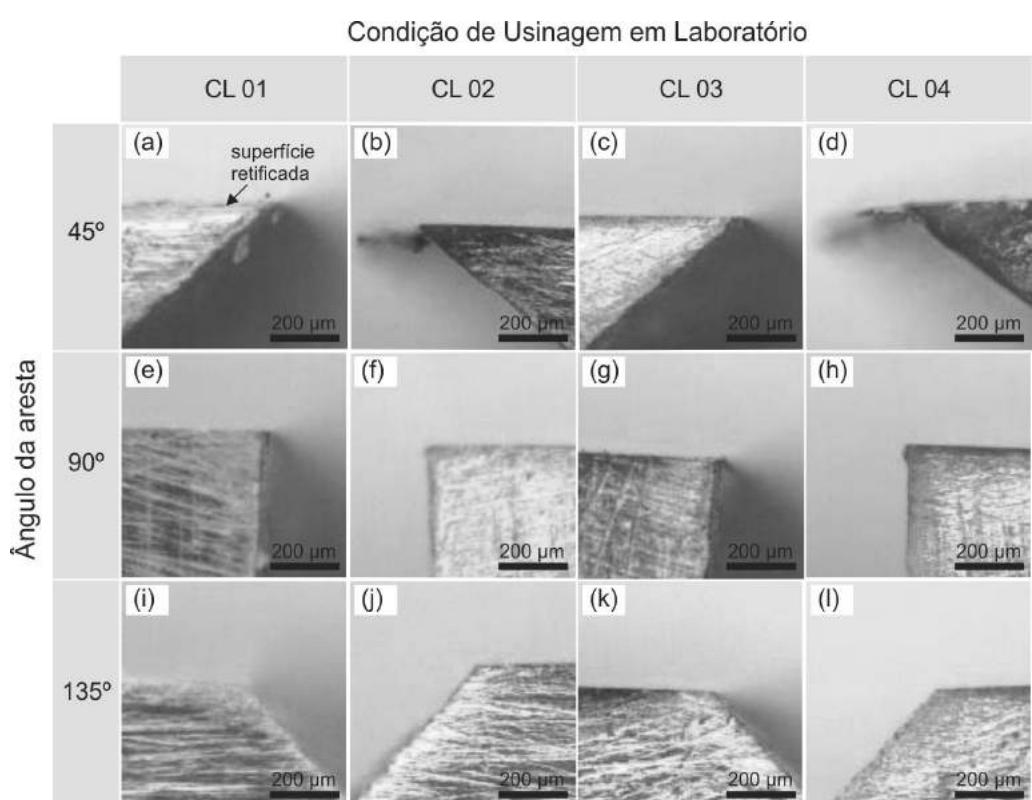


Figura 4.18: Imagens das superfícies laterais e das arestas de entrada do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL01 a CL04.

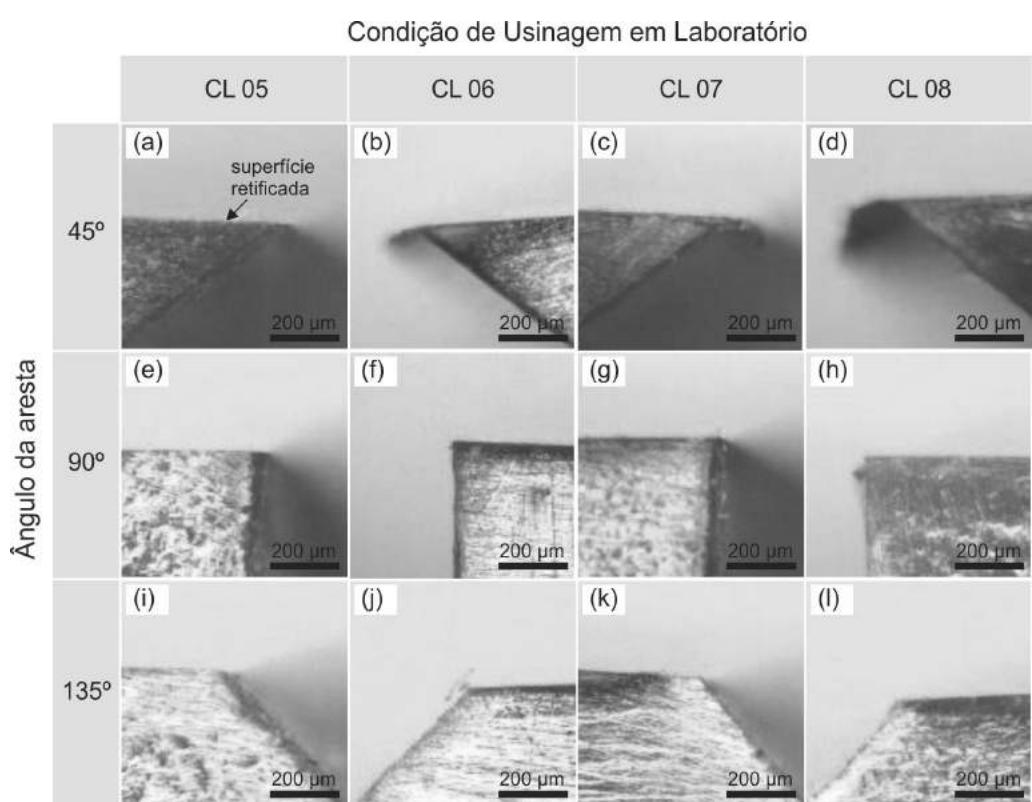


Figura 4.19: Imagens das superfícies laterais e das arestas de entrada do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL05 a CL08.

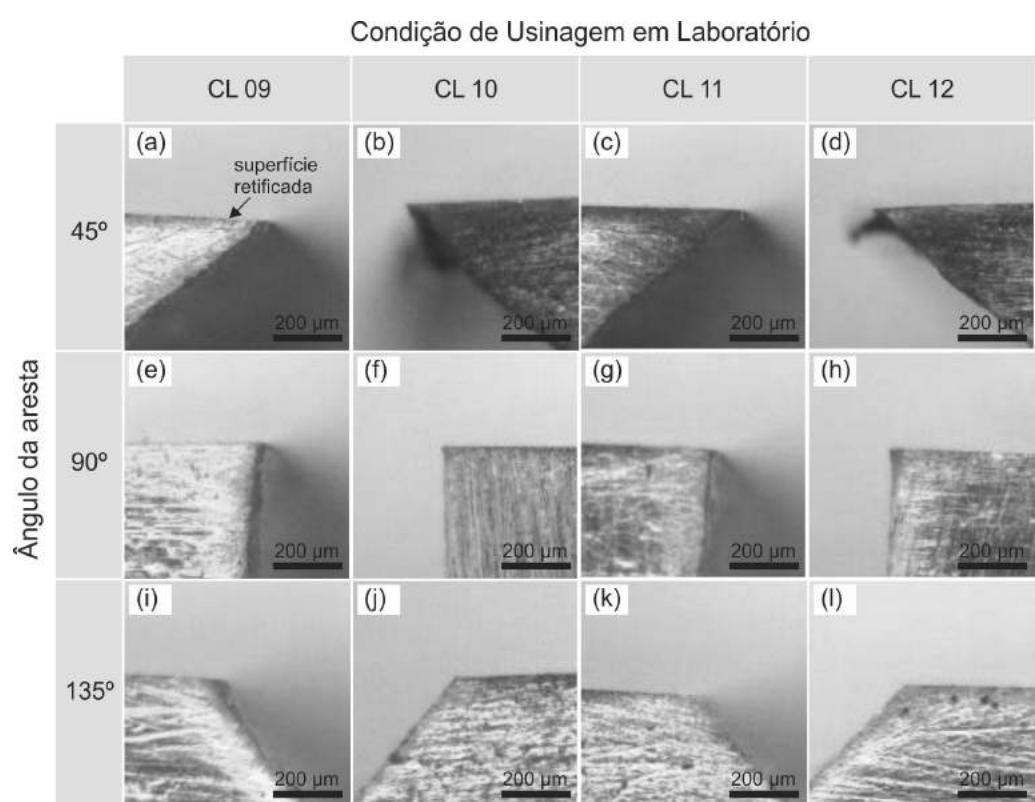


Figura 4.20: Imagens das superfícies laterais e das arestas de entrada do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL09 a CL12.

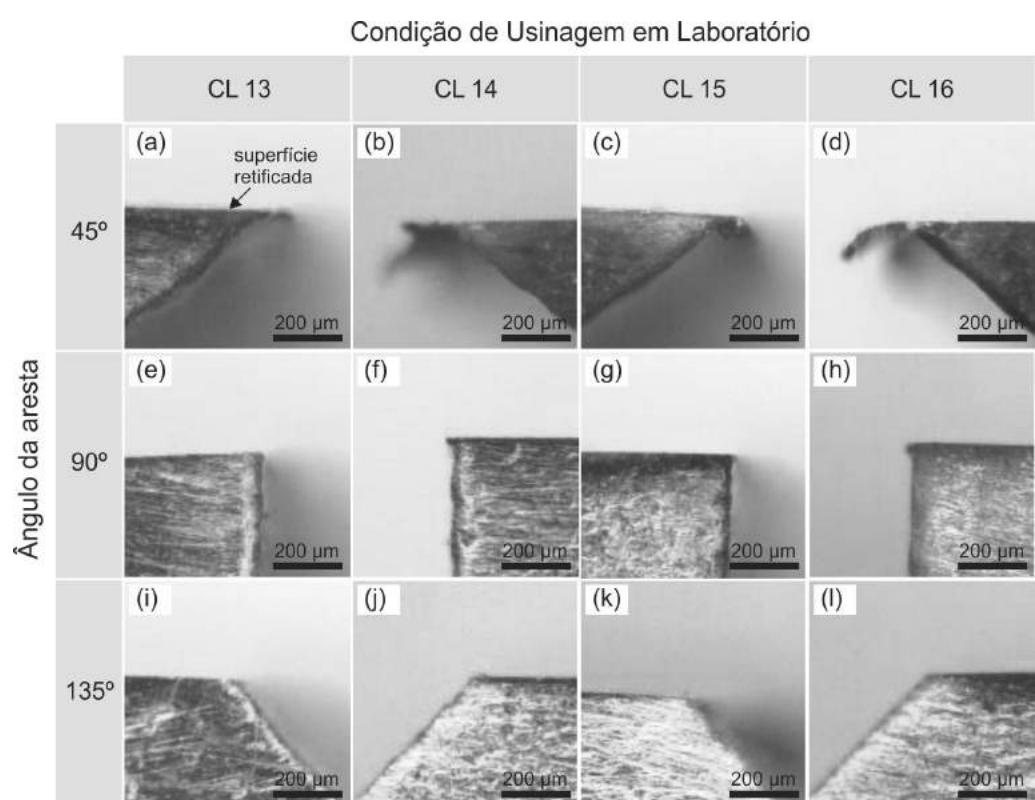


Figura 4.21: Imagens das arestas de entrada do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL13 a CL16.

geral quanto menor o ângulo são observadas rebarbas mais pronunciadas. Este ângulo da aresta faz com que haja menor quantidade de material para oferecer resistência ao se aproximar da aresta fazendo com que o material se dobre em torno dela.

A influência da velocidade de mergulho (v_f) na formação de rebarba, pode ser observada comparando a Fig. 4.18 com a Fig. 4.19 e a Fig. 4.20 com a Fig. 4.21. As arestas equivalentes são identificadas com as mesmas letras, sendo que as Figs. 4.18 e Fig. 4.20 representam o nível mais baixo de velocidade de mergulho, enquanto as figuras Fig. 4.19 e Fig. 4.21 o nível mais alto. Não é possível observar uma diferença significativa nas rebarbas apresentadas para os dois níveis deste parâmetro utilizando este aumento. Foram obtidas imagens com aumento maior para chegar a conclusões mais esclarecedoras, que serão apresentadas na seção de análise de rebarbas via MEV.

As rebarbas formadas nas condições com velocidade de corte (v_s) no nível mais baixo são aquelas mostradas nas Fig. 4.18 e Fig. 4.19, sendo respectivamente equivalentes àquelas de nível mais alto apresentadas nas Fig. 4.20 e Fig. 4.21. As arestas equivalentes são identificadas com as mesmas letras. O que difere a imagem da aresta na Fig. 4.18(c) da Fig. 4.20(c), CL07 e CL11 respectivamente, é a velocidade de corte, que é mais alta para esta última. Ao comparar as imagens entre elas, observa-se que não há uma diferença notável entre as rebarbas para a ampliação selecionada. Similarmente, a comparação entre as rebarbas mostradas nas imagens das Fig. 4.19 e Fig. 4.21 permite inferir que não há diferença significativa entre elas. A comparação do efeito da velocidade de corte também será realizada entre as imagens obtidas via MEV, a serem apresentadas na próxima sessão.

Esta análise preliminar sobre as dimensões e formas das rebarbas observadas nas arestas das amostras após os ensaios de usinagem realizados em laboratório permite obter uma visão geral das condições de ensaios que resultaram nas maiores rebarbas. Desta análise pode-se afirmar que os parâmetros de corte que mais exercem influência na formação de rebarba são o ângulo da aresta e a direção de corte. A ampliação ou aumento proporcionado pelo estereomicroscópio, contudo, não foi suficiente para evidenciar detalhes das rebarbas e os efeitos dos demais parâmetros. Por este motivo foram escolhidas condições específicas e realizada Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

4.2.2.2 Análise das Rebarbas na Aresta de Entrada Através de MEV

A seguir são apresentadas imagens das rebarbas nas arestas de entrada obtidas através de MEV após algumas condições de usinagem, escolhidas de forma a comparar a influência de cada um dos parâmetros. Nas figuras Fig. 4.22 e Fig. 4.23 são mostradas as rebarbas nas arestas de entrada com ângulo de 45° para condições com direção de corte concordante e discordante respectivamente. Este ângulo foi selecionado por ser aquele que resultou nas dimensões mais expressivas das rebarbas.

Na Fig. 4.22, cujas condições são para a direção de corte concordante o sentido de corte o rebolo move-se na direção da peça, porém devido ao sentido de rotação, os grãos abrasivos passam pela superfície na direção do canal. Este movimento faz com que uma porção de material seja projetada, formando portanto as rebarbas na entrada.

Já para as arestas apresentadas na Fig. 4.23, direção de corte discordante, o movimento dos grão abrasivos é no sentido da peça. Nestas condições de corte, a direção de corte faz com que os grãos cortem o material no sentido da peça, assim não são observadas rebarbas significativas, são materiais aderidos a aresta que não formam uma seção contínua. A condição CL06 (Fig. 4.22(c)) é equivalente a condição CL05 (Fig. 4.23(a)), mas com direção de corte oposto, na primeira há a presença de rebarba enquanto na segunda o material parece ter sido arrancado deixando apenas alguns fragmentos. Destas imagens observa-se que a direção de corte é bastante influente na formação das rebarbas nas arestas de entrada.

Nas imagens obtidas através do estereomicroscópio não foi observada influência direta do aumento da velocidade da peça no tamanho das rebarbas formadas. Através das imagens de MEV da Fig. 4.22, é possível fazer uma comparação das rebarbas formadas após a usinagem com as condições CL02 (Fig. 4.22(a)) e CL06 (Fig. 4.22(c)), de velocidade da peça (v_w) no nível mais baixo, e aquelas geradas nas condições CL04 (Fig. 4.22(b)) e CL08 (Fig. 4.22(d)) com v_w no nível mais alto. Observa-se que há uma tendência no aumento do tamanho da rebarba com a diminuição da velocidade de trabalho. A rebarba gerada na condição CL08 (Fig. 4.22(d)), por exemplo, quando comparada com aquela da CL06 (Fig. 4.22(c)) apresenta uma diferença visível, com detalhe para uma rebarba com curvatura acentuada.

