

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

TAYNAN LUCAS CAITANO

**FURAÇÃO DE AÇO SAE 4144M COM BROCAS HELICOIDAIS DE
METAL DURO PREPARADAS COM DIFERENTES PROCESSOS DE
POLIMENTO**

**CURITIBA
DEZEMBRO – 2019**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

TAYNAN LUCAS CAITANO

**FURAÇÃO DE AÇO SAE 4144M COM BROCAS HELICOIDAIS DE
METAL DURO PREPARADAS COM DIFERENTES PROCESSOS DE
POLIMENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica, Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Pontifícia
Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Álisson Rocha Machado, Ph.D

Coorientadores:

Prof. Denis Boing, Dr.

Prof. Carlos Augusto Henning Laurindo, Dr.

CURITIBA

DEZEMBRO – 2019

**Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após
apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora.**

Deve ser impressa no verso da folha de rosto.

A Biblioteca da PUCPR oferece o serviço gratuitamente.

Para solicitar, necessário enviar o trabalho para o e-mail

biblioteca.processamento@pucpr.br

Em até 48h a ficha será encaminhada para o e-mail do solicitante.



TERMO DE APROVAÇÃO

Taynan Lucas Caitano

Furação de Aço SAE 4144M com Brocas Helicoidais de Metal Duro Preparadas com Diferentes Processos de Polimento

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva
Universidade Federal de Uberlândia, UFU



Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR



Prof. Dr. Álisson Rocha Machado
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Orientador, PUCPR

Curitiba, 22 de novembro de 2019



Ao meu pai e minha mãe Cida e Nivaldo,
minha querida esposa Franciele e
principalmente ao mestre dos mestres,
Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Álisson Rocha Machado, pela amizade e confiança e principalmente pela oportunidade de bolsa em um programa de pós-graduação nível 6, por todos os momentos de orientação desprendidos durante o mestrado e pelos momentos de incentivo para realização dele.

Agradeço ao Denis Boing por ter aceito a ser coorientador do trabalho e “embarcar” neste desafio junto conosco, por toda a ajuda na parte de caracterização das ferramentas em termos de rugosidade tridimensional bem como os ensaios QSD e pelas diversas terças feiras de orientação e incentivo para a conclusão do trabalho.

Agradeço ao Carlos Laurindo por ter me orientado no projeto de graduação, ter me apresentado o caminho da pós-graduação e estar conosco neste projeto como coorientador.

Agradeço a Robert Bosch Curitiba nas pessoas do Zequiel Stella, Guillermo Meister e Udo Wall que possibilitaram e compraram a ideia deste projeto junto comigo bem como pelo incentivo desprendido para este trabalho, as pessoas do Matheus Machado e Lucas Petzhold que me ajudaram com os acompanhamentos dos testes na produção, ao Everaldo Garollo pelas diversas discussões sobre ferramentas de corte e know-how transmitido, ao time de desenvolvimento de processo nas pessoas do Irineu Gusso, Henry Scharf, Gustavo Cercal, Tiago Ribas, Moises Santana, Ricardo Gasola, Marco Freitas, Luciano Arantes, Vinicius Gogola e a todos os meus colegas que me ajudaram de forma direta ou indiretamente.

Agradeço a todos os técnicos laboratoristas que me ajudaram durante os experimentos na PUC-PR, na pessoa do Claudio - técnico do laboratório de metalografia - pela ajuda nas amostras de QSD, Michel - técnico do laboratório de térmicas - pela ajuda no processo de medição de temperatura, Jéssica Turola e Evandro - técnicos do laboratório de caracterização de superfícies - pela ajuda na realização das análises do MEV e em especial ao Rogério - técnico do laboratório de usinagem - pela amizade e ajuda em todos os ensaios realizados na PUC-PR que contribui muito para o resultado.

Agradeço a todos os professores do programa de pós-graduação da PUC-PR que de alguma forma me ajudaram a alcançar o objetivo.

Agradeço aos meus pais, Cida e Nivaldo que sempre me apoiaram, me ensinaram tudo o que eu sei e o que sou e devo a eles onde consegui chegar como

pessoa e profissionalmente, me ensinando valores éticos e religiosos, agradeço todo o carinho e ajuda que desprenderam durante esse período, amo vocês!

Agradeço a minha querida esposa Franciele Stachuk Nunes Caitano pela parceria durante esta jornada sempre me incentivando a ser melhor e me dando o suporte durante os momentos difíceis, sem você esta jornada seria muito difícil, eu te amo meu amor!

Por fim e não menos importante agradeço a Deus por ter me dado o dom da vida, me presenteado com pessoas incríveis na minha vida, me ajudado a ser uma pessoa melhor a cada dia e por esta grande oportunidade. Obrigado Deus!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Nele estão escondidos todos os tesouros
da sabedoria e do conhecimento.
(COLOSSENSES 2:3)

RESUMO

A furação é um importante processo de usinagem no campo metalmeccânico e otimizações são exigidas pelas empresas que querem ser competitivas, aumentando a produção e reduzindo custos. Acredita-se que a qualidade do acabamento da superfície de saída da ferramenta tem grande influência nos parâmetros resultantes da usinagem, tais como forças, temperaturas e vidas úteis das ferramentas. Teoricamente, um processo adequado de polimento da superfície de saída da broca pode garantir um melhor desempenho, bem como redução de quebra da ferramenta e melhorias na qualidade do furo. O presente trabalho tem como objetivo determinar a influência do tipo de polimento empregado na preparação de brocas de metal duro revestida com TiSiN/AlCrN na usinagem do aço SAE 4144M. Seis diferentes processos de polimento das brocas, após o revestimento, foram estudados - quatro tipos de polimento automático, sendo dois tipos de abrasivos (HSC 1/300 – composto de óxido de silício, casca de noz e pó abrasivo M21) e H 4/400 – composto de casca de noz e pó PP02) e dois tempos de polimento (5 e 20 minutos para o abrasivo HSC 1/300 e 1 e 10 minutos para o abrasivo H 4/400), polimento manual e sem polimento. As ferramentas foram previamente caracterizadas em um microscópio óptico de foco infinito (rugosidade e geometria da superfície) e em um microscópio eletrônico de varredura (quantidade de *droplets* sobre a superfície). Os testes de usinagem consideraram a força de avanço e o torque, a temperatura da peça de trabalho, a vida da ferramenta, os detalhes da raiz do cavaco das amostras utilizando-se de um dispositivo de parada rápida (QSD) e a qualidade dos furos. Os parâmetros de rugosidade obtidos na análise das ferramentas feitas no microscópio de foco infinito não apresentaram diferenças significativas entre as ferramentas quando considerados os intervalos de confiança de 95% para a média, contrariando a expectativa. No entanto, pela análise de área de *droplets* por área total realizada no MEV e testes qualitativos (análise do brilho e restrição ao pano), foi possível caracterizá-las e classificar quantitativamente os polimentos. Com esta metodologia, uma ferramenta polida com um processo de polimento específico (20 minutos – abrasivo HSC 1/300 – composto de óxido de silício, casca de noz e pó abrasivo M21) apresentou um valor de área de *droplets* por área total de 2822 % menor que uma sem polimento. Os resultados de qualidade dos furos (circularidade, posição, diâmetro, rugosidade, análise metalográfica e análise visual do primeiro furo) não foram influenciados pelo polimento das ferramentas de maneira significativa. A vida da ferramenta sem polimento foi 75% menor que a ferramenta polida com melhor desempenho. Os diferentes tipos de polimento não alteraram os mecanismos de desgastes das ferramentas, que foram o abrasivo e o *attrition*. A força de avanço foi 24% maior para a ferramenta sem polimento em comparação a ferramenta polida com melhor desempenho. Estes resultados provam que o grau de acabamento da superfície de saída (polimento) ou quantidade de *droplets* por unidade de área é importante para um bom desempenho da ferramenta e deve ser um parâmetro a ser levado em conta na usinagem do aço SAE 4144M.

Palavras-chave: Furação de aço SAE 4144M, Brocas de metal duro revestidas, Estratégia de polimento, Processo Drag finishing de polimento, HSC 1/300, H4/400, Esforços de usinagem, *Droplets*.

ABSTRACT

Drilling is an important machining process in the metalworking field, and optimizations are required by companies that want to be competitive, increasing production, and reducing costs. It is believed that the quality of the tool's exit surface finish has a significant influence on the machining parameters such as tool forces, temperatures and tool life. Theoretically, a proper polishing process on the drill exit surface can ensure good performance as well as reduced tool breakage and improved hole quality. The present work aims to determine the influence of the type of polishing employed in the preparation of TiSiN/AlCrN coated carbide drills in SAE 4144M steel machining. Six different drill polishing processes after coatings were studied - four types of automatic polishing, being two types of abrasives (HSC 1/300 – composed of silicon oxide, walnut shells and abrasive powder M21® and H 4/400 – composed of walnut shells and abrasive powder PP02®) and two polishing times (5 and 20 minutes for the HSC 1/300 abrasive and 1 and 10 minutes for the H 4/400), manual polishing and unpolished. The tools were previously characterized in an infinite focus optical microscope (roughness and surface geometry) and a scanning electron microscopy (number of droplets on the surface). The machining tests considered the feed force and torque, workpiece temperature, tool life, chip root details of the samples using a quick stop device (QSD), and quality of the holes. The roughness parameters obtained in the analysis of the tools made in the infinite focus microscope showed no significant differences between the tools when considering the confidence interval of 95%, contrary to the expectation. However, by analyzing of droplets area per total area within the SEM and qualitative tests (gloss analysis and cloth restriction), it was possible to characterize and quantitatively classify the polishing processes. Using this methodology, a specific polishing process (20 minutes - Abrasive HSC 1/300 - silicon oxide and walnut shells) presented a droplet area value per total area of 2822 % smoother than the unpolished tool. The tool polishing process did not influence the quality results of the holes (circularity, position, diameter, roughness, metallographic analysis and visual analysis of the first hole). The tool life of the unpolished tool was 75% shorter than the best performing polished tool. The different types of polishing did not change the tool wear mechanisms, which were abrasive and attrition. The feed force was 24% higher for the unpolished tool than for the better performing polished tool. These results proved that the surface finish (polishing) or the number of droplets per unit area is important for good tool performance and should be a parameter to be taken into account when machining the SAE 4144M steel.

Key-words: Drilling of SAE 4144M steel, Coated cemented carbide Drills, Polishing strategy, Drag finishing polishing process, HSC 1/300, H4/400, Cutting forces, *Droplets*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de furação pré-histórico no antigo Egito	26
Figura 2 - Processos de furação	27
Figura 3 - Processo de fabricação de uma broca	28
Figura 4 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação ..	32
Figura 5 - Partes de uma broca	34
Figura 6 - Partes de uma broca	34
Figura 7 - Classificação broca conforme ângulo de hélice	35
Figura 8 - Tipos de afiação da ponta	36
Figura 9 - Microgeometrias aplicadas a aresta de corte	38
Figura 10 - Oxidação do revestimento - Usinagem de 25 peças	39
Figura 11 - Dureza em função da temperatura dos materiais de ferramenta	40
Figura 12 - Dureza e tenacidade de materiais para broca	40
Figura 13 - Diagrama esquemático da estrutura do revestimento	42
Figura 14 – Crescimento de uma trinca em diversos tipos de revestimento	42
Figura 15 - Forças de corte na furação	44
Figura 16 - Zonas de cisalhamento no processo de usinagem	48
Figura 17 - Distribuição de temperatura na ferramenta, cavaco e peça na usinagem de aço, com ferramenta de metal duro P20; $v = 60\text{m/min}$; $h = 0,32\text{mm}$; $K_s = 230\text{ kg/mm}^2$; $\mu = 0,4$	49
Figura 18 - Distribuição de temperatura ao longo da aresta de corte de uma broca	50
Figura 19 - Direções de aplicação de fluidos de corte	52
Figura 20 - Corte ortogonal e aplicação do fluido	53
Figura 21 - Mecanismos de desgaste	53
Figura 22 – Tipos de desgastes de uma broca	55
Figura 23 - Classificação da Integridade Superficial	56
Figura 24 - Fluxograma dos experimentos abordados	61
Figura 25 - Desenho esquemático do corpo de prova.	63
Figura 26 - Microestrutura do Aço 4144M	63
Figura 27 - Desenho de fabricação da ferramenta	65
Figura 28 - Detalhes da seção transversal - Desenho de fabricação	65
Figura 29 - Detalhes do desenho de afiação da ferramenta	66

Figura 30 - Abrasivo HSC 1/300 (à esquerda) e H 4/400 (à direita).....	67
Figura 31 – Análise MEV abrasivos HSC 1/300 - Casca de noz (à esquerda) e óxido de silício (à direita)	67
Figura 32 – Análise MEV abrasivo H 4/400 - Casca de noz.....	68
Figura 33 - Resultados MEV – Pó M21 (à esquerda) e Pó PP02 (à direita)	69
Figura 34 - Máquina Drag Finishing.....	70
Figura 35 - Massa de polimento + Feltro de algodão	71
Figura 36 - Análise MEV abrasivo massa azul	71
Figura 37 - Processo de polimento manual	72
Figura 38 - Teste qualitativo para polimento em ferramentas – Restrição ao pano.....	73
Figura 39 - Microscópio Alicona	74
Figura 40 - Padrão de avaliação da rugosidade - Canal (à esquerda), Guia (à direita)	75
Figura 41 – Imagens geradas pelo Alicona no processo de avaliação da superfície de saída (inferior esquerda) e da guia (inferior direita).....	75
Figura 42 - Tratamento imagem MEV - Medição droplets - Software Image J ...	76
Figura 43 - Máquina de medição TecSart.....	77
Figura 44 - Modelo de avaliação de ferramenta.....	78
Figura 45 - Modelo de ferramenta no fim de vida	79
Figura 46 - Croqui dos cortes para análise metalográfica.....	80
Figura 47 - Modelo de cortes para análise metalográfica	80
Figura 48 - Placa de aquisição de dados + amplificador e computador (à esquerda), Plataforma dinamométrica (à direita)	82
Figura 49 - Dispositivo de descarga capacitiva micro controlada	83
Figura 50 - Fixação dos termopares no corpo de prova	83
Figura 51 - Barra de aço ABNT 1020 utilizada nos ensaios de temperatura	84
Figura 52 - QSD Furação - Quick Stop Device	85
Figura 53 - Corpos de prova QSD	85
Figura 54 - Modelo de corte para a eletro erosão a fio – Plano A	86
Figura 55 - Modelo de corte para eletro erosão a fio - Plano B (Perpendicular a A)	86
Figura 56 - Modelo de medição de espessura do cavaco – Espessura máxima (à esquerda) e mínima (à direita) - Corpos QSD	87

