

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - UCS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL

GUSTAVO FERRONATTO

INFLUÊNCIA DA VAZÃO E PRESSÃO DO FLUÍDO LUBRIRREFRIGERANTE NA
AFIAÇÃO DE BROCAS DE AÇO-RÁPIDO M2

CAXIAS DO SUL

2019

GUSTAVO FERRONATTO

**INFLUÊNCIA DA VAZÃO E PRESSÃO DO FLUÍDO LUBRIRREFRIGERANTE NA
AFIAÇÃO DE BROCAS DE AÇO-RÁPIDO M2**

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

F396i Ferronato, Gustavo

Influência da vazão e pressão do fluido lubrificador na afiação
de brocas de aço-rápido M2 / Gustavo Ferronato. – 2019.

107 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.

1. Brocas (Ferramentas). 2. Usinagem. 3. Retificação e polimento.
5. Lubrificação e lubrificantes. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II.
Título.

CDU 2. ed.: 621.951.4

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Michele Fernanda Silveira da Silveira - CRB 10/2334

GUSTAVO FERRONATTO

**INFLUÊNCIA DA VAZÃO E PRESSÃO DO FLUÍDO LUBRIRREFRIGERANTE NA
AFIAÇÃO DE BROCAS DE AÇO-RÁPIDO M2**

Dissertação de mestrado, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, apresentado à Universidade de Caxias do Sul, na área de concentração de processos de fabricação.

Aprovado em 20/08/2019

Banca Examinadora

Prof. Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Eng. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Eng. Leandro Luís Corso
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Eng. Gilmar Ferreira Batalha
Universidade de São Paulo - USP

Dedico este trabalho à minha família, meus amigos e todos os que me apoiaram para que este objetivo fosse alcançado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por iluminar meu caminho durante estes anos.

À minha família, em especial aos meus pais Neide Di Domênico Ferronato e Celso Ferronato, pelos quais tenho imensa admiração e sou eternamente grato. Às minhas irmãs que também sempre me incentivaram nos estudos e apoiaram para que eu concluísse mais esta importante etapa.

Aos meus professores da Universidade de Caxias do Sul, em especial ao meu orientador Eng. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann pela dedicação, ensinamentos, paciência e a amizade construída.

À empresa, à todos colegas de profissão que me ensinaram muito ao longo destes anos. Em especial ao Eng. José Carlos Rizzolli responsável pelo laboratório e que me apoiou no que foi preciso, ao laboratorista Tiago Pedrollo que colaborou de forma ágil nos testes, ao Eng. Alexandre Baú, pelo apoio e colaboração neste estudo compartilhando sua experiência no setor produtivo, e à todos os demais colegas de empresa que tiveram alguma participação neste trabalho.

À empresa parceira do grupo, em especial ao Msc. Eng. Fernando Scomazzon Fardo por ter recebido e executado as análises necessárias e às laboratoristas Bruna Fritzen e Márcia Peruzzo.

Aos meus colegas e amigos que sempre me acompanharam e ficam felizes com mais esta importante conquista, em especial à Msc. Simone Batistela pelo apoio efetivo na realização do mesmo.

RESUMO

Este trabalho apresentou um estudo sobre a influência da intensidade de pressão e vazão do fluido lubrificante no comportamento do processo de retificação cilíndrica externa. Para a análise dos resultados foram mantidas constantes as condições de usinagem e variou-se os valores de pressão e vazão do fluido de corte. Os ensaios foram realizados em duas etapas, sendo na primeira com um rebolo convencional de óxido de alumínio, retificando como corpo de prova brocas de aço SAE M2, com dureza média de 62 à 65 HRc (dureza Rockwell). A partir dos resultados obtidos verificou-se que não houve alterações microestruturais na sub-superfície analisada através de microscopia óptica, ao mesmo tempo que com o aumento dos valores de pressão e vazão do fluido de corte, diminuíram as marcas escurecidas da região afetada superficialmente pelo calor até a vazão de 60 l/min. Para os experimentos de furação da segunda etapa o critério de fim de vida utilizado foi a quantidade de material usinado. O principal mecanismo de desgaste foi a abrasão e o tipo de desgaste mais significativo foi o lascamento. Os esforços axiais obtidos nos ensaios, após análise estatística dos dados através do método de Fisher, demonstrou que não houve diferenças entre as cinco condições de aplicação do fluido com relação à força de avanço.

Palavras-chave: Usinagem. Retificação. Furação. Broca helicoidal. Fluido lubrificante.

ABSTRACT

This work presents a study on the influence of the pressure and flow intensity of the lubricating fluid on the external cylindrical grinding process. For the analysis results, the machining conditions were maintained constant, varying the values of pressure and flow of the cutting fluid. The tests were conducted in two phases: first with a conventional aluminum oxide grinding wheel, grinding as specimen SAE M2 steel drills, with an average hardness from 62 to 65 HRc (Rockwell hardness). The obtained results show that there were no microstructural alterations on the sub-surface, analyzed through optical microscopy. As the increased values of the pressure and flow fluid rate showed that the darkened marks of superficially affected region decreased when the flow rate is at 60 liters per minute. For the drilling experiments of the second stage the end of life criteria used was the amount of machined material. Abrasion was the main mechanism of wear as chipping being the most significant type of wear. The axial forces on the surveys, after data analysis through Fisher method, it was shown there were no differences among the five circumstances of the application of the fluid regarding the feed force.

Keywords: Machining. Grinding. Drilling. Twist drill. Cutting fluid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Retificação cilíndrica externa de mergulho	23
Figura 2 - Disposição dos grãos em um rebolo	24
Figura 3 - Perfil de grão em analogia à gumes de corte usados em ferramentas de geometria definida	25
Figura 4 - Zonas de deformação elástica e plástica na formação do cavaco	26
Figura 5 - Dureza dos materiais ferramenta versus temperatura	30
Figura 6 - Diagrama de fases do aço-rápido M2 com base na seção 6 W-5 Mo-4 Cr-2 V através do sistema Fe-W-Mo-Cr-V-C.....	32
Figura 7 - Tipos de brocas	33
Figura 8 - Nomenclatura das brocas helicoidais.....	34
Figura 9 - Processos de fabricação de brocas helicoidais.....	35
Figura 10 - Tipos de afiação da ponta	36
Figura 11 - Componentes dos esforços em furação.....	37
Figura 12 - Principais tipos de desgaste em brocas	38
Figura 13 - Representação dos elementos superficiais e subsuperficiais que definem a tecnologia das superfícies	39
Figura 14 - Diferentes tipos de danos térmicos e temperaturas relativas em que ocorrem	41
Figura 15 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental	48
Figura 16 - Representação da broca recebida e regiões de dureza	50
Figura 17 - Medidores instalados na máquina.....	50
Figura 18 - Bocais para lubrificarrefrigeração	51
Figura 19 - Seccionamento: a) vista de topo; b) vista lateral; c) após corte.....	54
Figura 20 - Principais pontos para análise microestrutural	54
Figura 21 - Dispositivo para furação com servomotor e célula de carga	56
Figura 22 - Ferramentas: a) da primeira etapa sem afiação e b) da segunda etapa com afiação do gume de corte.....	57
Figura 23 - Teste de furação em andamento no laboratório	59
Figura 24 - Representação do bloco padrão com a malha de furação	59
Figura 25 - Medições de desgaste de flanco médio e máximo	61
Figura 26 - Aumento da rebarba em função da variação no fluido lubrificarrefrigerante.....	62
Figura 27 - Vista de topo evidenciando as falhas ao longo do gume	63
Figura 28 - Defeitos inerentes ao processo de fabricação	64
Figura 29 - Gumes de corte com análise de MEV para as 5 condições de vazão	65

Figura 30 - Microscopia óptica nas amostras para metalografia	67
Figura 31 - Região afetada pelo calor para as diferentes condições de ensaio.....	69
Figura 32 - Marcas da região afetada pelo calor após ensaios de usinagem	70
Figura 33 - Gráfico com desgastes de flanco entre as 5 condições de teste	73
Figura 34 - Desgaste para as diferentes condições de lubrificante.....	74
Figura 35 - Desgastes para a CV5	75
Figura 36 - Esforço axial máximo	77
Figura 37 - Parâmetros de controle geométrico das brocas.....	78
Figura 38 - Máquina retificadora utilizada na afiação das brocas.....	104
Figura 39 - Equipamentos utilizados na caracterização da superfície usinada.....	104
Figura 40 - Ferramentas utilizadas no processo de retificação das brocas.....	105
Figura 41 - Robô Motoman utilizado nos ensaios de furação	105
Figura 42 - Célula de carga C2 da HBM.....	106
Figura 43 - Equipamento especial para medição de ferramentas de corte	106
Figura 44 - Especificação técnica servomotor Kollmorgen	107
Figura 45 - Laudo técnico do material	108
Figura 46 - Análise metalográfica	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características do rebolo	49
Quadro 2 - Parâmetros do processo de retificação	51
Quadro 3 - Características do robô para furação	55
Quadro 4 - Parâmetros do processo de furação	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço SAE M2	49
Tabela 2 - Valores de dureza para a broca em aço M2.....	50
Tabela 3 - Condições de vazão e pressão para os testes de retificação	52
Tabela 4 - Composição química do aço VC 131	57
Tabela 5 - Matriz experimental dos ensaios de desgaste.....	60
Tabela 6 - Esforço de avanço máximo para todas amostras.....	76
Tabela 7 - Ângulos de folga recomendados para brocas helicoidais.....	79
Tabela 8 - Valores para média e desvio padrão dos parâmetros de controle na produção	79
Tabela 9 - Região afetada pelo calor após retificação	89
Tabela 10 - Tabela com os desgastes de flanco para todas as amostras dos testes de furação.	91
Tabela 11 - Medidas para brocas da CV1.....	95
Tabela 12 - Medidas para brocas da CV2.....	95
Tabela 13 - Medidas para brocas da CV3.....	95
Tabela 14 - Medidas para brocas da CV4.....	95
Tabela 15 - Medidas para brocas da CV5.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
ANOVA	Análise de variância
CBN	<i>Cubic Boron Nitride</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Energia
EP	Extrema Pressão
HRc	Dureza Rockwell
HSS	<i>High Speed Steel</i>
M	Molibdênio
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
UCS	Universidade de Caxias do Sul
W	Tungstênio
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

α	ângulo de folga ortogonal da ferramenta [°]
γ	ângulo de corte ortogonal [°]
ρ_s	raio de gume [mm]
μ	força de usinagem [N]
a	profundidade de penetração do rebolo [mm]
a_e	profundidade de corte [mm]
A_{vk}	superfície de desgaste [mm]
b	largura de retificação [mm]
C_m	desgaste do gume transversal (largura) [μm]
C_t	desgaste do gume transversal (altura) [μm]
d_e	diâmetro equivalente do rebolo [mm]
d_s	diâmetro do rebolo [mm]
d_w	diâmetro da peça [mm]
F_c	força de corte [N]
F_f	força de avanço [N]
$F_{n,s}$	força normal de corte [N]
F_p	força passiva [N]
$F_{t,s}$	força tangencial de corte [N]
F_z	esforço axial [N]
$FZ_{\text{máx}}$	esforço axial máximo [N]
$FZ_{\text{mín}}$	esforço axial mínimo [N]
h_{cu}	espessura de corte [mm]
h_{eq}	espessura equivalente de corte [mm]
K_m	desgaste de cratera [μm]
l_c	comprimento de contato [mm]
M_w	desgaste de guia lateral [μm]
P_m	lascamento do gume (largura) [μm]
$P_{\text{máx}}$	pressão máxima [Pa]
P_t	lascamento do gume (altura) [μm]
Q'_w	taxa de remoção específica de material [mm^2/s]
$Q_{\text{máx}}$	vazão máxima [l/s]
Q_w	taxa de remoção de material [mm^3/s]
T_μ	penetração do início de corte [mm]

$VB_{\text{máx}}$	desgaste de flanco máximo [μm]
$VB_{\text{méd}}$	desgaste de flanco no ponto médio [μm]
v_f	velocidade de avanço do rebolo [m/s]
v_s	velocidade de corte [m/s]
v_w	velocidade da peça [m/s]
W	desgaste de quina [μm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVO GERAL	20
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	RETIFICAÇÃO	22
2.2	RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO	23
2.3	GEOMETRIA E CINEMÁTICA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	24
2.3.1	Comprimento de contato (l_c)	26
2.3.2	Diâmetro equivalente (d_e)	27
2.3.3	Espessura equivalente de corte (h_{eq})	27
2.3.4	Taxa de remoção de material (Q_w)	28
2.4	AÇO-RÁPIDO	29
2.4.1	Formação de propriedades	31
2.5	BROCAS	32
2.5.1	Tipos de brocas	32
2.5.1.1	Brocas helicoidais	34
2.5.2	Tipos de afiação	35
2.5.3	Esforços na furação	36
2.5.4	Desgaste	37
2.6	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	39
2.6.1	Queima da peça	41
2.7	INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL	42
2.8	FLUÍDOS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO	44
2.8.1	Tipos de fluido de corte	45
2.8.2	Influência do fluido de corte na retificação	46
3	METODOLOGIA	47
3.1	INTRODUÇÃO	47
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	47

3.3	PRIMEIRA ETAPA: ENSAIOS DE RETIFICAÇÃO DAS BROCAS	48
3.3.1	Máquina-ferramenta.....	48
3.3.2	Ferramenta de corte e dressamento.....	49
3.3.3	Corpos de prova.....	49
3.3.4	Equipamentos para vazão, pressão e bocais	50
3.3.5	Parâmetros do processo	51
3.3.6	Variáveis de entrada e saída.....	52
3.3.7	Realização experimental	53
3.4	SEGUNDA ETAPA: ENSAIOS DE FURAÇÃO COM AS BROCAS	55
3.4.1	Máquina-ferramenta.....	55
3.4.2	Equipamentos e ferramentas.....	55
3.4.3	Corpos de prova.....	57
3.4.4	Parâmetros do processo	58
3.4.5	Variáveis de entrada e saída.....	58
3.4.6	Realização experimental	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA PRIMEIRA ETAPA, ENSAIOS DE RETIFICAÇÃO ..	61
4.1.1	Irregularidades	62
4.1.2	Alterações metalúrgicas	66
4.1.3	Espessura da região afetada pelo calor nas brocas	68
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA SEGUNDA ETAPA, ENSAIOS DE FURAÇÃO	72
4.2.1	Desgastes das ferramentas	72
4.2.2	Tipos e mecanismos de desgaste.....	73
4.2.3	Monitoramento do esforço axial na furação	76
4.2.4	Medição dos parâmetros geométricos	78
5	CONCLUSÕES	81
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A - TABELA COM AS MEDIDAS DA REGIÃO AFETADA PELO CALOR.....	89
	APÊNDICE B - TABELA COM AS MEDIDAS DE DESGASTES DE FLANCO	91

APÊNDICE C – TESTE DE FISHER PARA OS ESFORÇOS AXIAIS	94
APÊNDICE D – TABELAS COM OS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	95
APÊNDICE E – TESTE DE FISHER PARA OS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS...	97
ANEXO A – MÁQUINAS, EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS	104
ANEXO B – LAUDO TÉCNICO DO MATERIAL	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Historicamente, o processo de retificação tem sido considerado de domínio complexo pelos pesquisadores e profissionais de manufatura devido as características complexas e da dinâmica subjacente (VINAY e RAO, 2013).

A retificação usualmente é utilizada somente em fase final de produção. No entanto, com o passar dos anos e com novos avanços tecnológicos altas taxas de remoção de material podem ser alcançadas com alta eficiência, tornando-se viável em operações intermediárias. Para a usinagem de canais estreitos e profundos em material endurecido, por exemplo, a retificação pode ser significativamente mais eficiente em relação aos processos que utilizam ferramentas de geometria definida (KLOCKE, 2009).

Este aprimoramento do desempenho nos processos de retificação somente tornou-se possível devido ao desenvolvimento contínuo de materiais como os grãos abrasivos, os rebolos e as máquinas de retificação. Decorrente disto, a retificação permite obter baixa rugosidade e reduzidas tolerâncias dimensionais mesmo em materiais endurecidos (KLOCKE, 2009; PUERTO et al., 2013).

Apesar dos diversos estudos, ainda existem muitos desafios para a indústria no que concerne ao processo de retificação. A retificação é considerada um dos processos de remoção de material mais complexos. Para além da complexidade habitual do processo, as aplicações de retificação em diversas áreas de alta tecnologia, como óptica e eletrônica criaram requisitos adicionais para a qualidade dos elementos. Além da baixa rugosidade e alta precisão, que são os requisitos tradicionais para a retificação, as altas aplicações tecnológicas dos componentes muitas vezes precisam de propriedades subsuperficiais individualizadas, como distribuição de tensões residuais e variação permitida de microestrutura (JACKSON e DAVIM, 2011).

O fluido lubrificante-refrigerante apresenta-se como um recurso indispensável para o controle da temperatura no processo de retificação com uso de altas velocidades de corte. O custo do mesmo, no setor produtivo, chega a representar 20% do custo total de fabricação (SILVA e SOARES, 2009). Com base nestes elevados custos de produção atribuídos aos fluídos, busca-se aumentar a sua eficácia no processo. Na retificação de alta velocidade isto depende, entre outros fatores, do tipo de fluido selecionado, da pressão e vazão de alimentação, do projeto da tubeira e, por conseguinte, da velocidade e forma de escoamento do fluido na saída da tubeira (LOPES, 2007).

Contudo, é importante que o processo de retífica confira à peça as características finais desejadas. Como citam Vulc, Brindasu e Beju (2013), a performance do processo, em geral, corresponde aos fatores que afetam tanto os custos como a qualidade.

Tendo em vista esta grande influência citada anteriormente pelos parâmetros de lubrificação, este trabalho tem como proposta verificar a influência de diferentes condições de vazão e pressão na alimentação do fluido lubrificante para o processo de fabricação específico de afiação de brocas de aço-rápido (*High-Speed-Steel*).

Raros são os estudos encontrados na bibliografia técnica ou em trabalhos científicos direcionados ao estudo da influência destes parâmetros no processo de produção de brocas de aço-rápido. As causas que levam a escassez de material para pesquisa podem ser variadas, uma delas é o fato de que o processo é realizado por um número pequeno de empresas ao redor do mundo, outra é a existência de diferentes equipamentos e conseqüentemente condições de fabricação específicas, fator relevante este para a baixa quantidade de publicações sobre o assunto.

Estes são os elementos de maior motivação para a realização deste trabalho, uma vez que a atual metodologia tende a gerar custos mais elevados para as empresas, devido às potenciais falhas que podem ocorrer no produto, assim como a busca por processos mais limpos ou a redução do consumo de produtos nocivos ao meio ambiente. Com a utilização de diferentes combinações na condição de lubrificação, o projeto proposto visa analisar a influência da vazão e pressão na integridade superficial e desempenho em trabalho das peças após a usinagem.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo a respeito da influência da vazão e pressão do fluido lubrificante sobre alguns elementos que compõem a integridade superficial e o desempenho das brocas após o processo de afiação.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) checar a influência da vazão e pressão do fluido lubrificante sobre os mecanismos de desgaste;

- b) verificar a influência da vazão e pressão do fluido lubrificador sobre os tipos de desgaste;
- c) avaliar a influência da pressão e da vazão do fluido lubrificador sobre a integridade superficial, considerando a microestrutura e alterações superficiais;
- d) averiguar a influência da vazão e pressão do fluido lubrificador no desgaste de flanco e esforço axial das brocas de aço-rápido.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

De maneira a atender os objetivos propostos, o trabalho foi organizado inicialmente com a fundamentação teórica (capítulo 2), seguida da metodologia para alcançar os objetivos (capítulo 3), a qual traz os materiais e os métodos aplicados na experimentação. O capítulo 4 traz os resultados experimentais, assim como a discussão e confrontação com a literatura. O capítulo 5 expõe as conclusões baseado nos resultados obtidos, e o capítulo 6 traz sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RETIFICAÇÃO

A retificação é basicamente um processo de fabricação que utiliza partículas abrasivas de geometria indefinida com elevada dureza como elemento de corte para remover cavacos (MALKIN e GUO, 2008; TSCHÄTSCH, 2009). Ao mesmo tempo que Klocke (2009) afirma que os métodos de usinagem com gumes geometricamente indefinidos são processos de precisão no qual alta qualidade superficial e alto grau de precisão podem ser obtidos.

Simplificadamente, a retificação é um processo de usinagem que emprega um rebolo abrasivo girando em alta velocidade para remover material de outro mais macio. Na indústria moderna, a tecnologia de retificação é altamente desenvolvida de acordo com as particularidades de cada produto ou processo (ROWE et al., 1994). Para Koprowski et al. (2016) trata-se de um processo complexo que envolve a interação de múltiplas arestas de corte sem uma forma geométrica específica.

Atualmente, a retificação é um processo importante que representa cerca de 20 a 25% do total de gastos com operações de usinagem em países industrializados (MALKIN e GUO, 2008). Também citam Marinescu et al. (2006) que a tecnologia e consequente aumento da velocidade dos rebolos permitiram alcançar altas taxas de remoção de material. Estima-se que a velocidade dos rebolos aumentou de duas a dez vezes ao longo do último século.

De forma geral, com velocidade do rebolo entre 30 e 35 m/s é considerado retificação convencional. Quando a velocidade do rebolo excede os 45 a 50 m/s é definido já como retificação de alta velocidade e, por fim, se a velocidade estiver entre 150 a 180 m/s ou mais, é definido como retificação de super-alta velocidade (HOU, LI e ZHOU, 2010).

Devido aos abrasivos utilizados terem elevada dureza, para Youssef e El-Hofy (2008) assim como para Marinescu et al. (2006), basicamente a retificação é utilizada quando se requer algumas características principais, tais como:

- a) alta precisão e acabamento superficial;
- b) alta taxa de remoção de material, aqui como exemplo a abertura dos canais das brocas que são realizados numa única rápida operação;
- c) usinagem de materiais endurecidos.

Atualmente dispõe-se de um número significativo de possíveis métodos de retificação. A norma alemã DIN 8589 possui as partes 11,12 e 13 (2003) para classificação dos diferentes processos com geometrias de corte não-definida (WEGENER, 2019).

Ainda como apresenta Wegener (2014), de acordo com a DIN 8589-11(2003) os processos de retificação em seu 4º nível de classificação são divididos da seguinte forma:

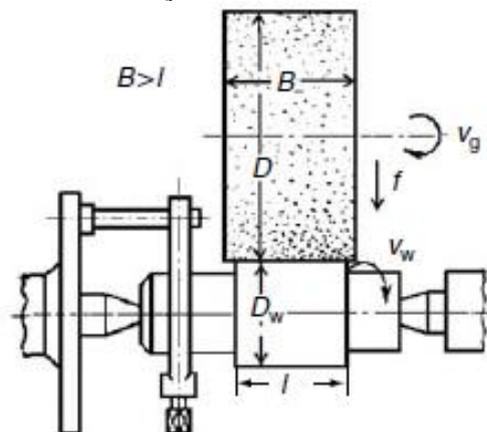
- a) retificação plana;
- b) retificação cilíndrica;
- c) retificação de rosca;
- d) retificação de geração de engrenagem;
- e) retificação de perfis;
- f) retificação de formas livres.

2.2 RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO

De acordo com a norma DIN 8589 a retificação externa de mergulho classifica-se dentro do grupo de operações da retificação cilíndrica externa. Neste tipo de operação não há movimento no sentido longitudinal, existe movimento de avanço relativo entre rebolo e peça somente no sentido transversal, assim, a largura de corte é igual à largura do rebolo, ou a largura efetiva do rebolo. Este é um método largamente utilizado na indústria, principalmente na fabricação de virabrequins, assentos de rolamentos e na abertura de canais (KLOCKE, 2009).

Na Figura 1 abaixo pode-se ver esquematicamente o método e algumas grandezas básicas envolvidas no processo.

Figura 1 - Retificação cilíndrica externa de mergulho

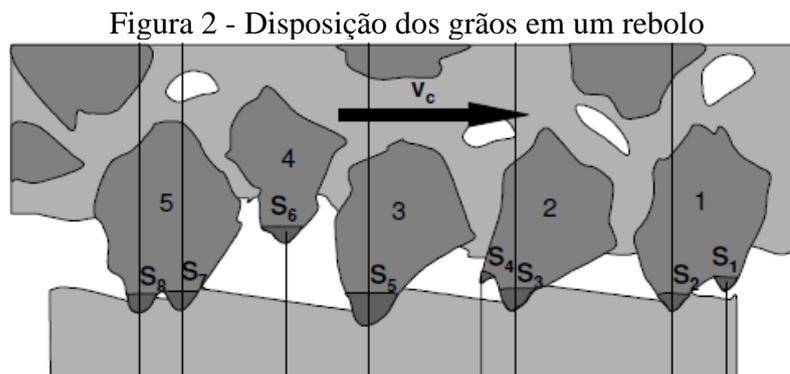


Fonte: Youssef e El-Hofy (2008).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), além do fato do rebolo normalmente ser mais largo que o comprimento da peça a ser usinada, há ainda a possibilidade de se fazer a retificação de várias superfícies simultaneamente.

2.3 GEOMETRIA E CINEMÁTICA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Os grãos dos rebolos se sobressaem de forma variável em relação ao material de ligação, envolvendo-se assim com força variável. Apenas grãos ou partes salientes da superfície do grão penetram na peça durante o processo de usinagem, gerando assim a remoção de material. Isto pode ser melhor entendido observando-se a distribuição dos grãos na Figura 2 (MARINESCU et al., 2004).

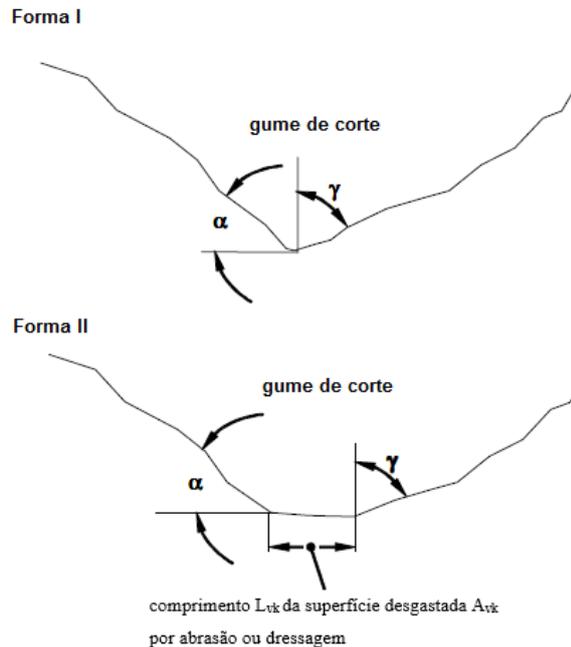


Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

Perfis típicos de corte podem ser vistos na Figura 3. Os grãos abrasivos podem se fragmentar individualmente durante o processo, de modo que, sua forma possa ser descrita como semelhante a ferramentas com gumes definidos. A geometria deve ser determinada pela ferramenta com um ângulo de corte ortogonal γ , o ângulo de folga ortogonal da ferramenta α e a superfície de desgaste A_{vk} que devem, portanto, ter um ângulo de corte ortogonal de ferramenta negativo para ser comparável a geometria dos grãos (KLOCKE, 2009).

São identificadas duas formas básicas, sendo que a Forma I mostra uma geometria de ponta sem desgaste enquanto que a Forma II ilustra um contorno de ponta com superfície de desgaste A_{vk} , que pode ser considerado como parte de uma face de flanco, de modo que as condições de fricção sejam comparáveis às de uma ferramenta de torneamento (KLOCKE, 2009).

Figura 3 - Perfil de grão em analogia à gumes de corte usados em ferramentas de geometria definida



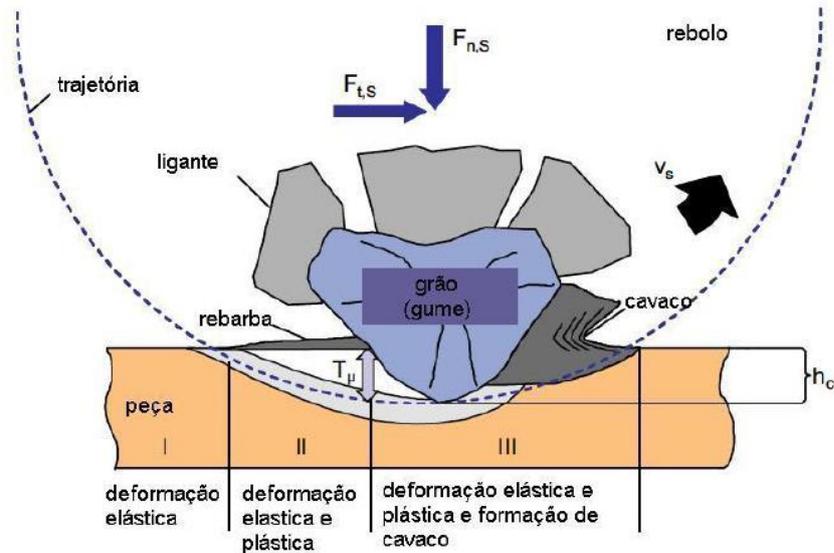
Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

A força de corte pode ser dividida em duas componentes, uma normal à direção de corte ($F_{n,s}$) e outra tangencial ($F_{t,s}$). No entanto, para a retificação com perfis não simétricos ou com percurso esta distribuição das forças fica comprometida, dado que haveria também uma componente de força adicional em uma direção paralela ao eixo do rebolo. Através da análise das forças que atuam momentaneamente sobre o gume de corte e o comportamento do processo é possível interpretar o resultado do trabalho em termos de qualidade da peça ou desgaste do rebolo (KLOCKE, 2009; MALKIN e GUO, 2008).