A provável explicação para o aumento de tamanho com a diminuição da velocidade da peça é que o rebolo ao passar pela região da aresta, a peça permaneça por mais tempo com baixo v_w do que quando ela passa mais rápido, com v_w maior. Este tempo prolongado de contato faz com que um maior número de grãos atue empurrando material no movimento de corte. Desta forma, na região próxima à aresta, a porção de material que será removida fica mais alongada, formando rebarbas maiores. Além disso, como mostrado para análise da queima, para menores velocidades da peça o calor na região de contato é maior. Segundo Aurich, Sudermann e Bil (2005), quanto maior o fluxo de calor na região de contato, maiores serão as rebarbas formadas.

Comparando as rebarbas formadas nas condições CL02 e CL06, Fig. 4.22(a) e Fig. 4.22(c) respectivamente, é possível observar que ao aumentar a velocidade de mergulho do rebolo (v_f), de CL02 para CL06, a rebarba reduz seu comprimento. O mesmo acontece com aquelas das condições CL04 e CL08 (Fig. 4.22(b) e Fig. 4.22(d)). O efeito parece análogo ao da velocidade de trabalho. Quando se aumenta a velocidade de penetração, no mesmo intervalo de tempo o rebolo penetra mais na peça, porém há um menor tempo de contato, o que resulta em rebarbas menores.

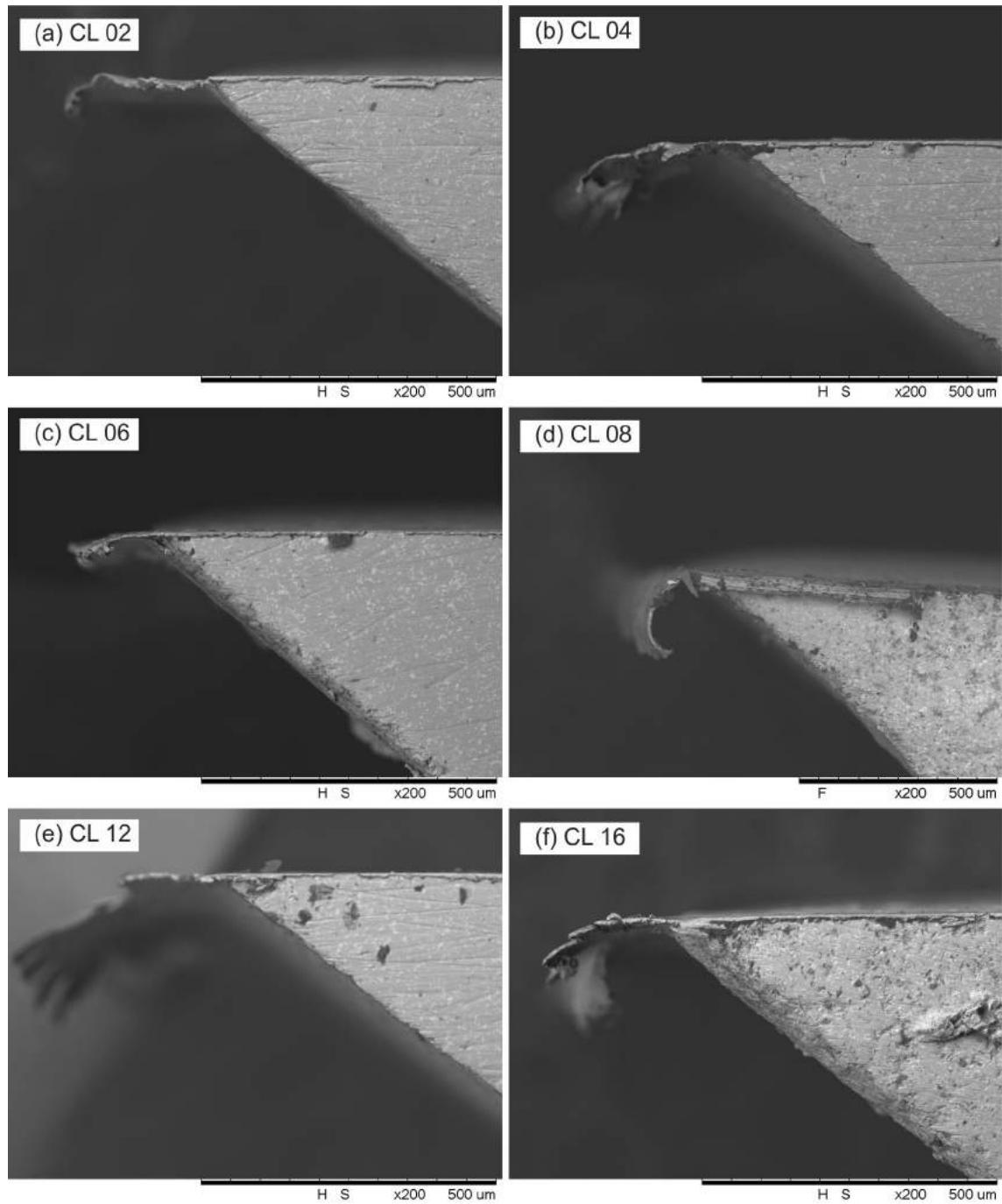


Figura 4.22: Imagens das rebarbas das arestas de entrada com ângulo de 45° e direção de corte concordante, obtidas através de MEV para os Ensaios em Laboratório.

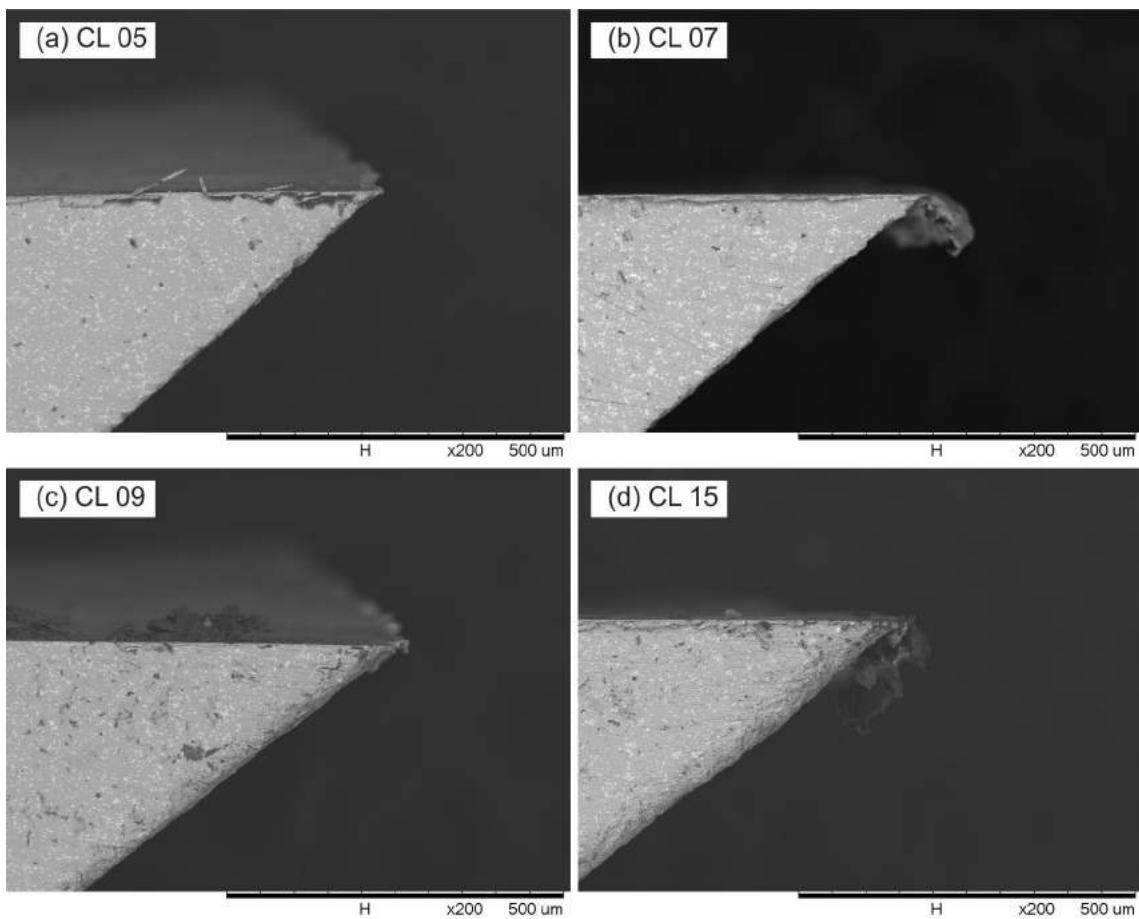


Figura 4.23: Imagens das rebarbas das arestas de entrada com ângulo de 45° e direção de corte discordante, obtidas através de MEV para os Ensaios em Laboratório.

Depois do ângulo da aresta e da direção de corte, a velocidade do rebolo mostrou ser o terceiro parâmetro mais influente quanto ao tamanho das rebarbas observadas. Comparando as condições CL04 e CL12 (Fig. 4.22(b) e Fig. 4.22(e)) respectivamente, é possível observar que após a usinagem com condição de maior velocidade de rebolo (CL12) a rebarba foi maior. O mesmo efeito é observado para as rebarbas geradas nas condições CL08 e CL16 (Fig. 4.22(d) e Fig. 4.22(f)), respectivamente. O aumento da velocidade do rebolo, que indica que o rebolo passa mais vezes pela aresta resulta na projetação de uma porção maior de material.

As observações apresentadas até o momento foram realizadas através da análise das rebarbas formadas na aresta de entrada do rebolo na peça. Na próxima sessão serão analisadas as rebarbas formadas na região da peça durante a saída do rebolo (rebarbas de saída).

4.2.2.3 Investigação das Rebarbas nas Areastas de Saída

Nesta sessão serão mostrados os resultados obtidos para as arestas formadas entre a parte final da superfície retificada (região de saída do rebolo) e cada superfície resultante dos ângulos estudados para as diferentes condições de corte empregadas em laboratório (CL).

Nas Figs.4.24, Fig. 4.25, Fig. 4.26 e Fig. 4.27 são apresentadas as imagens das arestas para as 16 condições de usinagem em laboratório (Conforme Tab. 3.2) e para os três diferentes ângulos de saída, 45°, 90°e 135°.

Observa-se a formação de rebarbas na maioria das imagens obtidas. Quando o rebolo realiza o corte, e passa pela superfície a ser usinada, os grãos projetam o material no sentido de corte e atuam no sentido de expulsá-la e promovendo, portanto, a sua remoção. Entretanto, ao chegar na aresta (saída da superfície), o material removido não é mais apoiado pela região à frente da região de corte, e por não existir mais apoio, esta porção de material é projetada para o exterior da peça formando portanto a rebarba na aresta de saída.

Na Fig. 4.24 são observadas rebarbas nas arestas com 45°após a usinagem com as condições CL03 (Fig. 4.24(c)) e CL04 (Fig. 4.24(d)) (Tab.3.2). A rebarba para aresta unsinada sob a condição CL03 é bem maior que para a condição CL04. Nas arestas com 90°e 135°não foram observadas rebarbas.

Na Fig. 4.25 são apresentadas as imagens das superfícies perpendiculares às superfícies retificadas (arestas formadas pela superfície retificada e superfícies com ângulos de 45°e 90°). Arestas com as rebarbas mais pronunciadas são observadas nas imagens obtidas após a retificação com as condições CL07 (Fig. 4.25(c)) e CL08 (Fig. 4.25(d)), seguidas pelas arestas produzidas após usinagem com as condições CL05 (Fig. (4.25(a))) e CL06 (Fig. 4.25(b)). Para as arestas com ângulos de 90°, condições CL05 (Fig. 4.25(e)) e CL07 (Fig. 4.25(g)), em que foi empregado o sentido de corte discordante, também foram observadas rebarbas. Já nas arestas formadas pelo ângulo de 135°(Fig. 4.25(i)) a Fig. 4.25(l)) não foram observadas rebarbas.

Na Fig. 4.26 as rebarbas mais significativas são encontradas nas arestas com 45°. Para a aresta de 90°da condição CL11 (Fig. 4.26(g)) também observa-se uma rebarba acen-tuada. Para as arestas com 135°não foram observadas rebarbas.

Na Fig. 4.27 são apresentadas as imagens das arestas obtidas após a retificação com as condições CL13 a CL16, região de saída do rebolo. Nestas condições foram observadas as maiores rebarbas de saída. A maior rebarba foi notada para a condição CL15 (Fig. 4.27(c)) ângulo de 45°, seguida da condição CL16 (Fig. 4.27(d)) também com ângulo de 45°. Na Fig. 4.27(g), (CL15), também observou-se rebarba que apresenta a maior dimensão encontrada dentre todas as condições de usinagem com arestas formada pelo ângulo de 90°. Entretanto, não foram observadas rebarbas para arestas formadas pelo ângulo de 135°.

Ao comparar as imagens das superfícies mostradas nas Fig. 4.24(c),Fig. 4.26(d), Fig. 4.27(c), é possível inferir que a geometria da aresta formada entre a superfície usinada e a superfície com os ângulos estudados exerce bastante influência na formação da rebarba de saída nas condições investigadas em laboratório (CL). Para as arestas formadas com o ângulo de 45°são observadas rebarbas com dimensões maiores do que aquelas para as geometrias de 90°e 135°. Na Fig. 4.27(g), rebarba gerada para uma condição com aresta de 90°, observa-se

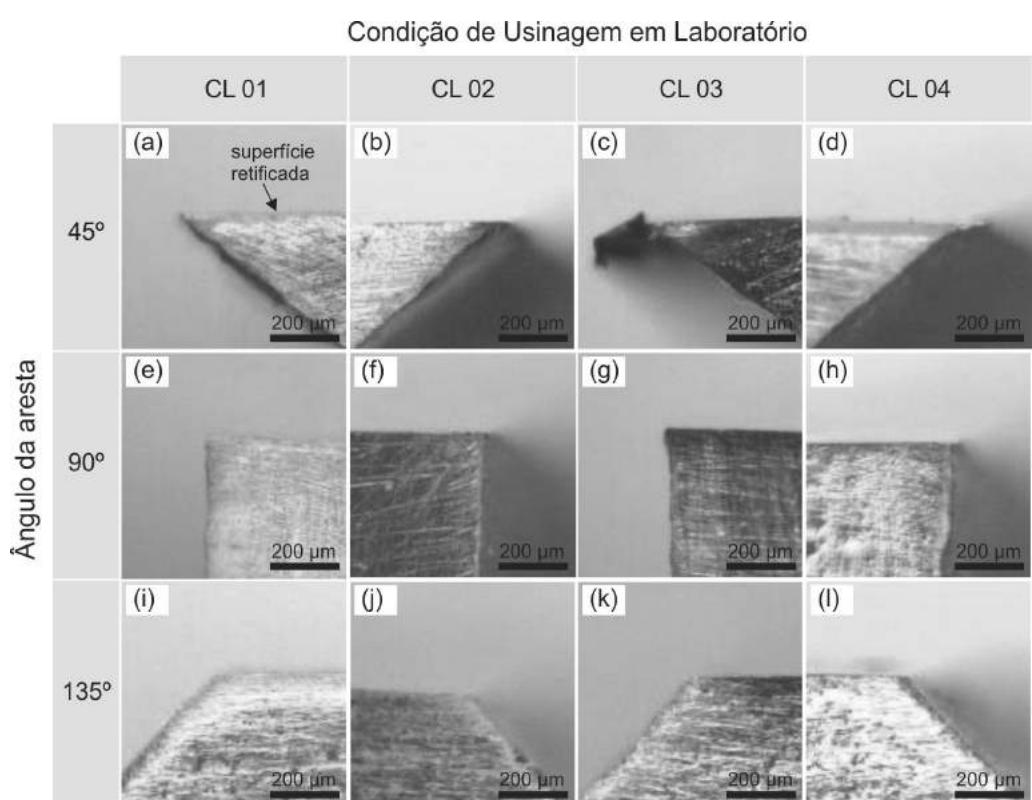


Figura 4.24: Arestas de saída do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL01 a CL04 da Tab.3.2.