Figura 57 - Honing das ferramentas	88
Figura 58 - Classificação qualitativa – Teste do pano.....	89
Figura 59 - Comparação visual processos de polimento	90
Figura 60 - Comparação visual processos de polimento – 2 (à esquerda) e 6 (à direita)	90
Figura 61 - Rugosidade S_p dos seis processos investigados	91
Figura 62 - Rugosidade S_z dos seis processos investigados.....	92
Figura 63 - Rugosidade S_a dos seis processos investigados	92
Figura 64 – Análise MEV – 2.000x – Canal das ferramentas.....	94
Figura 65 - Análise MEV – 2.000x – Guia das ferramentas	95
Figura 66 – Área de <i>droplets</i> /Área total – Canal	96
Figura 67 - Área de <i>droplets</i> /Área total – Guia.....	96
Figura 68 - $\emptyset$ da ferramenta vs Ângulo η	98
Figura 69 - Força de avanço vs Tipo de processo de polimento	99
Figura 70 – Torque vs Tipo de processo de polimento.....	100
Figura 71 - Espessura do cavaco – Máxima – 940mm/min – Posição 2	101
Figura 72 - Espessura do cavaco – Mínima – 940 mm/min – Posição 2	101
Figura 73 - Raízes dos cavacos produzidos com os diferentes processos, velocidade de avanço de 940 mm/min - Posição 02.....	102
Figura 74 - Processo 03 – Posição 02 - 940 mm/min (à esquerda) e 500 mm/min (à direita)	103
Figura 75 - Amostras QSD produzidas pelo processo 4, observadas nas 4 posições de análise, para $v_f = 940$ mm/min.....	104
Figura 76 – Vida das brocas preparadas pelos diferentes processos de polimento	105
Figura 77 - Lascamento da ferramenta do processo 02 - 150 peças	105
Figura 78 - Vistas das superfícies de saída das brocas após a usinagem de 500 peças (ou 1000 furos).....	106
Figura 79 - Largura da cratera após a usinagem de 500 peças (1000 furos). ..	107
Figura 80 - Guia cilíndrica das brocas após usinagem de 500 peças (1000 furos).	108
Figura 81 - Área desgastada na guia cilíndrica após a usinagem de 500 peças (1000	108

Figura 82 - Vista no MEV da superfície de folga principal de uma das arestas da broca - Processo 7	109
Figura 83 – Vista da superfície de folga principal da ferramenta – Processo 3 - Antes do ataque (à esquerda) e depois do ataque (à direita) com ampliações de 200x (acima) e 1000x (abaixo)	110
Figura 84 – Vista geral (à esquerda) do topo da ferramenta após o ataque químico e detalhe do desgaste de flanco (à direita) – Processo 2	111
Figura 85 - Vista da superfície de folga da ferramenta do processo 3 após a usinagem de 600 peças (1200 furos), após ataque químico e resultado do EDS nos pontos indicados	112
Figura 86 – Mapa EDS na Superfície de folga principal da ferramenta do processo 3 após a usinagem de 600 peças (1200 furos), após ataque químico	113
Figura 87 - Desgaste na superfície de saída da broca, processo 2, ao final da vida (600 peças ou 1200 furos), após ataque químico	114
Figura 88 - Vista do desgaste da guia cilíndrica da ferramenta, processo 2 ao final da vida, após ataque químico	115
Figura 89 - Desgaste da guia cilíndrica das ferramentas processos 7 (à esquerda), 2 (ao centro) e 3 (à direita), ao final da vida, após o ataque químico	116
Figura 90 - Vistas dos desgastes na superfície de saída (em um dos canais helicoidais) das brocas dos processos 7 (à esquerda), 2 (ao centro) e 3 (à direita) ao final das vidas.....	116
Figura 91 - Vistas dos desgastes de flanco das brocas dos processos 7 (à esquerda), 2 (ao centro) e 3 (à direita), ao final das vidas	117
Figura 92 - Modelo de comportamento da temperatura na superfície externa da peça.....	118
Figura 93 - Temperaturas máximas medidas pelos termopares colados no final dos furos (a 30 mm da borda) com uso dos diferentes processos de polimento das brocas	120
Figura 94 - Temperaturas máximas medidas pelos termopares colados no início dos furos (a 5 mm da borda) com uso dos diferentes processos de polimento das brocas	121
Figura 95 - Diâmetros dos furos medidos a 5 mm da face da peça.....	122

Figura 96 - Diâmetro dos furos medidos a 40 mm da face da peça	122
Figura 97 - Desvios de circularidade dos furos medidos a 5 mm da face da peça	123
Figura 98 - Desvios de circularidade dos furos medidos a 40 mm da face da peça	124
Figura 99 - Desvio de posição dos furos verificados ao longo da vida das brocas	125
Figura 100 - Modelo de medição da camada martensítica e deformação plástica	126
Figura 101 - Espessura camada martensítica - Corte transversal	126
Figura 102 - Espessura camada martensítica - Corte longitudinal	127
Figura 103 - Espessura da camada deformada plasticamente - Corte transversal	127
Figura 104 - Rugosidade Ra dos furos usinados ao longo das vidas das brocas com os diferentes processos de preparação testados	128
Figura 105 - Rugosidade Rz dos furos usinados ao longo das vidas das brocas com os diferentes processos de preparação testados	129
Figura 106 - Rugosidade Ra do primeiro furo usinado com as brocas dos diferentes processos de polimento testados	129
Figura 107 - Rugosidade Rz do primeiro furo usinado com as brocas dos diferentes processos de polimento testados	130
Figura 108 - Vista da superfície no início do primeiro furo (à direita) e ao longo do furo (à esquerda)	131
Figura 109 - Rugosidade Sq dos seis processos investigados	142
Figura 110 - Rugosidade Sv dos seis processos investigados	142
Figura 111 - Rugosidade S10z dos seis processos investigados	143
Figura 112 - Rugosidade Ssk dos seis processos investigados	143
Figura 113 - Rugosidade Sku dos seis processos investigados	144
Figura 114 - Rugosidade Sdq dos seis processos investigados	144
Figura 115 - Rugosidade Sdr dos seis processos investigados	145
Figura 116 - Rugosidade FLTt dos seis processos investigados	145
Figura 117 - Rugosidade Sk dos seis processos investigados	146
Figura 118 - Rugosidade Spk dos seis processos investigados	146
Figura 119 - Rugosidade Svk dos seis processos investigados	147

Figura 120 - Rugosidade Smr1 dos seis processos investigados	147
Figura 121 - Rugosidade Smr2 dos seis processos investigados	148
Figura 122 - Rugosidade Vmp dos seis processos investigados	148
Figura 123 - Rugosidade Vmc dos seis processos investigados	149
Figura 124 - Rugosidade Vvc dos seis processos investigados	149
Figura 125 - Rugosidade Vvv dos seis processos investigados	150
Figura 126 – Relação Vvc/Vmc dos seis processos investigados	150
Figura 127 - Teste Anova - Temperatura termopar final do furo	151
Figura 128 - Teste Anova - Temperatura termopar final do furo – Desconsiderando processo 4	152
Figura 129 - Teste Anova - Temperatura termopar início do furo	153
Figura 130 - Teste Anova - Temperatura termopar início do furo – Desconsiderando processos 3, 6 e 7.....	154
Figura 131 - Teste Anova - Temperatura termopar início do furo - Desconsiderando processos 2, 4 e 5.....	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura das partes de uma broca.....	35
Tabela 2 - Relação diâmetro da broca e largura da guia – Dimensões em mm ..	35
Tabela 3 - Valores recomendados para ângulo de hélice	36
Tabela 4 - Tamanho de honing vs Vida	38
Tabela 5 - Fatores que influenciam os esforços.....	43
Tabela 6 – Valores orientativos das pressões específicas de corte (Kc)	45
Tabela 7 - Forças específicas de Kienzle	46
Tabela 8 - Parâmetros de rugosidade bidimensionais.....	58
Tabela 9 - Parâmetros de rugosidade tridimensionais	59
Tabela 10 - Composição Química Aço 4144M.....	62
Tabela 11 – Resultados EDS - Abrasivos HSC 1/300 - Casca de noz e óxido de silício	67
Tabela 12 - Resultados EDS – Abrasivo H 4/400 - Casca de noz	68
Tabela 13 - Resultados EDS – Pó M21 e Pó PP02.....	69
Tabela 14 - Resultados EDS – Abrasivo Massa azul	71
Tabela 15 - Processos de polimento.....	72
Tabela 16 - Itens de qualidade dos furos avaliados e frequência de medição ..	79
Tabela 17 - Espessuras dos cavacos produzidos pelo processo 3 e graus de recalques para as duas velocidades de avanço utilizadas.....	103
Tabela 18 - Resultados das análises de EDS para broca - Processo 7 (figura 82)	110
Tabela 19 - Resumo dos experimentos	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AlCrN	Nitreto de Cromo-Alumínio
CNC	Comando numérico computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
Dr.	Doutor (a)
DIN	<i>Deutsches institut fur normung</i>
ed.	Edição
Ed.	Editor
EDS	Espectroscopia de raio x por dispersão em energia
EUA	<i>United States of America</i>
f.	Folha
HSS	<i>High Speed Steel</i>
LAUS	Laboratório de Pesquisa em Usinagem (PUCPR)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQF	<i>Minimum quantity of fluid</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
p.	Página
PCD	<i>Polycrystalline Diamond</i>
PCBN	<i>Polycrystalline Cubic Boron Nitride</i>
PhD	<i>Doctor of Philosophy</i>
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
PVD	<i>Physical Vapor deposition</i>
QSD	<i>Quick Stop Device</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TiAlN	Nitreto de Titânio-Alumínio
TiSiN	Nitreto de Titânio-Silício
UF	<i>Ultra Fine</i>
UNIFEBE	Centro Universitário de Brusque
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
v.	Volume
WEDM	<i>Wire electrical discharge machining</i>

LISTA DE UNIDADES

bar	Unidade de pressão
HRC	Unidade de dureza Rockwell na escala C
HB	Unidade de dureza Brinell
Hz	Unidade de frequência Hertz
kg	Quilogramas
kW	Quilowatts
mm	Milímetro
mm / min	Milímetros por minuto
m	Metros
m/min	Metros por minuto
mm ²	Milímetro quadrado
min	Minuto
N	Newton
Nm	Newton metro
rot	Rotações
RPM	Rotações por minuto
s	Segundo
µm	Micrometro
°C	Graus Celsius
Wt%	<i>Weight percent</i>
%	Porcentagem

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de corte
b	Largura do cavaco
B	Largura de corte
D	Diâmetro da broca
d	Diâmetro do pré-furo
f	Avanço
F_c	Força de corte
F_p	Força passiva
F_z	Força de avanço
FLTt	Parâmetro de rugosidade tridimensional
G00	Avanço rápido
G01	Avanço programado
h	Espessura de corte
h'	Espessura do cavaco
H_2SO_4	Ácido Sulfúrico
k_a	Pressão específica de corte na direção normal a aresta
k_c	Pressão específica de corte
$k_{c1.1}$	Pressão específica de corte para um cavaco quadrado de 1 mm^2
KT	Desgaste de cratera
M_z	Momento torçor
n	Rotações por minuto
r_ϵ	Raio de cunha
Ra	Parâmetro de rugosidade 2D – Desvio aritmético médio
Rc	Parâmetro de rugosidade 2D – Altura média do perfil
Rdq	Parâmetro de rugosidade 2D – Inclinação média quadrática do perfil
Rku	Parâmetro de rugosidade 2D – Fator de achatamento da distribuição
Rp	Parâmetro de rugosidade 2D – Altura máxima do pico do perfil
Rq	Parâmetro de rugosidade 2D – Desvio médio quadrático
Rsk	Parâmetro de rugosidade 2D – Fator de assimetria da distribuição
Rv	Parâmetro de rugosidade 2D – Altura máxima do vale do perfil
Rz	Parâmetro de rugosidade 2D – Altura máxima do perfil

Rmr1	Parâmetro de rugosidade 3D – Fração da superfície de picos acima do material núcleo
Rmr2	Parâmetro de rugosidade 3D – Fração da superfície que irá carregar a carga
Sa	Parâmetro de rugosidade 3D – Altura média da área selecionada
Sdq	Parâmetro de rugosidade 3D – Gradiente médio da raiz
Sdr	Parâmetro de rugosidade 3D – Índice de área interfacial desenvolvido
Sk	Parâmetro de rugosidade 3D – Profundidade da rugosidade núcleo
Sku	Parâmetro de rugosidade 3D – Kurtosis da área selecionada
Sp	Parâmetro de rugosidade 3D – Altura máxima do pico da área selecionada
Spk	Parâmetro de rugosidade 3D – Altura de pico reduzida
Sq	Parâmetro de rugosidade 3D – Altura da raiz média quadrática da área selecionada
Ssk	Parâmetro de rugosidade 3D – Skewness da área selecionada
Sv	Parâmetro de rugosidade 3D – Profundidade máxima do vale da área selecionada
Svk	Parâmetro de rugosidade 3D – Altura do vale reduzida
Sz	Parâmetro de rugosidade 3D – Altura máxima da área selecionada
S10z	Parâmetro de rugosidade 3D – Altura de dez pontos da área selecionada
VB_C	Desgaste de corner
VB_{Max}	Máximo desgaste de flanco
VB_{mg}	Desgaste da guia cilíndrica
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade de avanço
Ve	Velocidade efetiva de corte
Vmc	Parâmetro de rugosidade 3D – Volume do material do núcleo da superfície
Vmp	Parâmetro de rugosidade 3D – Volume do pico de material da superfície