Ainda, segundo Klocke (2009) a força tangencial pode trazer as informações relativas à potência consumida e a energia necessária para remover determinada quantidade de material, enquanto que a força normal reflete sobre a qualidade superficial da peça, sobre o dimensional e sua geometria.

Analisando um gume isoladamente durante a penetração no material da peça é possível distinguir três regiões principais, como pode ser visto na Figura 4. No início da penetração do gume ocorrem apenas deformações elásticas na peça e a força normal é superior à força tangencial. À medida que o gume penetra na peça e o cavaco começa a ser formado ocorre uma diminuição da força normal e um aumento na força tangencial de corte, levando assim consequentemente ao aumento da relação de força de usinagem (μ). Esta relação é dada pela razão das forças tangencial e normal ($F_{t,s}/F_{n,s}$) (KLOCKE, 2009).

Figura 4 - Zonas de deformação elástica e plástica na formação do cavaco



Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

Os parâmetros que favorecem a formação do cavaco levam a um aumento da força tangencial, enquanto que os parâmetros que elevam a penetração do início de corte (T_μ) tendem a aumentar a força normal. O atrito entre o gume e o material da peça é o principal fator de influência sobre a formação do cavaco (MALKIN e GUO, 2008).

O aumento do atrito favorece a formação do cavaco devido a diminuição da penetração do início de corte, isto para uma determinada espessura de corte (h_{cu}). Para entender melhor este parâmetro (h_{cu}) pode-se admitir que ele representa a profundidade da penetração dos grãos abrasivos no material que está sendo usinado. Nesta condição observam-se cavacos com maiores espessuras, já o contrário leva a um maior valor de T_μ , logo, se aproveita menos a penetração do gume na formação do cavaco. A formação do cavaco também é influenciada pelo raio de gume ρ_s , a lubrificação, as condições de escoamento do material, a velocidade de corte e o ângulo de ação do gume (KLOCKE, 2009; MARINESCU et al., 2006).

2.3.1 Comprimento de contato (l_c)

O arco ou comprimento de contato (l_c) define uma área de contato aparente entre o rebolo e a peça durante o processo de retificação. Pode-se calcular o comprimento de contato, geralmente, através da Equação 1. É importante ressaltar que esta equação é válida negligenciando-se os movimentos e as deformações do rebolo e da peça (MALKIN e GUO, 2008).

$$l_c = (a \cdot d_e)^{1/2} \quad (1)$$

Onde:

l_c é o comprimento de contato;

a é a profundidade de penetração do rebolo;

d_e é o diâmetro equivalente do rebolo.

2.3.2 Diâmetro equivalente (d_e)

Conforme afirmam, King e Hahn (1986), na retificação cilíndrica externa o ajuste ou a conformidade do rebolo com a peça de trabalho se difere do que ocorre na retificação cilíndrica interna. A diferença de curvatura entre o rebolo e a peça interfere no comprimento de contato, já com o diâmetro equivalente é possível indicar o grau em que a superfície do rebolo e da peça se adaptam.

$$d_e \equiv \frac{d_s}{1 \pm d_s/d_w} \quad (2)$$

Onde:

d_e é o diâmetro equivalente do rebolo;

d_s é o diâmetro do rebolo;

d_w é o diâmetro da peça.

Segundo Malkin e Guo (2008), o sinal positivo deve ser utilizado na operação de retificação cilíndrica externa enquanto que o negativo na interna. No caso da retificação superficial plana, $d_w = \infty$ ($d_e = d_s$).

2.3.3 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

De acordo com Rowe (2009), a espessura equivalente de corte é particularmente valiosa para correlacionar os parâmetros de retificação para um tipo específico de rebolo.

Em definição é dada como a relação entre a taxa de remoção e a velocidade de corte (velocidade periférica do rebolo). Abaixo equação 3 para retificação plana e a equação 4 para a retificação cilíndrica (MALKIN e GUO, 2008).

$$h_{eq} = a \cdot \frac{v_w}{v_s} \quad (3)$$

Onde:

h_{eq} é a espessura de corte equivalente;

a é a profundidade de penetração do rebolo;

v_w é a velocidade da peça;

v_s é a velocidade de corte.

Pode-se observar que o aumento da profundidade de corte e a velocidade de trabalho tendem a aumentar a espessura equivalente de corte, ao passo que o aumento da velocidade do rebolo reduz. O aumento da espessura equivalente implica no aumento da tensão nos grãos abrasivos, enquanto a redução da espessura por consequência reduz a tensão. Isso explica a tendência de se aumentar a velocidade do rebolo (ROWE, 2009).

$$h_{eq} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_s} \quad (4)$$

Onde:

h_{eq} é a espessura de corte equivalente;

d_w é o diâmetro da peça;

v_f é a velocidade de avanço do rebolo;

v_s é a velocidade de corte.

Tal parâmetro é considerado o que melhor caracteriza o processo de retificação, uma vez que está englobando três importantes características do processo. A velocidade de corte é responsável pela “dureza dinâmica” do rebolo, e a sua elevação proporciona o aumento do número de grãos ativos num mesmo intervalo de tempo, provocando assim o decréscimo da força de corte devido a menor participação de cada grão na operação, e com isto proporcionando uma maior vida do rebolo (MALKIN e GUO, 2008).

2.3.4 Taxa de remoção de material (Q_w)

A taxa de remoção de material (Q_w) é um parâmetro determinado pela profundidade de corte (a), pela velocidade relativa entre a peça e o rebolo (v_w) e pela largura de retificação (b) (ROWE, 2009). Para Malkin e Guo, (2008) através da equação 5 podemos determinar a taxa

para retificação tangencial plana enquanto que para a retificação cilíndrica é conveniente utilizar a equação 6.

$$Q_w = b \cdot a_e \cdot v_w \quad (5)$$

$$Q_w = b \cdot \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (6)$$

Onde:

Q_w é a taxa de remoção de material;

b é a largura de retificação;

a_e é a profundidade de corte;

v_w é a velocidade da peça;

d_w é o diâmetro da peça;

v_f é a velocidade de mergulho.

A taxa de remoção de material pela largura do rebolo é expressa como taxa de remoção específica (Q'_w), sendo definida na equação 7. Usando a taxa de remoção específica se reduz o número de variáveis e permite a comparação direta da eficiência de remoção de material para uma ampla gama de operações (ROWE, 2009).

$$Q'_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (7)$$

Onde:

Q'_w é a taxa de remoção de material específica;

d_w é o diâmetro da peça;

v_f é a velocidade de mergulho.

2.4 AÇO-RÁPIDO

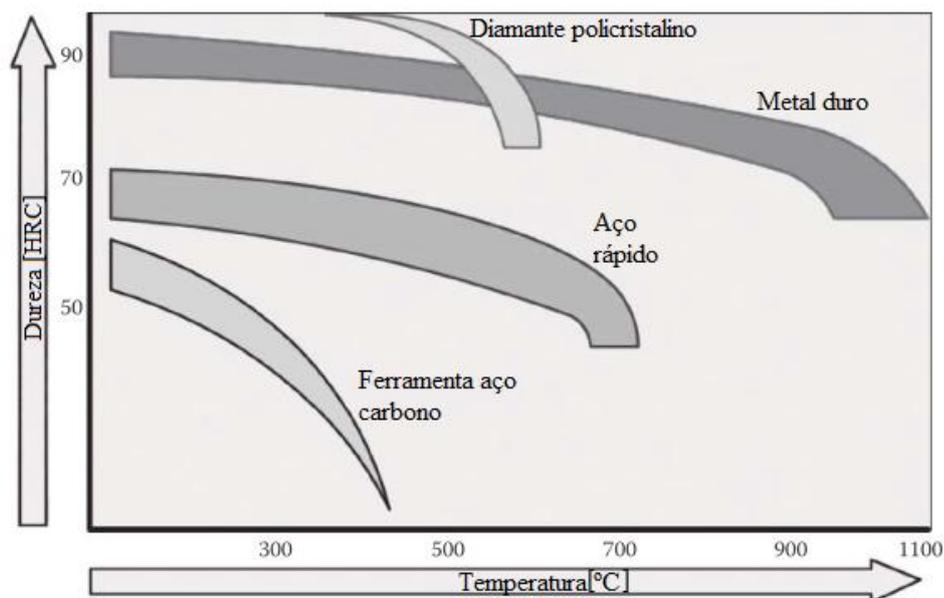
Os aços-rápidos são assim designados pois quando desenvolvidos, no início do século passado, eram os materiais para ferramenta que suportavam as maiores velocidades de corte, e devido a isto, os aços rápidos compreendem uma família de ligas usada principalmente para ferramentas de corte. O nome aço-rápido (do inglês *High Speed Steel – HSS*) é uma síntese de dois fatores: (a) as ligas pertencentes ao sistema multicomponente Fe-C-X, onde X representa um grupo de elementos de liga como Cr, W ou Mo, V e Co, como principais; (b) as ligas

caracterizadas pela sua capacidade de manter um alto nível de dureza quando submetidas à elevadas temperaturas resultantes do corte de metais em altas velocidades (BOCCALINI e GOLDENSTEIN, 2003; TSCHÄTSCH, 2009).

Existe uma ampla variedade de aços-rápidos que podem ser divididos em dois tipos básicos: (1) a categoria T, que compreende os tipos que contém tungstênio (W) como seu principal elemento de liga; (2) a categoria M, que compreende os tipos predominantemente com teor de molibdênio, ambos assim designados pela AISI (*American Iron and Steel Institute*) (GROOVER, 2010).

Comercialmente, o aço-rápido é um dos mais importantes materiais de ferramentas em uso, apesar de ter sido introduzido já há mais de um século. O aço-rápido é especialmente adequado para aplicações que envolvam geometrias de ferramentas complexas, como brocas, machos e fresas. Estas formas complexas são geralmente mais fáceis e mais baratas de serem produzidas a partir do aço-rápido não endurecido, se comparadas a outros materiais de ferramentas. Estes aços podem ser tratados termicamente para que a dureza da ponta se torne elevada (65 Rockwell C), enquanto a tenacidade das partes internas da ferramenta permaneça adequada (GROOVER, 2010). Na Figura 5 é possível comparar essa propriedade de dureza em função da temperatura dos aços-rápidos com outros materiais ferramenta utilizados.

Figura 5 - Dureza dos materiais ferramenta versus temperatura



Fonte: Adaptado de Astakhov (2014).

Sua característica principal é a capacidade de operar em velocidades 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. Nessas temperaturas estes aços retêm a dureza que

lhes permite continuar na operação de usinagem, após resfriados readquirem a dureza original. Essa característica é chamada “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 ferramentas, tornando sua durabilidade maior (CHIAVERINI, 2005).

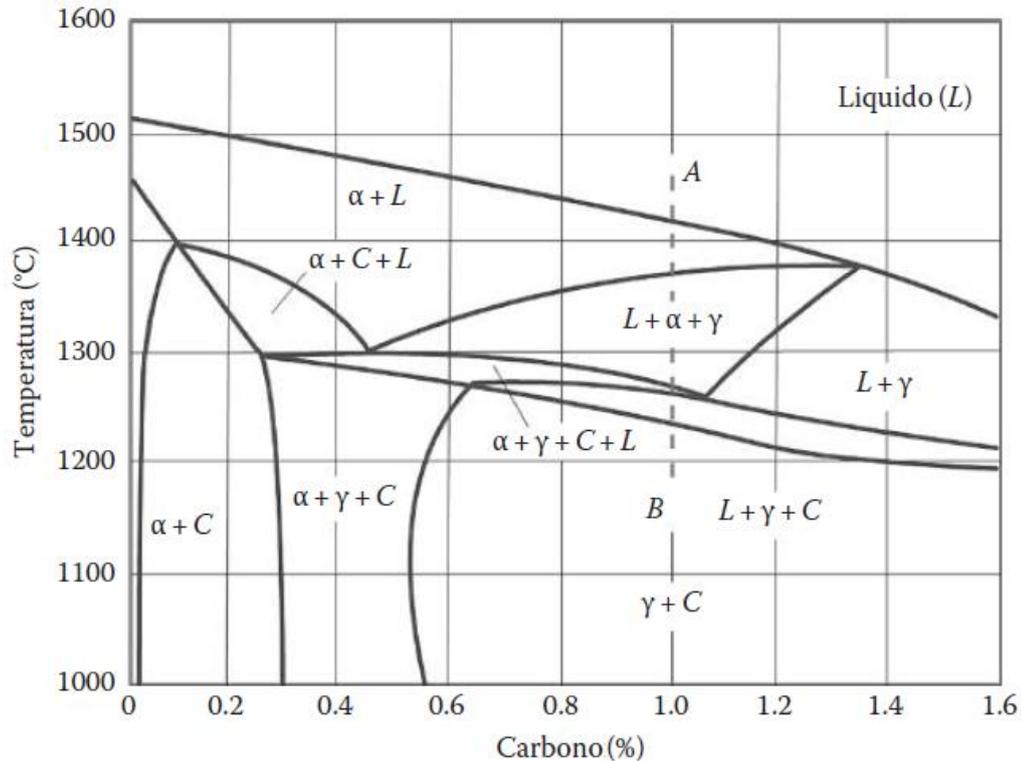
2.4.1 Formação de propriedades

A formação das propriedades básicas dos HSS ocorre desde os tratamentos de fundição e pós-fundição. Para compreender a diferença na qualidade (e, portanto, no custo) do HSS de vários fornecedores de aço, é necessário conhecer o básico dos processos de fundição e pós-fundição do HSS para poder obter informações adequadas ao selecionar um material. Ao fazer isso, é preciso perceber claramente que a composição química do HSS (também conhecido como o grau específico de HSS de acordo com as normas ISO e AISI) afeta a qualidade da ferramenta feita deste aço em um grau muito menor do que os processos de fundição, pós-fundição, e tratamento térmico utilizados (ASTAKHOV, 2014).

O aço-rápido é um complexo sistema de liga multicomponentes nos quais as microestruturas são muito dependentes da cinética das reações de solidificação e do estado sólido e as distribuições não uniformes de fases que acompanham essas reações. Segundo Hoyle (1988), a melhor maneira de racionalizar as mudanças microestruturais que ocorrem durante o processamento dos HSSs é considerar seções verticais através dos sistemas multicomponentes que compõem esses aços. As seções verticais traçadas da região de fase estabilizada são em função da temperatura e do teor de carbono, mas não fornecem as composições das fases coexistentes ou a configuração das fases. Mesmo assim, as seções verticais indicam quando várias fases devem se formar durante o processamento, e essas informações consideradas juntamente com outras observações fornece uma boa compreensão da evolução da microestrutura dos aços-rápidos.

A Figura 6 mostra uma concentração típica de carbono para o aço M2. Nestas composições, começando da fase líquida, cristais dendríticos ou ramificados de ferrita nucleada que crescem após o resfriamento.

Figura 6 - Diagrama de fases do aço-rápido M2 com base na seção 6 W-5 Mo-4 Cr-2 V através do sistema Fe-W-Mo-Cr-V-C



Fonte: Adaptado de Astakhov (2014).

2.5 BROCAS

Para a abertura de furos empregam-se ferramentas denominadas brocas, as mesmas podem ser de diversos tipos, tais como: brocas chatas, brocas helicoidais, brocas canhão, brocas ocas, entre outros (STEMMER, 1995).

2.5.1 Tipos de brocas

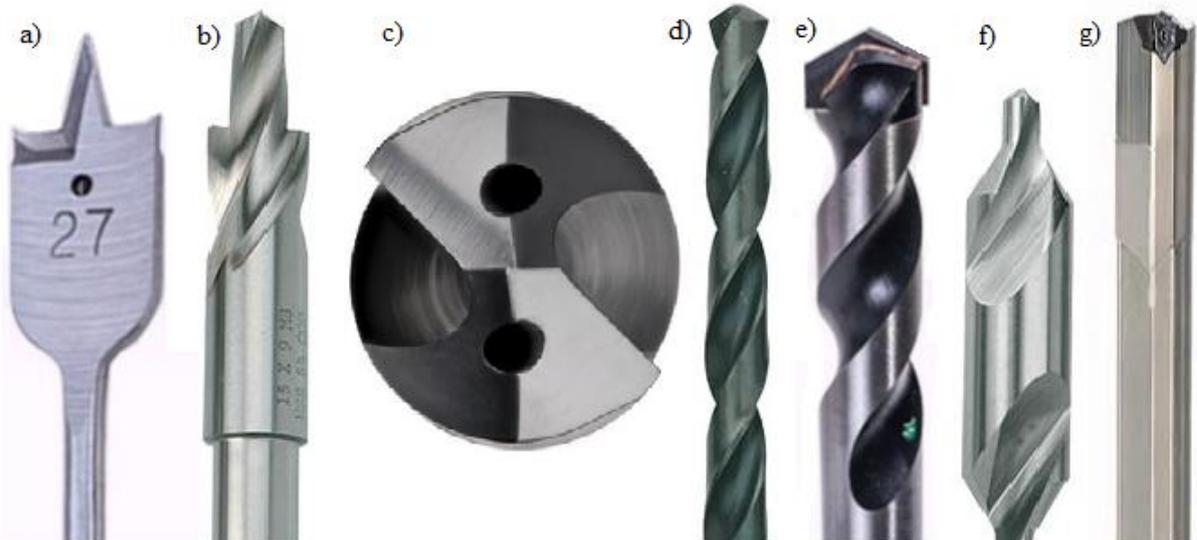
Ainda segundo Stemmer (1995), diferentes tipos de brocas podem ser encontrados de acordo com sua geometria e finalidade. A seguir são descritos cada um dos principais tipos:

- Brocas chatas:** são as ferramentas de furação mais antigas. Obtidas por achatamento a quente de uma barra cilíndrica ou por encaixe de uma lâmina. Utilizadas para furações pouco profundas em materiais frágeis. Suportam momentos torsores muito limitados e a remoção de cavacos, crítica em furos mais profundos, é muito deficiente;
- Brocas escalonadas:** são ferramentas que possuem dois ou mais diâmetros retificados em brocas padronizadas. São frequentemente utilizadas para a

execução de dois ou mais diâmetros diferentes, ou para combinar operações de furação, alargamento ou chanframento;

- c) Brocas com dutos de refrigeração: são utilizadas para furos mais profundos, em que é necessário prover adução de fluido de corte mais próximo na zona de contato entre a peça e a ferramenta, facilitando assim a remoção de calor e dos cavacos no processo;
- d) Brocas helicoidais: são as ferramentas de maior aplicação na furação, sendo as principais na obtenção de furos cilíndricos. Possuem dois gumes de corte principais, ligados pela aresta transversal de corte;
- e) Brocas helicoidais com pastilhas de metal duro: tem sua aplicação na execução de furos em materiais muito abrasivos, tais como concreto, cerâmica, não metálicos, entre outros. Na usinagem de aços só são empregadas naqueles tipos de difícil usinabilidade, onde a vida das brocas de aço rápido se torna muito pequena;
- f) Brocas de centro: são utilizadas para marcar o centro dos furos ou realizar pré-furos. É uma ferramenta combinada para furar e escarear, sendo em geral dupla, isto é, afiada em ambos os lados para melhor aproveitamento do material;
- g) Brocas canhão: são ferramentas que possuem o corpo em aço, proporcionando maior tenacidade, sendo geralmente a ponta ou pastilha de metal duro intercambiável. São utilizadas para furações profundas (acima de 10 vezes o diâmetro), por esta razão aconselha-se o uso de altas pressões nos fluídos de corte e refrigeração interna.

Figura 7 - Tipos de brocas

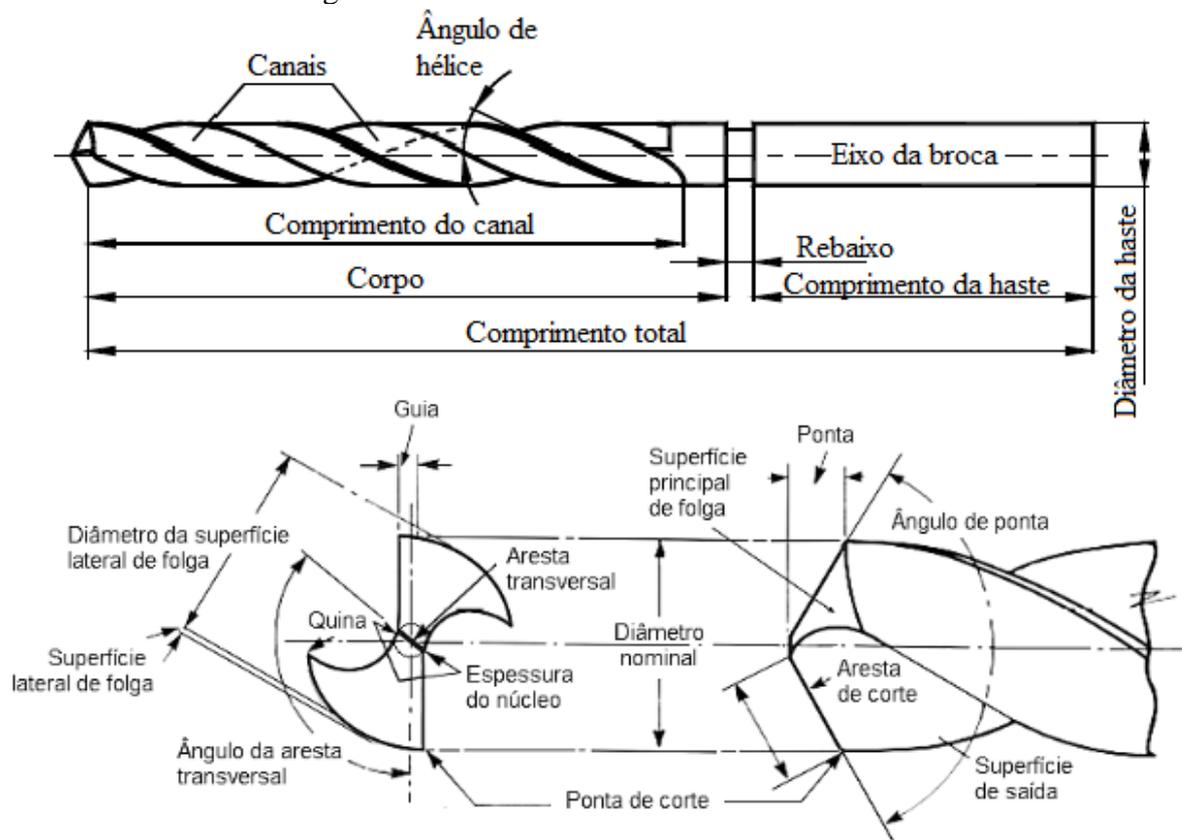


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

2.5.1.1 Brocas helicoidais

A broca helicoidal foi inventada por Steven A. Morse em 1863. O método original de fabricação baseava-se em cortar dois sulcos em lados opostos de uma barra redonda, depois torcer a barra para produzir os canais helicoidais. Este processo deu o nome da ferramenta. Atualmente na fabricação de brocas helicoidais uma peça cilíndrica gira e avança em direção ao rebolo para gerar os canais helicoidais, cuja geometria depende do perfil do rebolo abrasivo. Pode ser visto na Figura 8 uma broca helicoidal comum e suas respectivas nomenclaturas, consistindo basicamente no corpo, rebaixo (opcional) e haste.

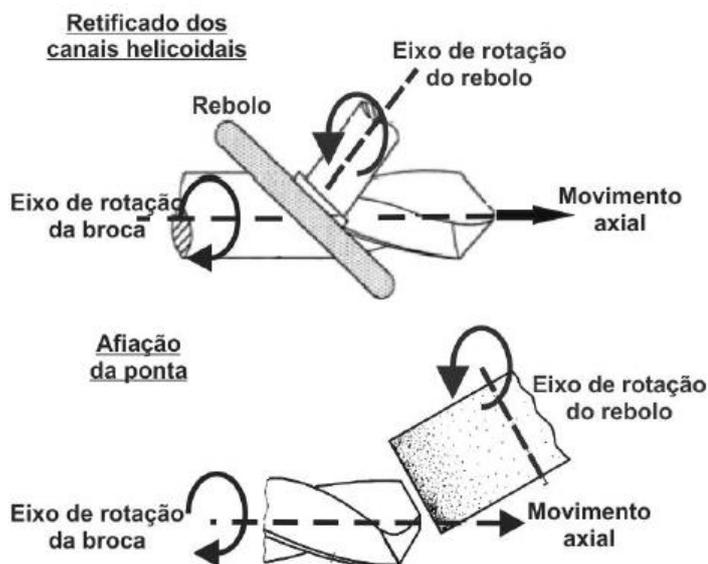
Figura 8 - Nomenclatura das brocas helicoidais



Fonte: Adaptado de Astakhov (2014).

A Figura 9 mostra o tipo de afiação mais comum empregado em brocas helicoidais, a afiação de duplo tronco de cone. Não obstante, existem diversos métodos de afiação que definem a geometria do gume transversal (ASTAKHOV, 2010b).

Figura 9 - Processos de fabricação de brocas helicoidais



Fonte: Moreno, (2013).

2.5.2 Tipos de afiação

O gume transversal é responsável por uma parcela ponderável da força de avanço. Em virtude disto, a afinação do gume transversal à medida que são realizadas afiações se mostra necessária visto que o mesmo tende a aumentar pelas sucessivas reafiações e a broca ficando mais curta. Isto se deve ao fato de os fabricantes aumentarem o diâmetro do núcleo da broca em direção à haste para aumentar a rigidez torcional. Para reduzir a força de avanço se retifica uma reentrância na ponta da broca, reduzindo o gume transversal, como mostra a Figura 10 (a) (STEMMER, 1995).

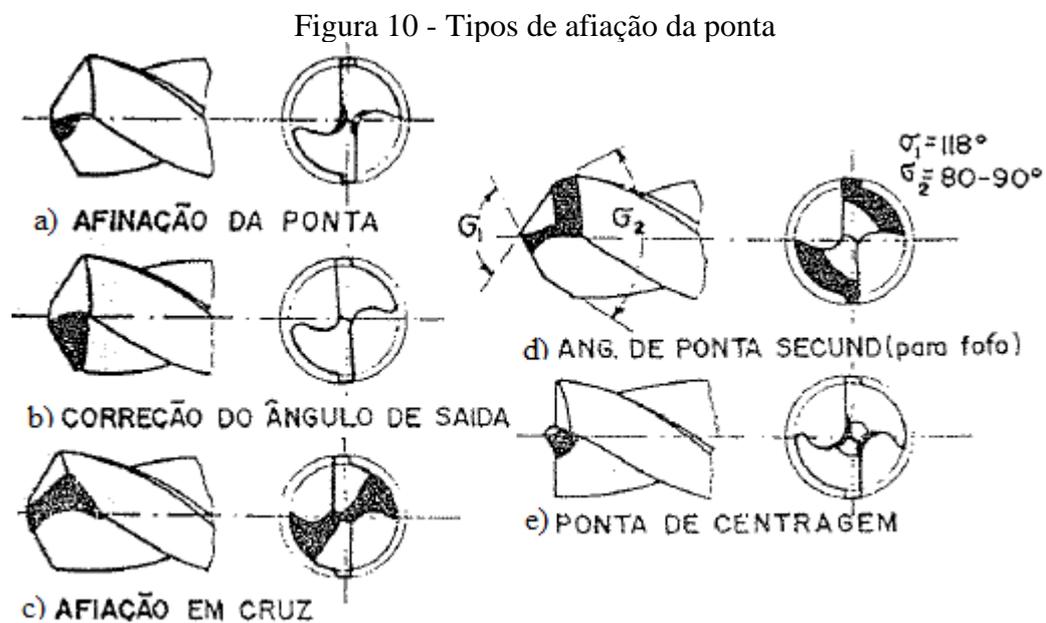
Na correção do ângulo de saída com afinação do gume transversal, como mostra a Figura 10 (b), se retifica uma canaleta que simultaneamente corrige o ângulo de saída da broca no centro e afina o gume principal, melhorando as condições de corte (STEMMER, 1995).

A afiação cruzada é outro tipo, segundo Stemmer (1995), pela qual se retifica um plano inclinado nas superfícies de incidência (flancos), eliminando parcial ou totalmente o gume transversal, como pode ser visto na Figura 10 (c). Em lugar do gume transversal se formam dois novos gumes principais que formam um ângulo menor do que 90° com o eixo principal, provocando assim um efeito centrante na broca. Este tipo de afiação é mais utilizado em brocas para furos profundos.

Na afinação de ponta secundária, como mostra a Figura 10 (d), além da ponta principal com o ângulo usual de 118° , retifica-se uma segunda ponta com ângulo de 80 à 90° . Este tipo de afiação é recomendada para a furação de ferro fundido cinzento. O objetivo da ponta

secundária é reduzir o perigo de sobre-aquecimento na parte mais externa dos gumes, onde a velocidade de corte é máxima (STEMMER, 1995).