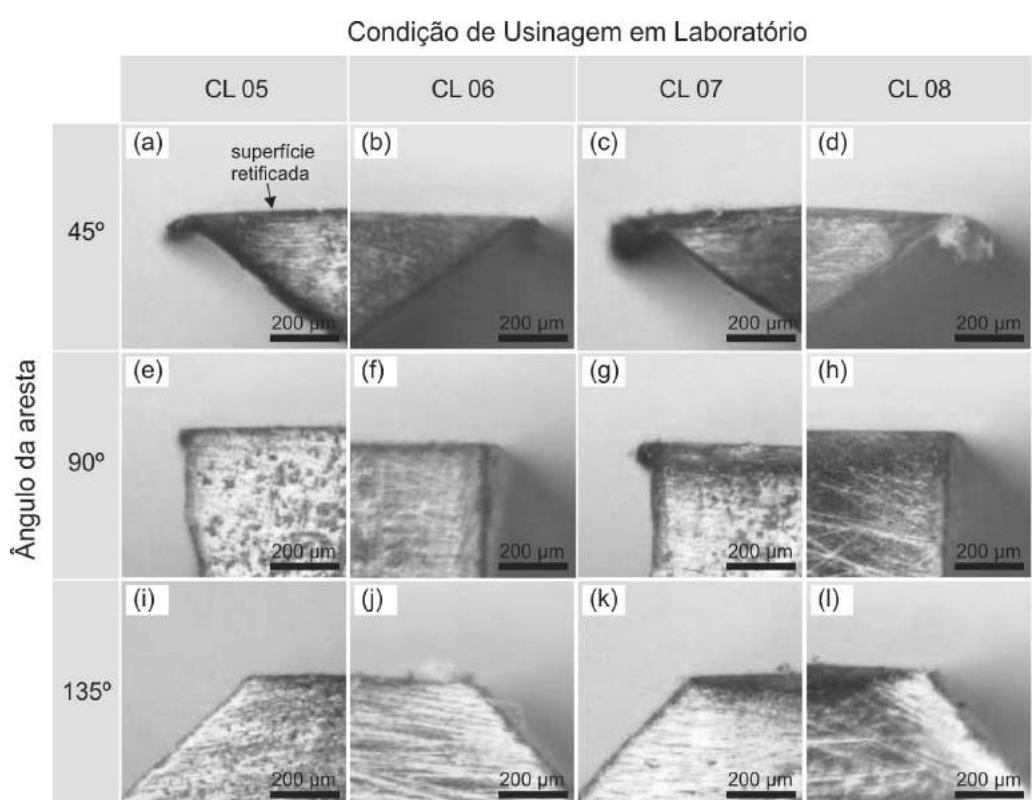


Figura 4.25: Areias de saída do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL05 a CL08 da Tab.3.2.

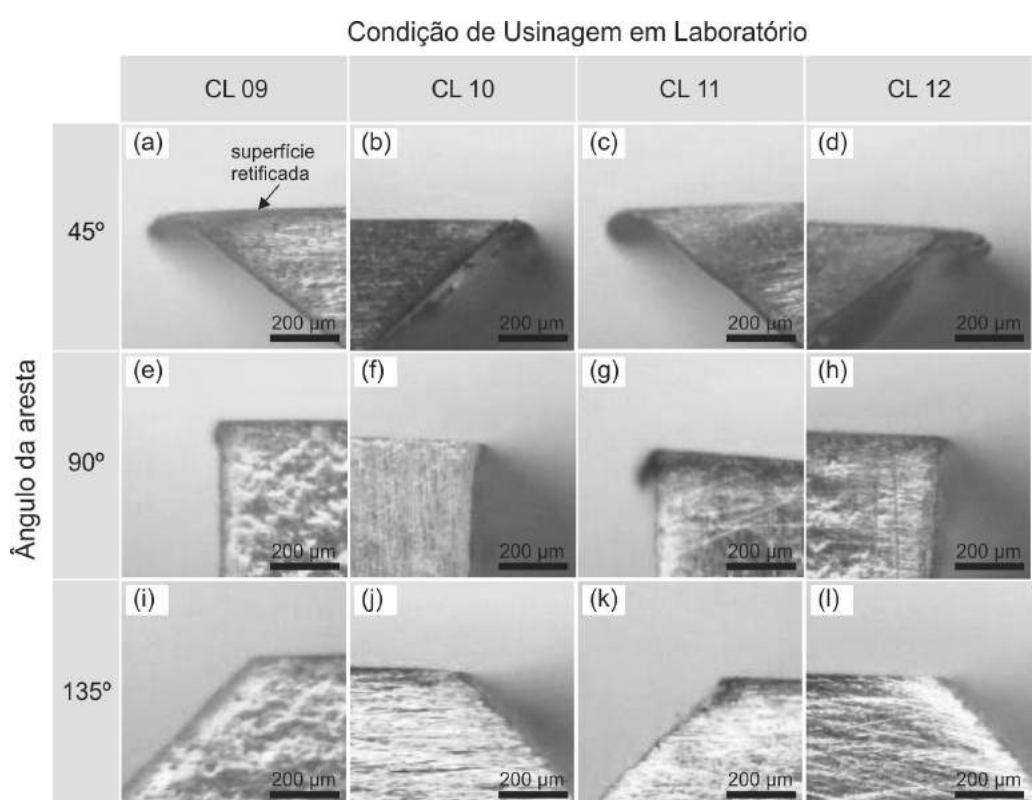


Figura 4.26: Arestas de saída do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL09 a CL12 da Tab.3.2.

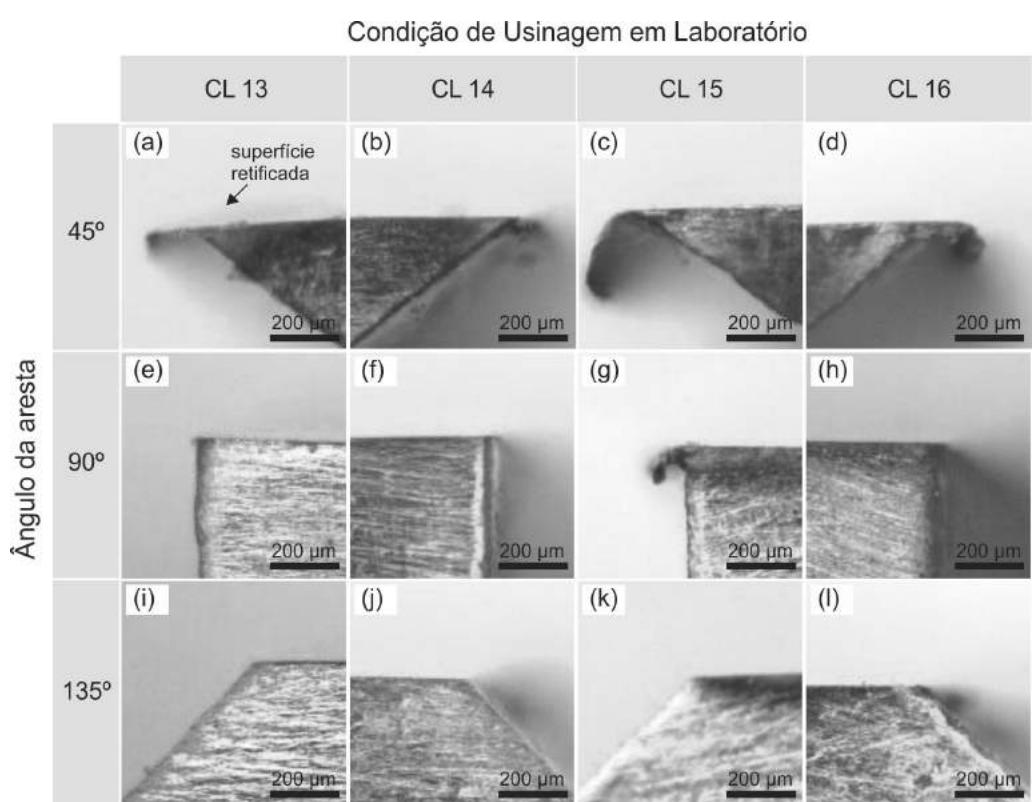


Figura 4.27: Areias de saída do rebolo na peça em diferentes ângulos - Condições de CL13 a CL16 da Tab.3.2.

uma rebarba considerável, mas um pouco menor que aquela formada para uma aresta com ângulo de 45°(Fig. 4.27(c)).

As condições de número par representam condições com direção de corte concordante, enquanto as ímpares direção discordante. Na Fig. 4.24 a comparação pode ser feita entre a primeira (CL 01)(Fig. 4.24(a), Fig. 4.24(e), Fig. 4.24(i)) e a segunda coluna (condição CL02) (Fig. 4.24(b), Fig. 4.24(f), Fig. 4.24(j)), ou ainda entre a terceira (CL03)(Fig. 4.24(c), Fig. 4.24(g), Fig. 4.24(k)) e a quarta coluna (CL04)(Fig. 4.24(d), Fig. 4.24(h), Fig. 4.24(l)).

Ao comparar as imagens nas Fig. 4.25, Fig. 4.26 e Fig. 4.27. pode-se observar que as maiores rebarbas foram encontradas após usinagem com as condições de corte que empregaram a direção de corte discordante. A rebarba para condição com corte discordante CL15 (Fig. 4.27(c)), por exemplo, é maior que a condição com direção de corte concordante, CL16 (Fig. 4.24(d)).

A velocidade da peça (v_w) diminui entre as condições CL01 e CL03, mantendo os demais parâmetros de corte constantes. Ao observar as imangens na Fig. 4.24, e comparar com aquelas da primeira coluna (CL01)(Fig. 4.24(a), Fig. 4.24(e), Fig. 4.24(i)) com aquelas da terceira coluna (CL03)(Fig. 4.24(c), Fig. 4.24(g), Fig. 4.24(k)), ou ainda a segunda (CL02)(Fig. 4.24(b), Fig. 4.24(f), Fig. 4.24(j)) com a quarta coluna (CL04)(Fig. 4.24(d), Fig. 4.24(h), Fig. 4.24(l)), é possível observar que a rebarba aumenta com a diminuição da velocidade da peça (de CL01 para CL03 ou CL02 para CL04). Analogamente, pode ser feita comparação entre as imagens das rebarbas formadas nas condições nas Fig. 4.25, Fig. 4.26 e Fig. 4.27.

O efeito da velocidade de mergulho (v_f) na dimensão das rebarbas pode ser observado entre as imagens das Fig. 4.24 e Fig. 4.25, como também entre as figuras Fig. 4.26 e Fig. 4.27. Condições identificadas com as mesmas letras são equivalentes, porém se altera o nível da velocidade de mergulho. Por exemplo, a condição CL03 (Fig. 4.24(c)) é equivalente a CL07 (Fig. 4.25(c)). Em geral a espessura das rebarbas aumentou com a velocidade de mergulho, o que pode ser observado ao comparar aos pares as imagens das Fig. 4.26(g) e Fig. 4.27(g), ou ainda da Fig. 4.26(d) e Fig. 4.27(d).

Para observar o efeito da velocidade de corte (v_s) nas rebarbas, é preciso comparar as imagens nas Fig. 4.24 (a) (CL01) e Fig. 4.26(a) (CL09) e também entre as Fig. 4.25 e Fig. 4.27.

A partir das observações das várias imagens das superfícies preparadas das amostras é possível afirmar que a geometria da aresta da peça exerce grande influência na formação de rebarba de saída nas condições investigadas. Além disso, as rebarbas de saída são maiores que as rebarbas de entrada. Para condições com direção de corte discordante foram observadas maiores rebarbas. Apesar de ser possível identificar as principais tendências de formação de rebarba, de acordo com os parâmetros de usinagem, existe a limitação da ampliação da imagem

pelo estereomicroscópio utilizado. Para observar com maiores detalhes as rebarbas de saída, foram realizadas imagens através de MEV, apresentadas na sub-sessão a seguir. Na próxima sessão serão discutidos com maiores detalhes a influência dos parâmetros de corte.

4.2.2.4 Análise das Rebarbas na Aresta de Saída Através de MEV

Nas Fig. 4.28(a) a Fig. 4.28(d) são mostradas as imagens das arestas de saída em condições com sentido de corte concordante obtidas através de MEV apenas para as condições que geraram rebarbas de saída consideradas significantes. No movimento de corte concordante a velocidade tangencial do rebolo tem a mesma direção e sentido que a velocidade da peça (v_w).

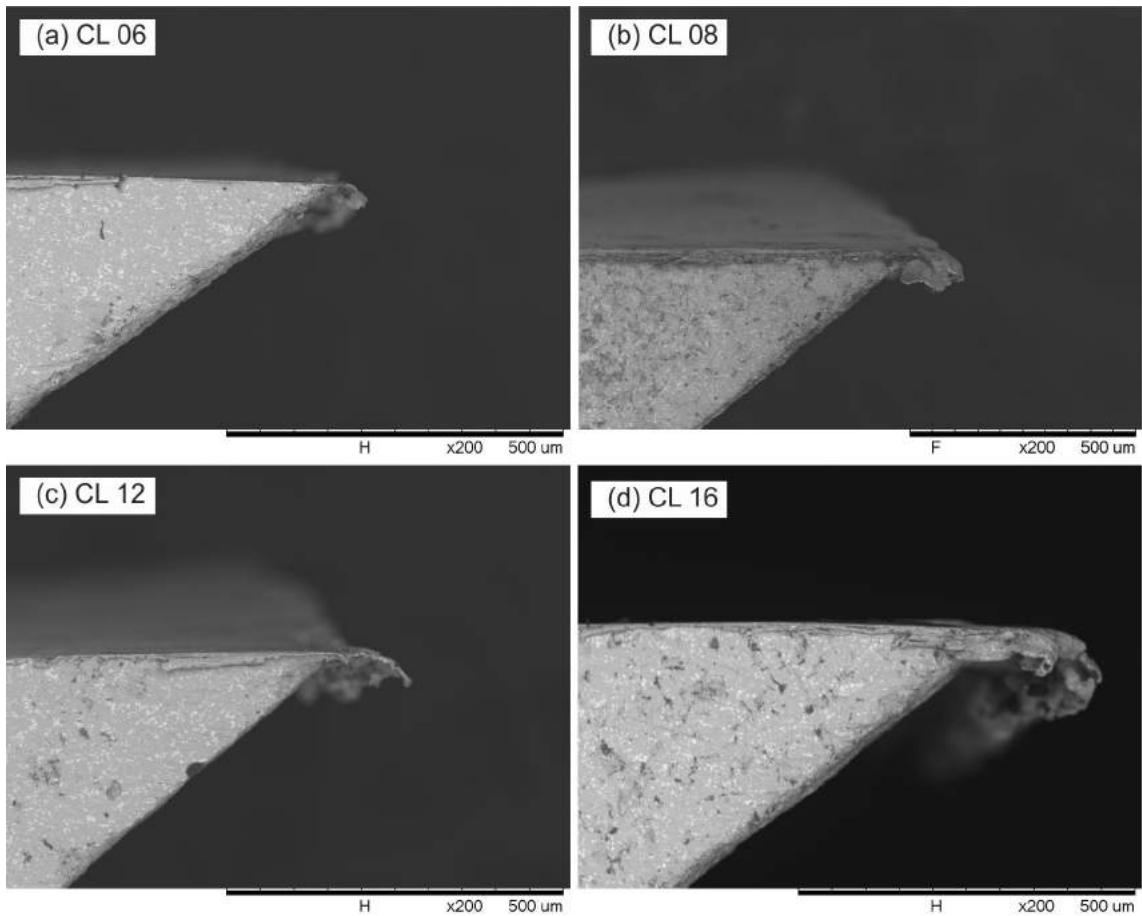


Figura 4.28: Imagens obtidas através de MEV das rebarbas formadas nas arestas de saída com o ângulo de 45°, na direção de corte concordante nos Ensaios em Laboratório.