V_{vc}	Parâmetro de rugosidade 3D – Volume de vazio do núcleo da superfície
V_{vc}/V_{mc}	Parâmetro de rugosidade 3D – Relação entre parâmetros V_{vc} e V_{mc}
V_{vv}	Parâmetro de rugosidade 3D – Volume de vale vazio da superfície
WC	Carboneto de tungstênio
σ	Ângulo de ponta
ψ	Ângulo da aresta transversal
γ_o	Ângulo de saída
β	Ângulo de cunha
α	Ângulo de folga
ε	Ângulo de ponta
η	Ângulo da direção efetiva de corte
σ_r	Tensão de ruptura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	HISTÓRICO, DEFINIÇÕES E LEVANTAMENTO DO PROBLEMA	25
1.2	OBJETIVOS.....	30
1.2.1	Objetivo Geral	30
1.2.2	Objetivos Específicos	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	O PROCESSO DE FURAÇÃO	31
2.1.1	Grandezas de corte	31
2.1.2	Movimentos do processo.....	32
2.1.3	Furação de aços	32
2.2	FERRAMENTAS DE CORTE NA FURAÇÃO	33
2.2.1	Geometria das brocas	33
2.2.2	Materiais de ferramentas para brocas	39
2.2.3	Brocas revestidas.....	41
2.3	ESFORÇOS DE CORTE NA FURAÇÃO.....	43
2.3.1	Forças de avanço	43
2.3.2	Torque.....	47
2.3.3	Potência de furação.....	47
2.4	TEMPERATURA DE USINAGEM NA FURAÇÃO	47
2.4.1	Geração de calor em usinagem.....	48
2.4.2	Distribuição de temperatura na usinagem	49
2.4.3	Temperatura no processo de furação.....	50
2.5	FLUIDOS DE CORTE NO PROCESSO DE FURAÇÃO	51
2.5.1	Funções do fluido de corte	51
2.5.2	Classificação dos fluidos de corte.....	51
2.5.3	Métodos de aplicação.....	52
2.5.4	Fluidos no processo de furação.....	52
2.6	DESGASTE E VIDA DE BROCAS	53
2.6.1	Mecanismos de desgaste.....	53
2.6.2	Vida das brocas	54
2.6.3	Formas de desgaste das brocas	55
2.7	INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	55

2.7.1	Classificação da integridade superficial.....	56
2.7.2	Rugosidade	56
2.7.2.1	Fatores que influenciam a rugosidade	57
2.7.2.2	Rugosidade bidimensional.....	57
2.7.2.3	Rugosidade tridimensional.....	59
2.7.3	Alterações subsuperficiais	59
2.7.3.1	Alterações de natureza mecânica.....	59
2.7.3.2	Alterações de natureza metalúrgica	60
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	61
3.1	CORPOS DE PROVA.....	62
3.2	PREPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE	64
3.2.1	Processos de fabricação das brocas.....	64
3.2.1.1	Polimento das ferramentas de corte	66
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS	73
3.4	MÁQUINA FERRAMENTA	76
3.5	AVALIAÇÃO DAS FERRAMENTAS	77
3.6	CRITÉRIO DE FIM DE VIDA	79
3.7	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO FURO USINADO	79
3.8	AVALIAÇÃO DE OUTRAS VARIÁVEIS DO PROCESSO	81
3.8.1	Torque e Força de Avanço.....	81
3.8.2	Temperatura.....	82
3.8.3	Análise da Raiz do Cavaco	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS	88
4.1.1	Caracterização da superfície - Qualitativa.....	88
4.1.2	Caracterização da superfície - Rugosidade.....	91
4.1.3	Caracterização da superfície - MEV	94
4.2	AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM.....	97
4.2.1	Avaliação de Força de avanço.....	99
4.2.2	Avaliação de Torque.....	100
4.2.3	Avaliação da raiz do cavaco	101
4.2.4	Avaliação de Vida	105
4.2.5	Análise de desgaste – Microscópio óptico.....	106
4.2.6	Análise de desgaste – MEV / EDS	109

4.2.6.1.1	Comparação dos desgastes entre processos de polimento	115
4.2.7	Avaliação de temperatura	118
4.3	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS FUROS.....	121
4.3.1	Diâmetro	121
4.3.2	Desvio de Circularidade.....	123
4.3.3	Desvio de Posição	124
4.3.4	Análise Metalográfica.....	125
4.3.4.1	Avaliação da Microestrutura	125
4.3.5	Acabamento dos furos.....	128
4.3.5.1	Rugosidade.....	128
4.3.5.2	Análise Visual	130
4.4	RESUMO DOS EXPERIMENTOS.....	133
5	CONCLUSÃO.....	135
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	137
	REFERÊNCIAS.....	138
	APÊNDICE A – RESULTADOS DE RUGOSIDADE	142
	APÊNDICE B – RESULTADOS ESTATÍSTICOS.....	151

1 INTRODUÇÃO

Com o advento das novas tecnologias, o *know-how* de fabricação de peças do ramo metal mecânico não é mais privilégio somente de uma única empresa ou país. Devido a este fato, hoje o mercado se tornou muito mais competitivo do que há 20 anos atrás. Assim, a busca por novas tecnologias que proporcionam melhores desempenhos com menor custo é fundamental para qualquer organização que tem o objetivo de se manter no mercado.

É importante acompanhar o desenvolvimento tecnológico de ferramentas de corte, pois os problemas referentes às ferramentas afetam diretamente o produto e o sistema produtivo, e costumam ser os que mais geram custos e paradas improdutivas das máquinas operatrizes.

Os processos convencionais de usinagem são divididos em: processos com geometria definida e processos com geometria indefinida. Para o desenvolvimento dos processos que utilizam ferramentas com geometria definida é necessário conhecer quatro aspectos principais relativos a ele: o material base da ferramenta, os revestimentos aplicados, as características macro geométricas da ferramenta e a preparação da aresta de corte (RODRÍGUEZ, 2009).

O acabamento e a forma das superfícies de saída e folga da ferramenta possuem uma relação direta com seu desempenho. A texturização da superfície por meio de *micro dimples* pode ser um caminho para redução dos esforços de corte, como demonstraram os ensaios realizados em brocas na furação de titânio (NIKETH; SAMUEL, 2017), assim como polir a superfície de saída é um caminho efetivo para estender a vida da ferramenta, comprovado pelo trabalho de Yamaguchi et al. (2016), no torneamento de titânio. Portanto é importante estudar e compreender a influência do acabamento no desempenho de uma ferramenta para proporcionar o desenvolvimento de ferramentas que garantam maior vida e por consequência redução de custos do processo de fabricação.

1.1 HISTÓRICO, DEFINIÇÕES E LEVANTAMENTO DO PROBLEMA

As ferramentas de um modo geral desempenharam papel primordial ao longo do tempo para o desenvolvimento e manutenção das civilizações existentes.

No período pré-histórico o ser humano tinha a necessidade de uma ferramenta que possibilitasse a obtenção de comida e mantimentos. A influência das ferramentas foi tão significativa neste período que a classificação e marco histórico para mudança do período se deu através do desenvolvimento e otimização das mesmas: Idade da Pedra Lascada (Paleolítico - Machado de Pedra Lascada), Idade da Pedra Polida (Neolítico - Foice de osso), Idade dos Metais (Pontas de armas).

Os primeiros artefatos utilizados para confecção de furos são datados de 10.000 anos antes de cristo, onde pequenas varas eram utilizadas para, através do movimento intermitente da palma das mãos, obter furos em madeira. Entre aproximadamente 4.000 – 1.450 anos antes de cristo o homem começava a utilizar de um fio enrolado a uma haste, para produzir o movimento de rotação da “broca”, desenvolvendo assim o primeiro artefato utilizado para obtenção de furos (BOEIRA, 2010), conforme figura 1.

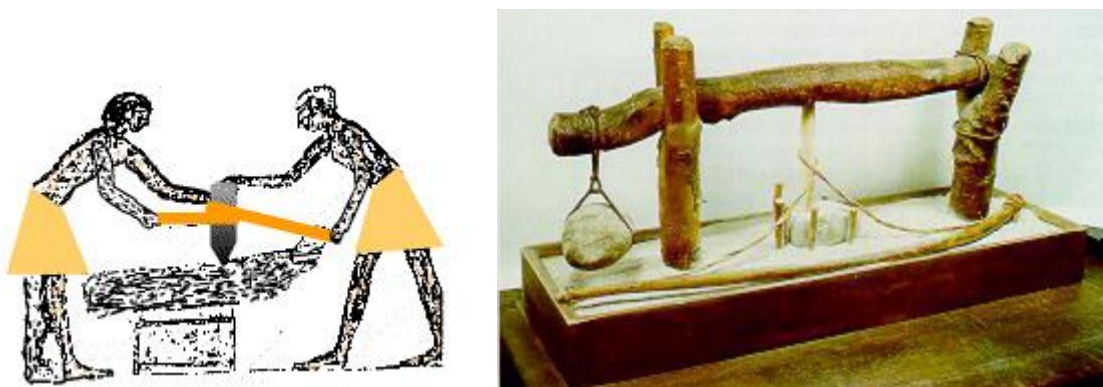


Figura 1 – Processo de furação pré-histórico no antigo Egito
Fonte: Adaptado (CIMM, 2019; TEIXEIRA, C.R. 1995)

No ano de 1820 têm-se o primeiro registro de utilização de uma broca helicoidal através de uma publicação no “Gills Technical Repository”. Em 1864, Morse fundou a primeira fábrica de brocas e de máquinas para execução de furos, a “Morse Twist Drill and Machine Company”, em New Bedford, Massachusetts, EUA. Em 1891, Robert Stock realizou na Alemanha os primeiros ensaios de furação, e em 1896 inicia a fabricação de brocas (BOEIRA, 2010).

A furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira. A grande maioria das peças de qualquer tipo de indústria, tem pelo menos um furo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000). Estima-se que cerca de 36% de toda a hora máquina é gasto realizando furos, contra 25% de torneamento e 26%

de fresamento, produzindo 60% de todo cavaco dos processos de usinagem (ASTAKHOV, 2014).

De acordo com a exigência de cada aplicação há diversos tipos de furação, alguns deles estão ilustrados na figura 2 (ASTAKHOV, 2014; KLOCKE, 2011).

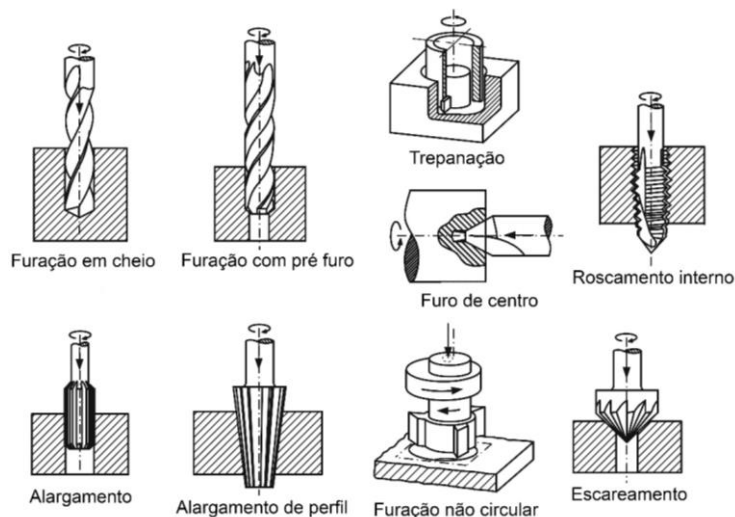


Figura 2 - Processos de furação
Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2011)

Na furação deve-se levar em conta uma série de fatores, como o diâmetro e a profundidade do furo, tolerâncias de formas e de medidas, volumes de produção, etc. (STEMMER, 1995). Tais fatores, aliados às condições impostas ao processo, tais como fixação da peça, máquina operatriz, fluido de corte etc., determinam qual tipo de broca é o mais indicado para a aplicação. Encontram-se disponíveis no mercado vários tipos de brocas, como chatas, helicoidais, escalonadas, com canais de refrigeração, com insertos intercambiáveis, canhão, de centros e de trepanação (STEMMER, 1995). Destas a mais utilizada é a broca helicoidal.

As brocas podem ser produzidas por diversos processos de fabricação, tais como conformação, fresamento, retificação e torneamento, sendo que o processo de retificação é o mais utilizado atualmente para as brocas de metal duro.

O metal duro normalmente vem em barras cilíndricas, com furos de refrigeração ou não, sendo retificados à medida que a barra gira e avança em direção ao rebolo para gerar os canais helicoidais, cuja geometria depende do perfil do rebolo abrasivo e do deslocamento/rotação do eixo da máquina, normalmente CNC. A figura 3 ilustra o processo.

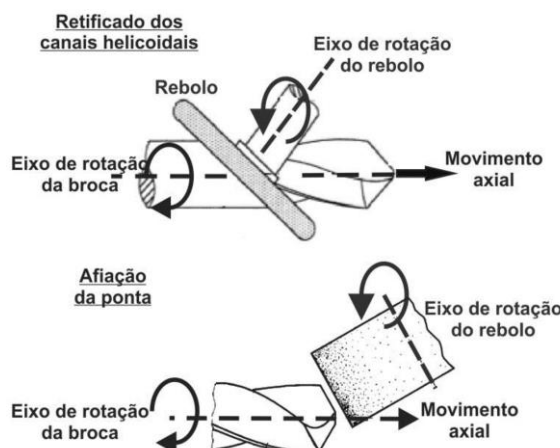


Figura 3 - Processo de fabricação de uma broca
Fonte: (MORENO, 2013)

A formação do cavaco é um processo periódico, ao qual é dividido em quatro etapas: recalque inicial, deformação, ruptura e saída de cavaco (MACHADO, 2015). Na interface cavaco-ferramenta existem duas regiões delimitadas pela forma de interação entre o par, a zona de aderência e a zona de escorregamento.

A zona de aderência se dá sob elevadas tensões de compressão do cavaco contra a ferramenta, com movimento do cavaco ocorrendo na zona de fluxo, região acima da ferramenta, no interior do cavaco. Em caso de ocorrência da APC, a zona de fluxo se posiciona acima desta. Nesta zona de fluxo, as taxas de deformação são elevadas, gerando grandes quantidades de calor, com elevação de temperatura. Assim, a zona de aderência exerce um papel significativo em usinagem e o seu tamanho tem um papel determinante na caracterização da usinabilidade de um material. A zona de escorregamento ocorre na adjacência da zona de aderência, na superfície de saída da ferramenta, onde as tensões de compressão do cavaco são menores, eliminando a condição de aderência e estabelecendo o contato apenas nas irregularidades das superfícies, valendo nesta condição as leis do atrito de Coulomb (carga tangencial proporcional à normal).