A afiação com ponta de centragem, que pode ser vista na Figura 10 (e), é utilizada basicamente na furação de chapas. De acordo com Astakhov (2014), o ângulo de ponta varia de 150 à 180°, dependendo da espessura da chapa a ser furada. Ângulos grandes ensejam maior desgaste na periferia, recomendando-se assim nos casos mais críticos o uso de um ângulo secundário de 90°. Este tipo de afiação da ponta só deve ser empregado em furações de pouca profundidade (menor que duas vezes o diâmetro da broca).

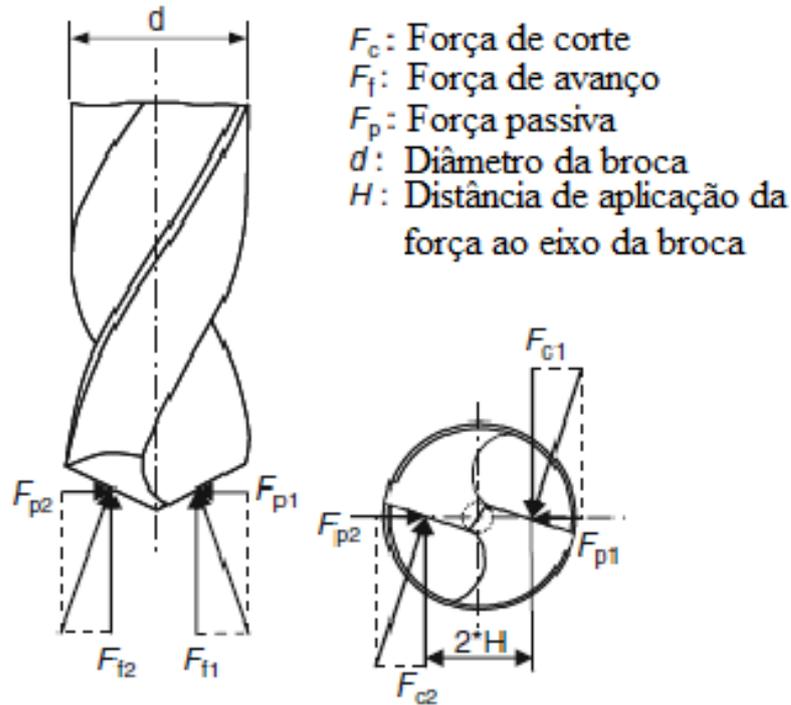


Fonte: Adaptado de Stemmer (1995).

2.5.3 Esforços na furação

Um diagrama de corpo livre simplificado para uma broca helicoidal é mostrado na Figura 11. A força de usinagem que atua sobre a parte cortante durante a furação pode ser vista decomposta em três componentes: Força de corte (F_c), Força de avanço (F_f) e Força passiva (F_p) (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2008; KLOCKE, 2011).

Figura 11 - Componentes dos esforços em furação



Fonte: Adaptado de Klocke, (2011).

A força de corte, em cada gume cortante, é decorrente da resistência ao corte do material usinado e está distribuída sobre as partes cortantes do gume principal. Pela relação entre o momento torsor na furação e a força de corte calculada para uma determinada seção de usinagem, é possível estabelecer a distância “H” do eixo de rotação a que esta força é aplicada. Já a força de avanço é decorrente da atuação do gume transversal (corte deficiente e esmagamento do material) e da resistência ao corte (penetração) do material usinado. A força passiva, por sua vez, atuante em uma parcela do gume principal tem sentido oposto à força passiva atuante na outra. Presumindo-se que a geometria da ponta da broca tenha sido corretamente construída, a resultante de $F_{p1} + F_{p2}$ é nula (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2008; KLOCKE, 2011).

2.5.4 Desgaste

Nas brocas helicoidais, segundo Kanai (1978 apud CARDOSO, 2014; ZEILMANN, 2003) o desgaste apresenta-se na face, no flanco, no gume transversal, na quina e nas guias. Os principais tipos de desgaste em brocas são mostrados na Figura 12 e elencados conforme segue:

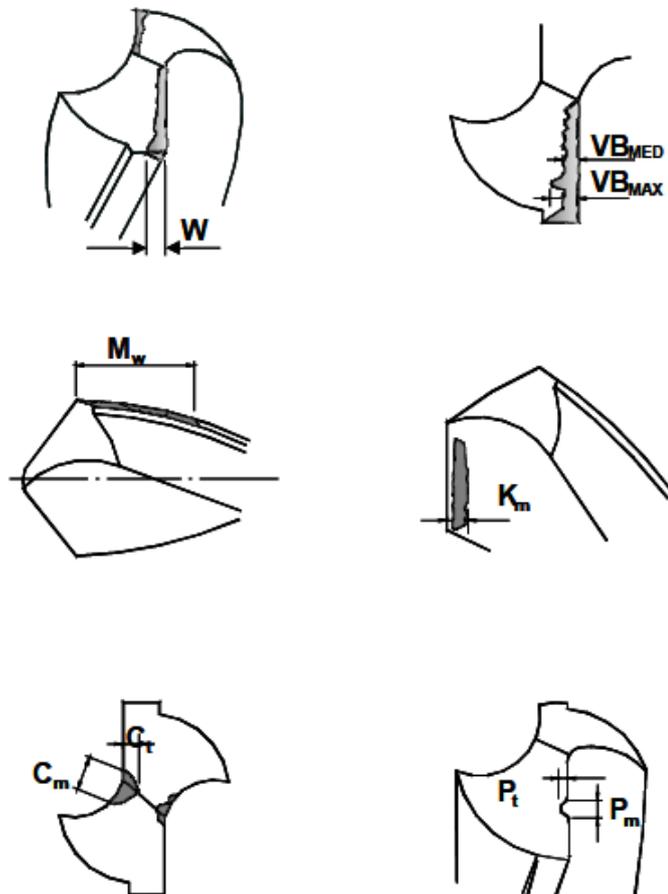
- desgaste de quina (W);
- desgaste de flanco no ponto médio ($VB_{méd}$);
- desgaste de flanco máximo ($VB_{máx}$);
- desgaste de guia lateral (M_w);

- e) desgaste de cratera (K_m);
- f) desgaste do gume transversal medido em relação ao gume de corte (altura) (C_t);
- g) desgaste do gume transversal medido em relação ao gume de corte (largura) (C_m);
- h) lascamento do gume de corte medido em relação ao gume transversal (altura) (P_t);
- i) lascamento do gume de corte medido em relação ao gume transversal (largura) (P_m).

Por sua vez, os principais mecanismos responsáveis pelos desgastes nas brocas são (FERRARESI, 1969; KLOCKE, 2011; STEMMER, 1995):

- a) fadiga térmica e mecânica;
- b) adesão e cisalhamento;
- c) difusão;
- d) abrasão mecânica;
- e) oxidação;
- f) desgaste químico.

Figura 12 - Principais tipos de desgaste em brocas



Fonte: Kanai (1978, apud ZEILMANN, 2003).

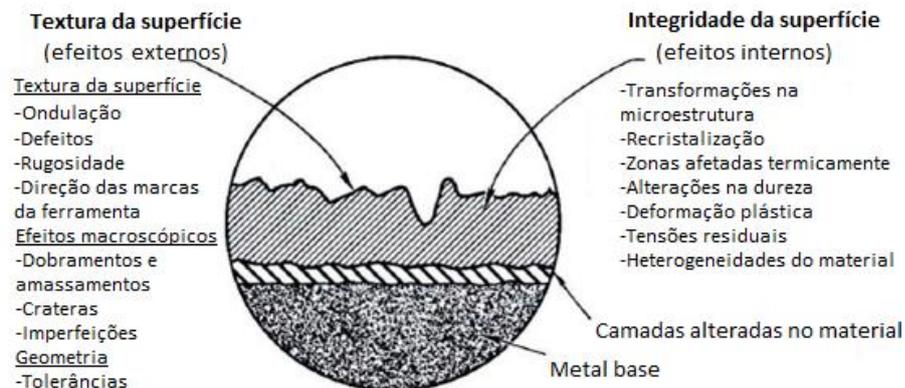
2.6 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Uma definição feita por Astakhov (2010a) descreve a integridade superficial como o conjunto de propriedades de uma superfície (superficiais e subsuperficiais) que afetam o seu desempenho em serviço.

Há um grande número de parâmetros influenciando a camada superficial na retificação, como exemplos: características e topografia do rebolo, características do material da peça de trabalho, cinemática do processo de corte, fluido de corte utilizado, entre outros. Devido a isso, qualquer predição das propriedades da camada superficial retificada é extremamente difícil, especialmente sob consideração teórica (ASTAKHOV, 2010b).

A tecnologia das superfícies inclui a descrição do conjunto de efeitos internos e externos à superfície, sendo denominados como textura superficial, ou topografia de superfície e integridade da superfície (MALKIN e GUO, 2008) . Na Figura 133 apresenta-se uma representação esquemática destes elementos.

Figura 13 - Representação dos elementos superficiais e subsuperficiais que definem a tecnologia das superfícies



Fonte: Machinability Data Center (1980 apud ROSARIO, 2011).

A integridade superficial de uma peça usinada é o resultado de um processo que envolve diversos fatores como, deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, vibrações, tensões residuais e até mesmo reações químicas (MACHADO et al., 2011).

Para Malkin e Guo (2008), na retificação os aspectos mais importantes de integridade superficial estão relacionados aos danos térmicos causados pela excessiva geração de calor durante o processo. Segundo Mahdi e Zhang (1997), a deformação plástica térmica induzida pelo calor gerado é uma das maiores causadoras de tensão residual de retificação.

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, 2011).

Essas variáveis são:

- a) as variáveis de desempenho da máquina de retificação como: rigidez, precisão de posicionamento, estabilidade e deformação térmica;
- b) as variáveis do rebolo como: tamanho dos abrasivos, propriedades dos materiais abrasivos, estrutura, concentração, porosidade, dureza e propriedades dos materiais ligantes;
- c) as propriedades do material da peça como: tensão de escoamento, resistência à fratura e resistência a transformação de fase;
- d) parâmetros de retificação como: velocidade do rebolo, velocidade da mesa, profundidade de corte, tipo de refrigerante e método de aplicação, condições de dressagem e propriedades dos dressadores.

No trabalho de Puerto et al. (2013), a evolução da rugosidade das peças foi monitorada continuamente junto com o progresso da retificação e desgaste do rebolo. Assim, a evolução da rugosidade foi relacionada com diferentes variáveis do processo como: parâmetros de dressagem, condições de retificação, forças de retificação e desgaste radial do rebolo.

Condições agressivas de dressagem geram topografias grosseiras no rebolo, portanto, a rugosidade inicial tende a ser alta e reduz à medida que a retificação vai acontecendo. Já em condições de dressagem mais suaves as topografias geradas foram mais brandas, fazendo com que as rugosidades iniciais ficassem levemente inferiores à rugosidade final (PUERTO et al., 2013).

Verificou-se também uma relação muito próxima entre as forças de retificação e a rugosidade das peças usinadas. As forças e a rugosidade tendem a estabilizar ao mesmo tempo, no entanto, a rugosidade converge para valores mais elevados quando as condições de usinagem mais agressivas são utilizadas (PUERTO et al., 2013). Através dos resultados obtidos neste estudo, confirmam-se também as observações feitas por Adibi, Rezaei e Sarhan (2013) os quais afirmam que a perda do poder de corte do rebolo causa excessivas forças e temperaturas no processo.

É interessante ressaltar que devido a todos estes fatores envolvidos na integridade da superfície, grande parte das peças que são retificadas na indústria provém de outros processos que antecedem a retificação, principalmente peças que já foram tratadas termicamente. Com isto, é de certa forma comum problemas ligados à material aparecerem depois do processo de retificação, porém ao se analisar profundamente os motivos encontra-se a raiz do problema em algum dos processos anteriores. Isto ficou bem evidente no estudo feito por Oliveira et al. (2009), onde abordaram diversos problemas práticos encontrados na indústria, sendo que em inúmeros casos a solução passava por ter a matéria-prima dentro de especificações mais restritas

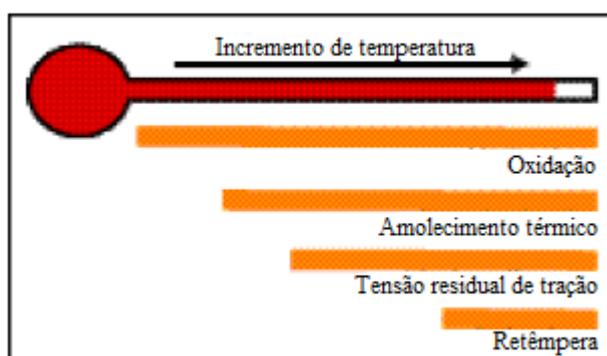
de composição química ou as micro estruturas em conformidade com o que era necessário para posterior retificação. Neste estudo são abordados os mais variados casos e com isto pode-se concluir que dentre tantos itens é notória a possibilidade de evolução nos processos industriais, uma vez aliados os conhecimentos produzidos na academia com os recursos da indústria.

2.6.1 Queima da peça

De acordo com Malkin e Guo (2008), um dos tipos mais comuns de danos térmicos é a queima da peça de trabalho. Este fenômeno tem sido investigado principalmente para retificação de aço carbono e ligas de aço, embora este seja um problema também para outros materiais metálicos.

A “queima de retificação” é um termo usado frequentemente para descrever qualquer tipo de dano térmico que ocorre na peça de trabalho durante a retificação. Muitas vezes o operador ou engenheiro responsável pelo processo simplesmente procura se há descoloração da peça para determinar a existência de algum problema. Porém, existem vários tipos diferentes de danos térmicos. Alguns são estritamente cosméticos, alguns inibem o desempenho da peça e outros levam até a imediata fratura da peça de trabalho. Abaixo na Figura 14 é possível relacionar alguns destes tipos de danos com o aumento da temperatura (BADGER; TORRANCE, 2000).

Figura 14 - Diferentes tipos de danos térmicos e temperaturas relativas em que ocorrem



Fonte: Adaptado de Badger e Torrance (2000).

Visualmente, a queima da peça em aços é caracterizada pelas cores azuladas, que são consequência da formação de uma camada de óxido. As cores de têmpera são normalmente removidas no fim do ciclo de retificação, especialmente na retificação cilíndrica, se for utilizado o processo de faiscamento ou *spark-out*. Este efeito, porém, pode ser apenas cosmético pois a ausência de cores de têmpera na superfície da peça usinada não significa necessariamente que a queima da peça não ocorre (MALKIN; GUO, 2008).

Quando as temperaturas na superfície da peça excedem os valores limite, ocorre a oxidação e queima da superfície. Os principais fatores que influenciam nessa temperatura limite, acima da qual ocorrem danos térmicos significativos, são a velocidade do rebolo, a velocidade da peça, a intensidade da força e a afiação do rebolo. Em geral, velocidades de trabalho mais altas e rebolos afiados permitem que as superfícies sejam produzidas sem que ocorram danos térmicos significativos (ASTAKHOV, 2010b).

2.7 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL

A integridade da superfície é obtida pela seleção e controle dos processos de fabricação, estimando seus efeitos nas propriedades de engenharia significativas dos materiais de trabalho. Na retificação existem cinco parâmetros importantes que determinam se as condições são suaves ou abusivas, sendo eles: tipo de rebolo, velocidade do rebolo, avanço, dressagem do rebolo e fluido lubrificante. À medida que os parâmetros se tornam mais agressivos (isto é, rebolos mais duros, maiores velocidades de corte dos rebolos, maiores avanços e assim por diante) o processo se torna mais abusivo e, portanto, mais propenso a produzir danos na superfície (ASM HANDBOOK, 1995).

As deformações plásticas não uniformes nas proximidades da superfície podem induzir a formação de tensões residuais no material. Segundo Malkin e Guo (2008), três fatores principais podem induzir a estas formações de tensões, são elas: influência mecânica, das transformações microestruturais e da dilatação térmica. Dependendo do tipo de material e das condições de usinagem impostas as alterações podem gerar tensões de tração e compressão.

O estudo realizado por Alves (2007) buscou condições de lubrificação que pudessem propiciar a diminuição do volume de fluido de corte sem perdas em termos de acabamento superficial e integridade na retificação do aço ABNT 4340 utilizando rebolo de CBN. Em suas propostas de processo otimizado e MQL, ambos foram capazes de manter a dureza superficial e a integridade da superfície das peças produzidas. Exceção somente para a condição MQL com vazão de fluido de 40ml/h que produziu trincas e retêmpera superficial.

De acordo com Silva (2000), a operação de retificação em aços temperados e revenidos pode ocasionar um aumento significativo na microdureza superficial da peça. Isso ocorre devido à queima superficial, que é capaz de provocar um aumento da dureza superficial em função da retêmpera do material, a qual é consequência da re-austenitização do mesmo,

proporcionando assim a formação de martensita não revenida caracterizada por elevada dureza e fragilidade.

Assim, pode-se observar que a retificação é um processo que gera altas temperaturas e, além disso, a porcentagem desse calor transferida para a peça é maior que para os componentes do processo como o fluido, o rebolo e até mesmo o cavaco. Portanto, o uso de fluido lubrificante nesse processo é extremamente importante para evitar ou amenizar os danos térmicos à peça usinada (MARINESCU et al., 2006).

A retificação é um processo dominado termicamente. A energia térmica que entra na peça de trabalho deve ser removida rapidamente, para evitar que altas temperaturas locais causem altas tensões residuais superficiais e profundas induzidas termicamente, além de transformações de fase sólida na camada superficial da peça (comumente chamadas de queimas). Transformações de fase são frequentemente responsáveis por tensões residuais de tração, formação de camada branca, redução da resistência a fadiga, e trincas superficiais e subsuperficiais. O resfriamento é obtido pela aplicação do fluido lubrificante, bem como pela seleção de parâmetros de processo que reduzam a geração de calor (ASTAKHOV; JOKSCH, 2012).

A principal função do fluido na retificação é agir como lubrificante, minimizando os impactos mecânicos, térmicos e químicos entre a peça e o rebolo (DAVIM, 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999; FERRARESI, 1969; TRENT; RIGHT, 2000).

Além destes benefícios principais, os fluidos lubrificantes na retificação trazem outros benefícios como a redução das forças de corte, melhoram a estabilidade dimensional da peça e permitem resultados mais satisfatórios em relação ao acabamento superficial (ALVES et al., 2011; GROOVER, 2010). Outra função importante do fluido lubrificante na retificação é a limpeza que o mesmo promove no rebolo, prevenindo ou reduzindo o empastamento do material nos poros entre os grãos abrasivos (HILDEBRANDT, 2016; KLOCKE, 2011).

A forma da aplicação de fluido de corte nos processos de retificação cresce de importância, à medida que se desejam maiores taxas de remoção de material, qualidade superior e vida mais longa do rebolo. A seleção da forma de aplicação mais eficiente e o cumprimento dos procedimentos de manutenção dos fluidos são de extrema importância para o aumento da produtividade (LOPES, 2007).

Afirmam ainda Malkin e Guo (2008), bem como Ebbrell et al. (2000), que a aplicação de fluidos de corte geralmente é pouco eficiente nos métodos convencionais, uma vez que a energia armazenada durante sua aplicação não é suficiente para vencer a força centrífuga do rebolo ou penetrar na barreira de ar que o circunda quando está em movimento. Como

consequência de uma lubrificação ineficiente e uma refrigeração ruim da interface rebolo-peça ocorre o aumento do desgaste do rebolo, exigindo assim um maior número de dressagens ou perfilamentos, e ainda o prejuízo das condições essenciais para se manter a integridade superficial.

2.8 FLUÍDOS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO

Estes fluidos, como o nome já sugere, são utilizados para refrigerar e lubrificar no processo de retificação. O objetivo principal de um fluido na retificação é minimizar o impacto mecânico, térmico e químico entre os parceiros ativos do processo de abrasão. O efeito lubrificante do fluido reduz o atrito entre os grãos abrasivos e a peça de trabalho. Um segundo requisito é o resfriamento direto da zona de contato de retificação através da absorção e transporte do calor gerado no processo (MARINESCU et al., 2006).

Abaixo elenca-se as principais funções dos fluidos lubrirrefrigerantes (CARIUS, 1990; GROOVER, 2010):

- a) lubrificar, reduzindo o atrito e minimizando o desgaste da ferramenta;
- b) expulsar os cavacos;
- c) proteger a máquina e as peças da corrosão;
- d) refrigerar e lubrificar a interface peça-ferramenta.

Os fluidos de corte contém muitos aditivos, tais como: emulsificantes, antioxidantes, bactericidas, tensioides, aditivos EP, inibidores de corrosão ou agentes para evitar a formação de espuma. Os fluidos de corte representam 15% do custo de produção. Os custos de compra, manutenção e descarte dos fluidos de corte são duas vezes mais altos que os custos de ferramentas (ASTAKHOV, 2006; YOUSSEF; EL-HOFY, 2008).

Sabe-se que nenhum fluido poderá fornecer lubrificação e resfriamento ideal para todas as operações de usinagem. As características de lubrificação e resfriamento estão em “extremidades opostas do espectro”. Óleos puros (não miscíveis em água) proporcionam excelente lubrificação, contudo possuem propriedades de resfriamento relativamente baixas. A água, embora seja o melhor refrigerante conhecido irá remover o calor 2,5 vezes mais rápido que o óleo, mas não pode ser utilizada desta forma como um fluido de corte ou para retificação pois tem propriedades lubrificantes extremamente fracas e causa corrosão severa de metais ferrosos, e até de muitos não-ferrosos (SLUHAN, 1994).

Apesar de seus benefícios para o processo, o uso de fluidos de corte apresenta potenciais problemas ambientais. Os mesmos são arrastados pelos cavacos e pelas peças de

trabalho e assim contaminam as máquinas, o piso e os trabalhadores. O fluido de corte tem influência direta na usinagem de forma econômica e ecológica. O contato intenso do operador com o fluido de corte pode levar ao desenvolvimento de doenças de pele e respiratórias, além de aumentar o risco de câncer. Isso é causado principalmente pelos constituintes e aditivos dos fluidos de corte, bem como os produtos de reação e partículas geradas durante o processo (YOUSSEF e EL-HOFY, 2008).

2.8.1 Tipos de fluido de corte

Para Youssef e El-Hofy (2008), praticamente todos os fluidos de corte utilizados atualmente se enquadram em algum dos seguintes tipos:

- a) ar. Ar comprimido pode ser utilizado para refrigerar a zona de trabalho utilizando um jato de ar puro ou ar misturado com um fluido, como na técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL);
- b) fluidos de corte a base de água. Água, óleo solúvel, emulsões e soluções químicas ou fluidos sintéticos formam o fluido de corte;
- c) óleos puros. Óleos minerais, óleos graxos, óleos compostos, óleos de extrema pressão (EP) e óleos de uso múltiplo;
- d) nitrogênio líquido. O nitrogênio líquido, com temperatura de -196°C , é utilizado como fluido de corte para materiais difíceis de cortar. Também é usado para resfriar peças de trabalho de perfis tubulares, ou para resfriar a ferramenta através de canais internos que fornecem o nitrogênio sob pressão ou por inundação da área de corte.

Os tipos de fluidos para retificação mais utilizados são basicamente os óleos e os óleos emulsionáveis. Os óleos são derivados do petróleo e outras fontes, esses produtos são atraentes pois, o atrito é um fator muito importante na retificação e os óleos por sua vez, tem melhor capacidade de reduzi-lo, porém, sua capacidade de transportar o calor é menor que a observada nos fluidos a base de água. Outro ponto a ser destacado, diz respeito aos riscos que representam em termos de incêndios e para a saúde dos operadores, além disto seu custo é alto em comparação aos óleos emulsionáveis. Os óleos emulsionáveis utilizados como fluido de corte para a retificação são geralmente misturados com concentrações mais elevadas de óleo do que em outras operações de corte, desta forma se obtém melhor capacidade de redução de atrito no processo (GROOVER, 2010).

2.8.2 Influência do fluido de corte na retificação

A retificação é um processo que gera altas temperaturas e grandes quantidades de calor. Além disso, a porcentagem desse calor que é entregue à peça é maior que para outros componentes do processo. Portanto, o uso de fluido de corte na retificação é de extrema importância para evitar ou amenizar danos térmicos à peça (MELLO, 2015).

Alguns trabalhos investigados por Brinksmeier, Heinzl e Wittmann (1999) mostraram que com o aumento da concentração de óleo no fluido de corte para a retificação, as forças de usinagem, o desgaste do rebolo e as temperaturas envolvidas no processo diminuiriam.

Já Webster et al. (1995) propuseram um novo design para o bico de refrigeração, maximizando assim a aplicação do fluido na zona de retificação. Apresentaram resultados referentes a influência da posição do bico, da velocidade do jato, e da distância para a zona de trabalho. Obtiveram um ganho de 26,5% na vida do rebolo com o bico proposto na fabricação de um componente para a indústria aeroespacial. Dentre as conclusões, vale destacar que encontraram uma espessura crítica do jato a uma velocidade de jato fixa, acima da qual a queima pode ser frequentemente eliminada.

Em um estudo realizado por Kumar, Singh e Goyal (2016) verificaram que dentre os parâmetros de velocidade do rebolo, velocidade da peça, tamanho dos grãos do rebolo, profundidade de corte, vazão de fluido lubrificante e número de passes, o parâmetro que exerceu a maior influência sobre a rugosidade e a taxa de remoção de material do aço EN 47 tratado termicamente foi o tamanho dos grãos do rebolo (49%), enquanto que a vazão do fluido foi responsável por 4% da influência sobre os parâmetros de saída rugosidade da peça e taxa de remoção de material. É importante observar que para a rugosidade a vazão média utilizada (7,13 l/min) foi a que indicou os melhores resultados, enquanto que para a taxa de remoção de material foi a vazão máxima (11,53 l/min).

Após testes práticos, Li et al. (2015) conseguiram verificar a influência de uma série de parâmetros na taxa de fluido útil empregada no processo e obtiveram boa aproximação entre os modelos matemáticos desenvolvidos e os resultados reais medidos no experimento. O que pode ser observado é a influência da velocidade periférica do rebolo nessa taxa, combinada com a velocidade do jato de fluido. Para os jatos com velocidades de 20 m/s e 30 m/s o acréscimo se mantém de forma linear até a velocidade periférica do rebolo de 120 m/s, enquanto que já se percebe uma redução para a velocidade do jato de 10 m/s e uma queda para 5m/s, nas velocidades mais altas. Para a velocidade periférica do rebolo de até 100 m/s houve acréscimo mesmo na velocidade do jato mais baixa de 5m/s, demonstrando que a camada de ar criada pelo rebolo não se torna crítica nessas condições estudadas.

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados: as metodologias experimentais, o planejamento, os equipamentos, as ferramentas, os materiais utilizados e também os procedimentos para a avaliação dos resultados.

Todo o processo de retificação dos corpos de prova foi realizado em uma empresa metalúrgica da serra gaúcha, a qual faz parte de um grupo com dez unidades em todo Brasil. Os testes em laboratório foram executados no Centro de Inovação, Pesquisa e Desenvolvimento (CIPeD) da empresa, com o apoio do laboratório de outra empresa do grupo e da Universidade de Caxias do Sul (UCS) na análise dos resultados.

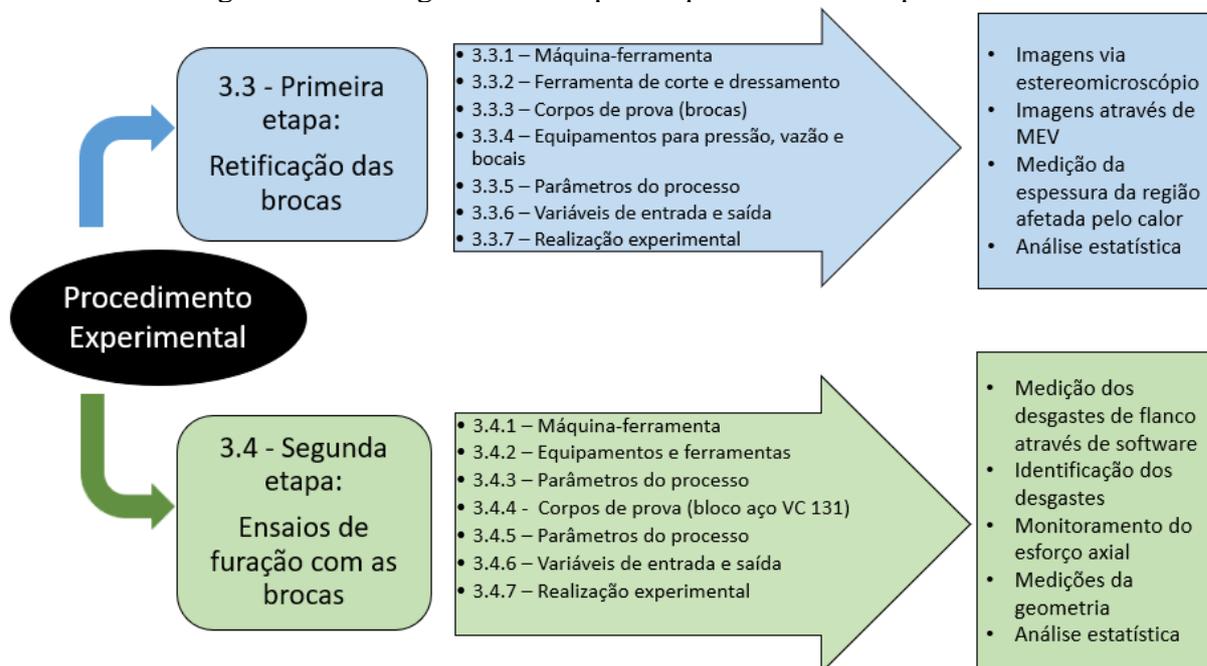
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados de modo a identificar a existência de uma possível influência de variação da vazão e pressão sobre a integridade superficial e subsuperficial das brocas helicoidais fabricadas em aço-rápido pelo processo de retificação, bem como verificar o efeito sobre o desgaste em ensaios de furação.