Na Fig. 4.28 é possível observar também o efeito da velocidade da peça comparando as condições CL08, com menor valor de velocidade de trabalho (Fig. 4.28(b)), e CL06 com maior valor de velocidade de trabalho (Fig. 4.28(a)). A diminuição da velocidade da peça proporciona maiores temperaturas na região de corte. Para retificação de mergulho este

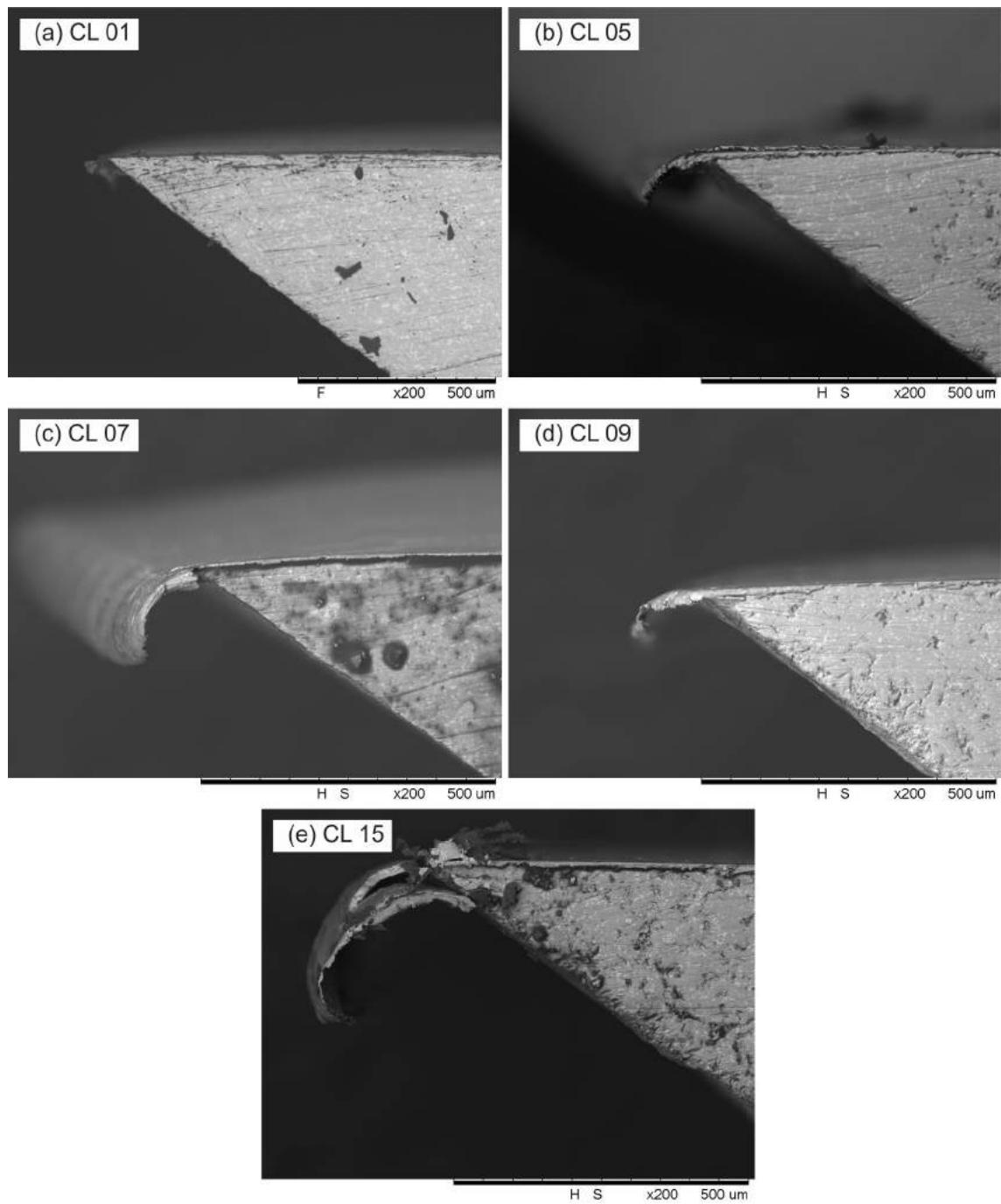


Figura 4.29: Rebaras das arestas de saída com 45° , em corte discordante, obtidas através de MEV nos Ensaios em Laboratório.

aumento também causa o aumento da profundidade de corte devido ao tempo de contato longo. De acordo com Aurich *et al.* (2009), a penetração de trabalho e a velocidade da peça são os parâmetros de corte que mais influenciam na formação de rebarba.

Das imagens na Fig. 4.28, merece atenção aquelas nas Fig. 4.28(c) (CL12) e Fig. 4.28(d) (CL16). A diferença entre estas duas condições está apenas na velocidade de mergulho (v_f), conforme Tab. 3.2. Para a condição CL12, por exemplo, o sentido de corte do rebolo seria da direita para a esquerda, enquanto a peça se descolaria da direita para esquerda. Este movimento faz com que os grãos abrasivos empurrem material para dentro da superfície retificada. Assim, a rebarba observada é provavelmente resultado do movimento da peça que, ao deixar o rebolo, faz com que a porção final de material próximo à aresta seja estendida por deformação. Ao aumentar a velocidade de mergulho (CL12 para CL16), a dimensão da rebarba também aumenta. Com o aumento deste parâmetro há um consequente aumento da penetração de trabalho por volta. O aumento também resulta no aumento da espessura equivalente de corte. Como o cavaco formado terá maior seção transversal, a tendência é que a rebarba também tenha suas dimensões aumentadas.

De forma semelhante ao observado para as rebarbas de entrada, a velocidade do rebolo foi o parâmetro de maior influência no tamanho da rebarba. Comparando as imagens das rebarbas nas condições CL08 (Fig. 4.28(b)) com a CL16 (Fig. 4.28(d)), é possível identificar que a condição de maior velocidade do rebolo (CL16) foi aquela que resultou na maior rebarba. A provável causa desta tendência pode ser explicada com base no mesmo fenômeno já descrito anteriormente, o aumento do número de grãos abrasivos em contato com a superfície da peça eleva a geração de calor e causa deformação de material principalmente na aresta de saída. Desta forma a rebarba será mais alongada nestas condições. Nota-se que em um mesmo intervalo de tempo, ao dobrar a velocidade, estima-se que o dobro de grãos também passará pela mesma aresta. Ao aumentar a velocidade do rebolo, mais material foi projetado na aresta, formando rebarbas maiores.

No caso das condições com direção de corte discordantes, mostradas na Fig. 4.29, o formato da rebarba é bastante diferente das rebarbas com sentido concordante mostradas na Fig. 4.28. O movimento de saída do rebolo da peça faz com que os grãos empurrem o material para região de saída, onde a porção de material encontrada próxima da aresta é projetada para fora. As rebarbas formadas neste caso são maiores que aquelas produzidas para direção de corte concordante.

Semelhantemente ao que foi observado quando se analisou as arestas formadas após usinagem com sentido de corte concordante, o aumento da velocidade da peça (CL07, Fig. 4.29(c)) para CL05 (Fig. 4.29(b)) implicou na formação de rebarbas com dimensões menores. A provável explicação para as rebarbas geradas tanto nas condições com sentido de corte concordante quanto para aquelas para o sentido discordante é a mesma. O aumento da velocidade da peça faz com que esta se desloque mais rapidamente, diminuindo

o tempo de contato entre o rebolo e peça. O fluxo de material deformado, juntamente com o cavaco, é empurrado na direção de saída do rebolo mais rapidamente e, não sofrendo cisalhamento, encurva sobre si na direção de corte, gerando uma rebarba com dimensão menor que aquela observada quando a velocidade da peça é menor. Este tipo de rebarba também é encontrado frequentemente após o fresamento em materiais dúcteis, pois é formada arestas da superfície livre das peças, local onde a força de corte será nula.

O aumento da penetração do rebolo da condição CL01 (Fig. 4.29(a)) para a condição CL05 (Fig. 4.29(b)) causa o aumento da rebarba. Este aumento pode estar relacionado com o aumento da profundidade de corte por volta. Na Fig. 4.29 as imagens para as condições CL01 (Fig. 4.29(a)) e CL09 (Fig. 4.29(d)) são aquelas obtidas após usinagem com menor valor de penetração ($3 \mu\text{m/volta}$), enquanto que a imagem para a condição CL05 (Fig. 4.29(b)) foi aquela obtida com profundidade intermediária ($6 \mu\text{m/volta}$). As condições CL07 (Fig. 4.29(c)) e CL15 (Fig. 4.29(e)) possuem a maior profundidade de corte por volta ($12 \mu\text{m/volta}$). Nota-se que este parâmetro exerce grande influência na formação de rebarba. A relação está na quantidade de material a ser removida na região de saída formada pela extensão da aresta de corte até o ponto de contato com o rebolo.

Após a usinagem com condições com corte no sentido discordante, observou-se que o aumento da velocidade de corte aumentou as dimensões das rebarbas. As imagens obtidas para a condição CL07 (Fig. 4.29(c)) possuem a mesma penetração de trabalho por volta que aquelas da condição CL15 (Fig. 4.29(e)), mas a condição CL15 possui velocidade de corte maior. Ao comparar estas imagens é possível observar que a rebarba é maior para a condição CL15, reforçando os resultados e análises anteriores de que o aumento da velocidade de corte implica no aumento das dimensões das rebarbas.

4.3 Resultados dos Ensaios de Usinagem na Empresa

Nesta sessão serão apresentados os resultados obtidos após ensaios de usinagem na empresa (CE). Eles estão subdivididos em análise da queima e investigação da formação de rebarba.

Na primeira parte são apresentados os resultados da análise da queima, através da espessura da camada mais escura observada durante os ensaios. Serão apresentados também os valores de microdureza a partir da superfície. Em seguida serão apresentadas as imagens das arestas para investigação da formação da rebarba.

Os ensaios foram realizados na empresa nas condições reais de fabricação (Tab. 3.4). Após os ensaios de usinagem foram coletadas amostras dos machos de corte, armazenadas em óleo e levadas para análise em laboratório.

Na Fig. 4.30 são apresentadas as imagens das arestas obtidas através do estereomicroscópio, conforme a metodologia apresentada nas figuras Fig. 3.3 e Fig. 3.22. Inicialmente

foram capturadas imagens das superfícies contendo rebarbas como mostrado na Fig. 4.30(a), que serão apresentadas na sub-seção “Investigação da Formação de Rebarba”. Após a remoção das rebarbas, com auxílio de uma pinça, então foram obtidas novas imagens com aquelas mostradas na Fig. 4.30(b), que serão apresentadas e comentadas sub-seção “Análise da Queima”.

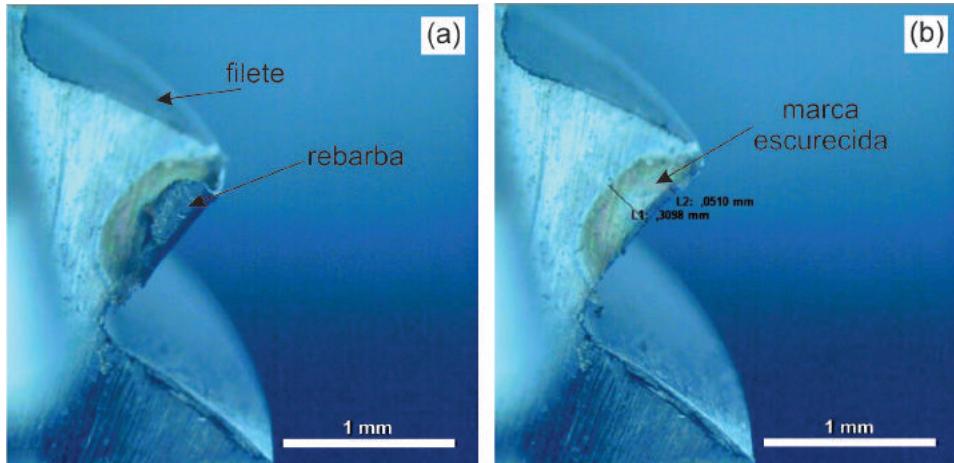


Figura 4.30: Areias entre o canal dos machos e a superfície retificada dos filetes nos ensaios de usinagem na empresa: (a) rebarbas formadas no processo e em (b) marca de retificação evidenciando a queima de retificação.

4.3.1 Análise da Queima nos Machos de Corte

Para a análise da queima nas amostras de machos de corte serão apresentados os resultados da medição da espessura da camada afetada e da microdureza na sub-superfície retificada de machos de corte.

4.3.1.1 Espessura da Camada Queimada nos Machos de Corte

Foram feitas medições da epessura da camada escura para as 8 condições em duas réplicas (A e B). Os valores das medições são apresentados na Tab.4.4. Os valores considerados foram medidos tomando como base o limite entre a camada mais escura e aquela de cor mais clara (típica de material sem influência do calor gerado na retificação).

Nas Fig. 4.31(a) a Fig. 4.31(h) são mostradas imagens da superfície dos filetes com marcas de retificação na parede do canal, situadas entre a face do canal e a superfície retificada. Esta região não é retificada, porém a condução de calor da peça faz com que seja visualizada uma região escurecida causada pela oxidação da superfície. Na superfície retificada não foi observada mudança na coloração provavelmente por ter sido removida durante os passes de acabamento. Desta forma, a análise da região próxima à aresta permite estimar o nível de dano na subsuperfície da região retificada.

Tabela 4.4: Espessura da marca de retificação medida nas amostras após os ensaios na empresa (CE).