A zona de aderência só existe devido ao atrito entre as superfícies da ferramenta e cavaco, sendo significativamente influenciada pela qualidade da superfície de saída. Quando o grau de acabamento da superfície é melhorado, espera-se que as restrições impostas pela zona de fluxo sejam reduzidas, diminuindo os esforços e a temperatura de usinagem. Estudos realizados no torneamento de alumínio mostraram que realizar o processo de polimento em insertos de CVD reduz

as três componentes da força de usinagem, embora em proporções diferentes (ARUMUGAM; MALSHE; BATZER, 2006).

Há diversos processos possíveis para realizar o polimento da superfície de uma ferramenta, no entanto o mais utilizado ainda é o processo de polimento manual, que usa uma pasta abrasiva adicionada a um feltro de algodão.

Para o caso de implementar um processo manual de alto impacto em uma cadeia produtiva significa a dependência plena na habilidade e repetibilidade do operador, o que por vezes pode não sair como o esperado. Para atender esta necessidade houve-se a demanda de desenvolvimentos de novos processos automáticos que eliminaria possíveis falhas do operador.

O processo *Drag Finishing* (que será utilizado neste trabalho) é um processo que atende a necessidade de aumentar a repetibilidade, por ser automático, além de permitir que os polimentos sejam otimizados. O processo *Drag finishing* é industrialmente sustentável e muito promissor em diversos domínios da fabricação, onde a qualidade e o desempenho são requisitos rigorosos (BARLETTA et al., 2014). Trata-se basicamente de um processo de tamboreamento orbital, no qual as ferramentas rotacionam dentro de um tambor que contém abrasivos, sendo que estes exercem papel fundamental no processo, ou seja, para cada aplicação há um abrasivo mais indicado. Estudos mostram que após o tratamento *Drag finishing* utilizando o abrasivo H4/400 em uma ferramenta sem revestimento a superfície que apresentava defeitos de fabricação antes do processo foi normalizada após o processamento (ZEILMANN; OST; FONTANIVE, 2018).

Para o trabalho serão utilizados os abrasivos HSC 1/300 (carboneto de silício, casca de nozes e pó M21) e H 4/400 (cascas de nozes e pó PP02), ambos fabricados pela OTEC. Além do abrasivo, os parâmetros do processo *Drag Finishing* também são importantes, sendo eles o tempo total, as rotações escolhidas e o tempo para cada sentido de rotação. Os tempos totais escolhidos para os processos estudados foram de 1 minuto e 10 minutos para o abrasivo H 4/400 e de 5 minutos e 20 minutos para o abrasivo HSC 1/300. Os demais parâmetros utilizados serão apresentados no capítulo 3.2.1.

Para determinados tipos de processo, realizar o polimento é fundamental para o desempenho da ferramenta, pois empiricamente sabe-se que se não polir as ferramentas após o revestimento há uma probabilidade grande delas quebrarem no

início da vida. No entanto, a literatura é escassa com trabalhos abordando o tema e a real necessidade do procedimento adequado de preparação das brocas.

O aço SAE 4144M é aplicado normalmente para componentes automobilísticos, como por exemplo bombas de injeção e válvulas para injeção de combustível devido a exigência técnica e mecânica de tais aplicações. Conforme sua descrição ele possui 0,44% de teor de carbono em sua estrutura sendo um aço ligado ao Cromo / Molibdênio, o “M” significa que ele é modificado. No estudo em questão tal matéria prima é temperada e revenida, resultando em uma dureza média de 39 HRC.

Devido às propriedades mecânicas e aos tratamentos sofridos, o aço SAE 4144M apresenta baixa usinabilidade, sendo necessário estudos científicos para melhorar os processos e a qualidade das ferramentas utilizadas para usinagem dos componentes (CARDOSO, 2014; SANTANA, 2015).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência do processo de polimento no desempenho de brocas helicoidais de metal duro revestidas na usinagem de aço SAE 4144M.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a. Avaliar os esforços de usinagem e torque na furação
- b. Avaliar as raízes dos cavacos gerados por amostras de quick-stop (QSD)
- c. Avaliar a vida das brocas e seus desgastes
- d. Avaliar a temperatura da peça durante o processo de furação
- e. Avaliar a qualidade dos furos obtidos

Nos próximos capítulos serão apresentados a Revisão Bibliográfica (Capítulo 2), o Procedimento experimental (Capítulo 3), os Resultados com as discussões (Capítulo 4), as principais Conclusões do trabalho (Capítulo 5), as Sugestões para futuras investigações (Capítulo 6), seguido das Referências Bibliográficas e Apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O PROCESSO DE FURAÇÃO

2.1.1 Grandezas de corte

As grandezas de corte são aquelas possíveis de serem ajustadas direta ou indiretamente na máquina. São elas: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, largura de usinagem, espessura de usinagem e profundidade do furo.

- **Velocidade de corte (V_c):** É a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte (MACHADO, 2015).
- **Avanço (f):** É o percurso de avanço que a ferramenta desenvolve sobre a peça em cada volta, dado em mm/rotação. É limitado pela resistência estrutural da broca e pela capacidade da máquina ferramenta.
- **Profundidade de corte (a_p):** É a profundidade de penetração da aresta principal sobre a superfície da peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho. Em furação em cheio é o raio da ferramenta.
- **Largura de corte (b):** A largura de corte ou de usinagem na furação em cheio corresponde ao comprimento da aresta principal.
- **Espessura de corte (h):** A espessura de corte ou de usinagem é medida perpendicularmente a aresta, na direção de avanço e depende do avanço utilizado.
- **Profundidade do furo:** É a distância total que a broca irá penetrar sobre a peça. Esta variável normalmente determina qual será a broca mais indicada para o processo requerido.

2.1.2 Movimentos do processo

Os movimentos relacionados ao processo de furação são apresentados na figura 4.

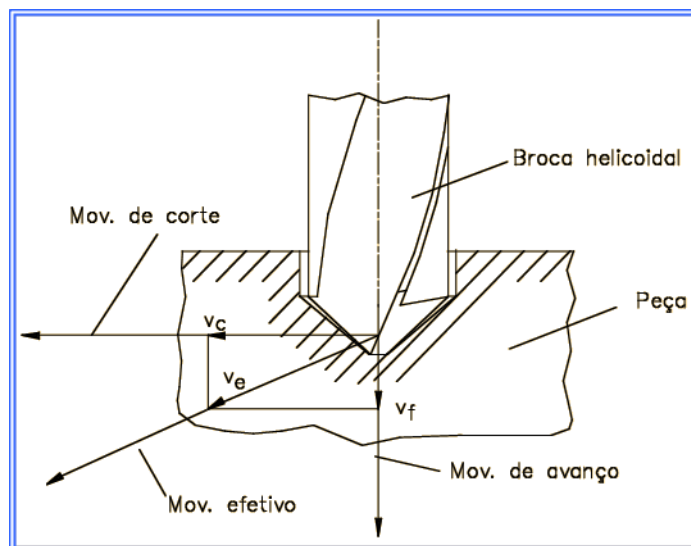


Figura 4 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação
Fonte: Machado et al. (2015)

O movimento de corte, realizado entre a peça e a aresta de corte, é dado pela rotação utilizada e depende da região da ferramenta analisada, sendo aquele que, sem o movimento de avanço, permite a retirada de apenas um cavaco (durante um giro da broca). O movimento de avanço é dado pelo avanço da ferramenta sobre a peça, permitindo a retirada contínua de cavaco. O movimento efetivo se dá pela resultante dos dois anteriores e o ângulo do movimento efetivo (η) é definido como sendo o ângulo entre as direções do movimento efetivo e do movimento de corte.

2.1.3 Furação de aços

A usinabilidade de um material compreende todas as propriedades que têm influência sobre o processo de usinagem.

A dureza e a resistência mecânica são fatores importantes para serem considerados quando se trata de usinabilidade, sendo que estas propriedades dependem dos elementos de liga adicionados ao material. Adição de elementos que aumentam estas propriedades dificultam a usinagem. Por outro lado, a usinabilidade pode ser melhorada pela adição de alguns elementos, como: chumbo, enxofre,

selênio, telúrio, bismuto, estanho, fósforo, cálcio, entre outros. São elementos que facilitam o processo de formação dos cavacos, e, portanto, a usinagem.

A usinabilidade depende das características do material e das condições e geometria da ferramenta de corte. Para mensurar a usinabilidade são utilizados alguns critérios, como (KÖNIG e KLOCKE, 1997):

- Vida da ferramenta
- Força de usinagem
- Qualidade superficial da peça
- Formação de cavaco.

2.2 FERRAMENTAS DE CORTE NA FURAÇÃO

2.2.1 Geometria das brocas

As brocas, assim como a maior parte das ferramentas de corte, possuem diversas geometrias possíveis de serem utilizadas, sendo que para obter o melhor desempenho, cada geometria de ferramenta deve ser escolhida de acordo com o material a ser usinado, bem como os parâmetros utilizados. Dependendo da usinabilidade do material ou desempenho requerido, faz-se necessário estudos detalhados para comparação de qual tipo de afiação é mais indicada para a aplicação (OLIVEIRA, 2008; PEREIRA, 2010).

Uma broca possui três partes principais que são a haste, o corpo e a ponta. A haste é a região da ferramenta que é utilizada para a fixação da broca na máquina ou até mesmo em um porta-ferramenta, podendo ser cônica ou cilíndrica. O corpo da broca é a parte onde é fabricada no momento da construção da ferramenta sendo responsável, por exemplo, pelo escoamento do cavaco e calibração do diâmetro da peça. A ponta da ferramenta é a região onde recebe a afiação de ponta e a escolha do seu “tipo” impacta diretamente no desempenho da ferramenta.

As figuras 05, 06 e a tabela 01 apresentam a nomenclatura das partes de uma broca helicoidal, que é o tipo de broca mais utilizado para a usinagem de furos.

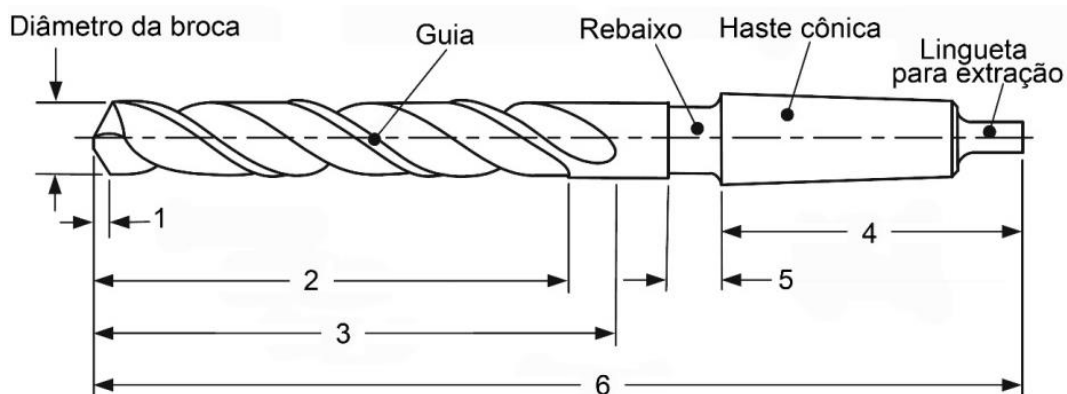


Figura 5 - Partes de uma broca
Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2011)

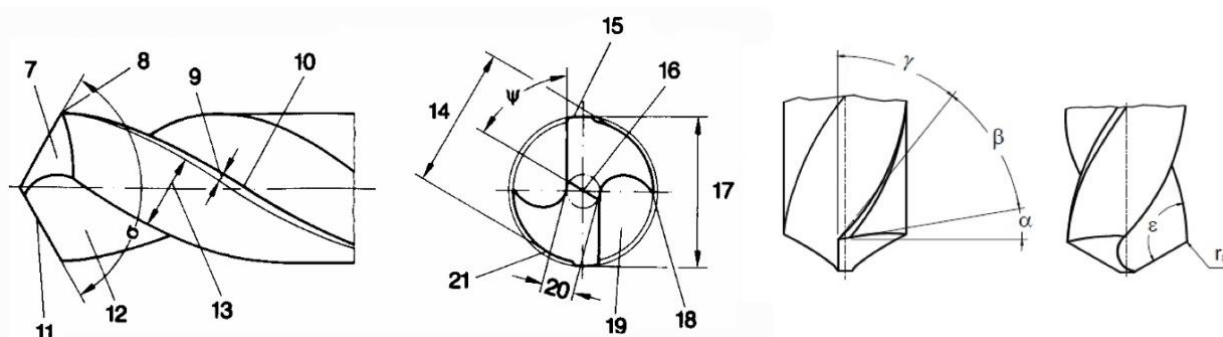


Figura 6 - Partes de uma broca
Fonte: Adaptado (ABNT NBR ISO 3002-1:2013; ABNT NBR ISO 5419:2009)

Nomenclatura NBR 6176		Termos usuais
σ	Ângulo de ponta da broca	-
Ψ	Ângulo da aresta transversal	-
γ	Ângulo de saída	Ângulo de hélice
β	Ângulo de cunha	-
α	Ângulo de folga	-
ϵ	Ângulo de ponta	Ângulo de quina
r_{ϵ}	Raio de quina	-
1	Comprimento da ponta	-
2	Comprimento utilizável	Comprimento de corte
3	Comprimento do canal	-
4	Comprimento da haste	-
5	Comprimento do rebaixo	Comprimento do pescoço
6	Comprimento total	-
7	Superfície principal de folga	Superfície detalonada
8	Ponta de corte	Largura do filete cilíndrico
9	Largura da guia	-
10	Aresta lateral	-

11	Aresta principal de corte	-
12	Superfície de saída	-
13	Largura da superfície lateral de folga	Largura do rebaixo
14	Comprimento da superfície lateral de folga	Diâmetro do rebaixo
15	Guia	Filete cilíndrico
16	Aresta transversal	Centro morto
17	Quina	-
18	Canal	-
19	Espessura k do núcleo	Alma na ponta
20	Superfície lateral de folga	Rebaixo

Tabela 1 - Nomenclatura das partes de uma broca

Fonte: Adaptado (ABNT NBR ISO 3002-1:2013; ABNT NBR ISO 5419:2009)

A espessura das guias é uma parte da broca que tem influência direta na geração de calor entre a ferramenta e a parede do furo. Devido a necessidade de reduzir tal geração de calor é realizado uma pequena conicidade de 0,02 mm a 0,08 mm por 100 mm de comprimento em direção a haste e tais espessuras são normalmente controladas de acordo com a tabela 2.

d= diâmetro da broca	2,5	5	10	20	30	40	50	60	80	100
b' α1 = larg. da guia	0,4	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	2,9	3,3	4,1	4,8

Tabela 2 - Relação diâmetro da broca e largura da guia – Dimensões em mm

Fonte: Adaptado (STEMMER, 1995)

A classificação de uma broca quanto ao corpo está sendo apresentada na figura 7 e na tabela 3. O ângulo de hélice tem a função de criar o espaço necessário para a expulsão e escoamento do cavaco, para materiais de maior dureza utiliza-se ângulo de hélice menores, já para materiais com dureza menor utiliza-se ângulo de hélice maiores. Além de tais funções, o ângulo de hélice exerce também influência sobre a rigidez torcional da ferramenta (NARASIMHA et al., 1987).