Para tal, os experimentos foram divididos em duas etapas: I, a primeira etapa referente ao processo realizado na retífica onde foram usinadas as pontas das brocas; e II, segunda etapa que contempla os testes de furação em laboratório. O fluxograma da Figura 15 ilustra mais detalhadamente cada uma delas.

Os testes de usinagem de retificação foram realizados no setor de fabricação de brocas da empresa, assim foi possível submeter os corpos de prova às condições reais de fabricação. Os testes práticos de furação da segunda etapa e posterior avaliação de desgaste das brocas foram realizados no laboratório da mesma unidade, sendo necessário o apoio do laboratório de outra empresa do grupo apenas para as análises em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e do laboratório da UCS para imagens de caracterização dos desgastes.

Figura 15 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.3 PRIMEIRA ETAPA: ENSAIOS DE RETIFICAÇÃO DAS BROCAS

Esta primeira etapa consiste em retificar a ponta das brocas de aço-rápido a fim de afiar o gume de corte e conferir à peça as medidas conforme estabelecido pela norma DIN 338. Este é um dos processos finais pelo qual o produto é submetido antes de chegar ao consumidor. A empresa segue esta norma para afiação pois é a que o mercado mais demanda.

3.3.1 Máquina-ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada nos experimentos foi uma retificadora de precisão da marca Haux modelo SS336 (Anexo A). Esta máquina é equipada com comando Siemens, possui potência total de acionamento de 16kW e atinge a velocidade de corte máxima de 75m/s. Possui sistema de compensação da rotação do rebolo conforme sua variação de diâmetro durante o processo para manter a velocidade de corte constante através de um inversor de frequência. Permite usinar peças com diâmetros entre 3 mm e 21 mm.

3.3.2 Ferramenta de corte e dressamento

Para a realização dos ensaios utilizou-se o mesmo rebolo que estava validado pela empresa para o processo. O rebolo é feito especialmente para este tipo de operação pela empresa TDC, e possui as características conforme mostrado no Quadro 1:

Quadro 1 - Características do rebolo

Tipo de grão	óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)
Tipo de ligante	resinóide
Perfil do rebolo	reto
Diâmetro externo	500 [mm]
Espessura do revestimento	16 [mm]
Diâmetro interno	304,8 [mm]
Largura	7,3 [mm]

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O dressador utilizado é de diamante 1 quilate com ponta única, fabricante TDC. Ambos podem ser visualizados no Anexo A.

3.3.3 Corpos de prova

O material dos corpos de prova (brocas de aço-rápido) é o aço SAE M2 proveniente do processo de lingotamento comum. Sua composição química pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço SAE M2

C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	P máx	S máx
0,80 a 0,90	0,20 a 0,40	0,20 a 0,40	3,80 a 4,40	1,75 a 2,20	5,50 a 6,75	4,50 a 5,50	0,030	0,030

Fonte: Arquivo interno da empresa (2018).

Tal material é recebido na forma de *blank*, cortado no comprimento especificado, chanfrado em ambos os lados, corpo temperado, revenido e retificado, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 - Representação da broca recebida e regiões de dureza



Fonte: Arquivo interno da empresa (2018).

A Tabela 2 mostra os valores de dureza para cada uma das três regiões.

Tabela 2 - Valores de dureza para a broca em aço M2

Região	Dureza [HRC]
L1	10 à 20
L2	30 à 50
L3	62 à 65

Fonte: Arquivo interno da empresa (2018).

Todas as brocas foram fabricadas em um mesmo lote de produção para evitar possíveis alterações no material. O diâmetro da broca escolhido foi de 8 mm, por questões técnicas e econômicas.

3.3.4 Equipamentos para vazão, pressão e bocais

Para os ensaios de retificação foram reguladas as vazões através de um medidor de vazão tipo turbina da marca Contech, modelo CTH2265I instalado na entrada do sistema de lubrificação da máquina com resolução de 0,1 l/min. A pressão resultante foi medida através de um pressostato, também instalado na entrada do sistema, marca IFM modelo PN5002 com faixa de medição em intervalos de 0,5 bar. Foram utilizados os medidores, como pode ser visto na Figura 17, o mais próximo possível da saída a fim de eliminar as diferenças de leitura devido às perdas de carga pelo caminho a ser percorrido pelo fluido até chegar aos bocais.

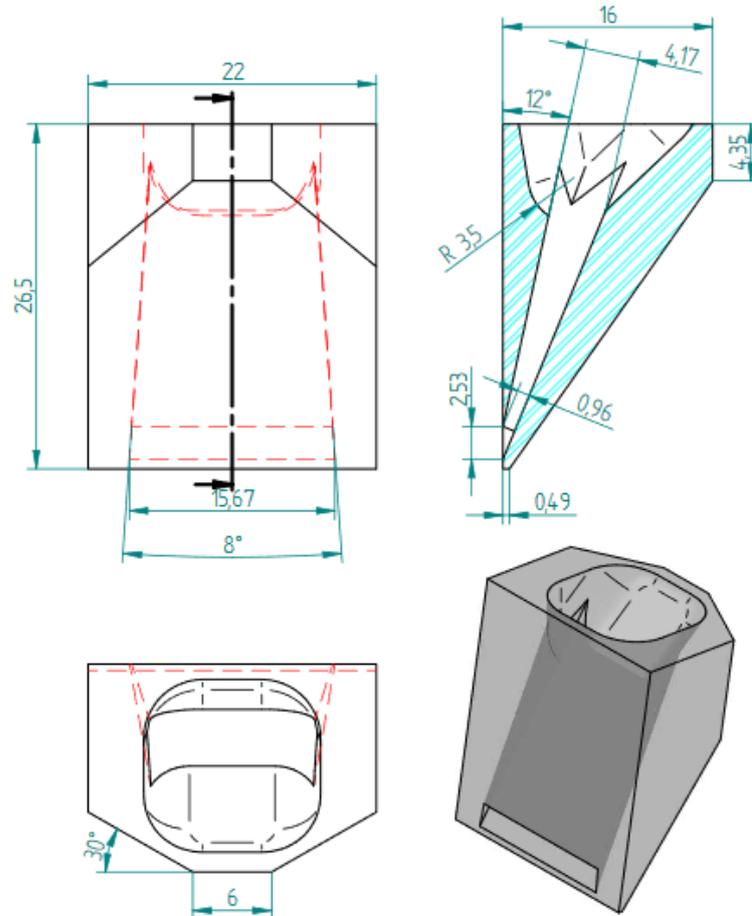
Figura 17 - Medidores instalados na máquina



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Dois bocais foram utilizados para conduzir o fluido lubrificador até a área de trabalho, ficando um acima e um abaixo da região de corte. As peças fabricadas em aço baixo carbono encontram-se soldadas na extremidade do tubo que conduz o fluido. Na Figura 18 é possível observar as dimensões utilizadas.

Figura 18 - Bocais para lubrificação



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.3.5 Parâmetros do processo

Alguns parâmetros utilizados no processo podem ser visualizados no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros do processo de retificação

Velocidade do rebole (v_s)	70 [m/s]
Velocidade da peça (v_w)	120 [oscilações/min]
Profundidade de corte (a_e)	1 [mm]
Número de passes (N_p)	2 [por gume]
Fluído lubrificante	óleo integral, base mineral (FUCHS)

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Por se tratar de um processo dedicado a máquina foi desenvolvida com um movimento específico da peça em relação ao rebolo. O avanço da peça é feito em forma de rotação, sendo que realiza-se uma oscilação (movimento de subida e descida) para executar a afiação da ponta da broca. No primeiro passe é retirada toda a profundidade de corte, enquanto que o passe seguinte é para acabamento, sem incremento de profundidade.

O processo atual é realizado com uma vazão de fluido lubrificante de 85 l/min, sendo que o indicado pelo fabricante da máquina é uma vazão de 120 l/min. Na prática, valores acima de 100 l/min são evitados uma vez que o fluido é projetado sob altas pressões e acaba se espalhando de forma indesejada aumentando as perdas do fluido por arraste e até mesmo por ser expelido diretamente para fora da máquina.

A pressão do sistema é de 20 bar, sendo que o fabricante recomenda o uso de 10 bar de pressão. Porém, como o bico utilizado é fixo à medida que é alterado a regulagem da vazão os valores de pressão também variam.

Para investigar a influência da vazão e pressão do fluido sobre os resultados do trabalho foram escolhidos 5 valores de vazão, sendo que cada um dos valores de teste para a vazão e pressão correspondente de fluido lubrificante que foram utilizados podem ser vistos abaixo na Tabela 3. Para simplificar a identificação, passarão a ser chamados de forma abreviada a partir daqui. Estes valores de vazão para os testes foram definidos com base nos dados utilizados pela empresa e no objetivo de verificar a possibilidade de reduzir a vazão utilizada no processo.

Tabela 3 - Condições de vazão e pressão para os testes de retificação

	Condição 1 (CV1)	Condição 2 (CV2)	Condição 3 (CV3)	Condição 4 (CV4)	Condição 5 (CV5)
Vazão [l/min]	20	40	60	80	100
Pressão [bar]	0,5	2,5	5,5	10,5	15,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.3.6 Variáveis de entrada e saída

Como visto nos capítulos anteriores, existem diversas variáveis que influenciam no processo de retificação. Deste modo, já que o objetivo foi a compreensão e caracterização da integridade da superfície em função dos parâmetros de vazão e pressão do fluido lubrificante foram analisadas estas duas variáveis de entrada em função das demais, sendo

que os demais fatores não controláveis intrínsecos ao processo serão mantidos fixos para não exercerem influência nos resultados finais.

As variáveis de saída relacionadas à microestrutura do material foram verificadas, sendo elas: irregularidades, alterações metalúrgicas e camada escurecida pelo calor.

3.3.7 Realização experimental

Cada experimento foi realizado adotando-se a seguinte sequência de trabalho:

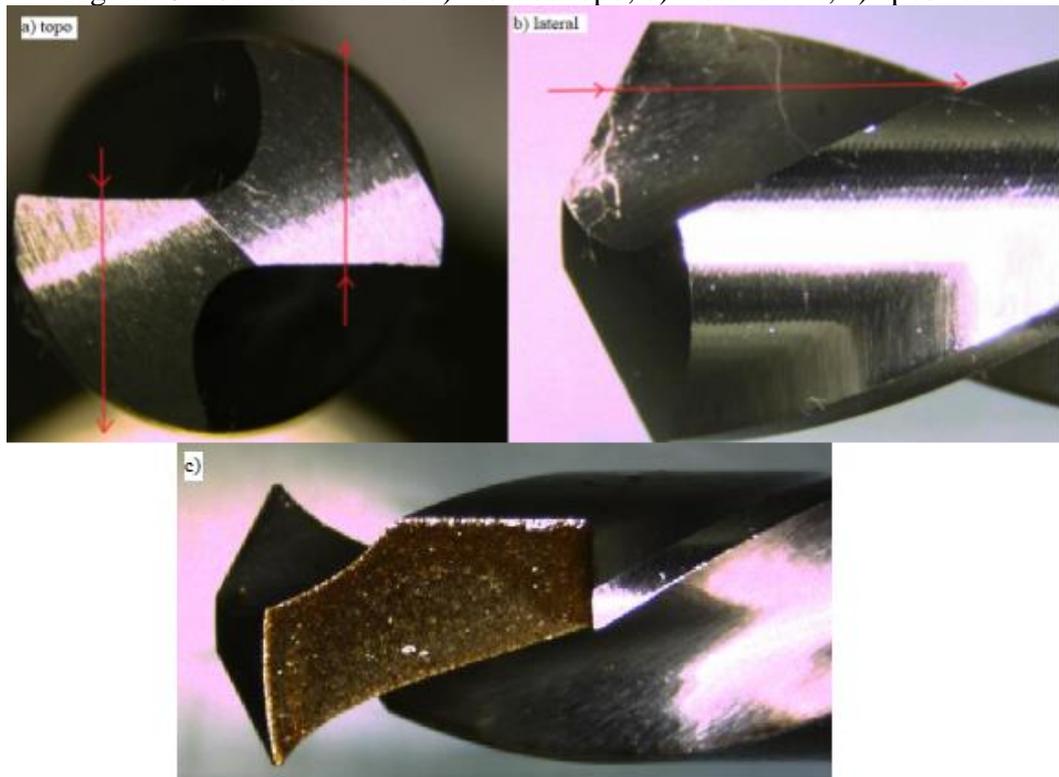
- a) regulagem da vazão e registro da pressão correspondente (codificação CV);
- b) dressagem do rebolo;
- c) início da produção, sendo excluídas as dez primeiras peças fabricadas;
- d) coleta de dez amostras para realização de todos os testes, com duas sobressalentes.

Este procedimento foi repetido para cada uma das 5 diferentes condições de teste, sendo destinadas 15 peças para a primeira etapa e 25 peças para a segunda etapa dos ensaios. A quantidade de 3 amostras para metalografia e 5 para o ensaio prático de furação foram definidas com o intuito de se obter boa amostragem dos dados e ao mesmo tempo tornar viável em termos de custos e tempo para as análises e testes.

Realizado o processo de retificação da ponta, as amostras seguiram para os ensaios em laboratório. Primeiramente realizou-se as etapas para preparação das amostras as quais incluem basicamente o seccionamento, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. Ressalta-se a importância de se observar a posição e a orientação da amostra durante a operação de corte.

Os cortes foram todos realizados conforme mostrado na Figura 19. A opção pela EDM (*Electrical Discharge Machining*) deu-se devido ao tamanho reduzido das amostras e a dificuldade de realizar o corte corretamente com o método tradicional utilizando discos abrasivos. A distância do centro foi de 3,8 mm, o fio utilizado tem espessura de 0,25 mm resultando assim em um pedaço de amostra com aproximadamente 4 mm. A profundidade do corte foi de 10 mm, isto foi suficiente para sair da peça e assim separar a amostra do corpo de prova. O sentido de corte utilizado foi do gume de corte para o interior da peça. Para que haja uma melhor compreensão está indicado na Figura 19(a) e Figura 19(b) quais os sentidos de corte realizados, sendo que na Figura 19(c) podemos ver a broca após o processo realizado.

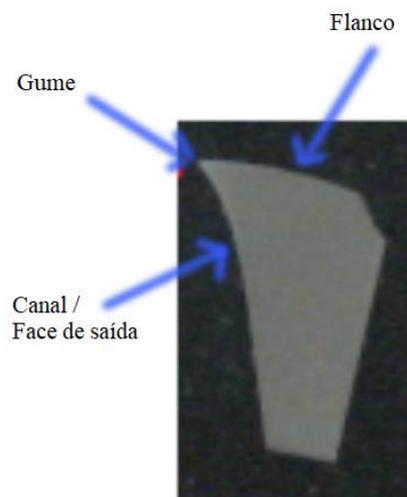
Figura 19 - Seccionamento: a) vista de topo; b) vista lateral; c) após corte



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Realizado o corte por eletroerosão a fio, as amostras ficam seccionadas do corpo de prova e o perfil esperado pode ser visto na Figura 20, onde estão destacadas as três regiões principais das amostras.

Figura 20 - Principais pontos para análise microestrutural



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Analisaram-se as imagens por microscopia óptica com o uso de um microscópio óptico modelo Olympus BX60 e o microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Tescan, ambos localizados no laboratório de outra empresa do grupo.

Inicialmente, verificou-se com o auxílio das fotos as microestruturas para todas as condições de ensaio. Foram realizadas as imagens com ampliações de 100 vezes, 200 vezes, 500 vezes e 1000 vezes para cada um dos gumes de corte das 15 brocas analisadas nesta etapa.

Em virtude do perfil complexo que as brocas possuem, torna-se muito difícil realizar medições por microindentação a fim de verificar se houve alteração na subsuperfície através de alterações na dureza do material. As distâncias mínimas que devem ser obedecidas para a realização deste tipo de verificação não são possíveis com o perfil do gume, que é o principal ponto a ser verificado.

3.4 SEGUNDA ETAPA: ENSAIOS DE FURAÇÃO COM AS BROCAS

Esta segunda etapa consiste em submeter as brocas a testes de desgaste acelerado em furação. São 5 brocas que foram avaliadas para cada uma das 5 condições mostradas na Tabela 5, totalizando assim 25 brocas ensaiadas no teste prático.

3.4.1 Máquina-ferramenta

Os ensaios de furação foram executados por um robô de 6 eixos da marca Motoman modelo MH50II, com controlador DX200, para realizar os movimentos de furação.

No Quadro 3 são descritas as suas principais características.

Quadro 3 - Características do robô para furação

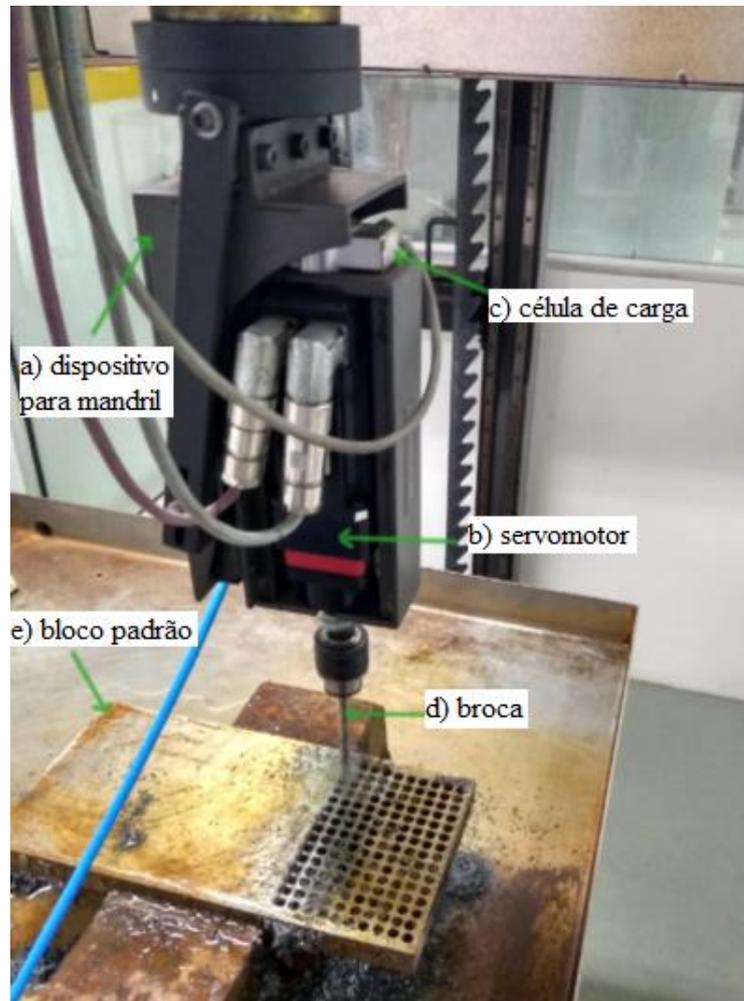
Tipo	articulado
Nº de eixos	6
Carga útil	50 [kg] – 110,231 [lb]
Alcance máximo	2.061 [mm]
Repetibilidade	0,07 [mm]
Peso	550 [kg]
Fonte de alimentação	4 [KVA]

Fonte: adaptado de <https://www.yaskawa.eu.com/en/products/robotics/motoman-robots/productdetail/product/mh50ii/>

3.4.2 Equipamentos e ferramentas

Acoplou-se um dispositivo fabricado internamente na empresa com servo motor e célula de carga para garantir melhores resultados nas medições de esforço e aplicação dos parâmetros no processo.

Figura 21 - Dispositivo para furação com servomotor e célula de carga



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O servomotor presente no dispositivo é da marca Kollmorgen, modelo XT060-005 RM060. A célula de carga é composta pelo sensor de força modelo C2 da HBM com capacidade de leitura para forças de compressão até 2kN. Ambos têm suas especificações detalhadas no Anexo A.

As ferramentas utilizadas nos testes foram as amostras das brocas de número 4 à 8, restantes da primeira etapa do processo de retificação para todas as 5 condições de vazão e pressão. Como pode ser visto na Figura 22(b), as ferramentas de aço-rápido nesta etapa estão na condição de afiadas.

Figura 22 - Ferramentas: a) da primeira etapa sem afiação e b) da segunda etapa com afiação do gume de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.4.3 Corpos de prova

Os corpos de prova são blocos de aço AISI D6 (VC131) com medidas de 175x350x25 mm as quais permitiram a execução de todos os furos previstos para os testes.

A escolha por este aço ligado deve-se às propriedades do material que lhe conferem características de má usinabilidade, acelerando assim o desgaste das brocas nos ensaios. Com o objetivo de eliminar as variações nos resultados devido à variação do material usinado todos os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico de recozimento e posteriormente ao processo de retífica para retirada em condições brandas de aproximadamente 0,5mm com a finalidade de eliminar uma possível camada superficial que tenha sofrido decarbonetação após o processo de tratamento térmico e ajustar a medida do bloco para 25mm de espessura.

Pode ser visto na Tabela 4 a composição química para o aço VC131 informada pelo fabricante e, no Anexo B, o relatório com a composição química encontrada para os blocos utilizados nos ensaios, bem como análise metalográfica após tratamento térmico.

Tabela 4 - Composição química do aço VC 131

C	W	Mn	Cr	V
2,10	0,70	0,30	11,50	0,20

Fonte: <http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>

Como resultado obteve-se os corpos de prova com matriz coalescida e carbeto dispersos de forma homogênea. A dureza encontrada ficou entre 10 à 11,2 HRc.

3.4.4 Parâmetros do processo

Os parâmetros do processo de furação utilizados na programação do robô para execução da malha de furação de testes são mostrados no Quadro 4. Tais parâmetros foram selecionados com base nos testes de rotina executados na empresa e nos pré-testes que foram realizados com o objetivo de alcançar o desgaste desejado para as brocas sem demandar muito tempo de usinagem.

Quadro 4 - Parâmetros do processo de furação

Tipo de furação	Intermitente
Profundidade dos furos	25 [mm]
Quantidade de furos	30
Avanço do robô	3 [mm/s/10]
Passo em Z	2 [mm]
Retorno em Z	0,05 [mm]
RPM	600
Quantidade de material usinado	0,75 [m]
Fluído lubrificador	Água mineral, pura

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.4.5 Variáveis de entrada e saída

As variáveis de entrada são as brocas usinadas com diferentes condições de vazão e pressão do fluido lubrificante.

As variáveis de saída para esta segunda etapa são: desgastes das ferramentas, quantificado através dos desgastes de flanco médio ($VB_{méd}$) e máximo ($VB_{máx}$), tipos e mecanismos de desgaste e o esforço axial para realizar a operação.

3.4.6 Realização experimental

Nesta etapa foram realizados os testes de desgaste acelerado nas amostras produzidas na primeira etapa de retificação. Realizou-se 30 furos com profundidade de 25 mm cada, a fim de se atingir o valor de desgaste de flanco médio de 0,3 mm e desgaste de flanco máximo de 0,5 mm. Realizaram-se pré-testes com o intuito de encontrar a quantidade de furos necessária

para se alcançar valores próximos a estes de desgaste, visto que o critério de parada dos experimentos foi a quantidade de furos realizados, que totalizou 0,75 m usinados de material.

Esta estratégia visa avaliar diferenças no desgaste das brocas em função dos parâmetros de entrada utilizados para as amostras de forma direta.

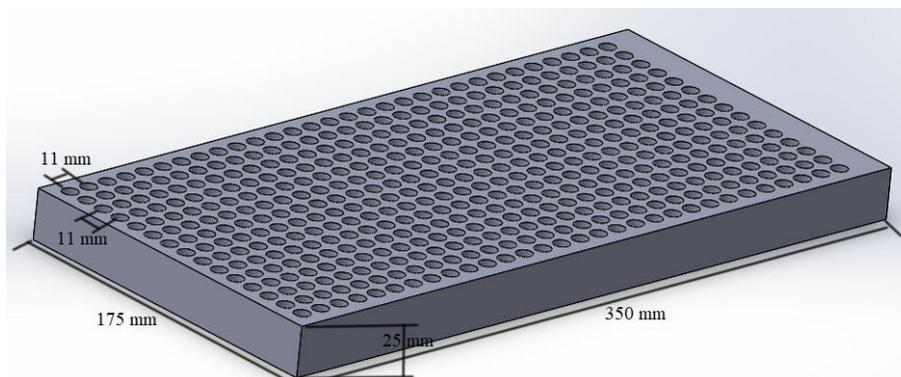
Os ensaios foram executados com a broca em posição vertical, sentido descendente, sem pré-furo e sem furo de centro. O espaçamento entre os centros dos furos foi de 11 mm. Foram realizados assim 15 furos na direção do eixo x e 2 linhas na direção de y para cada broca totalizando 30 furos. Na Figura 23 pode-se observar o teste em andamento na sala do laboratório enquanto na Figura 24 está representado o bloco padrão utilizado e a simulação da malha de furação para os testes.

Figura 23 - Teste de furação em andamento no laboratório



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 24 - Representação do bloco padrão com a malha de furação



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Abaixo na Tabela 5 é possível verificar a forma como os ensaios de desgaste foram conduzidos.

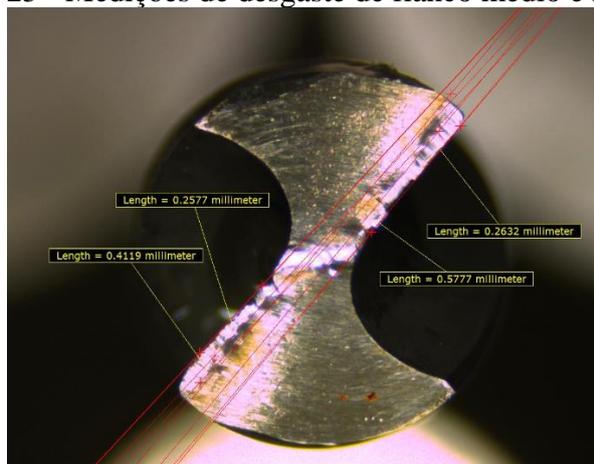
Tabela 5 - Matriz experimental dos ensaios de desgaste

Número do ensaio	Número da amostra	Condição de vazão e pressão
1	4	CV1
2	5	CV1
3	6	CV1
4	7	CV1
5	8	CV1
6	4	CV2
7	5	CV2
8	6	CV2
9	7	CV2
10	8	CV2
11	4	CV3
12	5	CV3
13	6	CV3
14	7	CV3
15	8	CV3
16	4	CV4
17	5	CV4
18	6	CV4
19	7	CV4
20	8	CV4
21	4	CV5
22	5	CV5
23	6	CV5
24	7	CV5
25	8	CV5

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Após ensaios de furação os desgastes de flanco foram medidos através do equipamento especial para inspeção de ferramentas de corte modelo 560S da marca Winsloweng (Anexo A) utilizando-se o software Vision Gauge ®. A Figura 25 traz uma imagem de broca ilustrando como foi executada a medição do desgaste. O mesmo equipamento foi utilizado para verificar uma série de parâmetros geométricos antes mesmo das brocas serem utilizadas nos testes práticos. Tal controle foi baseado nos testes de rotina da empresa, seguindo normatização.

Figura 25 - Medições de desgaste de flanco médio e máximo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A verificação dos tipos e mecanismos de desgaste foi realizada no laboratório da UCS, empregando-se o estereoscópio trinocular de medição universal marca Entex, modelo TNE-10B que pode ser visto no Anexo A. Utilizaram-se para as imagens as ampliações de 15 e 30 vezes, tendo o equipamento a capacidade de aumento de até 45 vezes.

Para todas as amostras foram armazenados os dados de esforço axial durante a execução dos furos em função do tempo através do computador conectado à célula de carga do dispositivo. Os dados foram registrados num intervalo de 0,5 s.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos após afiação do gume referentes à primeira etapa e os resultados experimentais obtidos após os testes de furação da segunda etapa.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PRIMEIRA ETAPA, ENSAIOS DE RETIFICAÇÃO

Nesta primeira etapa foram realizados os ensaios de retificação. Dessa forma as condições reais de fabricação foram utilizadas para a produção das amostras (brocas). Os parâmetros do processo que sofreram variação foram somente a vazão e pressão do fluido lubrificante, conforme Tabela 3. As demais grandezas de entrada foram mantidas fixas como descrito no capítulo anterior. Posteriormente, as amostras foram levadas ao laboratório para análises da microestrutura.

A microscopia óptica foi a técnica utilizada para a caracterização da estrutura da peça, uma vez que permite analisar as superfícies mostrando uma visão geral de danos térmicos, desgaste e/ou falhas.

Inicialmente são apresentadas as irregularidades encontradas através das imagens obtidas por um sistema de inspeção para ferramentas de corte e microscópio eletrônico de varredura. Após é feita a análise de possíveis alterações na microestrutura do material. Na sequência são apresentadas as análises da espessura de camada escurecida devido a condução térmica.