Condição Empresa (CE)	Espessura da marca de retificação (μm)			
	Réplica		Média	Desvio padrão (s)
	A	B		
1	74	73	73	1
2	309	289	299	14
3	197	256	227	41
4	220	240	230	14
5	74	78	76	3
6	405	429	417	16
7	219	217	218	1
8	260	270	265	7

De acordo com os resultados apresentados na Tab.4.4, as condições cujas amostras apresentaram maior espessura de marca escurecida são as condições CE02 (Fig. 4.31(b)) e CE06 (Fig. 4.31(f)). Na Fig. 4.32 são apresentados de forma gráfica os valores da espessura da marca de retificação apresentadas na Tab.4.4. As imagens das amostras que apresentaram menor espessura de marca escurecida são as condições CE01 (Fig. 4.31(a)) e CE05 (Fig. 4.31(e)).

As maiores marcas foram observadas para as condições CE02 e CE06. No entanto, essas não são condições de corte mais severas, quando comparadas com as condições CL07 e CL08. Para as condições CL02 e CL06, as arestas mostradas nas Fig. 4.31(b) e Fig. 4.31(f), respectivamente, apresentaram uma coloração diferente das demais arestas.

Na Fig. 4.33 são apresentadas as imagens dos filetes após usinagem com as condições CE02 (Fig. 4.33(a)) e CE06 (Fig. 4.33(b)), observa-se que próximo às arestas investigadas a coloração da superfície (plano da folha) não é uniforme. Nota-se nitidamente a presença de duas regiões, uma com marcas acobreadas e a outra com marca escurecida. Através das medições, a marca escurecida tem dimensões próximas às marcas observadas para condições CE01 e CE05, como é informado na Fig. 4.31. Porém, de acordo com o critério de medição adotado, foi considerada marca de retificação aquela alteração visível da coloração próxima à aresta do filete. Assim, os valores mostrados na Fig. 4.32 consideram a marca acobreada. Por este motivo, estas duas condições são aquelas que apresentam maior espessura de marca de retificação.

Após realizar a medição de microdureza, constatou-se que a marca acobreada na realidade não representa alteração da microestrutura. A coloração diferente aponta que não atingiu as mesmas temperaturas que as regiões com marcas escurecidas indicadas nas Fig. 4.33(a) e Fig. 4.33(b). Os resultados de microdureza serão apresentados na próxima sessão. Para efeito de comparação entre os parâmetros, será desconsiderada a marca acobreada. Desta

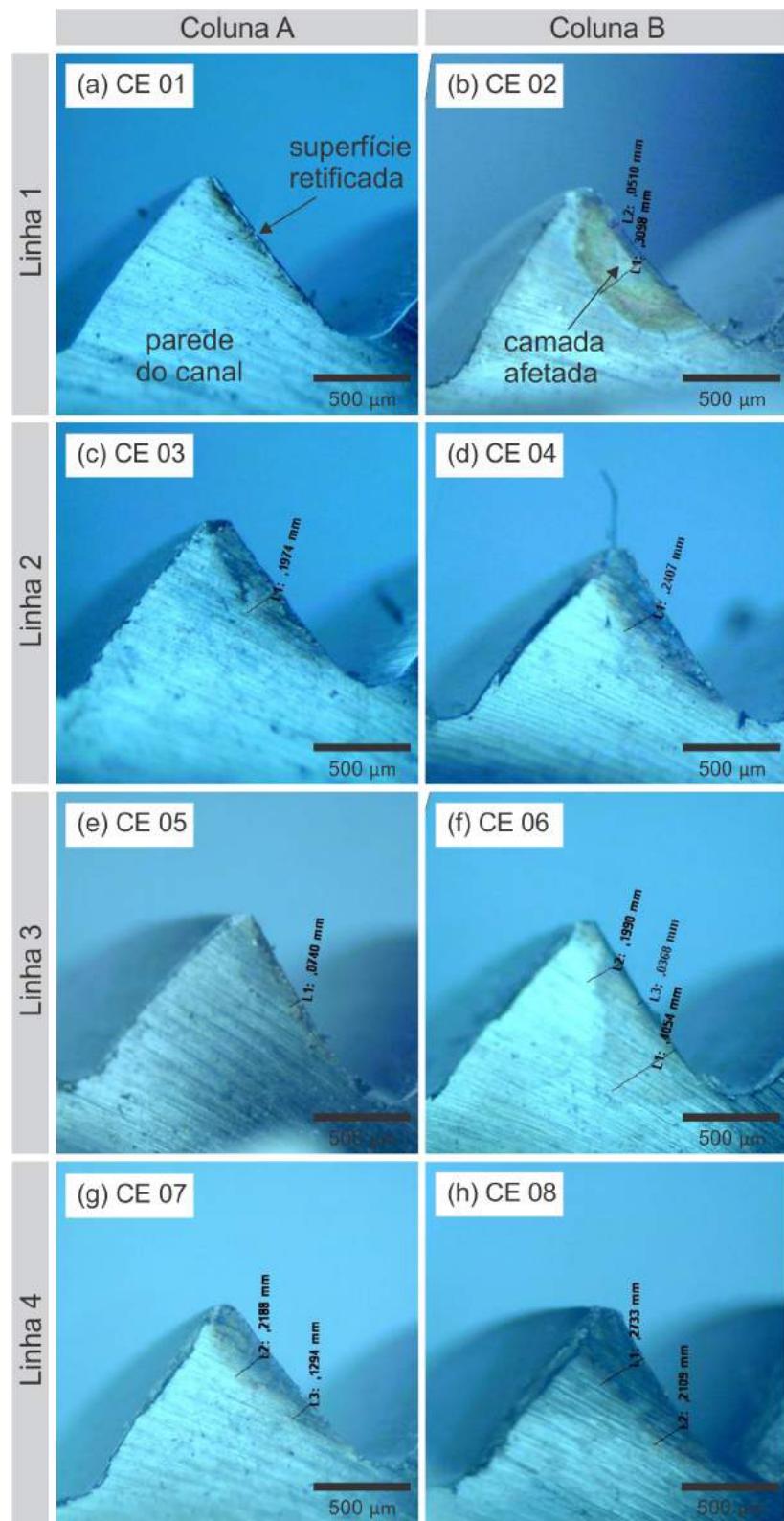


Figura 4.31: Marca de retificação após os ensaios de usinagem para 8 condições de ensaio na empresa (CE).

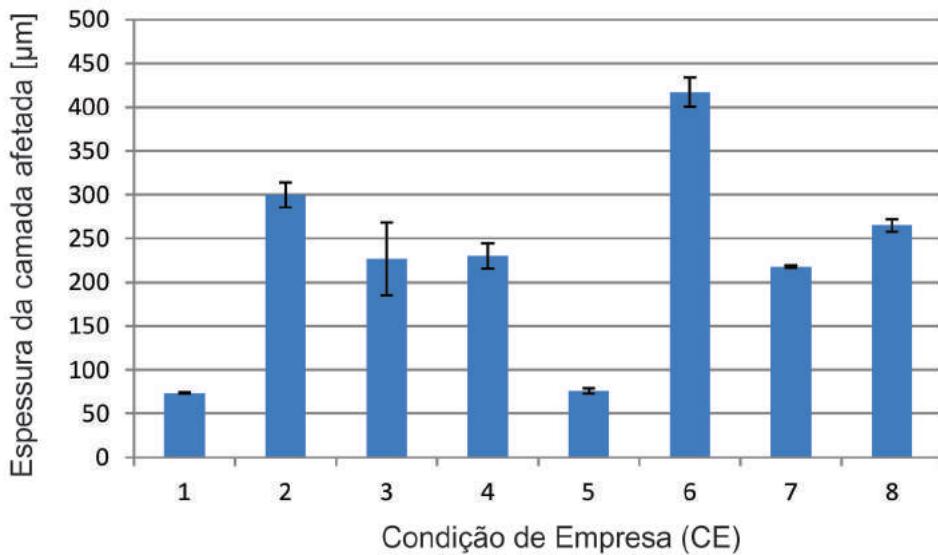


Figura 4.32: Espessura da marca de retificação para 8 condições de ensaio na empresa (CE).

forma, os valores apresentados para a espessura da marca de retificação para as condições CE02 e CE06, correspondem à marca mais escurecida observada.

Os resultados a seguir serão discutidos a partir dos gráficos mostrados na Fig. 4.34, Fig. 4.35 e Fig. 4.36. Nestes gráficos, as condições são organizadas em blocos para a comparação entre os níveis mais alto e mais baixo de cada parâmetro.

Na Fig. 4.34 são mostrados os valores da espessura da camada escurecida após os ensaios para cada uma das 8 condições na empresa. O grupo à esquerda (Fig. 4.34(a)) representa as condições de usinagem com nível mais baixo de velocidade de corte (v_s), enquanto o grupo à direita (Fig. 4.34(b)) as condições com o nível mais alto deste parâmetro. Comparando as condições uma a uma, ou seja, a condição CE01 com a CE02, e a CE03 com a CE04 e assim por diante, não se observa uma diferença significativa entre estas condições.

Realizando a mesma comparação entre as imagens dos filetes da Fig. 4.31, observa-se à esquerda (coluna A), as imagens que foram obtidas em condições com nível mais baixo de velocidade de rebolo (v_s), enquanto que à direita (coluna B) com o nível mais alto deste parâmetro. Desconsiderando a marca acobreada das condições CE02 e CE06 (Fig. 4.31(b) e (f)) é possível inferir que não há diferença significativa entre as imagens da coluna A com a coluna B.

Conforme discutido para os ensaios de usinagem na empresa, o aumento da velocidade de corte resulta na diminuição da espessura equivalente de corte. Este parâmetro deve ser controlado com o objetivo de melhorar o acabamento. Em relação a espessura da camada afetada, ele não exerceu influência significativa nas condições investigadas.

Para a comparação das condições levando em consideração o parâmetro velocidade da peça (v_w), é apresentado o gráfico da Fig. 4.35. Na Fig. 4.35(a) são agrupados os

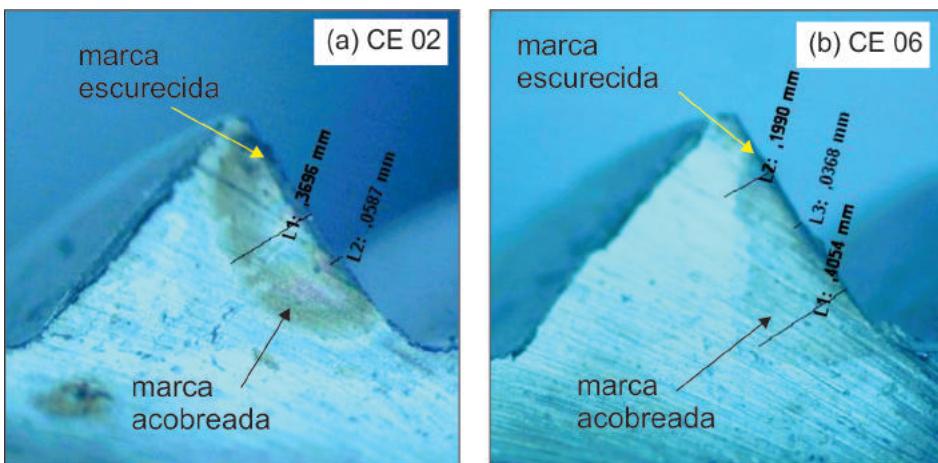


Figura 4.33: Marcas de retificação nas arestas dos filetes retificados sob a condição CE02(a) e CE06(b).

resultados para as condições que apresentam velocidade da peça no nível mais baixo, enquanto que na Fig. 4.35(b), estão as condições com velocidade da peça no nível mais alto. Desta figura observa-se uma nítida distinção entre os dois grupos e que os valores de espessura da camada escurecida foram bem menores quando se empregou o menor valor de velocidade da peça. Em termos de valores médios, a camada afetada diminui 71% com o aumento da velocidade da peça.

A influência da velocidade da peça também pode ser comparada através das imagens apresentadas nas Fig. 4.31. Nas linhas 1 e 3 são mostradas as imagens obtidas após usinagem com as condições com velocidade no nível mais alto, enquanto nas linhas 2 e 4 estão as imagens obtidas com a velocidade da peça no nível mais baixo. Nestas imagens é possível observar ainda que ao diminuir a velocidade de trabalho (da linha 1 para linha 2, e da linha 3 para linha 4) ocorre o aumento na espessura da camada escurecida proveniente do processo de retificação (marca de retificação). Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos nas condições investigadas em laboratório (CL da Tab.3.2). O aumento da velocidade da peça resulta em um menor tempo de contato. Neste processo, diferentemente do observado para a retificação de mergulho, o aumento da velocidade da peça não reduz a profundidade de corte. A espessura equivalente de corte é aumentada. Por este motivo, são empregadas menores velocidades para condições de acabamento.

Para o processo de retificação investigado, a penetração de trabalho (a_e) representa o mergulho do rebolo na direção da peça para cada passe de usinagem. O ciclo completo de retificação foi realizado em 5 passes, sendo que os três primeiros foram realizados com parâmetros de desbaste e os dois últimos com parâmetros de acabamento. Foi considerado o valor dos passes de acabamento para definir como nível mais alto e mais baixo. Desta forma, na Fig. 4.36 são mostradas as condições de usinagem agrupadas em dois níveis com relação ao parâmetro profundidade de corte. Nesta figura, à esquerda (grupo (a)) estão as condições com

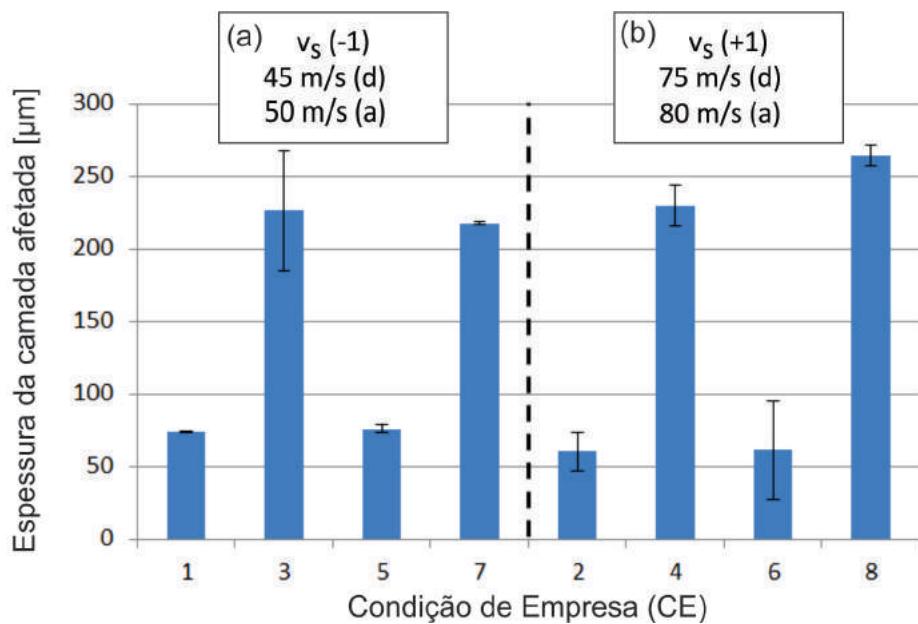


Figura 4.34: Espessura da marca escurecida abaixo da superfície para as oito condições de ensaio na empresa em função da velocidade do rebolo: (a) velocidade do rebolo no nível mais baixo e (b) velocidade do rebolo no nível mais alto.

o nível mais baixo de profundidade de corte ($0,02\text{ mm}$), enquanto que à direita (grupo(b)), Fig.4.36(b), estão os resultados agrupados para o nível mais alto ($0,03\text{ mm}$). Mas destes resultados não é possível estabelecer distinção entre os níveis mais baixo e mais alto deste parâmetro em relação espessura da camada afetada. Contudo, uma pequena diferença entre os valores obtidos na espessura é observada após a usinagem com as condições CE04 e CE08.