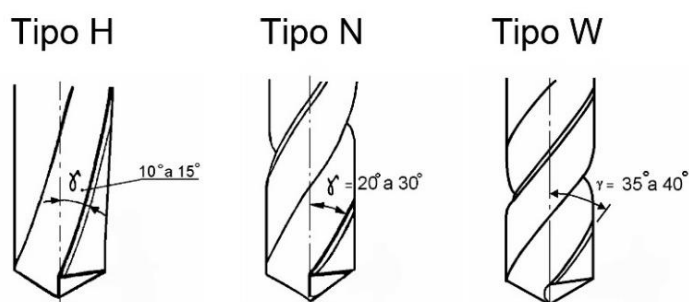


Figura 7 - Classificação broca conforme ângulo de hélice

Fonte: Adaptado (STEMMER, 1995)

Faixa de diâmetros d(mm)	Valores recomendados do ângulo de hélice		
	H	N	W
Até 0,5	-	$16^{\circ} \pm 3^{\circ}$	-
0,6 a 1,0	-	$18^{\circ} \pm 3^{\circ}$	-
1,0 a 3,2	$10^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$20^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$35^{\circ} \pm 3^{\circ}$
3,2 a 5,0	$12^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$22^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$35^{\circ} \pm 5^{\circ}$
5,0 a 10	$13^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$25^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$40^{\circ} \pm 5^{\circ}$
> que 10	$13^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$30^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$40^{\circ} \pm 5^{\circ}$

Tabela 3 - Valores recomendados para ângulo de hélice

Fonte: Adaptado (STEMMER, 1995)

Uma broca também pode ser classificada de acordo com o tipo de afiação de ponta, dependendo do material a ser usinado e dos parâmetros utilizados cada tipo de afiação de ponta é o mais indicado para o melhor desempenho da ferramenta. A figura 8 apresenta alguns tipos de afiações de ponta que foram desenvolvidos ao longo do tempo.

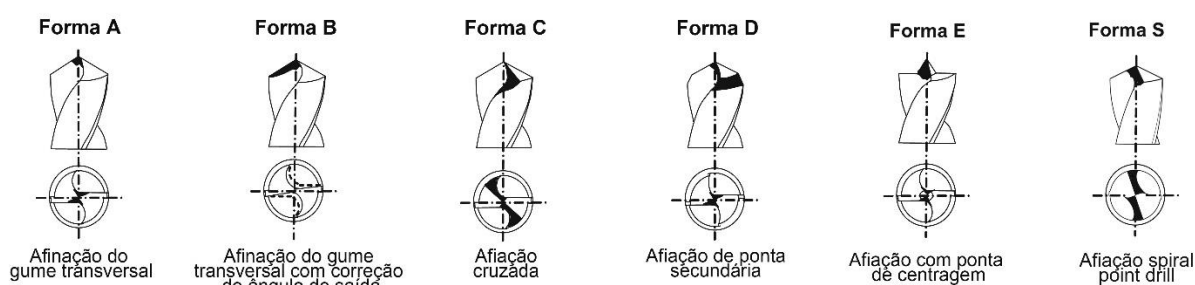


Figura 8 - Tipos de afiação da ponta

Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2011; DIN1412; O autor, 2019)

O objetivo de realizar a afinação da aresta transversal (Tipo A) é de reduzir os esforços de corte no eixo axial à ferramenta devido a aresta transversal ser responsável por 30 a 65 % deste esforço, outra necessidade de utilizar-se o tipo A é devido aos fabricantes de brocas normalmente aumentarem o diâmetro do núcleo das ferramentas em direção a haste com intuito de melhorar a rigidez da ferramenta à torção, e caso não utilize-se a afinação da aresta transversal a cada reafiação da ferramenta o esforço axial terá seu valor aumentado. Outra forma de reduzir os esforços de corte é realizando uma correção do ângulo de saída com afinação da aresta transversal (Tipo B), neste tipo de afiação de ponta é afiada uma face corrigindo o ângulo de saída da broca e simultaneamente afinando a aresta principal. A afiação cruzada (Tipo C) proporciona a operação uma redução drástica na força de avanço e uma melhor centralização da broca, normalmente utilizada para furação profunda

(STEMMER, 2005), uma face inclinada nas superfícies de incidências, eliminando parcial ou totalmente a aresta transversal. A afiação de ponta secundária (Tipo D) é realizada com o objetivo de proteger a quina da ferramenta, tendo em vista de que esta região possui a maior velocidade de corte da ferramenta, é realizada afiando-se uma segunda ponta normalmente com o ângulo entre 80° e 90°. Para uma melhor centragem do furo, normalmente eliminando brocas de centro, é utilizada a afiação com ponta de centragem (Tipo E), é realizada afiando uma ponta de centragem com ângulo de ponta normalmente de 150° a 180°. Com intuito de reduzir esforços por um lado e ao mesmo tempo quebrar o cavaco em materiais de difícil usinabilidade é utilizada afiação do tipo espiral ou “*spiral point drill*” (Tipo S), ela é obtida pela afiação da aresta transversal em forma de S.

A construção e afiação de uma ferramenta de corte pode ser dividida em macrogeometria que compreende seus ângulos e tipo de afiação de ponta e a microgeometria que compreende a preparação de aresta e o acabamento superficial da ferramenta. A microgeometria tem sido objeto de estudo durante os últimos anos pois exerce grande influência no desempenho da ferramenta, assim como já sabido sob a macrogeometria.

A aresta de corte de uma ferramenta pode ser preparada de 3 formas diferentes, deixá-la somente afiada (aresta extremamente “positiva”), realizar uma fase negativa (chanfro) ou realizar o *honing* (arredondamento da aresta), conforme figura 9. Moises (2015) comparou os três tipos de preparação de aresta para furação do aço 4144 M, no qual as ferramentas com preparação do tipo *honing* apresentaram o dobro de vida quando comparado com as chanfradas e cinco vezes a vida quando comparadas com a somente afiada. O uso de um chanfro ao invés de um arredondamento afeta a formação de cavaco e comparado a uma aresta arredondada a temperatura na zona de formação de cavaco aumenta (KOEHLER, 2008).

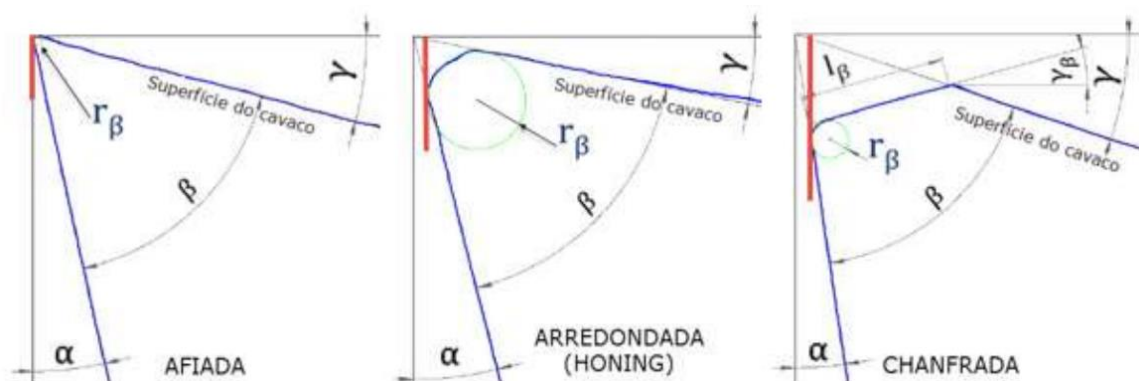


Figura 9 - Microgeometrias aplicadas a aresta de corte
Fonte: (SANTANA, 2015)

Somente realizar a preparação de aresta de corte do tipo *honing* não garante uma otimização do desempenho da ferramenta, pois o tamanho do arredondamento de aresta influencia diretamente no desgaste e na vida da ferramenta, conforme apresentado na tabela 4 e por Caitano (2016).

Tamanho de arredondamento (μm)	Vida (peças)	Vida (furos)	Vida (metros)
7 (Somente afiada)	25	50	2,4
10	50	100	4,8
20	100	200	9,6
30	585	1170	56,2
40	698	1396	67,0

Tabela 4 - Tamanho de honing vs Vida
Fonte: Adaptado (CAITANO, 2016)

No entanto, o tamanho do arredondamento de aresta é proporcional ao esforço de corte e à temperatura da usinagem, conforme sugere a figura 10, que apresenta as superfícies de folga de várias ferramentas, com diferentes áreas oxidadas, que são diretamente proporcionais ao tamanho do honing. Esta relação pode ser um fator limitante para a escolha do tamanho do arredondamento, dependendo dos requisitos técnicos da peça e/ou capacidade de fornecer potência pela máquina operatriz.

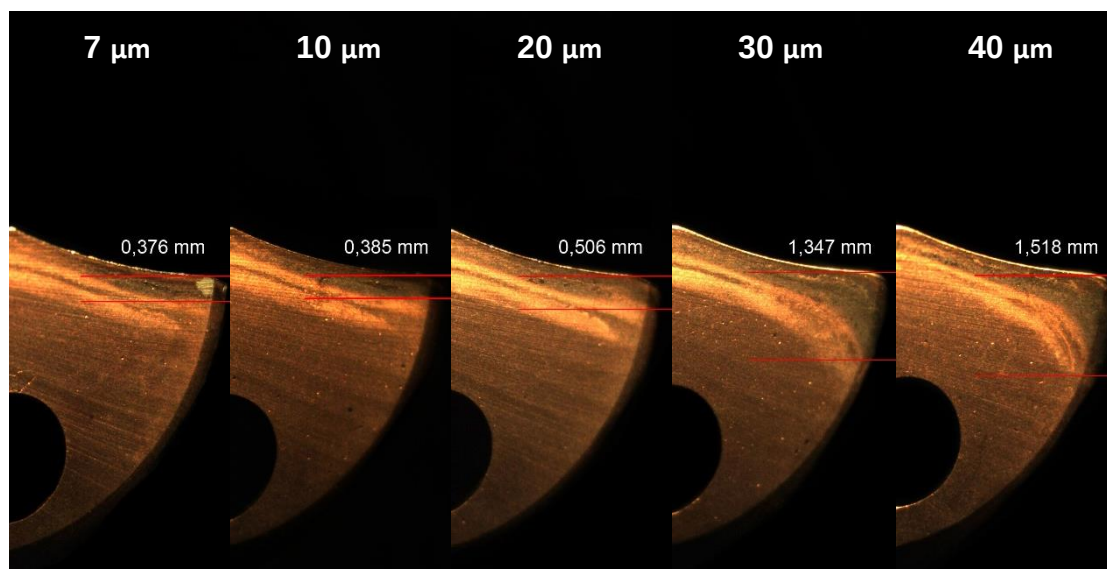


Figura 10 - Oxidação do revestimento - Usinagem de 25 peças
Fonte: Adaptado (CAITANO, 2016)

2.2.2 Materiais de ferramentas para brocas

A seleção de uma ferramenta de corte é um fator importante para ser considerado para o sucesso da operação de furação. O conhecimento básico de cada material de ferramenta e sua performance é de grande importância para a seleção correta para cada aplicação que possa ser feita (ASTAKHOV, 2014).

Os materiais para ferramenta de corte devem conter as seguintes propriedades (KLOCKE, 2011):

- Dureza e resistência à compressão
- Resistência à flexão
- Força de ligação interna
- Resistência à altas temperaturas
- Resistência à oxidação
- Resistência à adesão e difusão

Em operações modernas de furação, três tipos de material para ferramenta são usados: HSS, Metal duro e Diamante, incluindo os PCDs. Em alguns casos especiais, como na furação pesada (grandes diâmetros e grandes avanços), pode ser utilizado o nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN). Um dos fatores que determinam a escolha correta do material da ferramenta é a quantidade de calor que o cisalhamento do material irá gerar, por consequência a temperatura que será desenvolvida no par

ferramenta-peça, pois cada material de ferramenta tem um comportamento diferente para cada temperatura de interface, conforme mostra a figura 11.