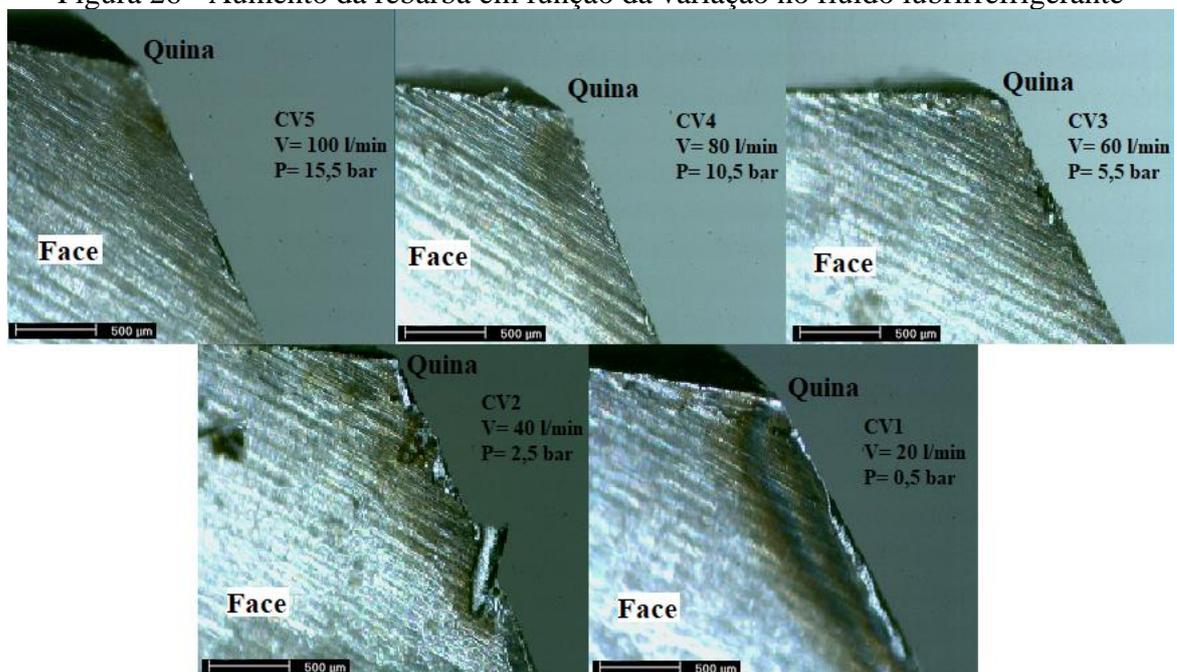
4.1.1 Irregularidades

Foi possível identificar através das análises realizadas dois tipos de defeitos no gume, são eles:

- a) rebarbas;
- b) micro-lascamentos no gume.

A rebarba se mostrou presente, mesmo quando houve o micro-lascamento da ponta do gume. Em todas as 5 condições do teste foram evidenciadas rebarbas e micro-lascamentos. Nas imagens da Figura 26, com ampliação de 30 vezes, é possível perceber um aumento da rebarba constatado nos ensaios onde são mostradas as brocas em condição de novas, após processo de afiação da ponta.

Figura 26 - Aumento da rebarba em função da variação no fluido lubrificador

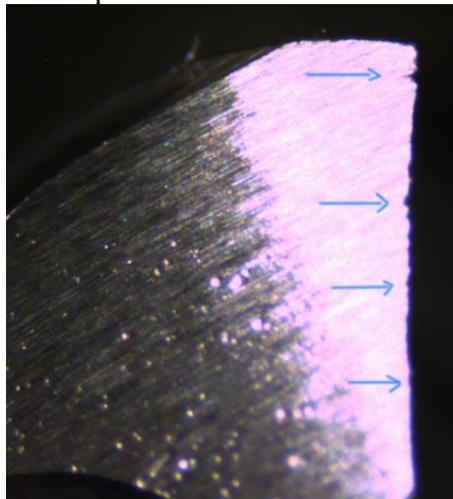


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Via de regra, a formação da rebarba se deu predominantemente na região mais próxima à quina da ferramenta, sendo que a medida da extensão e da largura da rebarba foi diminuindo com o aumento da vazão e a pressão do fluido lubrificador no processo. A redução da rebarba à medida que maiores condições de vazão e pressão são utilizadas provavelmente ocorre em virtude das melhores condições de lubrificação que a broca está sendo submetida na usinagem, gerando menores temperaturas no contato do rebolo com a peça. Da mesma forma que as maiores temperaturas existentes na periferia da broca, onde a massa é menor, causa maior concentração de calor e explica o aparecimento das rebarbas predominantemente mais próximo à quina.

Na Figura 27 é possível perceber as irregularidades ocasionadas pelo micro-lascamento no gume. Através da vista de topo foi possível identificar que as mesmas se espalham por toda extensão do gume. Para este tipo de irregularidade não foram encontradas diferenças significativas entre as condições testadas, como mudanças de grandeza ou frequência com que os defeitos aparecem.

Figura 27 - Vista de topo evidenciando as falhas ao longo do gume



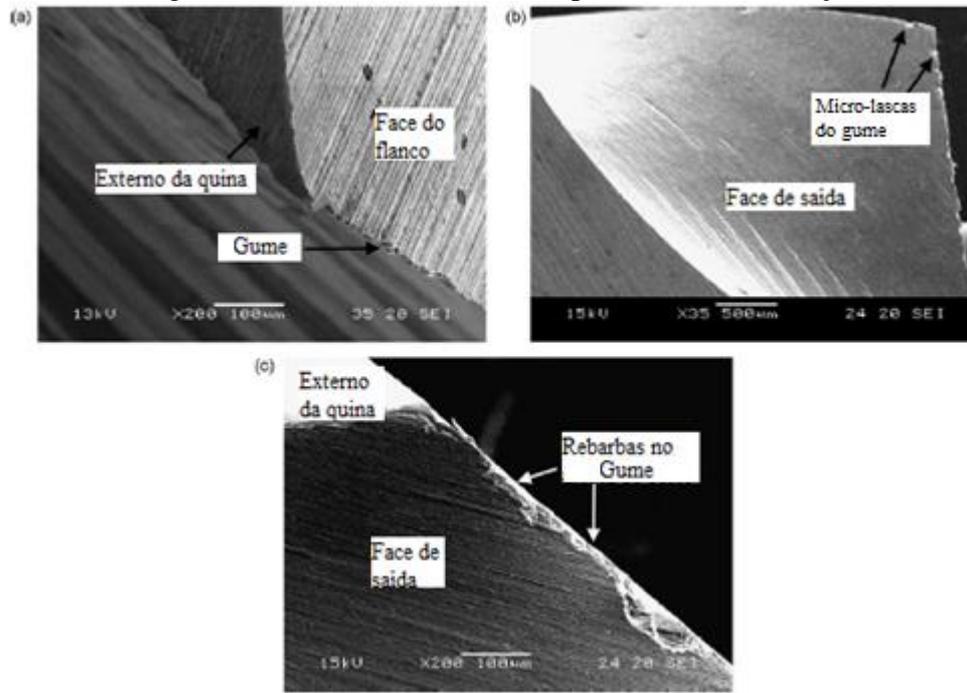
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os micro-lascamentos são defeitos que ocorrem nas ferramentas de aço-rápido devido à sua microestrutura. Os carbonetos formados, principalmente após o processo de tratamento térmico, são arrancados pelo rebolo fazendo com que haja irregularidades ao longo do gume das ferramentas. Tal comportamento ocorre mesmo para materiais com grãos menores, como o metal duro, porém com menor magnitude.

Estas rebarbas e micro-lascamentos do gume também foram evidenciadas no estudo realizado por Cheung et al. (2008), Figura 28. Estas irregularidades nas amostras das brocas de aço-rápido utilizadas em seus testes, os mesmos consideraram que são inerentes ao próprio processo de fabricação. Neste trabalho, as brocas de aço-rápido passaram por processo de

polimento magnético para preparação da ponta, após afiação, e então foram submetidas aos testes para comparativos de rendimento no processo de furação.

Figura 28 - Defeitos inerentes ao processo de fabricação



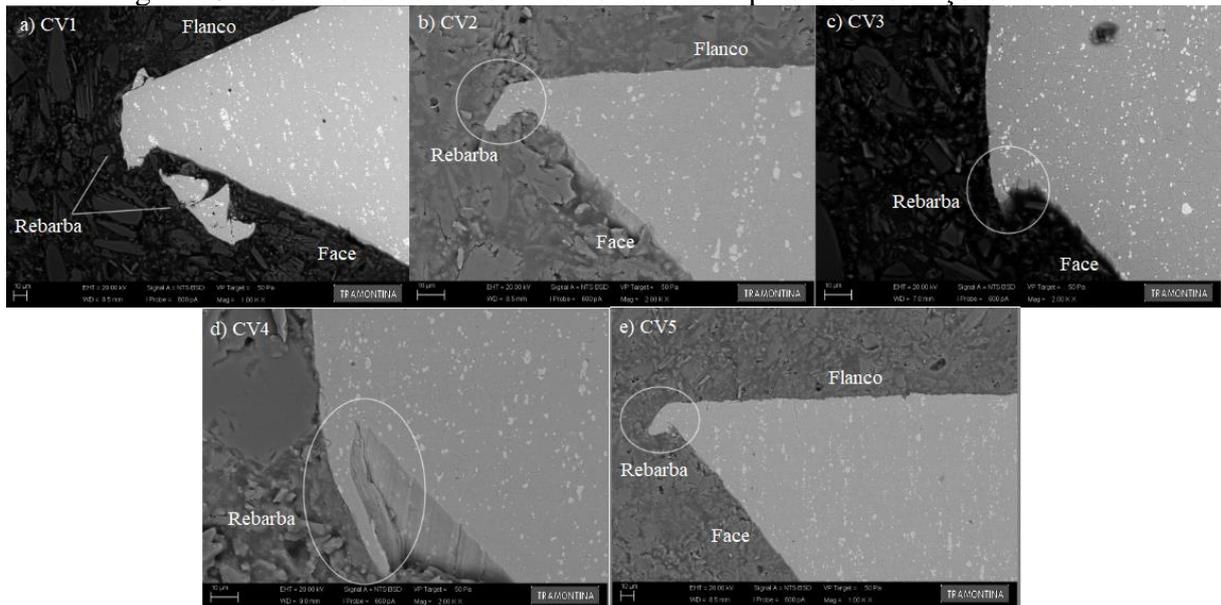
Fonte: Adaptado de Cheung et al., (2008).

Imagens no MEV foram realizadas para apenas uma amostra de cada uma das cinco condições de teste. Assim foi possível verificar com mais exatidão e clareza o gume da ferramenta.

Para estes ensaios foram escolhidas as amostras identificadas como: CV1- amostra 2, CV2- amostra 3, CV3- amostra 2, CV4- amostra 2 e CV5- amostra 1. Estas foram selecionadas pois demonstraram melhor condição para análise do ponto do gume.

Na imagem da Figura 29(a) é possível identificar uma rebarba de tamanho considerável. Pode-se ver na Figura 29(b) a ponta e também as intersecções dos planos da face e do flanco, assim como na Figura 29(e), apresentando rebarbas pronunciadas como consequência da deformação do material. Na Figura 29(c) e Figura 29(d) logo acima da rebarba não é possível visualizar o flanco, possivelmente devido a um micro lascamento ocorrido no momento da usinagem. O micro-lascamento não se mostra presente em todas as imagens pois este fenômeno ocorreu de forma não homogênea ao longo do gume, portanto, apesar de termos seccionado as amostras sempre com a mesma distância da borda até o centro, em algumas amostras o corte para seccionamento coincidiu com uma região danificada, enquanto para outras não.

Figura 29 - Gumes de corte com análise de MEV para as 5 condições de vazão



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Esta rebarba observada em todas imagens é provavelmente resultado do movimento da peça que, ao deixar o rebolo, faz com que a quantidade final de material próximo ao gume seja estendido por deformação. A ideia de que a rebarba não está junto da peça na Figura 29(a) se dá devido ao formato da rebarba não ser homogêneo, com isto após a preparação da peça é provável que o material que foi retirado da amostra no processo de preparação tenha sido o suficiente para eliminar parte da rebarba que estava presente.

Barth et al. (2001, apud AURICH, SUDERMANN e BRAUN, 2006) investigaram a formação de rebarba em retificação plana com lubrificação. O principal foco desta pesquisa foi a formação de rebarba na saída, a qual é influenciada pela geometria de saída do gume, o rebolo e as condições de corte. Segundo os autores, a formação de rebarbas no geral pode ser explicada pela deformação plástica. Devido a insuficiente resistência contra as forças atuantes, a borda da peça deforma.

Já Marques et al. (2015) ao investigarem a caracterização do desgaste de brocas de HSS revestidas com AlCrN e não revestidas realizaram algumas furações em condições brandas de usinagem, antes de enviarem as brocas para o revestimento, com o objetivo de eliminar as rebarbas dos gumes das brocas, originadas no processo de afiação. Isto porque observaram que estas rebarbas são facilmente retiradas, por este motivo possivelmente seriam removidas durante os ensaios iniciais das ferramentas, eliminando assim o revestimento aplicado a ferramenta em questão.

Diversas irregularidades foram encontradas por Teixeira (1995) ao inspecionar um lote de brocas novas. Dentre as citadas estão: lascamentos nos gumes, existência de rebarba em certas zonas dos gumes e zonas com marcas de superaquecimento.

4.1.2 Alterações metalúrgicas

Durante o processo de retificação, quando a superfície da peça é exposta a altas temperaturas por um determinado tempo, alterações microestruturais podem ocorrer. Para comparar as microestruturas e verificar a ocorrência de danos térmicos, foram realizadas análises metalográficas com diferentes ampliações, sendo: 100 vezes, 500 vezes e 1000 vezes.

É possível observar na Figura 30 algumas imagens que representam estes resultados para cada condição do ensaio. É preciso ressaltar que houve a exceção do gume 2 da amostra número 2 para a condição CV4 com 80 l/min de vazão e 10,5 bar de pressão de fluido lubrificante, que aparece identificada como CV4 – 2. Pois, foi a única amostra onde ocorreu o aparecimento de camada branca, com aproximadamente 20 μm , na interface do gume com o flanco. Para todas as demais amostras analisadas, considerando as três regiões de gume, face e flanco, não foram observadas alterações microestruturais.

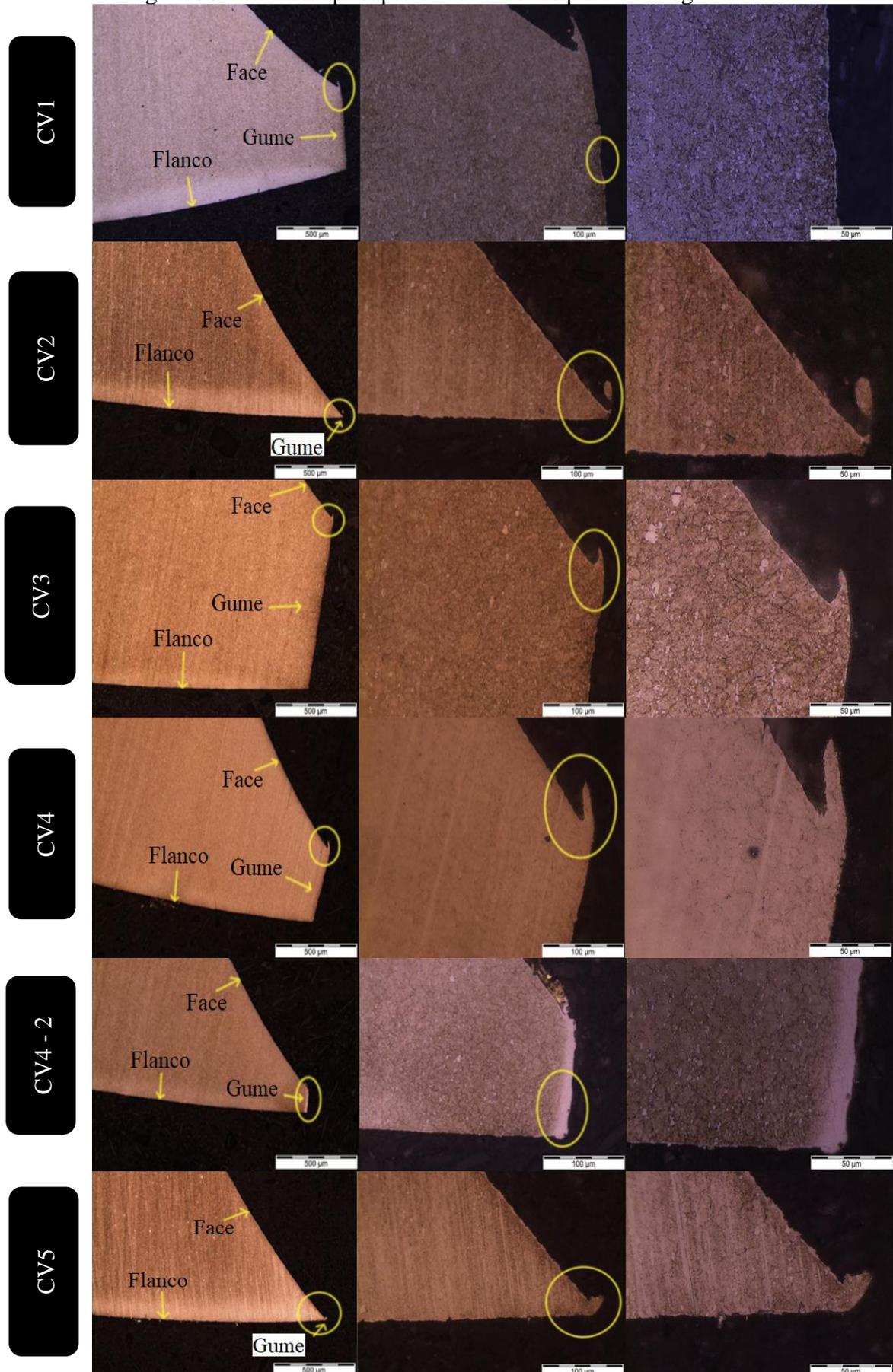
O fato de não terem sido encontradas alterações significativas na microestrutura para todas as condições testadas, salvo exceção de um gume na CV4, se deve ao conjunto de condições de corte empregados os quais não foram tão agressivos ao ponto de alterar a microestrutura das brocas.

Os resultados obtidos por Ferrari (2015), referente à retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 52100 com dureza de 64 HRc, rebolo de óxido de alumínio Al_2O_3 , em relação à microestrutura foram semelhantes aos obtidos neste trabalho. Após análise através de microscopia óptica para todas as condições de lubrificação por ele testadas, sendo: com fluido em abundância, MQL puro, MQL 1:1, MQL 1:3 e MQL 1:5, concluiu que não ocorreram alterações microestruturais, fato corroborado pelos ensaios de microdureza.

Resultados semelhantes foram obtidos por Alves (2005), ao analisar a influência da variação na velocidade de avanço e dois diferentes tipos de fluido lubrificante com o uso de rebolo CBN na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT D6 com dureza de 62HRc. Após proceder a análise metalográfica não encontrou mudanças significativas na microestrutura do material para nenhuma das condições testadas.

Em estudo realizado por Alves, Bianchi e Aguiar (2012), foi analisada a influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante (MQL), refrigeração otimizada e refrigeração convencional, com diferentes vazões e velocidade de aplicação do fluido de corte. Isto foi verificado na usinagem do aço ABNT 4340, temperado e revenido com dureza média de 54 HRc, onde os processos foram capazes de manter a integridade superficial das peças produzidas, com exceção somente para a condição com MQL e vazão do fluido de corte de 40 ml/h, que produziu trincas e queima superficial.

Figura 30 - Microscopia óptica nas amostras para metalografia



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Segundo Marinescu et al. (2004), pode ocorrer a camada branca durante a retificação, por se atingir temperaturas superiores a de austenitização do material, seguida de um rápido resfriamento, podendo promover uma nova têmpera a superfície retificada. A camada branca é muito prejudicial a integridade da peça, uma vez que a superfície endurecida torna-se extremamente frágil, além de serem verificadas tensões residuais de tração que tornam o material suscetível a trincas, reduzindo assim consideravelmente a resistência ao desgaste e a fadiga da peça.

Essa camada retemperada normalmente possui uma pequena espessura seguida de uma região com perda de dureza, denominada camada escura. A camada escura não indica transformações microestruturais, porém, quando a martensita sofre este super-revenimento há uma diminuição da dureza. A profundidade de ocorrência da camada escura não é superior a 100 μm (MARINESCU et al., 2004).

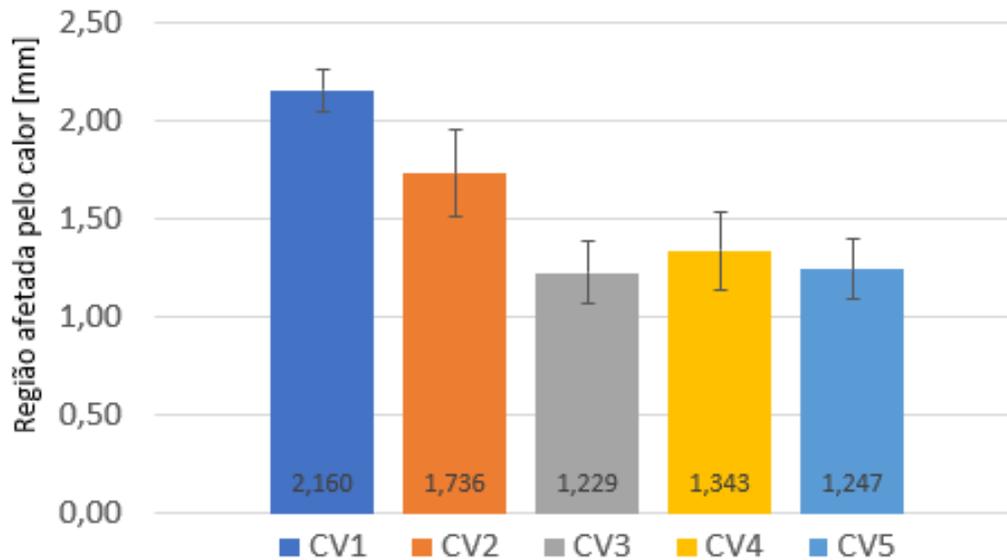
4.1.3 Espessura da região afetada pelo calor nas brocas

Após as análises realizadas na sub-sessão anterior em que não foram encontradas alterações na microestrutura, assim, não caracterizando a queima de retificação ou camada afetada pelo calor, prosseguiu-se com a análise da superfície onde foram evidenciadas alterações na coloração da peça na região de intersecção da face com o gume.

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 ou a intensidade do dano, ou seja, se é retêmpera, resultando em um aumento de dureza, ou um segundo revenimento, que resulta em diminuição da dureza (VENDRAME, 2015).

Foram feitas medições da espessura da região afetada pelo calor para todas as amostras, esta região é identificada visualmente após a usinagem das peças e seus valores podem ser vistos no gráfico da Figura 31. Esta região afetada que fica escurecida é assim tratada no presente estudo pois não foram realizadas análises para comprovar a existência de óxidos ou outros componentes que formam esta região mais escura do material.

Figura 31 - Região afetada pelo calor para as diferentes condições de ensaio



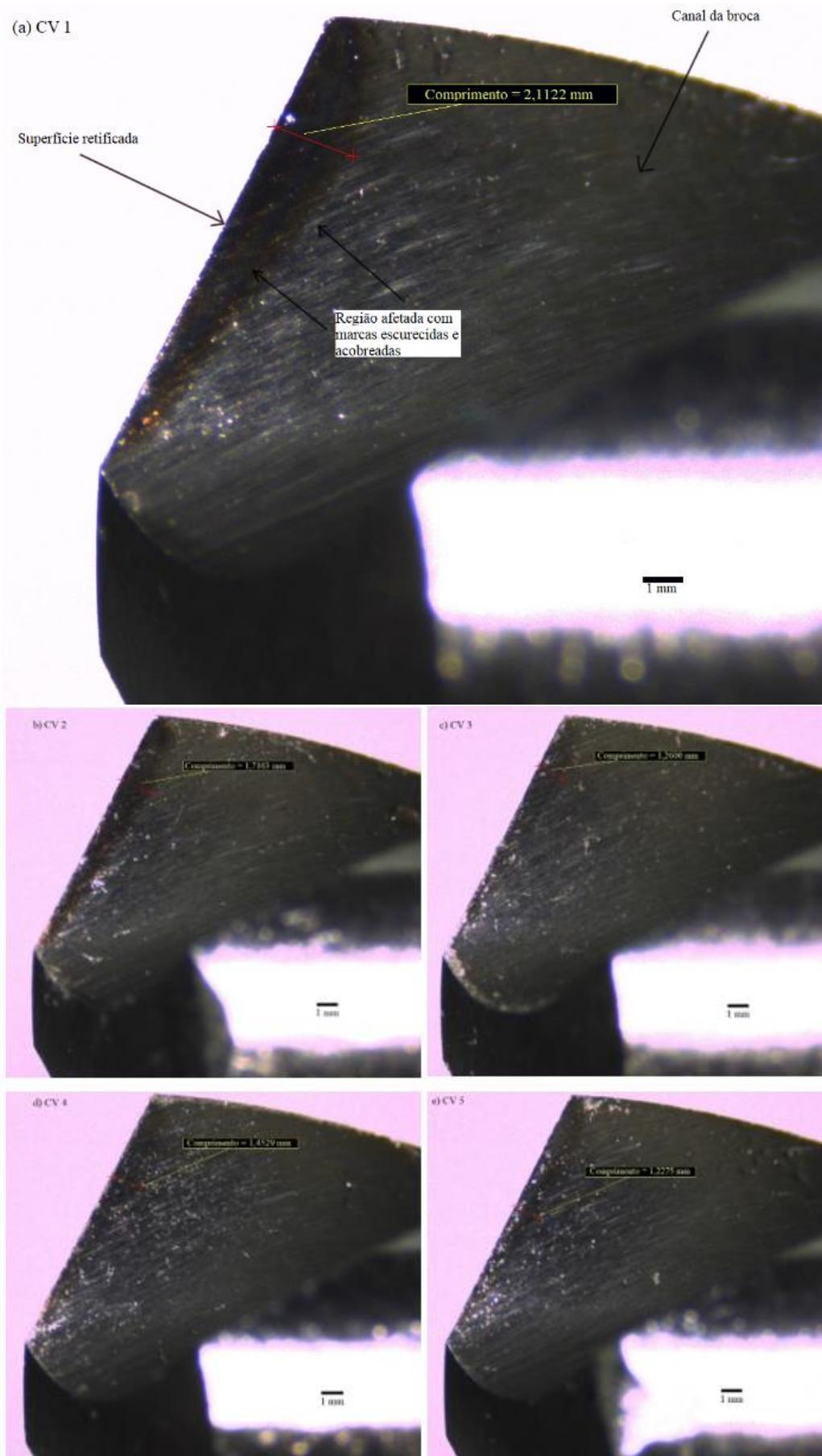
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os valores das medições podem ser vistos na sua totalidade no Apêndice A juntamente com o teste de Fisher. Os valores apresentados foram medidos tomando como base o limite entre a região mais escura e aquela de cor mais clara, típica de material sem influência do calor gerado na retificação. Estas regiões podem ser vistas em detalhe na Figura 32.

De acordo com os resultados encontrados, as condições cujas amostras apresentam maior espessura da marca escurecida são as condições CV1 (Figura 32(a)) e CV2 (Figura 32(b)), respectivamente. Para as outras 3 condições CV3 (Figura 32(c)), CV4 (Figura 32(d)) e CV5 (Figura 32(e)) não se observam grandes diferenças, isto fica mais claro quando são considerados os valores do desvio padrão observados e comprovado pelo teste de Fisher considerando um intervalo de confiança de 95%.

Nas Figuras 32(a) até a Figura 32(e) são mostradas imagens do gume com marcas escurecidas devido ao calor gerado na operação, estas marcas estão situadas especificamente entre a face de saída do canal e a superfície retificada. Esta região não é retificada neste processo em estudo, porém a condução de calor do processo de afiação do flanco da peça faz com que seja visualizada uma região escurecida causada supostamente pela oxidação da superfície. No que tange a superfície retificada não foi observada mudança na coloração, provavelmente por ter sido removida durante o passe de acabamento.

Figura 32 - Marcas da região afetada pelo calor após ensaios de usinagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Desta forma, houve diferença significativa na espessura da região afetada pelo calor na área adjacente à face retificada nas condições em que o fluido foi aplicado com as vazões mais baixas, sendo as de 20 l/min e 40 l/min. Para as demais condições mesmo com o acréscimo de vazão e pressão empregado no fluido de lubrificação não foram evidenciadas reduções nas espessuras medidas para as marcas provenientes da propagação do calor por condução no processo de retificação.

Isto pode ser explicado pelo fato de que nas condições com menores vazões e pressões (CV1 e CV2) o fluido de lubrificação perde eficiência devido à dificuldade imposta pela barreira de ar que é criada em torno do rebolo quando se trabalha em elevadas velocidades de corte (CATAI et al., 2003).