Das Fig. 4.31 e Fig. 4.32, imagens e valores de espessura de marcas de retificação para condições com menor profundidade de corte são as das linhas 1 e 2, enquanto aquelas com maior profundidade de corte são aquelas mostradas nas linhas 3 e 4. Comparando-se a linha 1 com a linha 3, ou então a linha 2 com a linha 4 (Fig. 4.31), são observadas marcas de retificação semelhantes que podem ser confirmadas pela Fig. 4.32. A profundidade de corte pareceu não influenciar na espessura da camada escurecida.

A partir dos gráficos apresentados nas Fig. 4.34, Fig. 4.35 e Fig. 4.36 é possível afirmar que o parâmetro velocidade da peça (v_w) exerceu influência na espessura da marca escurecida observada após os ensaios de retificação. Quando aos outros parâmetros, velocidade de corte (v_s) e profundidade de corte (a_e), não afetaram significativamente a espessura da marca de retificação observada. Para obter apoio estatístico e confirmar ou não estas relações, foi realizada análise estatística utilizando a metodologia de análise de variância (ANOVA). Na Tabela 4.5 é apresentado o quadro anova para os valores de espessura de retificação.

A partir dos resultados apresentados na Tab.4.5, o valor p é menor que $0,05$ para o parâmetro velocidade da peça (v_w). Este resultado indica que há significância estatística em relação ao parâmetro e que ele é influente na espessura da marca de retificação. Os resultados

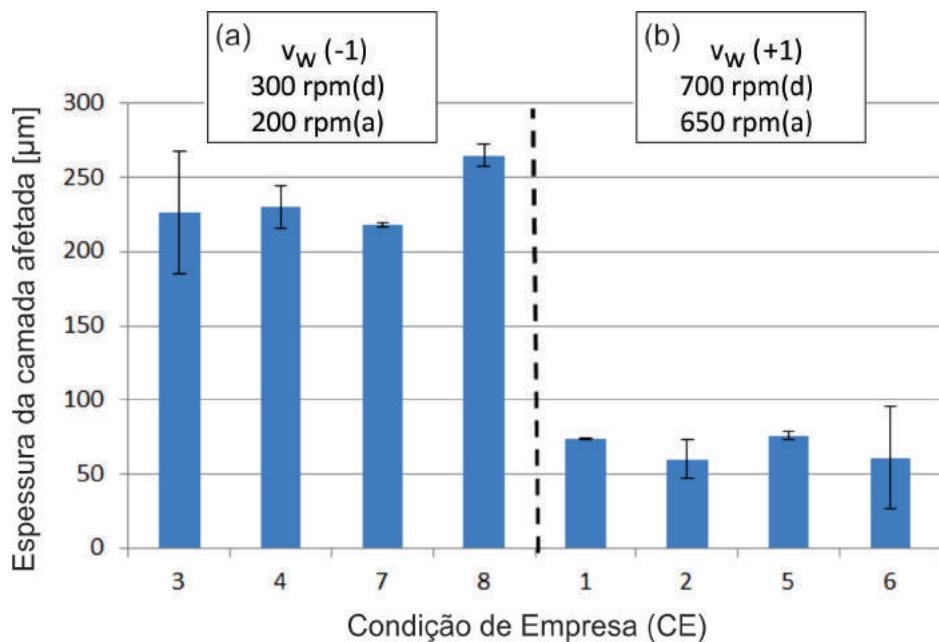


Figura 4.35: Espessura da marca escurecida abaixo da superfície para as oito condições de ensaio na empresa em função da velocidade da peça: (a) velocidade da peça no nível mais baixo e (b) velocidade da peça no nível mais alto.

Tabela 4.5: Quadro ANOVA para as medições da espessura da camada afetada

Parâmetro	Graus de Liberdade (GL)	Soma dos Quadrados (SQ)	Quadrado Médio (QM)	Valor F	Valor p (>F)
v_w	1	55995	55995	226,215	0,0423 *
a_e	1	104	104	0,419	0,6343
v_s	1	63	63	0,253	0,7031
$v_w : a_e$	1	62	62	0,251	0,7043
$v_w : v_s$	1	790	790	3,192	0,3249
$a_e : v_s$	1	218	218	0,882	0,5199
Resíduos	1	248	248		

*estatisticamente significativo

das interações de segunda ordem são bem superiores a 0,05.

Realizando novamente a análise somente para os parâmetros de primeira ordem, são obtidos os resultados da Tab.4.6.

A partir dos resultados da Tab.4.6 observa-se que, mesmo eliminando as interações de segunda ordem, os parâmetros profundidade de corte (a_e) e velocidade de corte (v_s), não exerceram influência com significância estatística na espessura da camada após a retificação nas condições investigadas nos ensaios da empresa (CE). Estas relações são apresentadas graficamente na Fig. 4.37.

Da Fig. 4.37 pode ser observado que quando o parâmetro velocidade da peça (v_s)

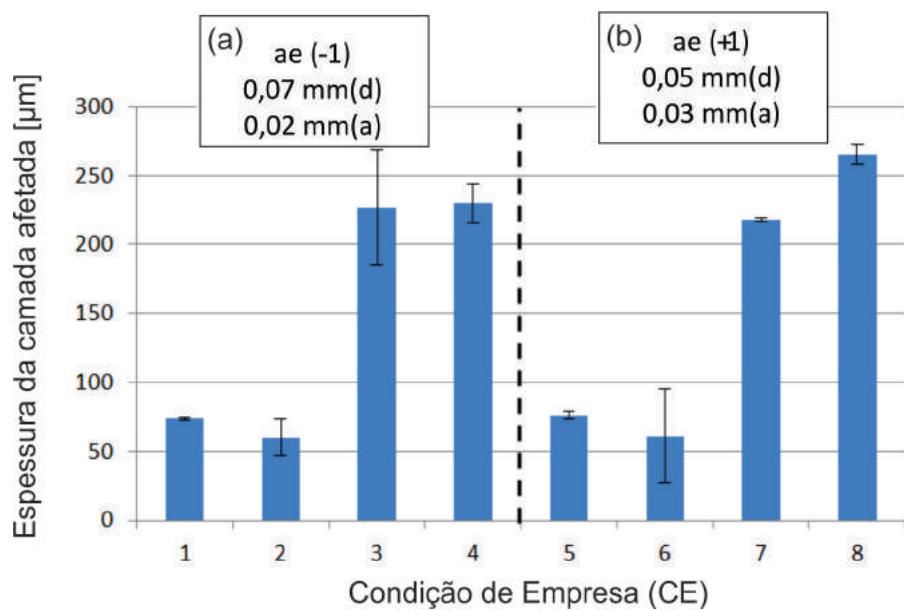


Figura 4.36: Espessura da marca escurecida abaixo da superfície para as oito condições de ensaio na empresa em função da profundidade de corte para os ensaios na empresa: (a) profundidade de corte no nível mais baixo e (b) profundidade de corte no nível mais alto.

Tabela 4.6: Quadro ANOVA para as medições da espessura da camada afetada sem as interações de seunda ordem da Tab. 4.5

Parâmetro	Graus de Liberdade (GL)	Soma dos Quadrados (SQ)	Quadrado Médio (QM)	Valor F	Valor p (>F)
v_w	1	55995	55995	169,924	0,0002 *
a_e	1	104	104	0,315	0,6048
v_s	1	63	63	0,190	0,6852
Resíduos	4	1318	330		

*estatisticamente significativo

passa do nível mais baixo para o mais alto, a espessura média da camada diminui de 240 μm para cerca de 60 μm (queda de 75 %). Já os outros parâmetros, v_s e a_e apresentam pouca influência.

A fim de estabelecer a comparação de todos os parâmetros de corte na espessura da camada após retificação, foi elaborado o gráfico da Fig. 4.38. No gráfico as condições estão separadas de acordo com a velocidade da peça, sendo que os dois primeiros grupos (a) e (b) estão com nível mais baixo de velocidade de corte, enquanto os grupos (c) e (d) no nível maior de velocidade de corte. Dentro de cada grupo ((a), (b), (c) e (d)) há distinção com relação a profundidade de corte. A condição CE03, por exemplo, tem a mesma velocidade de corte, mesma velocidade da peça, porém profundidade de corte menor que a condição CL07.

Na Fig. 4.38 observa-se que ao aumentar a velocidade da peça, do grupo (a) para o

grupo (b), ou do grupo (c) para o (d), há a diminuição da espessura da camada. Ao comparar o grupo (a) com o grupo (c), não se observa grande diferença. O mesmo ocorre entre os grupos (b) e (d). Este gráfico mostra que independente da velocidade de corte utilizada nestes ensaios, a velocidade da peça exerce um efeito predominante na espessura da camada afetada. Após a retificação do aço-rápido nas condições investigadas.

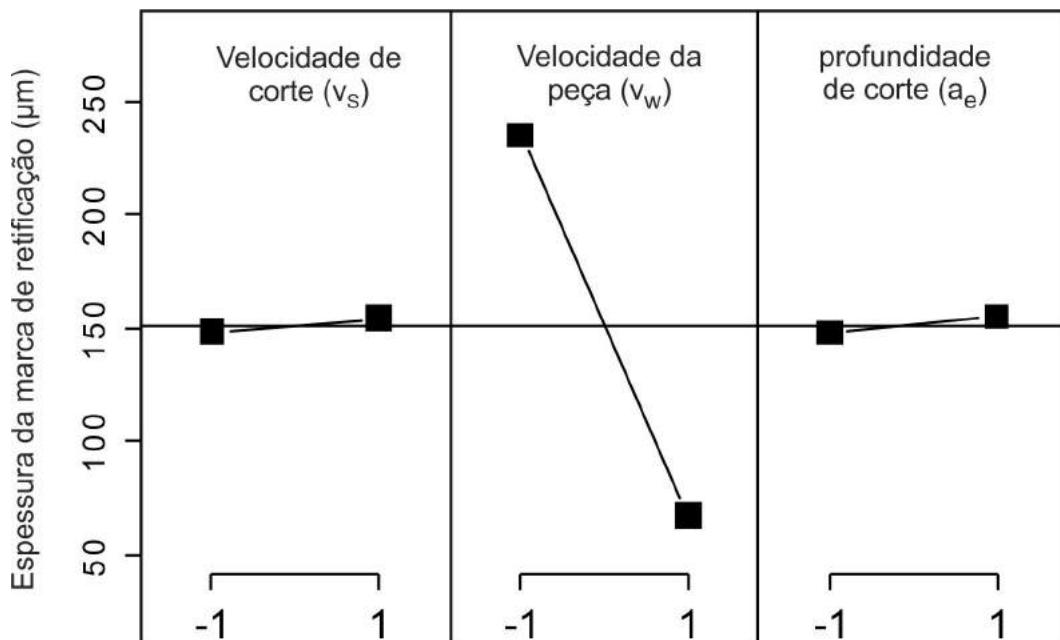


Figura 4.37: Variação da espessura da marca de retificação em torno da média em função dos parâmetros velocidade de corte, velocidade da peça e profundidade de corte nos ensaios na empresa (CE).

4.3.1.2 Perfil de Microdureza na Subsuperfície dos Machos

A observação visual da superfície da peça pode ser útil para detectar qualitativamente o nível de alteração subsuperficial resultante de um processo de retificação com condições não adequadas de corte. Mas às vezes, a alteração pode ser confundida apenas com uma oxidação presente na superfície. Assim, para confirmar a alteração microestrutural associada às camadas mais escuras observadas próximas as arestas foram feitas medições de microdureza. Esta não é uma tarefa simples porque existe dificuldade de acesso a região de medição de um filete de macho de corte, e a amostra precisa então ser embutida com baquelite. Durante o processo de embutimento é muito difícil manter a face da amostra paralela. Por este motivo foram realizadas as medições de apenas algumas amostras, aquelas cujas condições resultaram nos menores e maiores valores de espessura observados e discutidos na sessão anterior.

Na Fig. 4.39(a) e (b) são apresentados os valores de microdureza medidos após a retificação das amostras nas condições realizadas na empresa, CE 01 (menor profundidade de corte) e CE 05 (maior profundidade de corte) respectivamente. Em ambos os casos

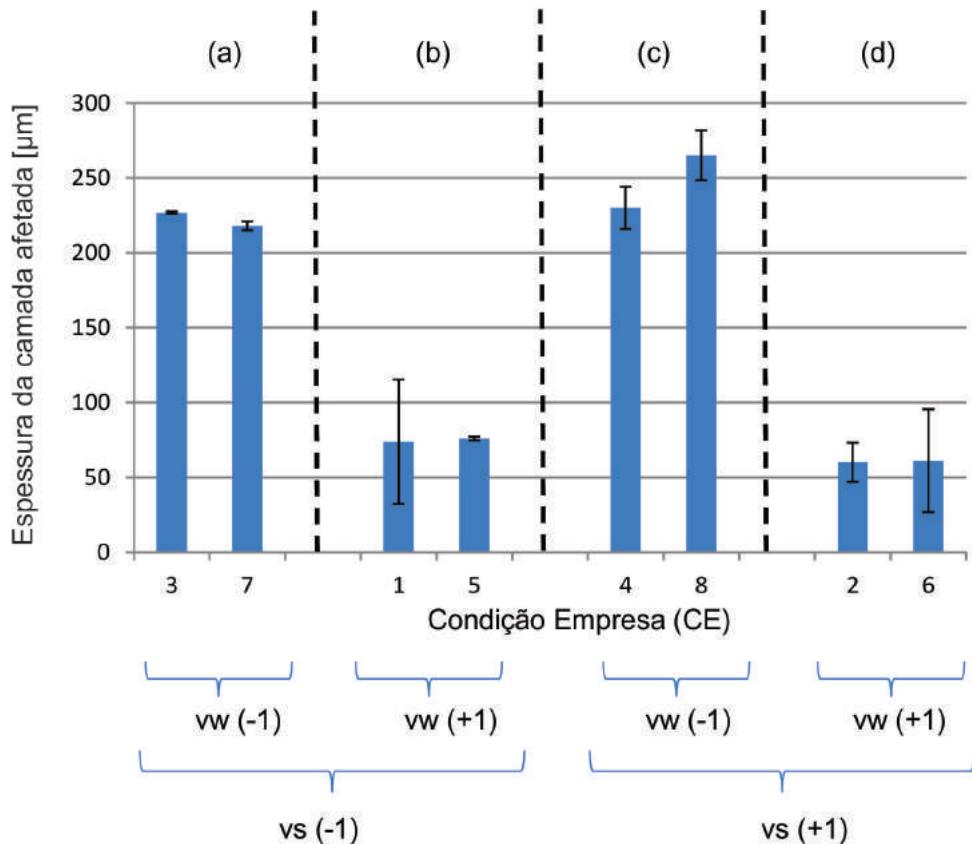


Figura 4.38: Espessura da marca de retificação em relação a velocidade do rebolo e velocidade de trabalho para os ensaios na empresa: (I) $v_w(-1)$ e $v_s(-1)$, (II) $v_w(+1)$ e $v_s(-1)$, (III) $v_w(-1)$ e $v_s(+1)$ e em (IV) $v_w(+1)$ e $v_s(+1)$

é observada alteração na microtureza uma região estende-se até uma distância em torno de $60 \mu\text{m}$ da superfície. Como mostrado para a espessura da marca escurecida observada, a profundidade de corte não influenciou significativamente. A microtureza confirma que a alteração microestrutural está na mesma faixa da camada escurecida observada.