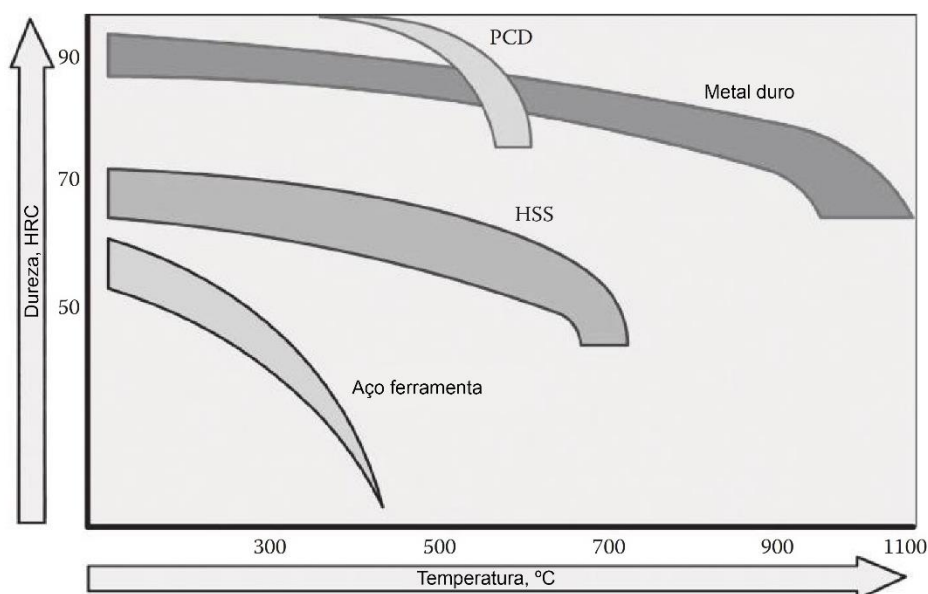


Figura 11 - Dureza em função da temperatura dos materiais de ferramenta
Fonte: Adaptado (ASTAKHOV, 2014)

Outro fator que deve ser levado em consideração é a relação de dureza e tenacidade dos materiais para ferramenta, conforme mostra a figura 12. Esta relação é impactante para a exigência da operação a ser realizada.

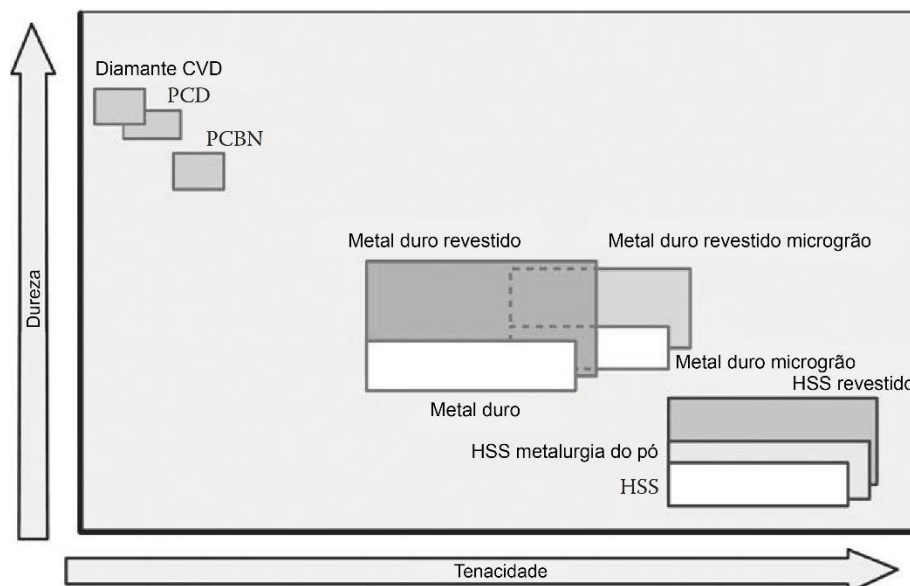


Figura 12 - Dureza e tenacidade de materiais para broca
Fonte: Adaptado (ASTAKHOV, 2014)

2.2.3 Brocas revestidas

A função principal de um revestimento é inibir o contato entre o material da peça e o substrato, reduzindo o desgaste causado pela adesão, abrasão, difusão e fenômeno oxidativo, normalmente com dureza superior ao do substrato da ferramenta (KLOCKE, 2011).

Enquanto os revestimentos melhoram a resistência ao desgaste, reduz adesão entre a ferramenta e o material usinado, reduz os esforços e geração de calor e atuam como uma barreira difusiva, a função do substrato é atuar como um suporte para o revestimento e promover ao corpo composto (substrato mais revestimento) uma dureza a quente suficiente e em particular, a tenacidade, que tem maior importância em aplicações com corte interrompido. No processo de furação o revestimento da broca se deve à necessidade de a ferramenta conter um corpo que apresente uma boa tenacidade e uma boa resistência ao desgaste na superfície. Utilizando-se uma broca de HSS revestida, pode-se alcançar um aumento de vida de quase 7 vezes em comparação à não revestida, dependendo do revestimento utilizado (HARRIS et al., 2003).

As ferramentas podem ser revestidas por dois processos, o CVD (*chemical vapor deposition*) e o PVD (*physical vapor deposition*). O processo CVD constitui-se basicamente da aplicação de revestimento por meio de reações químicas de vapores em atmosfera controlada numa faixa de temperatura entre 850-1050 °C. O processo PVD é obtido através da deposição feita por meio de vapores gerados no interior de fornos a baixa pressão e baixas temperaturas (450-600 °C). A baixa pressão permite os materiais que participarão da formação dos revestimentos passarem para o estado gasoso diretamente, sem passar pelo estado líquido. A baixa temperatura permite os revestimentos em ferramentas de aço rápido (HSS).

Dependendo do tipo de aplicação que a ferramenta será submetida, tem-se a escolha ideal de qual revestimento e do processo de deposição do revestimento sobre a ferramenta. De acordo com o processo, tem-se várias disposições de revestimentos sobre a ferramenta, conforme figura 13.

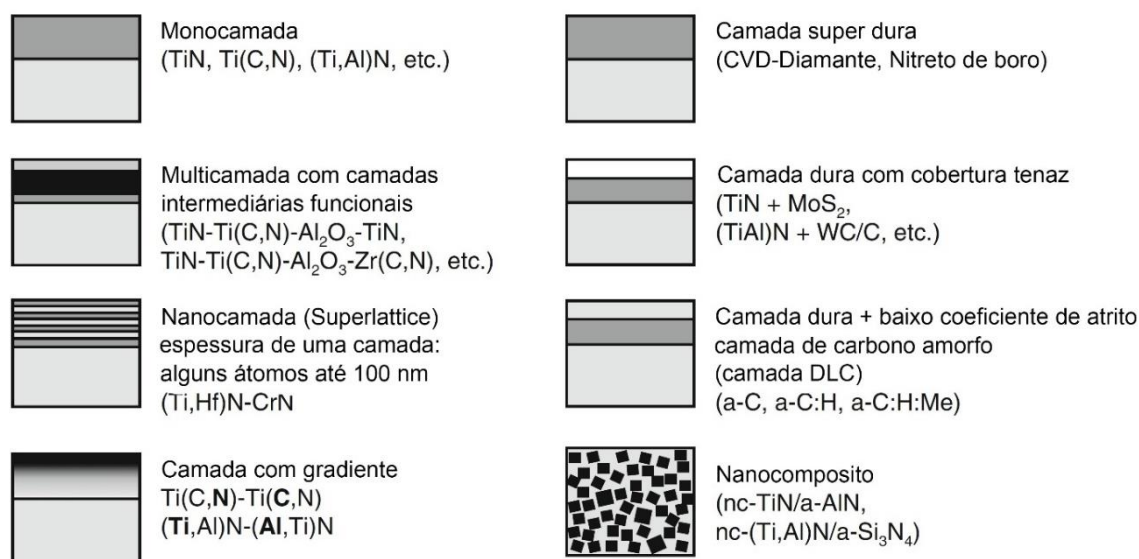


Figura 13 - Diagrama esquemático da estrutura do revestimento
Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2011)

Ao analisar a formação de uma trinca teórica sobre o revestimento, pode-se resultar nas seguintes afirmações. A trinca pode ser retardada por uma elevada tensão residual de compressão, pela estrutura cristalina do revestimento (quando assim o for) ou pelas várias camadas do revestimento. No entanto, a tenacidade de um revestimento é tão importante quanto sua dureza, deste modo deve existir um equilíbrio entre a alta tensão residual de compressão (que resultaria em uma menor adesão no substrato) e a baixa tensão residual de compressão (que resultaria em um retardo na propagação da trinca), conforme figura 14 (KLOCKE, 2011).

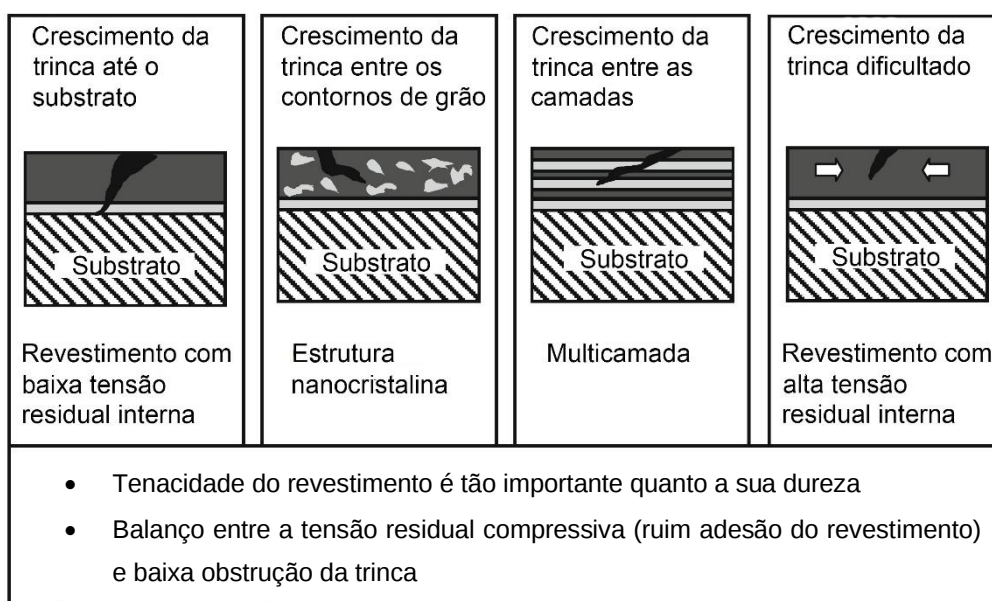


Figura 14 – Crescimento de uma trinca em diversos tipos de revestimento
Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2011)

Nos últimos anos o revestimento TiAlN foi muito aplicado em substituição ao TiN, no entanto após a criação do AlCrN (Hélica) estudos acadêmicos foram necessários para definir qual revestimento apresentava o melhor desempenho. Atualmente, os revestimentos a base de AlCrN substituem os revestimentos a base de nitreto de titânio para muitas aplicações de usinagem, devido à superior dureza a quente e resistência a oxidação (ENDRINO et al., 2007) e menor coeficiente de atrito (MO et al., 2007) do revestimento a base de Cr. Em termos de rugosidade, Viana (2009) apresentou uma comparação de parâmetros de amplitude antes e depois das ferramentas revestidas, em que após a deposição PVD dos revestimentos Hélica (AlCrN) e Futura (TiAlN) os valores de S_q , S_a , S_z e S_t sofreram incremento para ambos os revestimentos.

2.3 ESFORÇOS DE CORTE NA FURAÇÃO

As forças de avanço e o momento torçor resultantes do processo de furação com brocas dependem de 3 fatores (STEMMER, 1995):

- A resistência imposta pelo material da peça nas duas arestas principais
- O corte e esmagamento do material pela aresta transversal
- Atrito das guias da broca e dos cavacos nas paredes do furo, atrito do cavaco nos canais da broca e atrito dos flancos

Diversos ensaios quantificam a participação destes três fatores, conforme tabela 5.

Fatores	Força de Avanço	Momento Torçor
Gumes principais	40 a 50 %	70 a 90%
Gume transversal	45 a 58 %	3 a 10%
Atritos	2 a 5%	5 a 20%

Tabela 5 - Fatores que influenciam os esforços
Fonte: (STEMMER, 1995)

2.3.1 Forças de avanço

Os esforços de usinagem que atuam sobre as arestas de uma broca helicoidal podem ser divididos em 4 componentes: força de corte F_c , força de avanço F_z força passiva F_p e momento torçor M_z , conforme figura 15. A força de corte F_c é decorrente

da resistência ao corte do material usinado, e é a responsável pelo momento torçor gerado no processo (ASTAKHOV, 2014; KLOCKE, 2011; STEMMER, 1995).

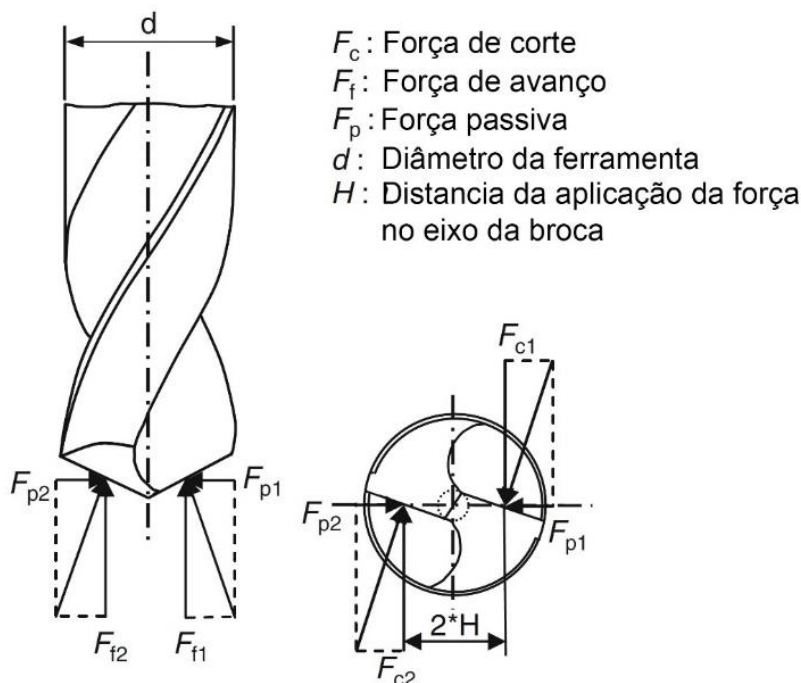


Figura 15 - Forças de corte na furação
 Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2011)

Para Stemmer, a seguinte equação rege a força de corte em uma furação em cheio:

$$F_c = k_c * \frac{f * D}{2 * 2} = k_c * \frac{f * D}{4} [N] \quad (1)$$

Para furação com pré-furo a equação 2 é utilizada:

$$F_c = k_c * \frac{f}{2} * \frac{D - d}{2} [N] \quad (2)$$

Onde,

D = diâmetro da broca em [mm]

d = diâmetro do furo prévio [mm]

f = avanço [mm/rot]

k_c = pressão específica de corte [N/mm^2]

O valor de k_c é retirado de tabelas ou obtido por meio de ensaios em que é medido diretamente o torque aplicado na broca, conforme tabela 6. Este valor depende do diâmetro da broca, avanço e material da peça. É também influenciado pelo ângulo da ponta, fluido de corte, ângulo de hélice e estado de afiação.