Por consequência, existe um aumento de temperatura na região do corte que, gerou maior área da camada escurecida nas condições CV1 e CV2. No estudo realizado por Bianchi et al. (2001) foram realizadas medições de temperatura nesta mesma região variando somente a pressão e vazão do fluido lubrificante. Os autores verificaram que quando os valores de vazão e pressão foram maiores, $Q_{\text{máx}} = 0,33$ l/s e $P_{\text{máx}} = 28417$ Pa, a ação da refrigeração foi mais eficiente e assim os valores de temperatura foram menores devido à redução da ação do atrito entre o rebolo e a peça. O rebolo utilizado foi de óxido de alumínio (Al_2O_3), com velocidade de corte de 33 m/s, retificando como corpo de prova o aço VC 131, com dureza de 60 HRc.

O acúmulo de calor nesta região foi evidenciado por Aurich, Sudermann e Braun (2006), quando analisaram a formação de rebarbas na retificação de aços ferramenta. Em condições severas de retificação, houve a formação de camada branca na superfície e, devido aos diferentes ângulos de saída testados (60° e 90°), puderam perceber comparando a geometria que há uma concentração de calor crescente à medida que decresce o ângulo na borda de saída. Isto vai de encontro às conclusões de Yamakawa et al. (1989, apud AURICH, SUDERMANN e BRAUN, 2006) que explicou a tendência do calor se concentrar nas bordas da peça quando o ângulo da borda se torna mais agudo.

No entanto, não foram observadas estas marcas na superfície retificada do flanco. Isto se deve provavelmente ao fato de que o processo possui dois passes, sendo o segundo responsável por remover as possíveis marcas superficiais (ROWE, 2009).

Isto foi observado também nos estudos desenvolvidos por Vendrame (2015), que ao retificar as arestas de machos de corte, na superfície onde passa o rebolo não encontrou marcas de oxidação porém, as altas temperaturas do processo por condução causaram marcas escurecidas que puderam ser vistas no perfil do dente, onde posteriormente foi executada a medição.

Os valores da espessura da região afetada pelo calor de forma isolada não fornecem subsídios suficientes para uma avaliação rigorosa da integridade das superfícies. É preciso ressaltar que tais marcas não são consideradas como zona termicamente afetada (ZTA) pois segundo Badger e Torrance (2000), a oxidação é causada pela formação de uma fina camada superficial de metal oxidado e refrigerante, causando a mudança na coloração da peça. Essa descoloração geralmente é apenas superficial e ocorre com frequência sem que a peça sofra qualquer dano metalúrgico. A oxidação pode ser vista na superfície retificada e/ou perto dela, onde as temperaturas são altas devido à condução. Os autores consideram ainda que a oxidação é um indicador fraco para saber se algum dano térmico realmente ocorreu, uma vez que é imprevisível, devendo assim ser comprovado através de outros métodos.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA SEGUNDA ETAPA, ENSAIOS DE FURAÇÃO

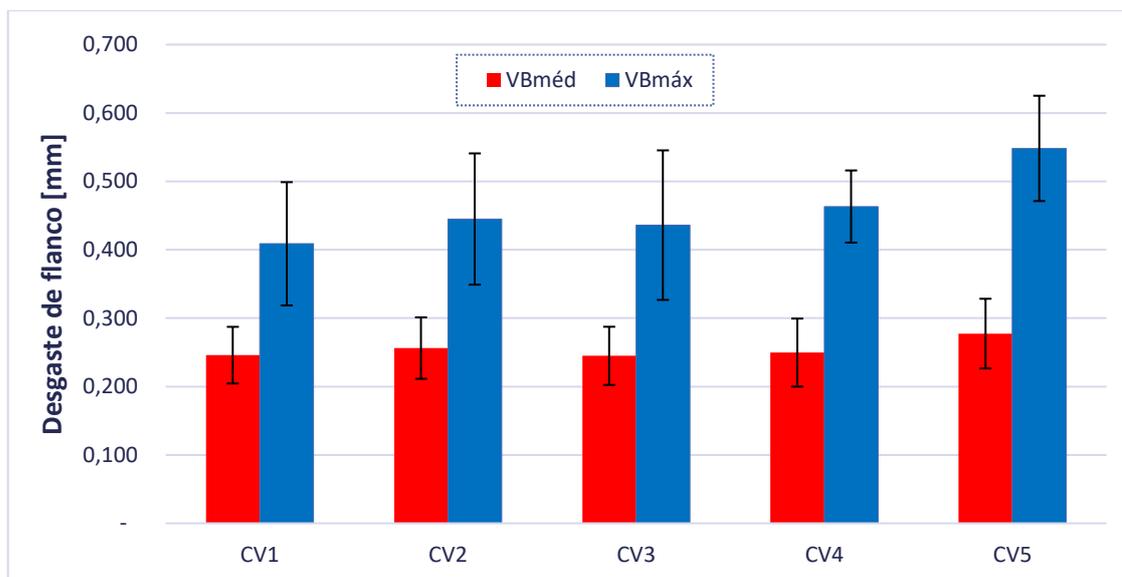
Nesta segunda etapa realizaram-se os testes de furação com as 5 brocas de cada condição em laboratório, conforme apresentado na Tabela 3. Inicialmente são apresentados os levantamentos dos desgastes das ferramentas, na sequência os valores obtidos no monitoramento do esforço axial durante a furação, e por fim os resultados das medições de alguns parâmetros de controle importantes na produção das brocas para cada condição de usinagem utilizada nos testes.

4.2.1 Desgastes das ferramentas

Os desgastes das ferramentas são os responsáveis por definir a sua vida útil, devido à sua importância foram realizados testes visando estabelecer se as diferentes condições de lubrificação a que foram submetidas as amostras puderam causar diferenças no desgaste de flanco das brocas. Abaixo, na Figura 33, o gráfico com os valores obtidos para cada condição de vazão utilizada mostra os desgastes de flanco após a conclusão dos ensaios de furação.

Analisando-se o gráfico é possível verificar que as médias de desgaste máximo de flanco foram muito próximas, principalmente quando são considerados os desvios padrão, os quais foram relativamente altos (em torno de 19%). Exceção foi para a CV5 com vazão de 100 l/min e pressão de 15,5 bar, esta apresentou valores ligeiramente maiores que as demais sendo a única com média de $VB_{máx}$ acima de 0,5mm.

Figura 33 - Gráfico com desgastes de flanco entre as 5 condições de teste



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O desgaste de flanco médio apresentou valores inferiores, porém o desvio padrão representou em média 18% do total. Praticamente o mesmo encontrado para o desgaste de flanco máximo. É possível observar que a CV5 apresenta novamente o maior valor de desgaste, porém, com menor diferença em relação aos demais.

Os desgastes de flanco máximo de maneira geral foram observados na região da quina da ferramenta. Isto pode ser explicado porque, como exposto por Zeilmann (2003), na quina da ferramenta tem-se a condição de corte mais severa na furação, maior velocidade de corte, maior temperatura devido ao atrito cavaco / ferramenta e guia / parede do furo. Além disto, a quina representa o local de menor dissipação de calor, pois está apoiada em menos massa que o restante do gume. Com isto a solicitação da quina é a mais severa e, por consequência, comumente apresenta o maior desgaste.

Através da análise estatística dos dados utilizando-se o método ANOVA - Fisher, que pode ser consultado no Apêndice B, com um intervalo de confiança de 95% é possível afirmar que para o desgaste $VB_{méd}$ não existem diferenças entre as 5 condições de teste. Já para o desgaste $VB_{máx}$ a CV5 apresenta diferença, tendo sua média superior à todas as demais condições testadas. Uma possível justificativa para os maiores desgastes observados na condição CV5 com maiores valores de pressão e vazão é devido à adesão ter sido maior nas brocas durante os testes de furação.

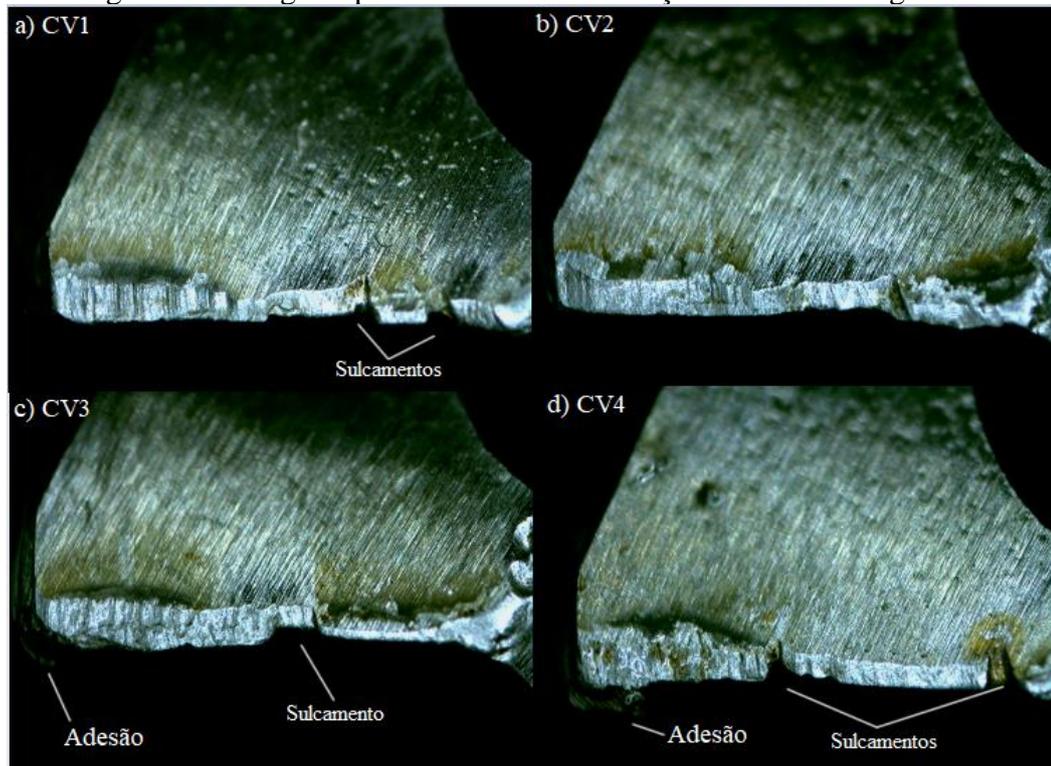
4.2.2 Tipos e mecanismos de desgaste

O estudo do comportamento do desgaste se deu na forma de uma avaliação sobre as imagens das brocas após os ensaios de furação. O critério de fim de vida utilizado foi uma quantidade pré-determinada de furos realizados, tendo como objetivo comparar os desgastes obtidos após os testes para as diferentes condições de ensaio.

Para todos os ensaios realizados foram identificados tipos de desgaste semelhantes. O principal mecanismo de desgaste presente foi a abrasão, com ocorrência de adesão em menor escala enquanto que o tipo de desgaste mais representativo foi o desgaste de flanco juntamente com a presença de sulcamento. As imagens do flanco para as cinco condições de teste podem ser vistas a seguir na Figura 34 e Figura 35.

De maneira geral, severos danos foram observados nos gumes e na quina das ferramentas. Micro-lascamentos na forma de sulcamento foram encontrados para todas as amostras ensaiadas, o desgaste abrasivo, o maior responsável pelos valores de desgaste $VB_{méd}$ pode ser identificado de forma evidente. Enquanto que a adesão passou a se tornar representativa na condição CV3 aumentando gradativamente até a CV5.

Figura 34 - Desgaste para as diferentes condições de lubrificador



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

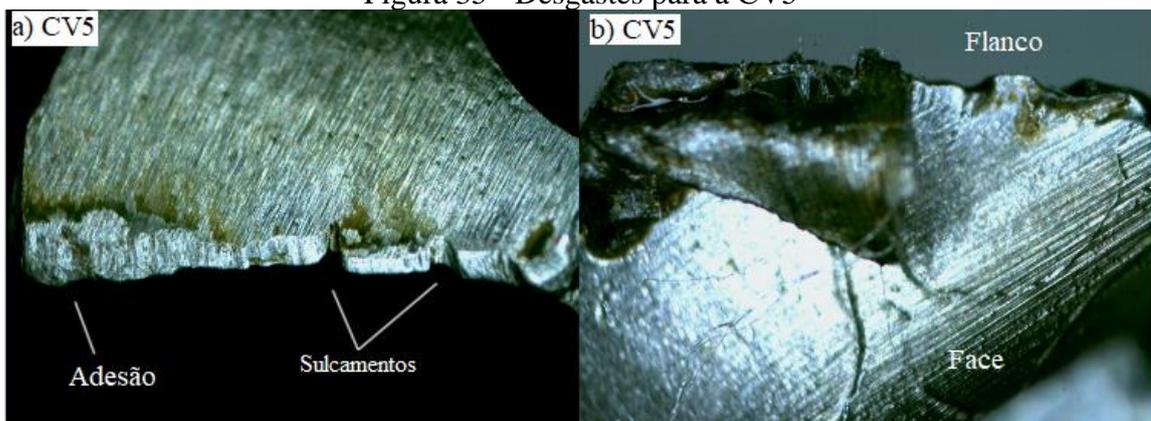
Os sulcamentos podem ser atribuídos principalmente aos defeitos de fabricação originados da primeira etapa. Os micro-lascamentos ao longo do gume principal potencializaram a ampliação dos defeitos, causando a ocorrência do sulcamento durante os testes de furação.

Isto foi observado também em estudo feito por Rigo (2015), onde atribuiu os lascamentos observados após os testes de usinagem a alguns fatores, inicialmente ao contato mecânico gerado durante a furação, além da frequente aderência e arrancamento de material no gume. Porém, ao analisar a geometria da broca de metal duro ainda nova verificou a presença de um grande número de falhas na continuidade dos gumes. Através de imagens da ferramenta ainda na condição de nova, evidenciou a existência de micro-lascamentos resultantes do processo de fabricação da broca. Pôde verificar ainda uma descontinuidade no gume principal, além de uma faixa de coloração mais escura ao longo do seu comprimento. Esta coloração mais escura pode ter sido originada pela temperatura elevada provocada pelo processo de retificação dos gumes. Assim, os lascamentos verificados após os testes podem ter sido decorrentes do aumento dos micro-lascamentos iniciais da broca, com o aumento do número de furos executados.

O sulcamento mostrou-se predominantemente presente em região próxima ao gume transversal. Mesmo para a maioria das amostras que apresentaram sulcamentos ao longo de todo o gume, os mesmos surgiram em maior quantidade na região mais próxima do centro da broca. Esta condição particular pode ser relacionada ao raio de concordância presente na geometria do gume da ferramenta. Este raio, combinado com as características de formação do cavaco na furação, em que as diferenças de velocidades ao longo do gume forçam o fluxo inicial do cavaco para o centro da broca, podem ter provocado uma concentração de esforços sobre a região do gume mais próxima ao gume transversal (KE, NI e STEPHENSON, 2005).

Notou-se um aumento significativo e progressivo da adesão próxima à quina da ferramenta à medida que as brocas usinadas com os maiores valores de vazão foram analisadas. Possivelmente, a única alteração está ligada com a redução da temperatura que poderia gerar um efeito de maior severidade na segunda etapa do teste prático de furação, porém isto não foi evidenciado nas análises iniciais.

Figura 35 - Desgastes para a CV5



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para as condições CV1 e CV2 não foram identificadas adesões próximas à quina, enquanto que na CV3 o processo iniciou acumulando material na região da face. Foi possível perceber que na CV4 este mecanismo se intensificou e foi progredindo até produzir grandes volumes de material aderidos à ferramenta como pôde ser visto na Figura 35 (b) para a CV5.

4.2.3 Monitoramento do esforço axial na furação

As amostras foram encaminhadas ao teste prático de furação no laboratório da empresa onde foram colocadas em condição de trabalho. O objetivo deste teste é simular de forma aproximada a condição que o produto é submetido pela maior parte dos clientes.

Para a realização dos testes em sua totalidade foram executados 750 furos e utilizados 2 blocos padrão, podendo gerar assim 750 gráficos com o comportamento do esforço ao longo tempo na furação. Analisando os diversos gráficos obtidos para os 30 furos programados para cada amostra constata-se que, de maneira geral, não há diferença no comportamento do esforço, existe apenas a variação esperada nos valores de F_z durante a execução dos furos.

Em posse dos elementos monitorados, utilizou-se os dados de esforço máximo para cada uma das amostras, com a finalidade de analisar de forma comparativa os testes realizados. Abaixo na Tabela 6 tem-se a comparação dentre todas as amostras ensaiadas para cada uma das 5 condições.

Como as 3 primeiras amostras foram utilizadas na primeira etapa, para esta segunda etapa a numeração iniciou na amostra de número 4 e assim segue até a de número 8.

Tabela 6 - Esforço de avanço máximo para todas amostras

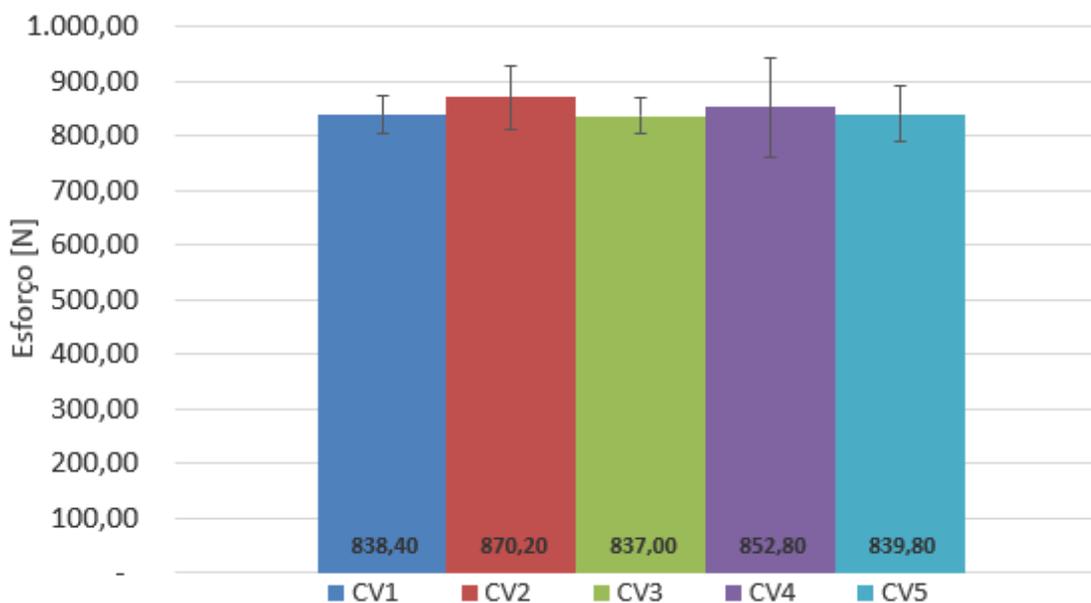
Condição	Esforço Máximo [N]					Média [N]	Desvio padrão [N]
	Amostras						
	4	5	6	7	8		
CV1	824	888	851	834	795	838,4	34,4
CV2	776	922	901	902	850	870,2	59,0
CV3	788	866	837	827	867	837,0	32,6
CV4	816	887	983	737	841	852,8	90,9
CV5	860	778	897	870	794	839,8	51,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para facilitar a comparação, na Figura 36 é possível ver os dados plotados graficamente.

Se for considerado um intervalo de 95% de confiança para a média todas as 5 diferentes condições de teste passam pelos valores de $Fz_{\text{mín}}$ 795,71 N e $Fz_{\text{máx}}$ 877,44 N. No Apêndice C é possível encontrar o teste de Fisher onde fica comprovado que para α de 5%, não temos diferenças significativas entre as médias encontradas nos testes.

Figura 36 - Esforço axial máximo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Estas igualdades no desempenho dos testes práticos vêm a corroborar com as análises realizadas na sub-seção anterior onde não foram encontradas diferenças significativas nos valores de desgaste de flanco e alterações na microestrutura do material em termos de danos subsuperficiais.

Devido ao ineditismo do presente estudo não foram encontradas outras pesquisas que correlacionassem as condições de lubrificação na afiação da ferramenta com seus resultados para a força de avanço posterior em condição de trabalho.

Sabe-se que maiores vazões de fluido lubrificante tendem a reduzir a temperatura na região de corte. Com isto, há um acréscimo nas forças de usinagem devido ao aumento da resistência do material da peça em temperaturas mais baixas (ZEILMANN, 2003).

Este comportamento diferenciado para a primeira etapa do processo de retificação não se mostrou influente na segunda etapa, onde as condições de lubrificação de teste foram mantidas constantes.

4.2.4 Medição dos parâmetros geométricos

Antes de submeter as amostras ao teste prático executaram-se diversas medições, sendo que algumas são resultado do processo de abertura do canal das brocas, assunto esse que não é objeto do presente estudo, e outras sendo resultado do processo da primeira etapa de afiação.

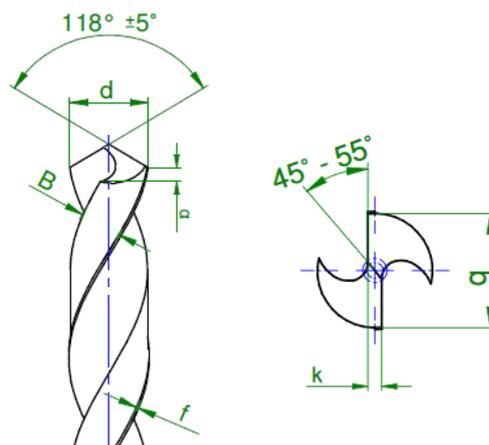
Para Astakhov (2010b), a geometria das brocas têm grande influência sobre o seu desempenho e apresenta uma série de experimentos em torno de modificações feitas em variados tipos de brocas, apresentando também as perdas e ganhos no processo de cada alteração abordada. Ainda segundo o autor os resultados da força axial, por exemplo, são fortemente influenciados pela geometria do gume transversal.

Já Teixeira (1995) avaliou a influência de diversos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço-rápido e verificou para cada erro simulado qual a influência sobre vários parâmetros de controle, sendo um deles o esforço axial.

Devido à estas e outras pesquisas realizadas sobre a influência da geometria no comportamento das brocas na furação fez-se o controle a fim de verificar a existência de variações significativas que possam alterar os resultados.

Todos os parâmetros controlados para o presente estudo são considerados constantes, isto é, não sofreram variação por ajustes ao longo do processo de produção das amostras. Contudo, é intrínseco do processo que ocorram variações dimensionais, portanto, foram realizadas as medições com a finalidade de averiguar se houveram diferenças que pudessem alterar os dados finais de esforço axial (F_z) obtidos. Pode-se observar na Figura 37 as nomenclaturas para cada um dos parâmetros que foram controlados, conforme consta na norma NBR ISO 235.

Figura 37 - Parâmetros de controle geométrico das brocas



Fonte: Adaptado do arquivo interno da empresa (2019).

Apenas o parâmetro definido como α não está citado na norma, contudo, por se tratar de um parâmetro com importância para o bom desempenho das brocas no processo foram executadas as medições assim como é feito nas análises de rotina da empresa.

Como valores de referência temos na Tabela 7 os ângulos recomendados que variam basicamente em função do diâmetro da broca e do material a ser usinado.

Tabela 7 - Ângulos de folga recomendados para brocas helicoidais
Ângulos de folga recomendados (°)

Faixa de diâmetro da broca (mm)	Brocas de uso geral	Brocas para materiais duros e resistentes	Brocas para materiais macios e de fácil usinagem
0.35-1.00	24	20	26
1.05-2.50	21	18	24
2.55-3.00	18	16	22
3.05-6.50	16	14	20
6.55-8.95	14	12	18
9.00-13.00	12	10	16
13.10-20	10	8	14
>20	8	7	12

Fonte: Adaptado de Astakhov (2014).

Abaixo segue Tabela 8 com as médias e desvio padrão para cada um dos parâmetros controlados para os 5 corpos de prova analisados em cada uma das 5 condições de teste. As tabelas com todas as medições realizadas podem ser encontradas no Apêndice D.

O parâmetro “f” mostra valores discrepantes de desvio padrão em relação aos demais, isto pode ser visto através do percentual de desvio padrão sobre a média que ficou sempre acima de 24%, chegando até a 55% na CV4.

Tabela 8 - Valores para média e desvio padrão dos parâmetros de controle na produção

Parâmetros	CV1			CV2			CV3			CV4			CV5		
	Média	Desvio padrão	%												
45 - 55°	47,690	1,415	3%	46,802	1,840	4%	47,220	1,760	4%	47,582	0,881	2%	47,662	0,721	2%
k	1,564	0,080	5%	1,555	0,073	5%	1,572	0,096	6%	1,520	0,047	3%	1,524	0,091	6%
q	8,007	0,014	0%	8,004	0,019	0%	7,982	0,007	0%	8,006	0,025	0%	8,005	0,013	0%
118°	115,440	0,830	1%	114,750	0,560	0%	115,440	0,730	1%	115,510	0,370	0%	114,860	0,480	0%
α	17,544	1,056	6%	17,950	0,614	3%	17,934	0,418	2%	16,604	1,308	8%	18,518	1,687	9%
f	0,844	0,204	24%	0,829	0,224	27%	0,873	0,210	24%	0,759	0,414	55%	0,760	0,223	29%
B	4,249	0,149	4%	4,186	0,131	3%	4,229	0,151	4%	4,261	0,344	8%	4,339	0,152	4%

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Realizou-se análises de variância ANOVA, com um nível de confiança de 95%, para apoiar na análise dos resultados através do método de Fisher. Os dados foram calculados e plotados com auxílio do software Excel®.

Os testes evidenciaram ao analisar o P-valor que é possível afirmar ao considerar um nível de significância de 5%, que se aceita a hipótese de igualdade entre as médias para todos

os níveis. É possível observar que o parâmetro “ f ” não influencia significativamente nos valores da força axial. Confrontando os valores de “ f ”, que podem ser consultados no Apêndice D, com os dados de F_z , presentes na Tabela 6, pode-se perceber que não há uma relação entre as duas grandezas.

Este fato concerne com os estudos realizados por Zeilmann (2003), que afirmou após testes de furação em ligas de titânio que o atrito das guias da broca com a parede do furo possui influência somente sobre o momento torçor, sendo desprezível sobre as forças de avanço.

A única interação em que não se aceita a hipótese de as médias serem iguais ocorreu para o parâmetro “ α ”, onde a CV4 e CV5 mostram-se estatisticamente diferentes para um intervalo de 95% de confiança.

Os testes foram realizados de forma sequencial, utilizando as peças de um mesmo lote com regulagem igual tanto da máquina que produziu a abertura do canal, quanto para a máquina da primeira etapa, responsável pela afiação da ponta.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que na avaliação da microestrutura possivelmente não houveram alterações na subsuperfície. Apenas um gume de corte para uma das três amostras avaliadas na condição de vazão de 80 l/min apresentou camada branca, representando assim uma exceção aos resultados gerais obtidos.

O processo de retificação causou irregularidades no gume das brocas de aço-rápido. Os micro-lascamentos oriundos do processo se mostraram presentes para todas as condições ensaiadas, enquanto que, à medida que maiores valores de vazão e pressão foram utilizados menores tamanhos de rebarbas foram encontrados.

A região afetada pelo calor verificada na face de saída da ferramenta reduziu até a condição denominada CV3 com vazão de 60 l/min e 5,5 bar de pressão. Para valores de vazão e pressão superiores a este não foram observados ganhos neste aspecto.

O mecanismo de desgaste principal foi a abrasão. O tipo de desgaste predominante foi o desgaste de flanco, sendo encontrados valores médios na ordem de 0,25 mm para 0,75 m usinados. Também foram encontrados alguns sulcos e micro-lascamentos que se mostraram presentes em todas as amostras ensaiadas. Estatisticamente não foram evidenciadas diferenças para o desgaste de flanco médio entre as cinco condições de teste, apenas para o desgaste de flanco máximo na condição com vazão de 100 l/min e pressão do fluido de 15,5 bar onde houve maiores valores de desgaste do que para as demais condições dos ensaios.

Os dados obtidos para o esforço axial na furação não sofreram variação estatisticamente significativa para as diferentes condições de vazão e pressão do fluido lubrificante testadas na primeira etapa. Apesar dos valores medidos para a guia da broca com elevado desvio padrão, e o ângulo de folga entre duas condições de teste terem apresentado valores diferentes, nenhum deles se mostrou significativamente influente na força de avanço de corte.

Por fim, este trabalho foi muito importante para a compreensão do tema, visto que, permitiu verificar que é possível diminuir os valores de vazão e pressão utilizados para a produção das brocas de aço-rápido na empresa sem comprometer a qualidade final do produto.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para novos trabalhos nesta área de pesquisa sobre fluido lubrificador na retificação, sugere-se que sejam realizados os seguintes estudos:

- realizar testes com mais variáveis como tipo de rebolo utilizado e uso do sistema de defletores nos bocais de alimentação do fluido;
- alterar os parâmetros da máquina para permitir valores inferiores de vazão e pressão de fluido lubrificador;
- realizar análise com Espectroscopia de raios X por Energia Dispersiva (EDS), Espectroscopia de raios X de dispersão por comprimento de onda (WDS) e medição de nanodureza para auxiliar na caracterização dos desgastes.