As condições CE 01 e CE 05 são condições mais brandas de retificação. Estas condições possuem alta velocidade da peça o que proporciona menores marcas observadas nas arestas dos filetes. As condições CE 02 e CE 06 também pertencem a este mesmo grupo de condições. No entanto, como discutido na seção anterior, foram observadas duas tonalidades de marcas de retificação, sendo uma marca acobreada e a outra escurecida. Na Fig. 4.40(a) e (b) respectivamente estão os resultados de microtureza abaixo da superfície para as condições CE 02 e CE 06, respectivamente. Quando comparadas com as condições CE 01 e CE 05 da Fig. 4.39, observa-se que não existe diferença significativa entre estas condições. A camada com microtureza alterada está em uma faixa entre 60 a $70 \mu\text{m}$ da superfície. A diferença entre as condições da Fig. 4.39 e Fig. 4.40 é que estas apresentam velocidade de corte no

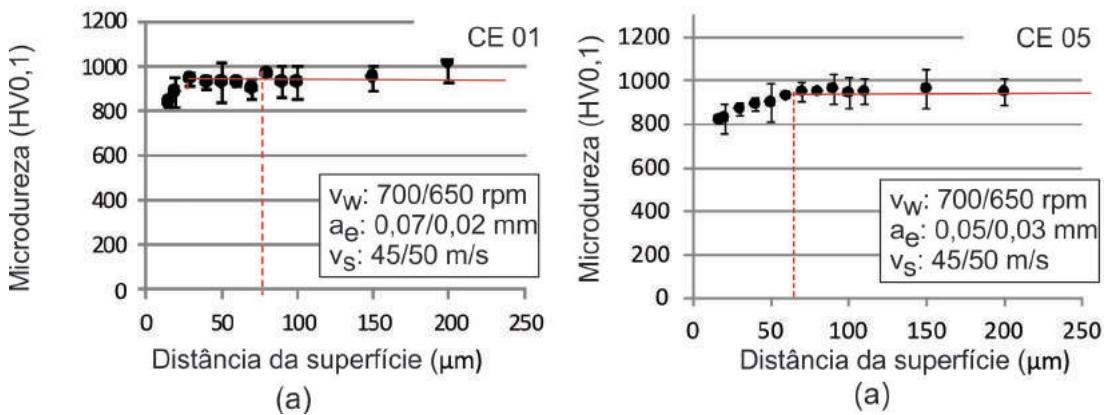


Figura 4.39: Valores de microdureza na região de camada mais escura abaixo da superfície para as condições (a) CE 01 e (b) CE 05.

nível mais alto. Portanto, a velocidade de corte não influenciou significativamente a espessura da camada afetada.

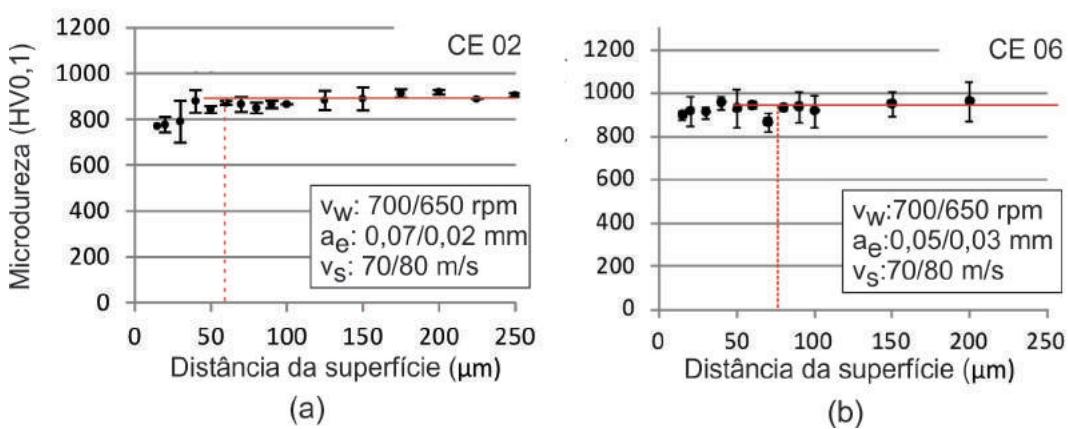


Figura 4.40: Valores de microdureza na região de camada mais escura abaixo da superfície para as condições (a) CE 02 e (b) CE 06.

Na Fig. 4.41(a) e (b) são mostradas as condições CE 03 e CE 08. Estas condições são mais favoráveis a queima devido a baixa velocidade da peça. Ambas condições apresentam camada com ligeira alteração de microdureza até cerca de $110 \mu\text{m}$ abaixo da superfície usinada. A condição CE03 (Fig. 4.41(a)) é equivalente a condição CE01 (Fig. 4.39(a)), porém com menor velocidade da peça. Observa-se desta figura que ao aumentar a velocidade, a espessura da camada afetada aumenta de $70 \mu\text{m}$ para $110 \mu\text{m}$, cerca de 60%. O mesmo efeito pode ser observado entre as condições CE 06 (Fig. 4.40(b)) e CE 08 (Fig. 4.41(b))

Os resultados da medição de microdureza mostraram que o aumento do parâmetro velocidade de trabalho (v_w) resulta em uma menor espessura de camada afetada a partir da superfície retificada. Para os parâmetros velocidade do rebolo (v_s) e penetração de trabalho

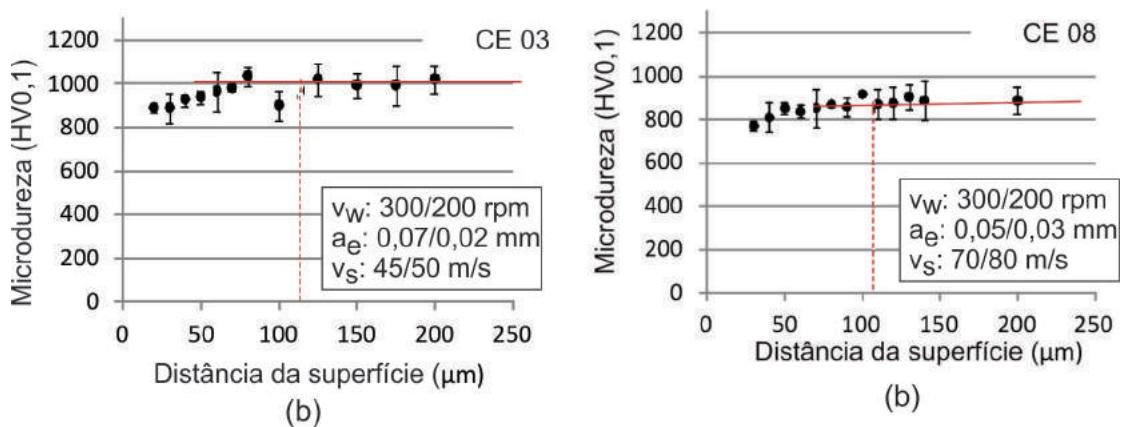


Figura 4.41: Valores de microdureza na região de camada mais escura abaixo da superfície para: (a) Condição CE 03 e (b) Condição CE 08.

(a_e), quando passam do nível mais baixo para o mais alto, não causaram influência na espessura da camada alterada. Estes resultados confirmam os evidenciados a partir da espessura da marca de retificação.

A visualização da marca de retificação com coloração acobreada está relacionada com a alteração no nível da velocidade de corte. Comparando as condições CE 01 e CE 02, ou ainda CE 05 e CE 06, não são observadas diferenças na camada com microdureza afetada, apesar da inspeção visual revelar as colorações acobreadas. Os resultados mostram que esta marca nem sempre está associada a alteração microestrutural.

Os resultados apresentados foram compatíveis aos obtidos em laboratório. Apesar disso os dois processos apresentam bastante diferença. A principal delas é que enquanto a retificação nos ensaios em laboratório é tangencial cilíndrica de mergulho, a da empresa é tangencial cilíndrica de passagem. Neste último caso não há velocidade de mergulho, que foi um dos parâmetros mais influentes nos resultados de camada afetada pela retificação dos ensaios em laboratório. A velocidade da peça pode ser considerada com o parâmetro mais influente em ambos processos nas condições investigadas neste trabalho.

Dentre as condições utilizadas nos ensaios na empresa, as mais adequadas, ou seja, aquelas são menos propensas à formação de queima, são aquelas que empregam a menor velocidade da peça. Como discutido anteriormente, a profundidade de corte não se mostrou influente na espessura da camada afetada, contudo, ela é o parâmetro que exerce influência direta na taxa de remoção de material. Como o processo de geração dos canais dos filetes é feito em passes de desbaste e em seguida de acabamento e com o mesmo rebolo, as melhores condições são aquelas em que são empregadas maiores valores de passes de desbaste e menores valores de passes de acabamento. Assim, as condições mais próximas das ideais para os ensaios na empresa são as CE01 e CE02. Esta segunda, porém, resultou em superfícies com aspecto de coloração acobreada, que com base nos resultados e análises deste trabalho não

necessariamente representa alteração microestrutural. A velocidade de corte deve ser escolhida em uma condição intermediária entre as duas, observando o acabamento e as tolerâncias dimensionais.

4.3.2 Investigaçāo da Formaçāo de Rebarba nos Machos de Corte

Para cada uma das condições de usinagem na empresa (CE) apresentadas na Tab. 3.4 foram obtidas imagens das arestas de saída entre a face retificada e o canal dos machos de corte. Nas amostras de machos de corte obtidas não foram observadas rebarbas na região de entrada. Na figura Fig. 4.42(a) a (h) são mostradas as imagens das arestas de saída dos machos após os ensaios de retificação.

Na Fig. 4.42(a) imagem da aresta não é possível notar a rebarba uma vez que ela foi destacada durante o transporte das amostras. Comparando as imagens das arestas da coluna A com as da coluna B, não é possível observar diferença nas dimensões. A diferença entre as colunas é que para a coluna A, a velocidade do rebolo (v_s) está no nível mais baixo, enquanto na coluna B está no nível mais alto. Observa-se, no entanto, que as rebarbas da Coluna B em geral possuem maiores valores de espessura.

Comparando as imagens das arestas dos machos obtidos após a retificação com as condições CE 02 (Fig. 4.42(b)) e CE 04 (Fig. 4.42(d)), a rebarba da condição CE 04 é maior que aquela obtida após usinagem com a condição CE 02. O mesmo ocorre quando se compara as imagens na Linha 3 com a Linha 4 da Fig. 4.42. Observa-se que para estas condições, as maiores rebarbas são observadas nas linhas 2 e 4, condições em que foram empregadas a menor velocidade da peça (v_w). Para menores velocidades da peça, o tempo de contato entre rebolo e peça é mais longo e com isso o calor gerado irá permanecer por mais tempo na superfície da peça, promovendo maior deformação de material juntamente com menor velocidade de saída do cavaco, o que contribui para a geração de rebarbas com dimensões maiores.

Ao comparar as imagens na Linha 2 com a Linha 4 na Fig. 4.42 observa-se que para aquelas na Linha 4 as rebarbas são menores que para as imagens da Linha 2. O mesmo ocorre comparando-se a condição CE 02 (Fig. 4.42(b)) com a condição CE 06 (Fig. 4.42). As imagens nas figuras das Linhas 1 e 2 contém as arestas provenientes de condições com menor penetração de trabalho (a_e), e as imagens nas Linhas 3 e 4 aquelas geradas com maior penetração de trabalho. Observa-se que aumento da penetração de trabalho resulta na diminuição da rebarba observada.

O aumento da velocidade do rebolo (v_s) não provoca o aumento das rebarbas observadas nas arestas dos machos de corte. Com o aumento da velocidade de trabalho (v_w) foram observadas rebarbas menores. Com o aumento da velocidade o tempo de contato entre o rebolo e a peça diminui, contribuindo para a formação de rebarbas com dimensões menores. Esta velocidade resulta em maiores temperaturas na região de corte, o que segundo Aurich *et al.* (2009) tem relação direta com o aumento do tamanho da rebarba.

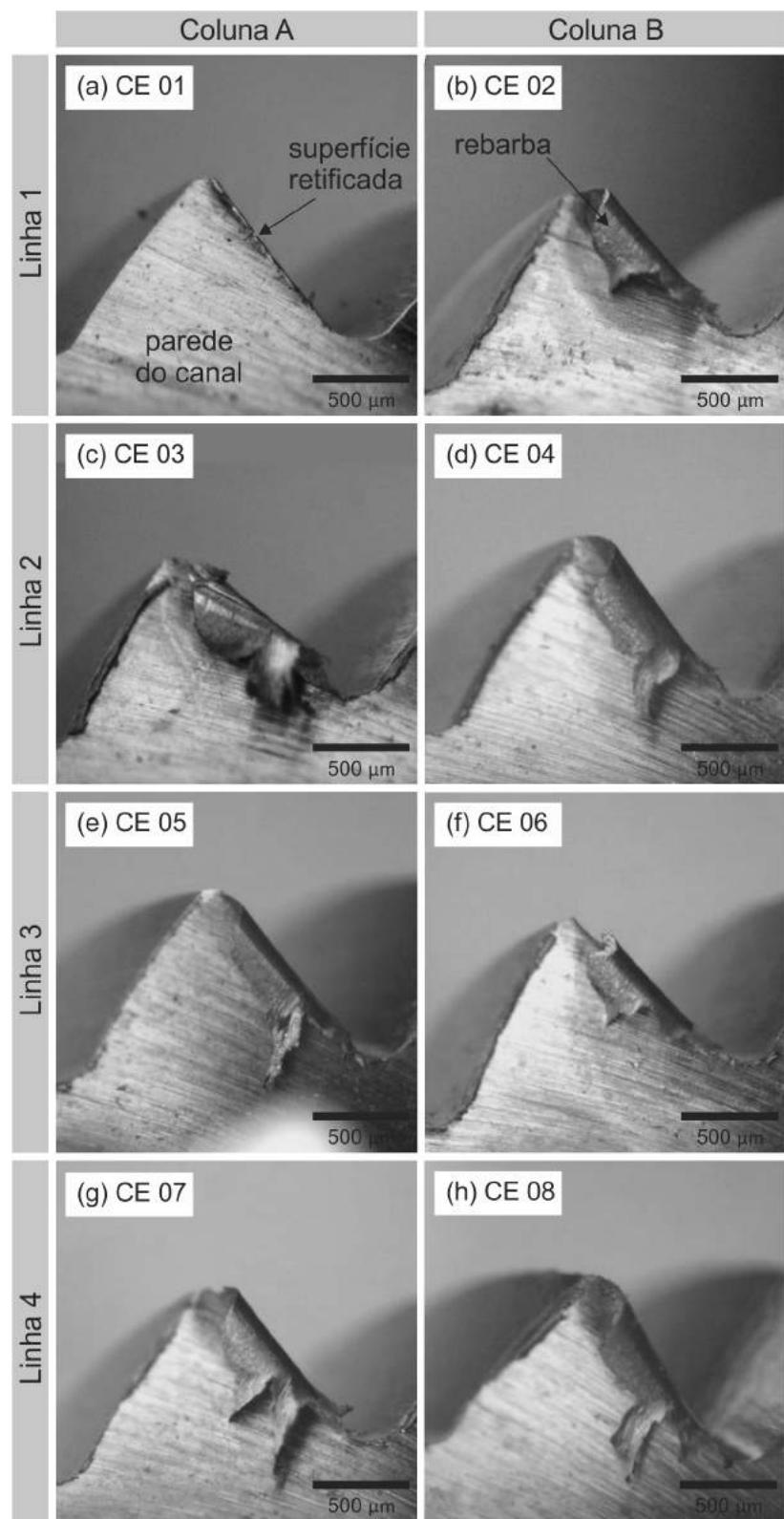


Figura 4.42: Rebarbas na aresta dos machos após os ensaios de retificação na empresa, condições de CE 01 a CE 04.