MATERIAIS	σ_r [N/mm ²] (ou dureza)	k_c [N/mm ²] Avanço em [mm/rot]			
		0,1	0,2	0,4	0,8
1.ST3411,St3711,St4211(ABNT1015a1025)	até 500	3600	2600	1900	1360
2.ST5011 (ABNT 1030 a 1035)	500 a 600	4000	2900	2100	1520
3.STR6011 (ABNT 1040 a 1045)	600 a 700	4200	3000	2200	1560
4.ST7011 (ABNT 1060)	700 a 850	4400	3150	2300	1640
5.ST85 (ABNT1095)	850 a 1000	4600	3300	2400	1720
6.	300 a 350	3200	2300	1700	1240
7.Aço Fundido	500 a 700	3600	2600	1900	1360
8.	> 700	3900	2850	2050	1500
9.	700 a 850	4700	3400	2450	1760
10.AçoMn, aços Cr-Ni, aços Cr-Mo e	850 a 1000	5000	3600	2600	1850
11. outros aços ligados	1000 a 1400	5300	3800	2750	2000
12.	1400 a 1800	5700	4100	3000	2150
13.Aço inoxidável	600 a 700	5200	3750	2700	1920
14.Aço ferramenta	1500 a 1800	5700	4100	300	2150
15.Aço manganês-duro	-	6600	4800	2500	2520
16.Ferro fundido GG12, GG14	HB até 200	1900	1360	1000	720
17.Ferro fundido GG18, GG26	HB200 a 250	2900	2080	1500	1080
18.Ferro fundido ligado	HB250 a 400	3200	2300	1700	1200
19.Ferro fundido maleável		2400	1750	1250	920
20.Ferro fundido duro	Shore 65/90	3600	2600	1900	1360
21.Cobre		2100	1520	1100	800
22.Cobre com mica (coletores)		1900	1360	1000	720
23.Latão	HB 80 / 120	1600	1150	850	600
24.Bronze vermelho (10Sn, 4Zn, 86Cu)		1400	1000	700	520
25.Bronze de fundição		3400	2450	1800	1280
26.Ligas de zinco		940	700	560	430
27.Alumínio puro		1050	760	550	400
28.Ligas de Al, c/alto teor de Si (11-13%)		1400	1000	700	520
29.Ligas p/ Al-Si (11-13,5% Si) (tenaz)		1400	1000	700	520
30. pistão G Al-Si (11-13,5% Si)		1250	900	650	480
31.Outras ligas de alumínio	até 300	1150	840	600	430
32. para fundição e	300 a 420	1400	1000	700	520
33. trabalho a frio	420 a 580	1700	1220	850	640
34.Ligas de magnésio		580	420	300	220
35.Borracha dura, ebonite		480	350	250	180
36.Baquelite, Pertinax, Novotext (massas isolantes presnadas, isentas de borracha)		480	350	250	180
37. Papel duro		380	280	200	140

Tabela 6 – Valores orientativos das pressões específicas de corte (Kc)

Fonte: Adaptado (STEMMER, 1993)

Quando se considera a variação do ângulo de ponta σ , a força de avanço pode ser expressa através da equação 3.

$$F_c = f_{a1} + f_{a2} = k_a * \frac{f * D}{2} * \frac{\sin \sigma}{2} [N] \quad (3)$$

Onde,

k_a = pressão específica de corte na direção normal a aresta [N/mm²]

Em brocas pode-se utilizar como aproximação $k_a = k_c$.

As equações 1, 2 e 3 se baseiam em um k_c constante, não variando de acordo com a espessura do cavaco. Kienzle, entretanto, apresenta uma formulação que leva em consideração tais fatores, tornando uma equação mais precisa para a resolução do problema.

$$F_c = k_{c1.1} * b * h^{1-m_c} [N] \quad (4)$$

Onde,

$k_{c1.1}$ = Pressão específica de corte para um cavaco quadrado de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ *
[N/mm²]

$$b = \frac{D}{2 * \sin \sigma/2} = \frac{a_p}{\sin \kappa} = \text{largura do cavaco} \quad (5)$$

$$h = \frac{f}{2} * \sin \sigma/2 = f * \sin \kappa = \text{espessura do cavaco} \quad (6)$$

A equação 7 expressa os valores de força para furação em cheio,

$$F_c = k_{c1.1} * \frac{D}{2 * \sin \sigma/2} * \left(\frac{b}{2 * \sin \sigma/2} \right)^{1-m_c} [N] \quad (7)$$

A equação 8 expressa os valores para furação com furo prévio,

$$F_c = k_{c1.1} * \frac{D - d}{2 * \sin \sigma/2} * \left(\frac{b}{2 * \sin \sigma/2} \right)^{1-m_c} [N] \quad (8)$$

Os valores de $k_{c1.1}$ podem ser obtidos na tabela 7.

MATERIAL (DIN)	ABNT equivalente	σ_r [N/mm ²]	$k_{c1.1}$ [N/mm ²]	1 - m _c
St 50	1030/1035	520	1990	0,74
St 60	1040/1045	620	2110	0,83
C 22	1020	500	1800	0,83
Ck 45	1045	670	2220	0,86
Ck 60	1060	770	2130	0,82
16 Mn Cr 5		532	2000	0,84
15 Cr Mo 5		590	2290	0,83
18 Cr Ni 6		630	2260	0,7
34 Cr Mo 4		800	2240	0,79
42 Cr Mo 4		1070	2320	0,84
50 Cr V 4		600	2220	0,74
55 Ni Cr Mo V6				
- recozido		940	1740	0,76
- beneficiado		730	1920	0,76
65 Si 7	9260	960	1270	0,73
100 Cr 6	52100	640	1600	0,71
100 Cr 6 recozido	52100	710	2400	0,79
105 W Cr 6		744	200	0,71
GG L 14	FoFo cinzento com		950	0,79
GGL 18	grafite lamelar	124	750	0,87
GG 26	FoFo cinzeto	HB200	1160	0,74
Meehanite A		360	1270	0,74
Meehanite E		220	1320	0,74
Meehanite M			1320	0,74
GTW, GTS	Maleável branco/preto	> 400	1200	0,79
GS 45	Aço fundido	300...400	1600	0,83
GS 52	Aço fundido	500...700	1800	0,84
G-Al Si 10 Mg a		250	400	0,73
G-Al Si 6 Cu 4		170	460	0,73
G-Al Mg 5		160	450	0,84
GK-Mg Al 9 Zn 1		130	240	0,66

Tabela 7 - Forças específicas de Kienzle

Fonte: Adaptado (STEMMER, 1993)

2.3.2 Torque

Para Stemmer (1993), a equação 9 rege o fenômeno torque em uma furação em cheio.

$$M_t = \frac{f_c * D}{2000} = k_c * \frac{f * D^2}{8000} [N/m] \quad (9)$$

A equação 10 expressa os valores de momento para furação com furo prévio.

$$M_t = \frac{f_c * (D + d)}{2000} = k_c * \frac{f * (D^2 - d^2)}{8000} [N/m] \quad (10)$$

2.3.3 Potência de furação

Segundo Stemmer (1993), a equação 11 governa a potência de corte, tanto para furação em cheio quanto pela furação com pré furo.

$$P_c = \frac{M_t * 2 * \pi * n}{60.000} = \frac{M_t * n}{9.549} [kW] = \frac{M_t * n}{7.025} [CV] \quad (11)$$

A potência de acionamento do motor é dada pela equação 12.

$$P_a = \frac{P_c}{\eta} \quad (12)$$

Onde,

n = rotações por minuto

η = rendimento da furadeira, usualmente entre 0,75 e 0,9

2.4 TEMPERATURA DE USINAGEM NA FURAÇÃO

A temperatura é uma variável fundamental no processo de usinagem, tendo em vista que tem influência direta no desgaste da ferramenta ou na precisão dimensional da peça usinada. A energia consumida em usinagem é largamente convertida em calor próximo a aresta de corte da ferramenta, e muitos problemas econômicos e técnicos são causados direta ou indiretamente pela ação da temperatura (TRENT; WRIGHT, 2000). Entender este processo é de grande importância para se fazer a escolha correta da ferramenta ou até mesmo das condições de corte ideais para serem aplicadas.

2.4.1 Geração de calor em usinagem

O processo de usinagem envolve cisalhamento contínuo do material da peça, em diferentes regiões da raiz de cavaco. As principais fontes de calor no processo da formação do cavaco estão descritas abaixo (FERRARESI, 1977), conforme figura 16:

- a) Deformação plástica do cavaco na região de cisalhamento primário (A)
- b) Atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta (B,C)
- c) Atrito da peça com a superfície de incidência da ferramenta (D)

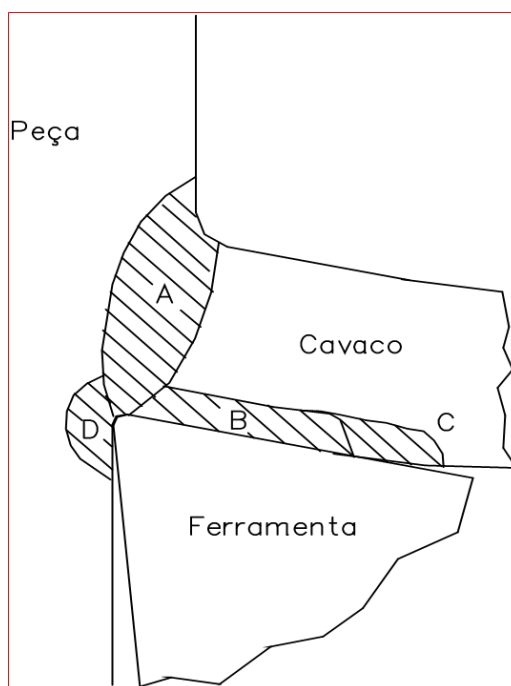


Figura 16 - Zonas de cisalhamento no processo de usinagem
Fonte: (MACHADO et al., 2015)

O plano de cisalhamento primário (A) é tratado como uma fonte de calor no processo, devido à movimentação planar do material que gera um atrito interno entre os átomos. Materiais de alta dureza são beneficiados por esse calor gerado, pois têm a sua dureza reduzida, devido a temperatura do processo (MACHADO et al., 2015)

O plano de cisalhamento secundário (B e C) compreende a zona de contato entre o cavaco e a ferramenta, dividida em uma região de aderência (B) e outra de escorregamento (C). Tal plano torna-se uma fonte de calor importante, pois está em contato direto com a ferramenta e ocorre devido ao atrito entre cavaco x ferramenta e internamente ao cavaco. Devido ao cavaco ser submetido a elevados valores de tensão contra a ferramenta de corte, na região B da figura 16 não há movimento na interface cavaco-ferramenta, sendo que o movimento corre internamente, por

cisalhamento do cavaco, em uma região denominada de zona de fluxo. Deste modo esta zona gera calor devido ao atrito interno dos átomos.

Por último e não menos importante tem-se a zona terciária de deformação (D) que se dá pelo retorno elástico da peça que provoca um atrito entre a peça e a face de folga da ferramenta de corte, gerando calor na interface peça-ferramenta de corte.

Verifica-se experimentalmente que cerca de 90% ou mais de todo trabalho de usinagem se transforma em calor. Portanto, a quantidade de calor, em quilocalorias por unidade de tempo, é aproximadamente equivalente ao trabalho de usinagem. Pode-se determinar, com aproximação, a quantidade de calor produzida na usinagem através da equação 13. (FERRARESI, 1977)

$$Q = \frac{P_c * v}{E} = [k \text{ cal/min}] \quad (13)$$

Onde,

P_c = força de corte, em kg

v = velocidade de corte, em m/min

E = equivalente mecânico do calor, $E = 427 [kg * m/k \text{ cal}]$

2.4.2 Distribuição de temperatura na usinagem

A distribuição de temperatura ao longo da ferramenta, peça e cavaco se dá conforme figura 17.

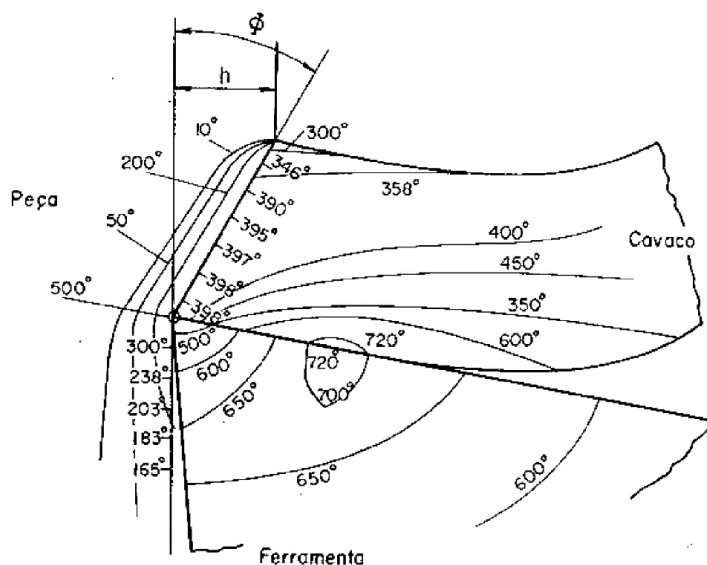


Figura 17 - Distribuição de temperatura na ferramenta, cavaco e peça na usinagem de aço, com ferramenta de metal duro P20; $v = 60\text{m/min}$; $h = 0,32\text{mm}$; $K_s = 230 \text{ kg/mm}^2$; $\mu = 0,4$
Fonte: (FERRARESI, 1977)

Contrariando a expectativa do senso comum, a região de maior temperatura não está localizada sob a aresta de corte e sim a uma certa distância dela. Tal fato pode ser explicado pela presença da zona de fluxo nesta região, pois gera calor pelo atrito do material cisalhado interno ao cavaco à medida que este se movimenta a partir da aresta de corte, gerando comprimento suficiente para realizar uma troca térmica mais eficaz sob a aresta de corte.