REFERÊNCIAS

- ADIBI, H.; REZAEI, S. M.; SARHAN, A. A. D. Analytical modeling of grinding wheel loading phenomena. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 68, n. 1–4, p. 473–485, 2013.
- ALVES, Manoel Cleber de Sampaio et al. Influence of Optimized Lubrication-Cooling and Minimum Quantity Lubrication on the Quality of. **Materia-Rio De Janeiro**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 754–766, 2011.
- ALVES, M. C. de S. **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada**. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2005.
- ALVES, M. C. de S. **Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN**. 2007. 155 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2007.
- ALVES, Manoel Cléber de Sampaio; BIANCHI, Eduardo Carlos; AGUIAR, Paulo Roberto De. Influência da lubrirefrigeração na qualidade superficial de metais retificados. **REM. Revista Escola de Minas**, [s. l.], v. 64, n. 4, p. 505–512, 2012.
- ASM HANDBOOK, C. **ASM Handbook: Machining**. 2ª ed., 16 v. [s.l.: s.n.] 1089 f. ISBN 0-87170-007-7.
- ASTAKHOV, V. P. **Tribology of metal cutting**. No. 52, 1th ed. Grã-Bretanha: Elsevier, 2006. ISBN–13: 978-0-444-52881-0.
- ASTAKHOV, V. P. **Geometry of Single-point Turning Tools and Drills: Fundamentals and Practical Applications**. London: Springer London Dordrecht Heidelberg, 2010a. ISBN 978-1-84996-052-6.
- ASTAKHOV, V. P. **Surface Integrity in Machining**. London: Springer London Dordrecht Heidelberg, 2010b. ISBN 978-1-84882-873-5.
- ASTAKHOV, V. P. **Drills: Science and Technology of Advanced Materials**. New York: CRC Press, 2014. ISBN 13: 978-1-4665-8435-8
- ASTAKHOV, V. P.; JOKSCH, S. (Eds.). **Metalworking fluids (MWFs) for cutting and grinding: Fundamentals and recent advances**. United Kingdom: Woodhead Publishing Limited, 2012. ISBN 978-0-85709-530-5.

AURICH, J. C.; SUDERMANN, H.; BRAUN, O. Experimental investigation of burr formation in the surface grinding of tool steel. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 220, n. 4, p. 489–497, 2006.

BADGER, J. A.; TORRANCE, A. Burn awareness - understanding the causes of grinding burn helps alleviate the problem. **Cutting Tools Engineering Magazine**, [s. l.], v. 52, n. 12, 2000.

BIANCHI, Eduardo Carlos et al. Estudo da influência da pressão e vazão do fluido de corte no processo de retificação. **Revista de Ciência & Tecnologia**, [s. l.], v. 8, n. 18, p. 79–85, 2001.

BOCCALINI, M.; GOLDENSTEIN, H. Solidification of high speed steels. **International Materials Reviews**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 92–115, 2003.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. Friction, cooling and lubrication in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 581–598, 1999.

CARDOSO, M. J. **Análise do processo de furação profunda no aço SAE 4144M endurecido utilizando MQL e broca helicoidal revestida**. 2014. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

CARIUS, A. C. Effects of Grinding Fluid Type on CBN Wheel Performance. **AES Magazine**, [s. l.], p. 22–27, 1990.

CATAI, R. E. et al. Estudo dos Métodos Otimizados de Aplicação de Fluidos de Corte no Processo de Retificação. **Revista de Ciência & Tecnologia**, [s. l.], v. 11, n. 22 p. 7–18, 2003.

CHEUNG, F. Y. et al. Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 208, n. 1–3, p. 196–204, 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 599 p.

DAVIM, J. P. **Machining of Hard Materials**. London: Springer London, 2011. ISBN 978-1-84996-449-4.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8589:11 (2003-09) Manufacturing processes chip removal – Part 11: grinding with rotating tool – classification, subdivision, terms and definitions**. Beuth, Berlin. 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8589:12** (2003-09) Manufacturing processes chip removal – Part 12: belt grinding – classification, sub-division, terms and definitions. Beuth, Berlin. 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8589:13** (2003-09) Manufacturing processes chip removal – Part 13: honing with linear cutting motion – classification, subdivision, terms and definitions. Beuth, Berlin. 2003.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 1ª ed. São Paulo: mm editora, 1999. 242 p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6ª ed. Campinas: Artiliber Editora Ltda, 2008.

EBBRELL, S. et al. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 209–223, 2000.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Carlos: Editora Edgard Blücher LTDA, 1969. 751 p.

FERRARI, C. **Análise comparativa dos métodos mql, mql/água e convencional na retificação cilíndrica do aço abnt 52100, com rebole de óxido de alumínio**. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2015.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**. 4th ed. United States: Wiley, 2010. ISBN 978-0470-467002.

HILDEBRANDT, R. A. **Retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 com aplicação do fluido de corte pela técnica de MQL com sistema de limpeza da superfície de corte do rebole**. 2016. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2016.

HOU, Y.; LI, C.; ZHOU, Y. Applications of high-efficiency abrasive process with CBN grinding wheel. **Engineering**, [s. l.], v. 02, n. 03, p. 184–189, 2010.

JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. (eds.). **Machining with Abrasives**. Boston, MA: Springer US, 2011. ISBN 978-1-4419-7301-6.

KE, F.; NI, J.; STEPHENSON, D. A. Continuous chip formation in drilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 45, n. 15, p. 1652–1658, 2005.

KING, R. I.; HAHN, R. S. **Handbook of Modern Grinding Technology**. New York: Chapman and Hall, 1986. ISBN-13: 978-1-4612-9167-1.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: grinding, honing, lapping**. Tradução de Aaron Kuchle. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-92258-2.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: turning, milling, drilling**. Tradução de Aaron Kuchle. Berlin: Springer Heidelberg Dordrecht London, 2011. ISBN 978-3-642-11978-1.

KOPROWSKI, S. et al. Modelling and simulation of grinding processes with mounted points: part I of II - grinding tool surface characterization. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 46, p. 599–602, 2016.

KUMAR, M.; SINGH, S.; GOYAL, K. To study the effect of grinding parameters on surface roughness and material removal rate of cylindrical grinding of heat treated en 47 steel. **Journal of Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 45, n. 2, p. 81–88, 2016.

LI, C. et al. Useful fluid flow and flow rate in grinding: an experimental verification. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 81, n. 5–8, p. 785–794, 2015.

LOPES, J. R. **Análise do comportamento do fluxo de fluido lubri- refrigerante em tuberias do tipo sapata para a retificação em alta velocidade**. 2007. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2011. ISBN 978-85-212-0452-7.

MAHDI, M.; ZHANG, L. Applied Mechanics in Grinding-V. Thermal Residual Stresses. **International Journal of Machining Tools Manufacturing**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. 619–633, 1997.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives**. 2nd ed. New York: Industrial Press Inc., 2008. ISBN 978-0-8311-3247-7.

MARINESCU, I. D. et al. **Tribology of abrasive machining processes**. USA: William Andrew, 2004. ISBN: 0-8155-1490-5.

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of machining with grinding wheels**. 1st ed. New York: CRC Press, 2006. ISBN: 1-57444-671-1.

MARQUES, F. M. et al. Caracterização de desgaste de brocas de hss revestidas com AlCrN e não revestidas, em ensaios de furação, na usinagem de ferro fundido nodular DIN GGG 50. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, [s. l.], v. 19, p. 87–104, 2015.

MELLO, A. V. de. **Retificação da liga Ti-6Al-4v, com fluido de corte contendo partículas de grafeno**. 2015. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.

MORENO, D. A. N. **Validação de um dispositivo de interrupção subita da furação com brocas helicoidais para análise da raiz de cavaco**. 2013. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

OLIVEIRA, J. F. G. et al. Industrial challenges in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 663–680, 2009.

PUERTO, P. et al. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 63, n. 1996, p. 174–182, 2013.

RIGO, J. A. **Análise do desempenho da furação do aço SAE 1012 com broca de metal-duro sem revestimento e com fluidos semissintéticos**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) - Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2015.

ROSARIO, J. F. A. **Estudo da integridade superficial e seu efeito na fadiga de contato de um aço ferramenta**. 2011. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

ROWE, W. B. et al. Applications of Artificial Intelligence in Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 521–531, 1994.

ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology**. 1st ed. Burlington, USA: Elsevier, 2009. ISBN: 978-0-8155-2018-4.

SILVA, L. R.; SOARES, C. B. Performance of the minimum quantity lubrication technique in turning Inconel 718 at high cutting speed. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 401, 2009.

SLUHAN, C. A. Selecting the right cutting and grinding fluids. **Tooling and Production**, [s. l.], v. 60, n. 2, p. 7, 1994.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

TEIXEIRA, C. R. **Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos furos produzidos**. 1995. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.

TRENT, E. M.; RIGHT, P. **Metal Cutting**. 4th ed. Woburn, USA: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 0-7506-7069-X.

TSCHÄTSCH, Heinz. **Applied Machining Technology**. 8th ed. New York: Springer Dordrecht Heidelberg London, 2009. ISBN 978-3-642-01006-4.

VENDRAME, S. **Estudo da integridade da aresta de machos de corte de HSS durante a retificação em várias condições de corte**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.

VINAY, P. V.; RAO, C. Srinivasa. Influence of Process Parameters on Grinding - A Review. **Stm Journals**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 16–28, 2013.

VULC, S.; BRINDASU, P-D.; BEJU, L. D. A parameters synthesis of grinding process modeling for carbide drills deep holes and small diameter. **Annals of the Oradea University** [s. l.], p. 443–448, 2013.

WEBSTER, J. A. et al. Grinding Fluid Application System Design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 333–338, 1995.

WEGENER, K.(ed.); LAPERRIÈRE, L.; REINHART, G. (orgs.). **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. p. 1–12. ISBN 978-3-642-35950-7.

YOUSSEF, H. A.; EL-HOFY, H. **Machining technology: machine tools and operations**. New York: CRC Press, 2008. ISBN: 978-1-4200-4339-6.

ZEILMANN, R. P. **Furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínimas quantidades de fluido de corte**. 2003. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

APÊNDICE A - TABELA COM AS MEDIDAS DA REGIÃO AFETADA PELO CALOR

Tabela 9 - Região afetada pelo calor após retificação

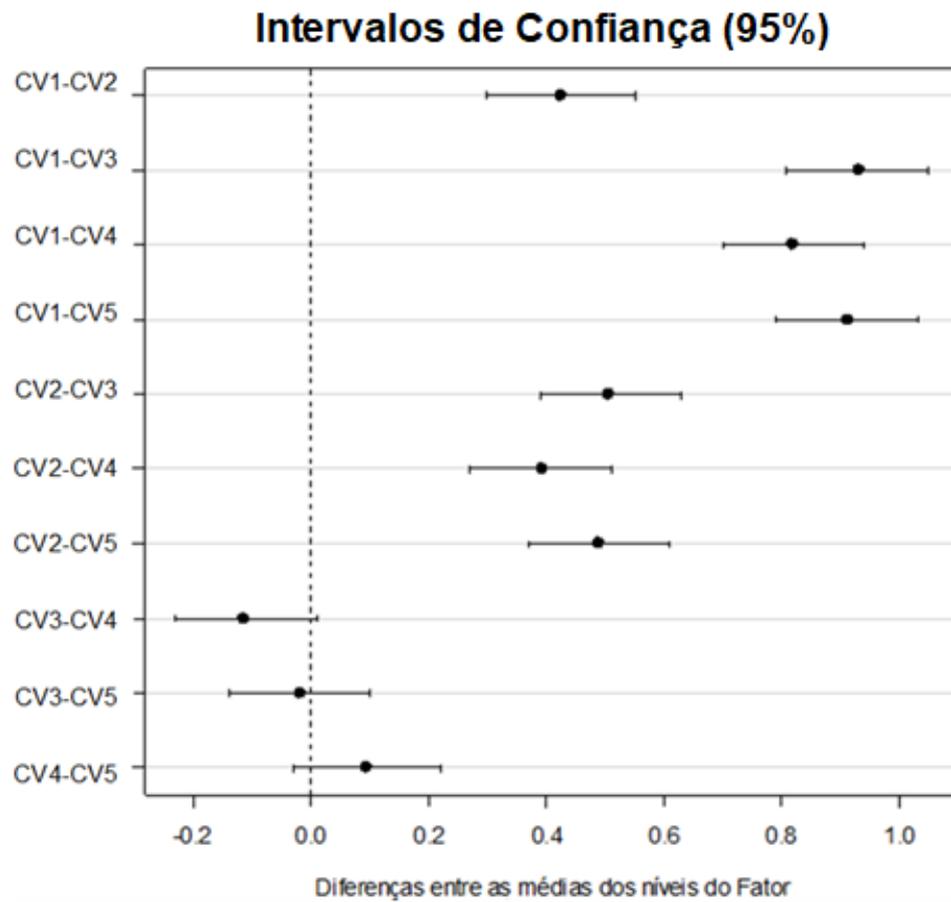
Condição de vazão (CV)	Nº do gume	Espessura da região afetada [mm]								Média	Desvio padrão (s)
		Réplicas									
		1	2	3	4	5	6	7	8		
1	1	2,295	2,120	2,196	2,095	2,112	2,014	2,202	2,302	2,160	0,109
	2	2,055	2,153	1,975	2,162	2,276	2,196	2,062	2,352		
2	1	1,709	1,703	1,781	1,862	1,182	1,760	2,066	1,791	1,736	0,222
	2	2,175	1,885	1,726	1,710	1,597	1,518	1,687	1,621		
3	1	1,300	1,260	1,150	1,090	1,058	1,068	1,366	1,517	1,229	0,156
	2	1,188	1,036	1,432	1,131	1,256	1,323	1,050	1,443		
4	1	1,273	1,223	1,209	1,228	1,453	1,244	1,155	1,316	1,343	0,198
	2	1,379	1,206	1,492	1,830	1,554	1,601	1,268	1,050		
5	1	1,176	1,118	1,379	1,336	1,172	1,286	1,405	0,995	1,247	0,153
	2	1,390	1,373	1,303	1,292	0,907	1,228	1,445	1,148		

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

TESTE DE FISHER

DADOS DO PROCESSO

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor
CV1-CV2	0,4245625	0,3	0,55	0
CV1-CV3	0,93110875	0,81	1,05	0
CV1-CV4	0,8177875	0,7	0,94	0
CV1-CV5	0,91343125	0,79	1,03	0
CV2-CV3	0,50654625	0,39	0,63	0
CV2-CV4	0,393225	0,27	0,51	0
CV2-CV5	0,48886875	0,37	0,61	0
-	-	-	-	-
CV3-CV4	0,11332125	-0,23	0,01	0,0664
CV3-CV5	-0,0176775	-0,14	0,1	0,7721
CV4-CV5	0,09564375	-0,03	0,22	0,12



APÊNDICE B - TABELA COM AS MEDIDAS DE DESGASTES DE FLANCO

Tabela 10 - Tabela com os desgastes de flanco para todas as amostras dos testes de furação

Amostra		CV1		CV2		CV3		CV4		CV5	
		V _B méd. [mm]	V _B máx. [mm]								
4	Gume 1	0,2602	0,3859	0,3058	0,5716	0,2625	0,3680	0,2834	0,4984	0,2362	0,6493
	Gume 2	0,2908	0,4658	0,2379	0,4220	0,2785	0,3569	0,2812	0,4467	0,2361	0,5503
5	Gume 1	0,2632	0,5777	0,2241	0,4678	0,2288	0,5087	0,2847	0,4686	0,3453	0,4486
	Gume 2	0,2577	0,4119	0,2086	0,3282	0,225	0,5166	0,2325	0,5361	0,1947	0,4597
6	Gume 1	0,2214	0,3745	0,2027	0,3934	0,2134	0,3042	0,1355	0,3782	0,3141	0,6599
	Gume 2	0,2530	0,2685	0,3205	0,5967	0,1687	0,2815	0,2127	0,4768	0,2668	0,5779
7	Gume 1	0,1705	0,3160	0,2732	0,4267	0,2274	0,6074	0,2855	0,4983	0,2955	0,5186
	Gume 2	0,2455	0,3775	0,3035	0,5389	0,2831	0,4888	0,3017	0,4035	0,3276	0,5737
8	Gume 1	0,1915	0,3996	0,2097	0,3438	0,2416	0,5346	0,2373	0,5176	0,3247	0,5899
	Gume 2	0,3050	0,5101	0,2765	0,3606	0,3199	0,3933	0,2419	0,4081	0,2335	0,4545
Média [mm]		0,2459	0,4088	0,2563	0,445	0,2449	0,436	0,2469	0,4632	0,2775	0,5482
Desvio padrão [mm]		0,0414	0,0901	0,0450	0,096	0,0426	0,1094	0,0497	0,0528	0,0509	0,077

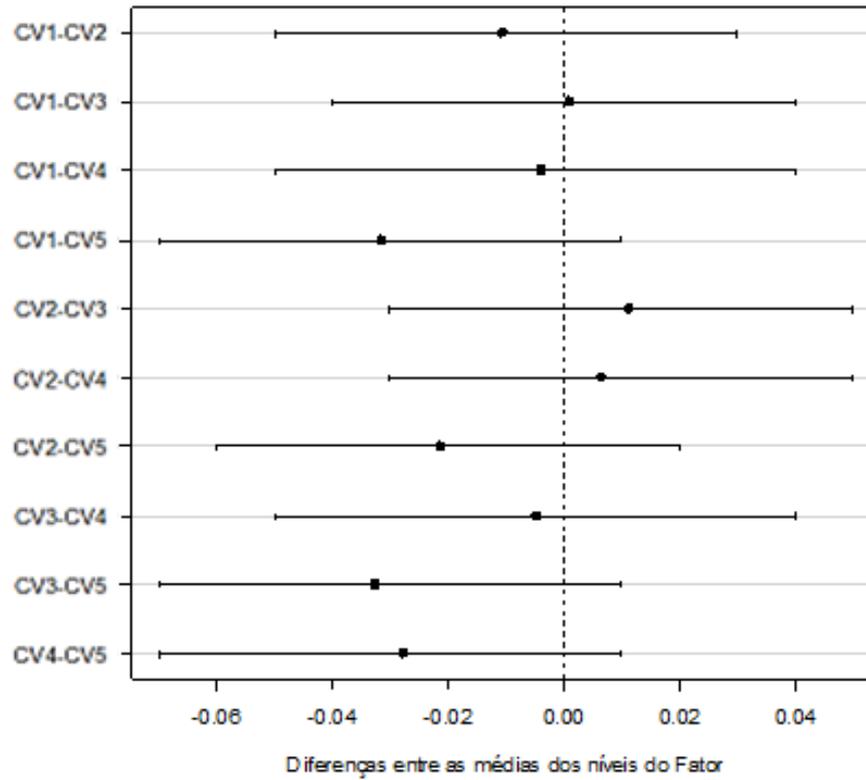
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

TESTE DE FISHER PARA V_BMÉD

DADOS DO PROCESSO

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor
CV1-CV2	0,01037	-0,05	0,03	0,6172
CV1-CV3	0,00099	-0,04	0,04	0,9619
CV1-CV4	0,00376	-0,05	0,04	0,856
CV1-CV5	0,03157	-0,07	0,01	0,1325
CV2-CV3	0,01136	-0,03	0,05	0,5841
CV2-CV4	0,00661	-0,03	0,05	0,7498
CV2-CV5	-0,0212	-0,06	0,02	0,309
CV3-CV4	0,00475	-0,05	0,04	0,8187
CV3-CV5	0,03256	-0,07	0,01	0,121
CV4-CV5	0,02781	-0,07	0,01	0,1838

Intervalos de Confiança (95%)

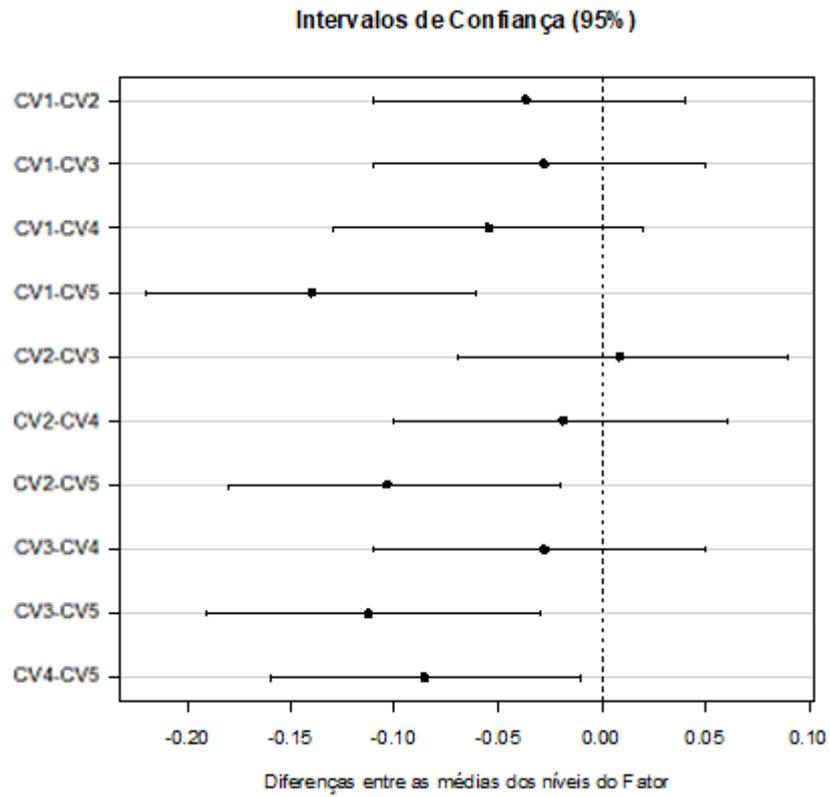


TESTE DE FISHER

PARA $VB_{MÁX}$

DADOS DO PROCESSO

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
-	-	-	-	-
CV1-CV2	0,03622	-0,11	0,04	0,3579
-	-	-	-	-
CV1-CV3	0,02725	-0,11	0,05	0,4882
-	-	-	-	-
CV1-CV4	0,05448	-0,13	0,02	0,1692
-	-	-	-	-
CV1-CV5	0,13949	-0,22	-0,06	0,0008
CV2-CV3	0,00897	-0,07	0,09	0,8191
-	-	-	-	-
CV2-CV4	0,01826	-0,1	0,06	0,6418
-	-	-	-	-
CV2-CV5	0,10327	-0,18	-0,02	0,0111
-	-	-	-	-
CV3-CV4	0,02723	-0,11	0,05	0,4885
-	-	-	-	-
CV3-CV5	0,11224	-0,19	-0,03	0,0061
-	-	-	-	-
CV4-CV5	0,08501	-0,16	-0,01	0,0345

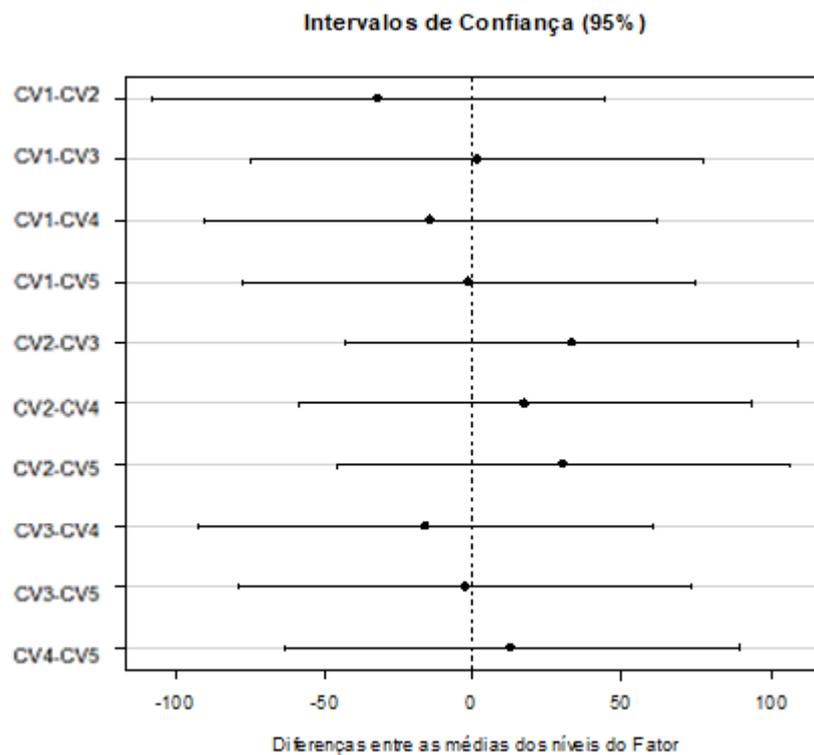


APÊNDICE C – TESTE DE FISHER PARA OS ESFORÇOS AXIAIS

TESTE DE FISHER

DADOS DO PROCESSO

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor
CV1- CV2	-31,8	-107,83	44,23	0,3933
CV1- CV3	1,4	-74,63	77,43	0,9697
CV1- CV4	-14,4	-90,43	61,63	0,697
CV1- CV5	-1,4	-77,43	74,63	0,9697
CV2- CV3	33,2	-42,83	109,23	0,3732
CV2- CV4	17,4	-58,63	93,43	0,6383
CV2- CV5	30,4	-45,63	106,43	0,4141
CV3- CV4	-15,8	-91,83	60,23	0,6693
CV3- CV5	-2,8	-78,83	73,23	0,9395
CV4- CV5	13	-63,03	89,03	0,7251



APÊNDICE D – TABELAS COM OS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Tabela 11 - Medidas para brocas da CV1

CV1 = 20							
AMOSTRA	45° - 55°	K	q	118°	α	f	B
4	47,78	1,505	7,986	114,99	16,15	0,608	4,376
5	45,35	1,643	8,000	116,56	18,69	0,998	4,236
6	47,71	1,641	8,007	114,42	17,85	1,017	4,167
7	48,94	1,569	8,022	115,91	18,26	0,637	4,414
8	48,67	1,463	8,018	115,34	16,77	0,962	4,052

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 12 - Medidas para brocas da CV2

CV2 = 40							
AMOSTRA	45° - 55°	K	q	118°	α	f	B
4	47,60	1,547	8,025	115,19	18,57	0,947	4,159
5	49,10	1,495	8,019	114,87	17,47	0,622	4,252
6	44,07	1,672	7,977	115,29	17,58	0,945	4,112
7	46,41	1,568	7,995	114,50	18,67	1,070	4,033
8	46,83	1,495	8,005	113,92	17,46	0,560	4,372

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 13 - Medidas para brocas da CV3

CV3 = 60							
AMOSTRA	45° - 55°	K	q	118°	α	f	B
4	47,54	1,652	8,007	116,37	18,43	1,067	4,081
5	46,27	1,672	8,005	115,60	18,08	0,703	4,325
6	46,26	1,589	7,989	115,29	17,98	1,068	4,104
7	45,87	1,495	7,993	115,58	17,90	0,916	4,196
8	50,16	1,454	7,985	114,34	17,28	0,609	4,438

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 14 - Medidas para brocas da CV4

CV4 = 80							
AMOSTRA	45° - 55°	K	q	118°	α	f	B
4	47,04	1,495	7,991	115,19	18,43	0,511	4,424
5	46,47	1,589	7,969	115,54	17,22	1,496	3,675
6	48,79	1,516	8,024	115,89	14,97	0,588	4,442
7	47,72	1,463	8,018	115,07	16,46	0,627	4,524
8	47,89	1,537	8,029	115,84	15,94	0,572	4,239

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 15 - Medidas para brocas da CV5

CV5 = 100							
AMOSTRA	45° - 55°	K	q	118°	α	f	B
4	48,28	1,620	7,999	114,34	18,92	0,655	4,537
5	47,29	1,578	7,989	115,61	20,79	0,563	4,341
6	47,02	1,537	8,007	114,76	19,01	1,061	4,154
7	48,59	1,505	8,006	114,98	17,57	0,931	4,233
8	47,13	1,381	8,024	114,62	16,3	0,591	4,43

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

APÊNDICE E – TESTE DE FISHER PARA OS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

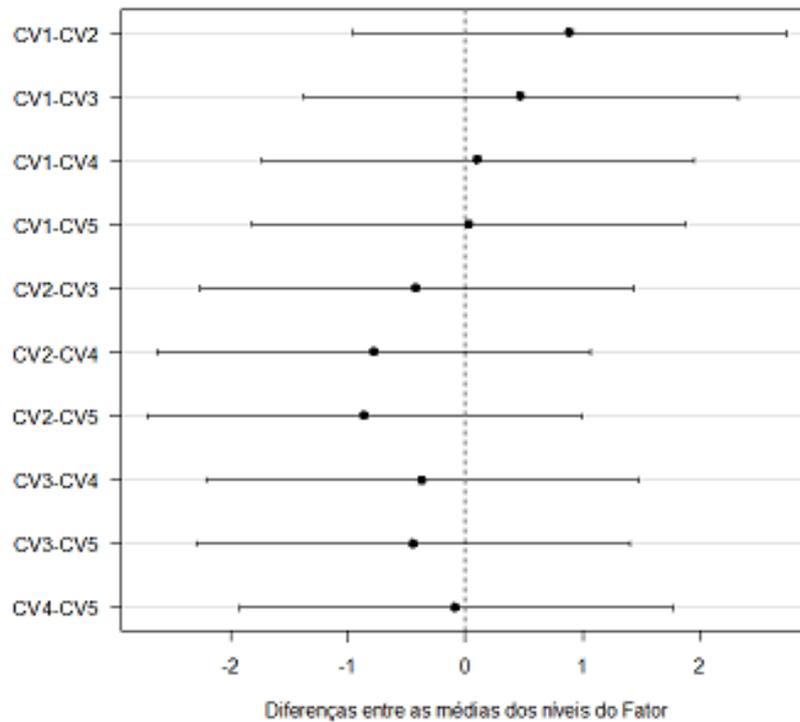
Teste de Fisher para parâmetro 45° - 55°