O aumento da penetração de trabalho (a_e) provoca a diminuição do tamanho das rebarbas. Quando se passa do nível mais baixo para o mais alto de penetração de trabalho, a penetração na condição de acabamento diminui, porém ao mesmo tempo a penetração dos passes de desbaste aumenta. Provavelmente a rebarba observada é gerada nos passes de desbaste, e então ali permanecendo aderida na aresta devida as baixas penetrações empregadas nas condições de acabamento.

4.4 Comparação Entre os Ensaios no Laboratório e Ensaios na Empresa

A partir dos ensaios em laboratório (CL) na Segunda Etapa foi possível compreender os fenômenos que afetaram os valores de espessura da camada afetada abaixo da superfície da peça e a formação de rebarba nas arestas. A partir deste estudo, o processo de retificação foi avaliado utilizando a mesma metodologia, durante os ensaios de retificação na empresa (CE), na Terceira Etapa. Vale ressaltar que os ensaios em laboratório não representam fielmente o processo da empresa, pois não foi possível replicar todos os parâmetros na máquina ferramenta do laboratório como o material e estrutura do rebolo e do próprio fluido de corte. Os ensaios na empresa por sua vez são realizados nas condições reais de operação em que são evidenciados os problemas que ocorreram de fato. Ressalta-se que as máquinas de retificação da empresa são máquinas confeccionadas exclusivamente para este processo, ou seja, são especiais e dedicadas, com condições de corte ajustadas para o tempo de condução do processo considerado ideal na empresa. O quadro apresentado na Tab.4.7 apresenta os parâmetros dos ensaios em laboratório e do ensaio na empresa e permite comparações.

Da Tab.4.7, observa-se que para os ensaios de usinagem em laboratório foram avaliados seis parâmetros de entrada, enquanto que para os ensaios na empresa foram apenas três. Como foi utilizado planejamento fatorial, no primeiro caso foi testado o dobro de condições de usinagem. Em ambos os casos foram realizadas duas réplicas para cada ensaio.

Além disso, foram utilizados rebolo de óxido de alumínio nos dois ensaios, mas nos ensaios de usinagem em laboratório a granulometria utilizada foi 220 mesh, enquanto que na empresa é utilizada granulometria 320 mesh. O diâmetro do rebolo também foi diferente, o maior diâmetro para os ensaios em laboratório, porém o diâmetro da peça é quase dez vezes maior. Assim o diâmetro equivalente é muito maior nos ensaios em laboratório em relação aos ensaios na empresa. Este fator interfere no comprimento de contato. Desta forma o rebolo possui grãos maiores para condição em laboratório, e as dimensões da região de contato também são maiores.

Tabela 4.7: Quadro de comparação entre os parâmetros dos ensaios em laboratório e na empresa.

	Ensaio em laboratório	Ensaio na empresa
Parâmetros de entrada	$v_w, v_s, v_f, a_e/volta$, geometria, direção de corte	Par de condições (desbaste e acabamento): v_w, v_s, a_e
Condições de ensaio	16	8
Réplicas	2	2
Rebolo ($\phi_{ext.}$ (mm))	Óxido de Alumínio - grana 220 (38A220-KVS) $\phi 350$	Óxido de Alumínio - grana 320 (CS33A320HH4VB1) $\phi 280$
Fluido	Sem fluido	Óleo mineral integral
Diâmetro da peça (mm)	53,0	6,35
Diâmetro equivalente (d_e)(mm)	46,02	6,2
Comprimento de contato (l_c)(mm)	$6,8 \sqrt{a_e}$	$2,49 \sqrt{a_e}$
Condição de dressagem	dressador tipo fliese	dressador tipo Rotary dress

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser retiradas através dos ensaios de retificação realizados:

- A espessura da marca escurecida observada abaixo da superfície das amostras retificadas em laboratório, coincide com a espessura da camada que apresenta alteração da microdureza. Desta forma, a metodologia desenvolvida é uma técnica para o estudo da queima em retificação;
- Comparando a velocidade da peça (v_w) entre o nível mais baixo ($0,22\text{ m/s}$) e o nível mais alto ($0,45\text{ m/s}$), após a análise estatística observou-se que a espessura média da camada afetada após a retificação é aproximadamente 60% menor para o nível mais alto nos ensaios realizados em laboratório;
- A espessura da camada afetada após a retificação é em média 34% maior para o nível mais alto de velocidade de mergulho (v_f) (1 mm/min), em relação ao nível mais baixo ($0,5\text{ mm/min}$), mas em alguns casos o aumento chegou a 20% nos ensaios em laboratório;
- O aumento da profundidade de corte por volta ($a_e/volta$) resulta no aumento da camada afetada. Aumentando de $3\text{ }\mu\text{m/volta}$ para $6\text{ }\mu\text{m/volta}$ a espessura aumentou em média 50%. Aumentando de $6\text{ }\mu\text{m/volta}$ para $12\text{ }\mu\text{m/volta}$ foi observado um aumento médio de 89,3% da espessura da camada afetada nos ensaios em laboratório;
- A direção de corte e a velocidade de corte (v_s) não apresentaram uma diferença significativa em relação a espessura de camada afetada nas amostras retificadas em laboratório quando comparadas entre os níveis mais alto e mais baixo destes parâmetros;

- A geometria da peça e o movimento relativo entre o rebolo e a peça são os fatores mais influentes para a observação de rebarbas nas arestas das amostras retificadas em laboratório;
- As rebarbas na região de saída do rebolo em relação à peça são maiores do que aquelas observadas nas regiões de entrada do rebolo nos ensaios em laboratório;
- Nas arestas de saída retificadas sob condições de usinagem com direção de corte discordante foram observadas rebarbas maiores quando comparadas com as rebarbas observadas em arestas retificadas em corte concordante;
- Arestras com menor ângulo (45°) apresentaram maior incidência de rebarbas nas condições de retificação em laboratório. Arestras com 90° apresentaram rebarbas somente quando retificadas com direção de corte discordante. Não foram observadas rebarbas nas arestas com 135° ;
- Para rebarbas de entrada aumento da velocidade de trabalho (v_w) resulta na diminuição do tamanho da rebarba nos ensaios em laboratório;
- As rebarbas observadas nas arestas de entrada apresentaram comprimento menor nas amostras retificadas sob condições com nível mais alto de velocidade de mergulho (v_f) nas condições de ensaio em laboratório;
- Nas arestas de saída foram observadas rebarbas maiores para as amostras retificadas em condições de menor velocidade da peça (v_w) nos ensaios em laboratório;
- Nas arestas de saída foram observadas rebarbas maiores nas amostras retificadas em condições com maior velocidade de corte (v_s), quando comparadas com condições de menor velocidade de corte nos ensaios em laboratório;
- Foi evidenciado que, ao aumentar a penetração de trabalho por volta ($a_e/volta$) são geradas rebarbas maiores nas arestas de saída das amostras nos ensaios em laboratório;
- A análise de microdureza revelou que, apesar das maiores marcas de retificação serem encontradas para as condições CE02 e CE06, estas marcas não representam alteração na microdureza nos ensaios na empresa. A região com marca acobreada não apresentou alteração na microdureza original do material;
- Nos ensaios de retificação na empresa, a espessura da camada afetada é 71% menor para condições com nível mais alto de velocidade da peça (700/600 rpm), quando comparada com amostras retificadas em condições de nível mais baixo (300/200 rpm);

- Independente da velocidade de corte e da profundidade de corte utilizada nos ensaios na empresa, a velocidade da peça exerce um efeito predominante em relação à espessura da camada afetada;
- Foi observada a formação de rebarba apenas nas arestas dos machos de corte com menor ângulo entre a superfície retificada e o canal nos ensaios na empresa;
- Foram observadas rebarbas com menor comprimento nas arestas do machos de corte retificadas em condições com velocidade da peça no nível mais alto (700/600 rpm), quando comparada com amostras retificadas em condições de nível mais baixo (300/200 rpm) nos ensaios na empresa;
- Foram observadas rebarbas menores nas arestas do machos de corte retificado sob condições onde a profundidade de corte (a_e) estava no nível mais alto (50/30 μm), quando comparada com amostras retificadas em condições de nível mais baixo (70/20 μm) nos ensaios na empresa;
- As rebarbas observadas após a retificação na empresa não apresentaram diferença entre as amostras retificadas sob nível mais alto (80/75 m/s) e mais baixo (50/45 m/s) de velocidade de corte (v_s).

Referências Bibliográficas

- ALDEN, G. I. Operation of grinding wheels in machine grinding. *Trans. ASME*, v. 36, p. 451–460, 1914.
- AURICH, J.; SUDERMANN, H.; BIL, H. Characterisation of burr formation in grinding and prospects for modelling. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 54, n. 1, p. 313–316, 2005.
- AURICH, J. C.; DORNFELD, D.; ARRAZOLA, P.; FRANKE, V.; LEITZ, L.; MIN, S. Burrs-analysis, control and removal. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 519–542, 2009.
- BADGER, J. *Grindability of high speed-steels*. [S.I.]: Erasteel, 2003.
- BADGER, J. A. The great divide: Grinding in academia and production. 2011.
- BOCCALINI, M.; GOLDENSTEIN, H. Solidification of high speed steels. *International Materials Reviews*, IOM Communications for the Institute of Materials, v. 46, n. 2, p. 92–115, 2001.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. [S.I.]: Wiley New York, 2007.
- CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos*. [S.I.]: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- DAVIM, J. P. et al. *Surface integrity in machining*. [S.I.]: Springer, 2010.
- DOTTO, F. R. L. *Sistema de detecção automática on-line de danos térmicos no processo de retificação com monitoramento via internet*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2004.
- DOYLE, E. On the formation of a quick-stop chip during single grit grinding. *Wear*, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 249–253, 1973.
- GILLESPIE, L.; BLOTTER, P. The formation and properties of machining burrs. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 98, n. 1, p. 66–74, 1976.
- ISO:13715. *Technical drawings - Edges of undefined shape - Vocabulary and indications*. [S.I.], 2000.
- JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. *Machining with abrasives*. [S.I.]: Springer, 2010.

- KAWAMURA, S.; YAMAKAWA, J. Formation and growing up process of grinding burrs. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, [sn], v. 23, n. 3, p. 194–199, 1989.
- KLOCKE, F.; EH, F. K.; KUCHIE, A. *Manufacturing Processes 2*. [S.I.]: Springer, 2009.
- KÖNIG, W.; MESSE, J. Influence of the composition and structure of steels on grinding process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 30, n. 2, p. 547–552, 1981.
- LAVINE, A. S.; JEN, T.-C. Coupled heat transfer to workpiece, wheel, and fluid in grinding, and the occurrence of workpiece burn. *International journal of heat and mass transfer*, Elsevier, v. 34, n. 4, p. 983–992, 1991.
- MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. da. Teoria da usinagem dos metais. *Editora Edgard Blucher*, p. 384, 2011.
- MALKIN, S.; GUO, C. *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. [S.I.]: Industrial Press Inc., 2008.
- MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M. P.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I. *Handbook of machining with grinding wheels*. [S.I.]: CRC Press, 2006.
- MARINESCU, I. D.; ROWE, W. B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. *Tribology of abrasive machining processes*. 2004.
- MAYER, J. E.; PRICE, A. H.; PURUSHOTHAMAN, G. K.; DHAYALAN, A. K.; PEPI, M. S. Specific grinding energy causing thermal damage in helicopter gear steel. *Journal of manufacturing processes*, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 142–147, 2002.
- MOTA, P. R. da. *Investigação do comportamento de Ferramentas de Aço-Rápido no Processo de Rosqueamento Interno com Alta Velocidade de Corte*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- NUSSBAUM, G. C. *Rebolas e Abrasivos: Tecnologia Basica*. [S.I.]: Editora Icone, 1988.
- OLIVEIRA, J.; SILVA, E.; GUO, C.; HASHIMOTO, F. Industrial challenges in grinding. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, v. 58, n. 2, p. 663 – 680, 2009. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609001735>>.
- OSG. *Catálogo de Produtos*. [S.I.]: OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda, 2012. 229 p.
- PEREIRA, I. C. *Análise do torque e da força axial, em diferentes condições de corte durante o rosqueamento de dois ferros fundidos cinzentos (CrCuSn e CrCuSnMo) e um ferro fundido vermicular da classe 350*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- RAJMOHAN, B.; RADHAKRISHNAN, V. A study on the thermal aspects of chips in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 32, n. 4, p. 563 – 569, 1992. ISSN 0890-6955.
- RAMESH, K.; HAN, H. The effects of grinding wheel speed on burr creation and surface quality. *Metal finishing*, Elsevier, v. 101, n. 7, p. 57–61, 2003.
- REN, Y.; ZHANG, B.; ZHOU, Z. Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 58, n. 1, p. 299–302, 2009.

- ROWE, W. B. *Principles of modern grinding technology*. [S.I.]: William Andrew, 2013.
- SAMULEWSKI, G. *Otimização do Processo de Retificação de Peças Prismáticas*: Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba - PR: [s.n.], 2006. 55 p.
- SANTA-AHO, S.; VIPPOLA, M.; SORSA, A.; LATOKARTANO, J.; LINDGREN, M.; LEIVISKA, K.; LEPISTO, T. Development of barkhausen noise calibration blocks for reliable grinding burn detection. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212, n. 2, p. 408 – 416, 2012. ISSN 0924-0136.
- SARAVANAPRIYAN, A. S.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. Significance of grinding burn on high speed steel tool performance. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 134, n. 2, p. 166–173, 2003.
- SHAW, M. Energy conversion in cutting and grinding. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 101–104, 1996.
- SILVA, R. B. . F.; BIANCHI, T. A. .; AGUIAR, E. C. .; CANARIM, P. R. .; C., R. Experimental study on peripheral surface grinding of a plastic mould VP80-steel with Al₂O₃ abrasive wheel. *9th International Conference on High Speed Machining*, v. 1, p. 1–6, 2012.
- SUDERMANN, H.; REICHENBACH, I.; AURICH, J. Analytical modeling and experimental investigation of burr formation in grinding. In: *Burrs-Analysis, Control and Removal*. [S.I.]: Springer, 2010. p. 63–71.
- VANDER VOORT, G.; JAMES, H. Asm handbook, vol. 9. *Metallography and Microstructures*, ASM International, OH, 2004.
- WAGER, J.; GU, D. "influence of up-grinding and down-grinding on the contact zone ". *CIRP Annals - Manufacturing Technology* ", v. 40, n. 1, p. 323 – 326, 1991.
- ZUM GAHR, K.-H. *Microstructure and wear of materials*. [S.I.]: Elsevier, 1987.