TESTE DE FISHER

DADOS DO PROCESSO

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
CV1-CV2	0,888	-0,96	2,73	0,3274
CV1-CV3	0,47	-1,38	2,32	0,601
CV1-CV4	0,108	-1,74	1,95	0,904
CV1-CV5	0,028	-1,82	1,87	0,9751
-	-	-	-	-
CV2-CV3	0,418	-2,26	1,43	0,6416
CV2-CV4	-0,78	-2,63	1,07	0,3883
CV2-CV5	-0,86	-2,71	0,99	0,3425
-	-	-	-	-
CV3-CV4	0,362	-2,21	1,48	0,6867
-	-	-	-	-
CV3-CV5	0,442	-2,29	1,4	0,6227
CV4-CV5	-0,08	-1,93	1,77	0,9288

Intervalos de Confiança (95%)



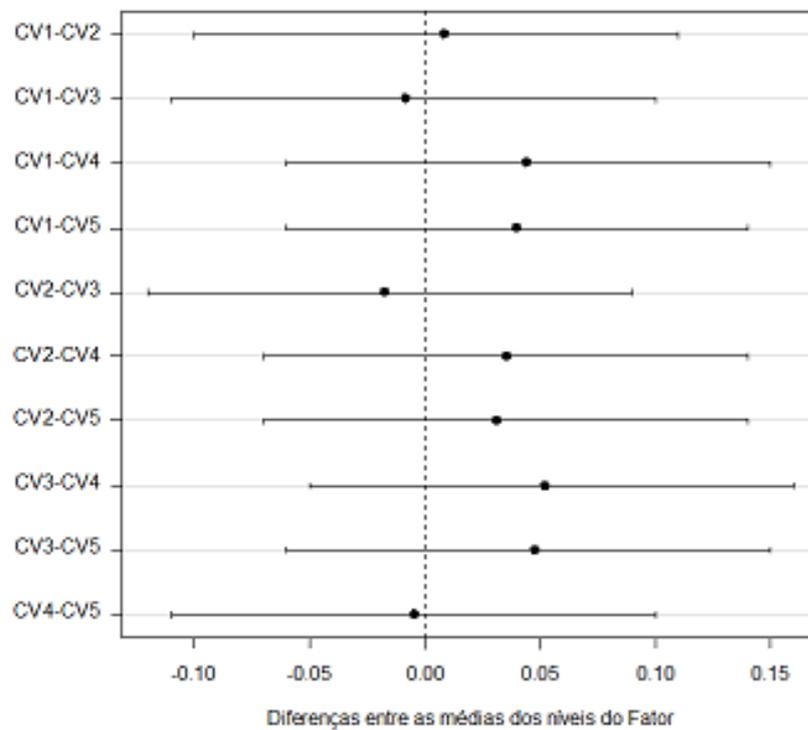
Teste de Fisher para parâmetro k

TESTE DE FISHER

DADOS DO PROCESSO

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
CV1-CV2	0,0088	-0,1	0,11	0,8624
CV1-CV3	-0,0082	-0,11	0,1	0,8717
CV1-CV4	0,0442	-0,06	0,15	0,3883
CV1-CV5	0,04	-0,06	0,14	0,4342
CV2-CV3	-0,017	-0,12	0,09	0,738
CV2-CV4	0,0354	-0,07	0,14	0,4881
CV2-CV5	0,0312	-0,07	0,14	0,5406
CV3-CV4	0,0524	-0,05	0,16	0,3082
CV3-CV5	0,0482	-0,06	0,15	0,3477
CV4-CV5	-0,0042	-0,11	0,1	0,934

Intervalos de Confiança (95%)



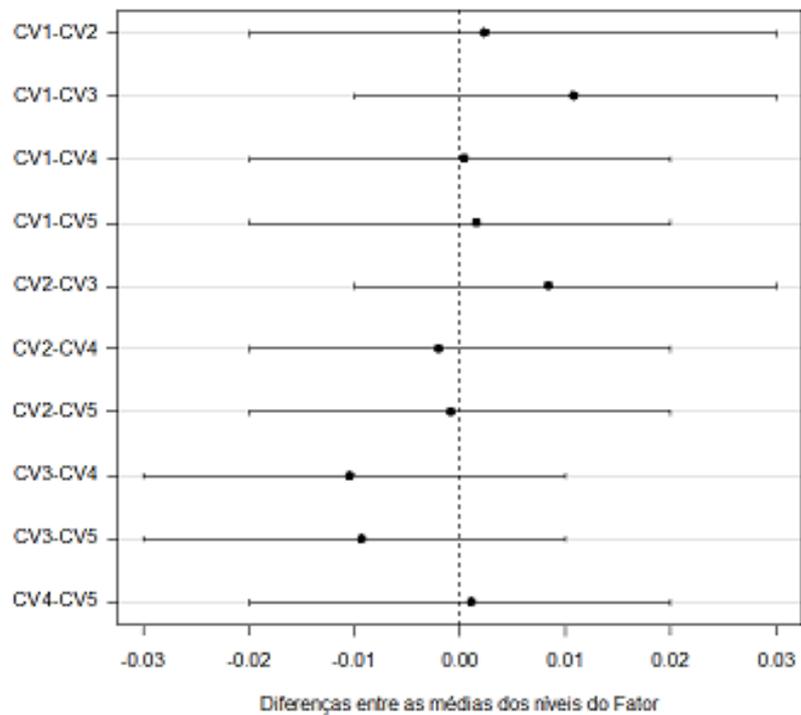
Teste de Fisher para parâmetro q

TESTE DE FISHER

DADOS DO PROCESSO

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
CV1-CV2	0,00246	-0,02	0,03	0,8236
CV1-CV3	0,01086	-0,01	0,03	0,3305
CV1-CV4	0,00046	-0,02	0,02	0,9667
CV1-CV5	0,00166	-0,02	0,02	0,8804
CV2-CV3	0,0084	-0,01	0,03	0,4495
CV2-CV4	-0,002	-0,02	0,02	0,8561
CV2-CV5	-0,0008	-0,02	0,02	0,9422
CV3-CV4	-0,0104	-0,03	0,01	0,351
CV3-CV5	-0,0092	-0,03	0,01	0,4082
CV4-CV5	0,0012	-0,02	0,02	0,9134

Intervalos de Confiança (95%)



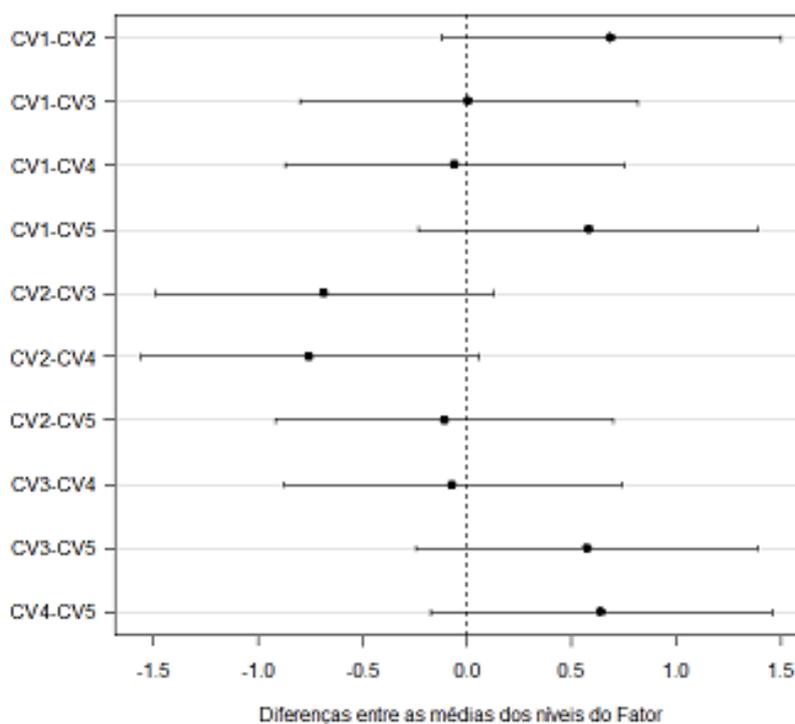
Teste de Fisher para parâmetro 118°

TESTE DE FISHER

DADOS DO PROCESSO

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
CV1-CV2	0,69	-0,12	1,5	0,0917
CV1-CV3	0,008	-0,8	0,82	0,9838
	-			
CV1-CV4	0,062	-0,87	0,75	0,8751
CV1-CV5	0,582	-0,23	1,39	0,1508
	-			
CV2-CV3	0,682	-1,49	0,13	0,0953
	-			
CV2-CV4	0,752	-1,56	0,06	0,0678
	-			
CV2-CV5	0,108	-0,92	0,7	0,7844
CV3-CV4	-0,07	-0,88	0,74	0,8592
CV3-CV5	0,574	-0,24	1,39	0,1562
CV4-CV5	0,644	-0,17	1,46	0,1139

Intervalos de Confiança (95%)



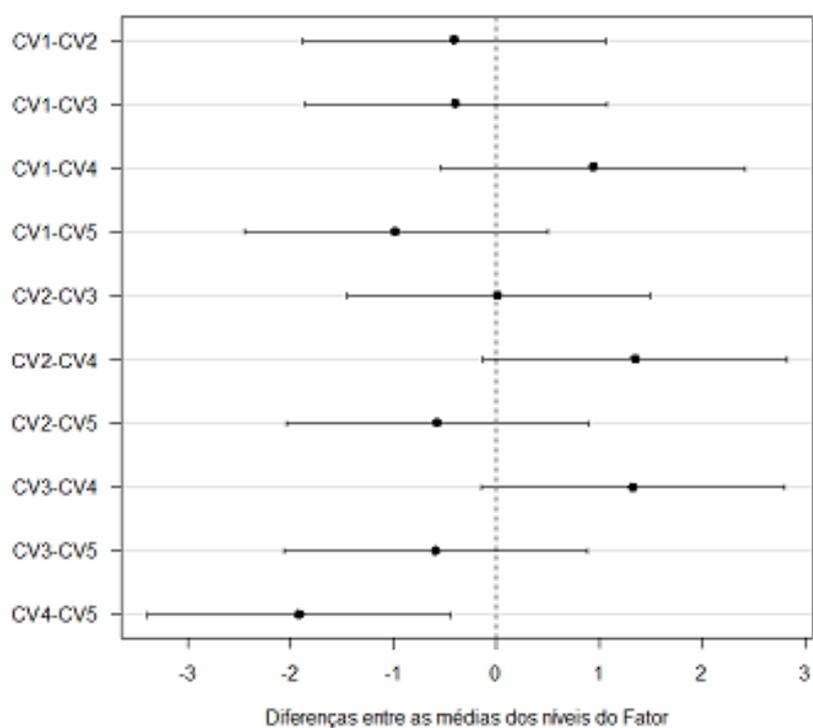
Teste de Fisher para parâmetro α

TESTE DE FISHER

DADOS DO PROCESSO

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor
-	-	-	-	-
CV1-CV2	0,406	-1,88	1,07	0,5715
CV1-CV3	-0,39	-1,86	1,08	0,5866
CV1-CV4	0,94	-0,53	2,41	0,1978
-	-	-	-	-
CV1-CV5	0,974	-2,45	0,5	0,1828
CV2-CV3	0,016	-1,46	1,49	0,9821
CV2-CV4	1,346	-0,13	2,82	0,0709
-	-	-	-	-
CV2-CV5	0,568	-2,04	0,9	0,4303
CV3-CV4	1,33	-0,14	2,8	0,0741
-	-	-	-	-
CV3-CV5	0,584	-2,06	0,89	0,4177
-	-	-	-	-
CV4-CV5	1,914	-3,39	-0,44	0,0134

Intervalos de Confiança (95%)

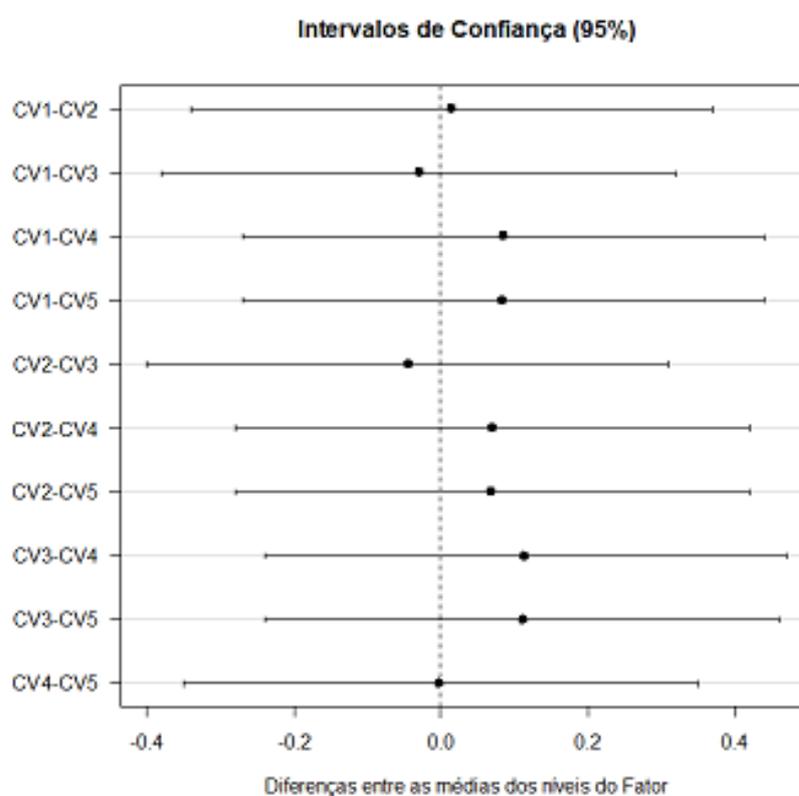


Teste de Fisher para parâmetro f

TESTE DE FISHER

DADOS DO PROCESSO

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
CV1-CV2	0,0156	-0,34	0,37	0,9274
CV1-CV3	-0,0282	-0,38	0,32	0,8691
CV1-CV4	0,0856	-0,27	0,44	0,618
CV1-CV5	0,0842	-0,27	0,44	0,6237
CV2-CV3	-0,0438	-0,4	0,31	0,7981
CV2-CV4	0,07	-0,28	0,42	0,6831
CV2-CV5	0,0686	-0,28	0,42	0,6891
CV3-CV4	0,1138	-0,24	0,47	0,5083
CV3-CV5	0,1124	-0,24	0,46	0,5135
CV4-CV5	-0,0014	-0,35	0,35	0,9935

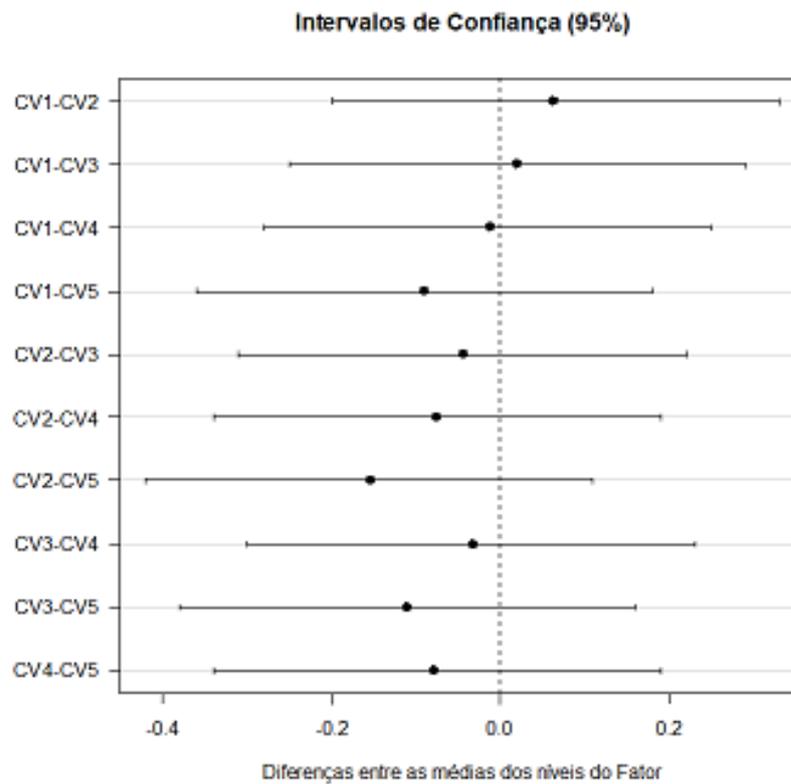


Teste de Fisher para parâmetro B

TESTE DE FISHER

DADOS DO PROCESSO

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
CV1-CV2	0,0634	-0,2	0,33	0,6248
CV1-CV3	0,0202	-0,25	0,29	0,8758
CV1-CV4	-0,0118	-0,28	0,25	0,9273
CV1-CV5	-0,09	-0,36	0,18	0,4888
CV2-CV3	-0,0432	-0,31	0,22	0,7385
CV2-CV4	-0,0752	-0,34	0,19	0,5623
CV2-CV5	-0,1534	-0,42	0,11	0,2434
CV3-CV4	-0,032	-0,3	0,23	0,8046
CV3-CV5	-0,1102	-0,38	0,16	0,3981
CV4-CV5	-0,0782	-0,34	0,19	0,547



ANEXO A – MÁQUINAS, EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS

As máquinas, equipamentos e ferramentas utilizadas na primeira etapa dos ensaios podem ser observadas abaixo nas figuras 38 à 44.

Figura 38 - Máquina retificadora utilizada na afiação das brocas



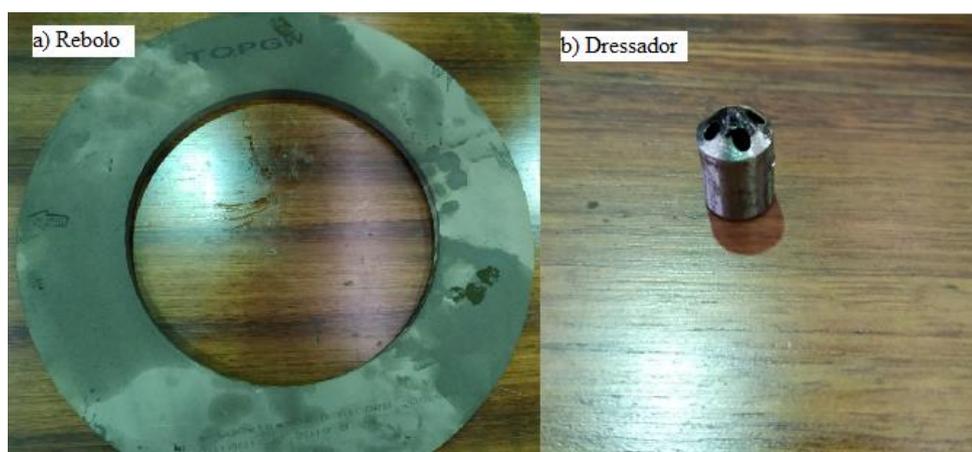
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 39 - Equipamentos utilizados na caracterização da superfície usinada



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 40 - Ferramentas utilizadas no processo de retificação das brocas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 41 - Robô Motoman utilizado nos ensaios de furação



Specifications MH50 II						
Axes	Maximum motion range [°]	Maximum speed [°/sec.]	Allowable moment [Nm]	Allowable moment of inertia [kg · m ²]	Controlled axes	
S	±180	180	–	–	Max. payload [kg]	50
L	+135/-90	178	–	–	Repeat. pos. accuracy [mm]	±0.07
U	+25/-170	178	–	–	Max. working range R [mm]	2061
R	±360	250	216	28	Temperature [°C]	0 to +45
B	±125	250	216	28	Humidity [%]	20 – 80
T	±360	360	147	11	Weight [kg]	550
					Power supply, average [KVA]	4

Fonte: Adaptado de <https://f.nordiskemedier.dk/23q00oppo1b2t49a.pdf>, acessado em: 15/05/2019.

Figura 42 - Célula de carga C2 da HBM.

C2

Force Transducer

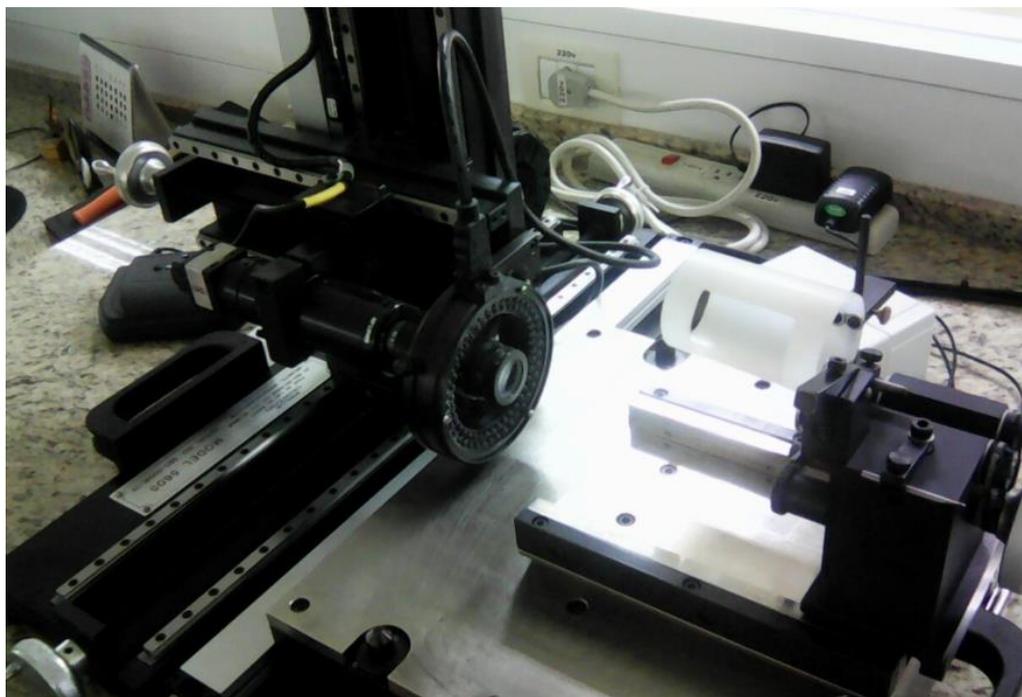
Special features



- Tensile/compressive force transducer
- Non-rusting, degree of protection IP67
- Can be configured with different cable lengths, plug fitting and TEDS on request
- Lateral force compensation
- Low overall height
- Nominal (rated) forces 500 N ... 200 kN
- Accuracy class 0.1

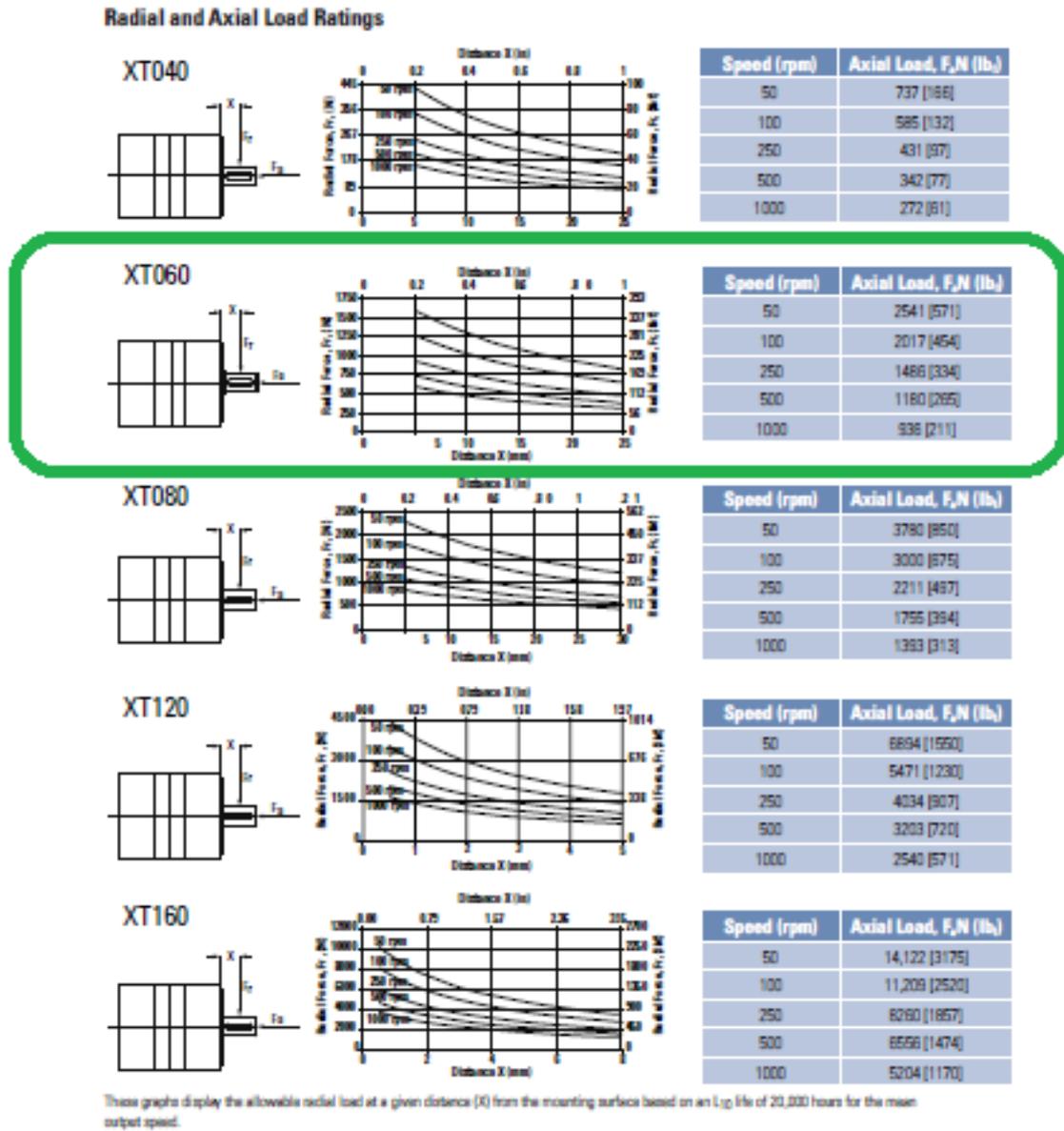
Fonte: <https://www.hbm.com/pt/2420/c2-sensor-de-forca-para-forcas-de-compressao>, acessado em: 15/05/2019.

Figura 43 - Equipamento especial para medição de ferramentas de corte



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 44 - Especificação técnica servomotor Kollmorgen



X TRUE™ TRUE PLANETARY GEARHEADS

Fonte: Catálogo do produto, disponível em: https://www.novotecargentina.com%2Fdownload.php%3Ftipo%3Dacrobat%26dato%3D1392233435_Reductores_Precision_XT.pdf&usg=AOvVaw11E7j32gOcmIWH0oq4Ccr0, acessado em: 15/05/2019.

ANEXO B – LAUDO TÉCNICO DO MATERIAL

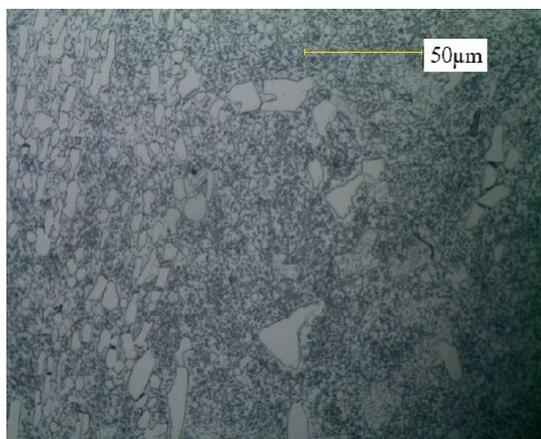
O laudo técnico metalográfico com a composição química do material utilizado como bloco padrão para os testes de furação está presente na Figura 45, enquanto que na Figura 46 pode-se ver sua microestrutura.

Figura 45 - Laudo técnico do material

TRAMONTINA		Relatório de Análises Químicas						
Método:	Fe-01-F	25/04/2019 15:44:19						
Comment:	Ferro Orientativo							
Fornecedor - Empresa:	Tramontina Garibaldi S.A.							
Liga:								
Rastreabilidade:	Não Aplicavel							
Corrida-Ordem Fabricação	Amostra A							
Operador:	Gabriel							
Observações:	Aço							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
< X > (3)	1.92	0.253	0.361	0.0143	0.0046	11.96	0.111	0.145
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
< X > (3)	0.0204	0.0204	0.0587	0.0163	0.0105	0.0879	0.904	< 0.0040
	Sn	Mg	As	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%
< X > (3)	0.0010	0.0116	< 0.0015	< 0.0015	< 0.0050	0.0019	0.0254	0.0021
	Te	B	Zn	La	Fe			
	%	%	%	%	%			
< X > (3)	0.0032	0.00086	0.0252	0.0026	84.0			

Fonte: Arquivos internos da empresa (2019).

Figura 46 - Análise metalográfica



Ataque: Nital 2%, aumento de 500x
 Matriz coalescida com carbeto dispersos de forma homogênea
 A dureza dos blocos ficou de 10,0 HRc à 11,2 HRc

Fonte: Arquivos internos da empresa (2019).