2.4.3 Temperatura no processo de furação

Para o processo de furação, cujo corte ocorre internamente, a maioria dos métodos de medição de temperatura existentes e desenvolvidos não é capaz de apresentar a distribuição da temperatura na ferramenta, peça e cavaco, ao longo do processo como um todo.

Para suprir a dificuldade de medir a temperatura, foram desenvolvidos simulações e modelos matemáticos de modo a apresentar as temperaturas ao longo da ferramenta. Nesta parte do conhecimento ainda faltam diversos estudos para apontar qual o correto método, ou talvez o mais abrangente, e um consenso sobre algumas informações. Em 2006, Bono et al. apresentaram um modelo ao qual contraria a convencional ideia de que a maior temperatura se localizava no maior diâmetro, onde se encontra a maior velocidade de corte. A figura 18 apresenta a distribuição da temperatura para dois métodos diferentes, onde os valores apresentados foram normalizados, dividindo-os pela média da temperatura na aresta de corte principal. Os dois perfis de temperatura apresentados correspondem cada um a uma equação utilizada, sendo que o da esquerda foi chamado de “modelo atual” pelos autores e o da direita foi desenvolvido por eles.

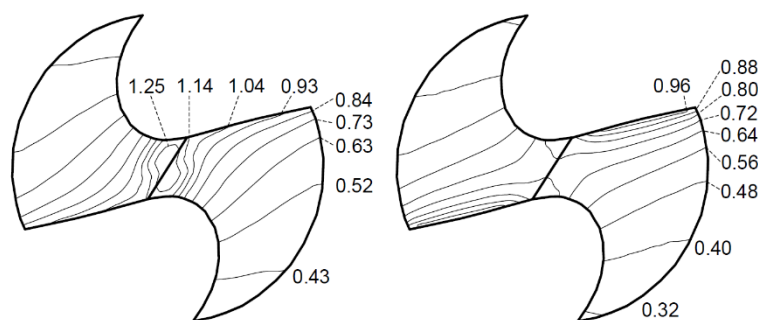


Figura 18 - Distribuição de temperatura ao longo da aresta de corte de uma broca
Fonte: (BONO; NI, 2006)

2.5 FLUIDOS DE CORTE NO PROCESSO DE FURAÇÃO

2.5.1 Funções do fluido de corte

As principais funções dos fluidos de corte são (MACHADO et al., 2015) :

- Lubrificação a baixas velocidades
- Refrigeração a altas velocidades de corte
- Remoção dos cavacos da zona de corte
- Proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação.

Quando se utiliza baixas velocidades de corte, o calor gerado é menor e consequentemente a temperatura do processo também é menor. Neste caso é necessário um fluido que possua alta lubricidade de modo a reduzir o atrito e a área de contato cavaco/ferramenta e possivelmente evitar aresta postiça de corte. O bom fluido de corte deve formar um filme lubrificante que possui resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material, favorecendo a formação do cavaco.

Quando se utiliza altas velocidades de corte a temperatura do processo é maior, sendo necessário um fluido que possua características refrigerantes para remover o calor gerado no processo.

2.5.2 Classificação dos fluidos de corte

Não há uma padronização na classificação dos lubrificantes em usinagem. Eles podem ser gasosos, líquidos ou sólidos. Os lubrificantes líquidos são os mais utilizados em operações de usinagem e são agrupados nas seguintes categorias: óleos integrais, emulsões e soluções.

Os óleos integrais podem ser de origem vegetal ou animal, possuem alta lubricidade e alto controle da corrosão. É limitado a baixas velocidades de corte e indicado para operações de corte pesadas (grandes profundidades de corte e avanços). Eles possuem baixo poder refrigerante e risco de ignição.

As emulsões são bifásicas, ao qual uma fase é a água e a outra é composta por partículas pequenas de óleos minerais (derivados do petróleo) ou de base vegetal. Normalmente utilizadas na presença de emulgadores que têm a função de deixar a distribuição de óleo uniforme e estável no meio aquoso. De maneira geral as emulsões apresentam propriedades lubrificantes e refrigerantes moderados.

As soluções são produtos químicos adicionados à água, formando um produto monofásico. Apresentam maior vida, melhores propriedades refrigerantes e piores lubrificantes que as emulsões.

2.5.3 Métodos de aplicação

Os fluidos podem ser aplicados por meio de jorro à baixa pressão, pulverização (MQF) e sistema à alta pressão.

O sistema de jorro é o mais utilizado por ser o mais simples dentre os 3. O método de pulverização de partículas de óleo com ar comprimido tem apresentado um ganho significativo em desempenho da ferramenta. No sistema à alta pressão, o fluido é bombeado através do porta-ferramentas e aplicado na superfície de saída da ferramenta, na direção contrária à saída do cavaco (direção B da figura 19), promovendo também a sua quebra.

As direções que o fluido pode ser aplicado estão exemplificadas na figura 19. A direção mais usada é a direção A, também denominada de “sobre-cabeça”.

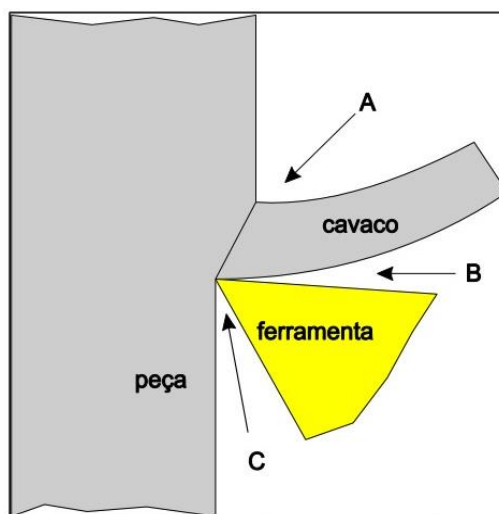


Figura 19 - Direções de aplicação de fluidos de corte
Fonte: Adaptado (Dos SANTOS et al., 2003)

2.5.4 Fluidos no processo de furação

O fluido para o processo de furação, além de ter a função de refrigerar e lubrificar, ajuda expulsar o cavaco do furo que está sendo obtido. Caso o cavaco não seja expulso do processo, a broca tem alta probabilidade de quebra por torção, devido a travamento dela dentro do furo. Além das funções destacadas, o fluido de corte exerce também um fator significativo no acabamento da superfície do furo obtido

(HAAN et al., 1997). Para aumentar a eficiência do fluido, ele pode ser aplicado por canais de refrigeração que estão localizados no corpo da broca, com saída na superfície de folga da ferramenta, conforme figura 20.

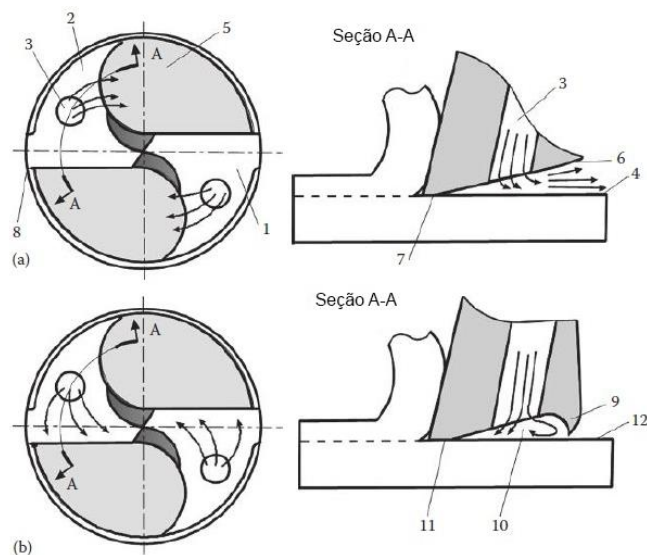


Figura 20 - Corte ortogonal e aplicação do fluido
Fonte: (ASTAKHOV, 2014)

2.6 DESGASTE E VIDA DE BROCAS

2.6.1 Mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste são apresentados na figura 21.

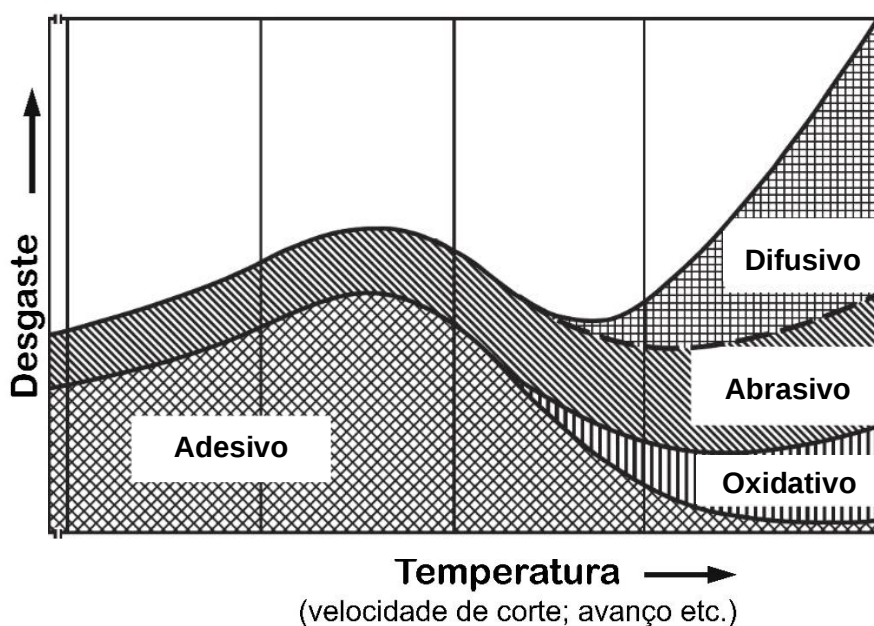


Figura 21 - Mecanismos de desgaste
Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2011)

Os mecanismos de oxidação e difusão são considerados temperatura dependentes, ou seja, só ocorrem a partir de uma determinada faixa de temperatura. Já os mecanismos de adesão e abrasão não dependem tanto da temperatura, sendo que o mecanismo de adesão predomina normalmente a baixas temperaturas, dando lugar aos “temperatura dependentes” quando esta alcança valores elevados.

A difusão ocorre pela transferência de elementos no nível atômico do material da ferramenta para o material da peça (cavaco) e vice-versa, altamente dependente da temperatura, do tempo e da afinidade química dos elementos envolvidos na zona de fluxo (MACHADO, 1991). A região de desgaste por difusão apresenta aspecto de uma superfície polida devido a troca de elementos químicos ocorrer no nível atômico.

A abrasão acontece quando o material da ferramenta é removido ou deslocado por partículas duras que podem estar soltas entre a superfície de saída e o cavaco, entre a superfície de folga e a peça ou que pertencem a uma dessas superfícies. Quando as partículas estão soltas, a abrasão é considerada de “três corpos”, quando as partículas duras rolam sob as duas superfícies. Quando as partículas estão contidas em uma das superfícies é considerada de “dois corpos” (HUTCHINGS, 1992). Ambos os tipos de abrasão podem ocorrer em usinagem, pois no material da peça ou cavaco pode haver precipitados “duros” gerando desgaste a dois corpos, assim como pode ocorrer desgaste do tipo *attrition*, desprendendo grãos duros da ferramenta, caracterizando um desgaste abrasivo de “três corpos”. O desgaste do tipo abrasivo é caracterizado por sulcos paralelos entre si e perpendiculares a aresta de corte da ferramenta (MACHADO et al., 2015) .

A adesão ou *attrition* (nomenclatura utilizada por Trent, 2000) ocorre quando grãos do material da ferramenta são removidos junto ao cavaco. Isso se dá devido ao fluxo do material da peça ou cavaco sob a superfície da ferramenta ser irregular e de tempos em tempos remove consigo grãos da ferramenta. O desgaste por *attrition* é caracterizado pelo arrancamento de grãos da ferramenta, portanto a região desgastada apresenta uma aparência áspera (MACHADO et al., 2015).

2.6.2 Vida das brocas

Para determinar a vida de uma ferramenta de corte, deve-se adotar um critério de fim de vida. O colapso da ferramenta somente é utilizado a título de pesquisa e não

é aplicável no processo produtivo, pois este requer, na maioria dos casos, a remanufatura da ferramenta (BORK, 1995).

Para furação não existem normas específicas e, portanto, não se tem uma recomendação de qual critério a ser adotado, sendo estipulado experimentalmente em função de um estudo do processo e suas respectivas tolerâncias e exigências.

2.6.3 Formas de desgaste das brocas

Os tipos de desgaste de uma broca são classificados conforme a figura 22 (ASTAKHOV, 2014).

- Desgaste de cratera (KT)
- Máximo desgaste de flanco (VB_{max})
- Desgaste de corner (VB_c)
- Desgaste da guia cilíndrica (VB_{mg})
- Desgaste da aresta transversal (VB_{cl})

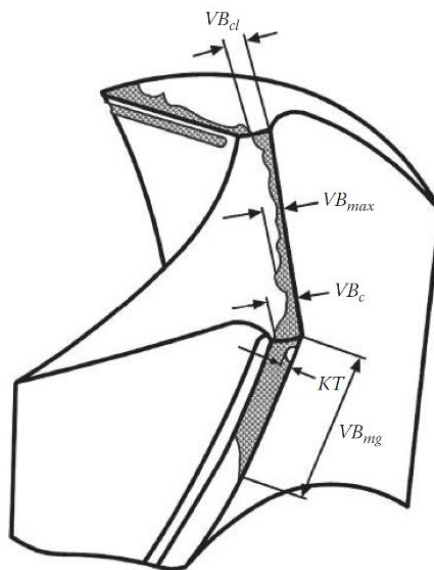


Figura 22 – Tipos de desgastes de uma broca
Fonte: (ASTAKHOV, 2014)

2.7 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Quando é realizado a operação de usinagem de um material, a condição final da superfície é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, às vezes,

reações químicas. Todos estes fatores citados podem ter efeitos diferentes na nova superfície, assim, o termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície e portanto engloba um grande número de alterações sofridas por ela (MACHADO et al., 2015).

A integridade superficial não abrange somente a textura da superfície ou a sua forma geométrica, engloba também outras características da superfície em serviço e de camadas abaixo desta (MACHADO et al., 2015).

2.7.1 Classificação da integridade superficial

A integridade superficial pode ser classificada conforme figura 23.

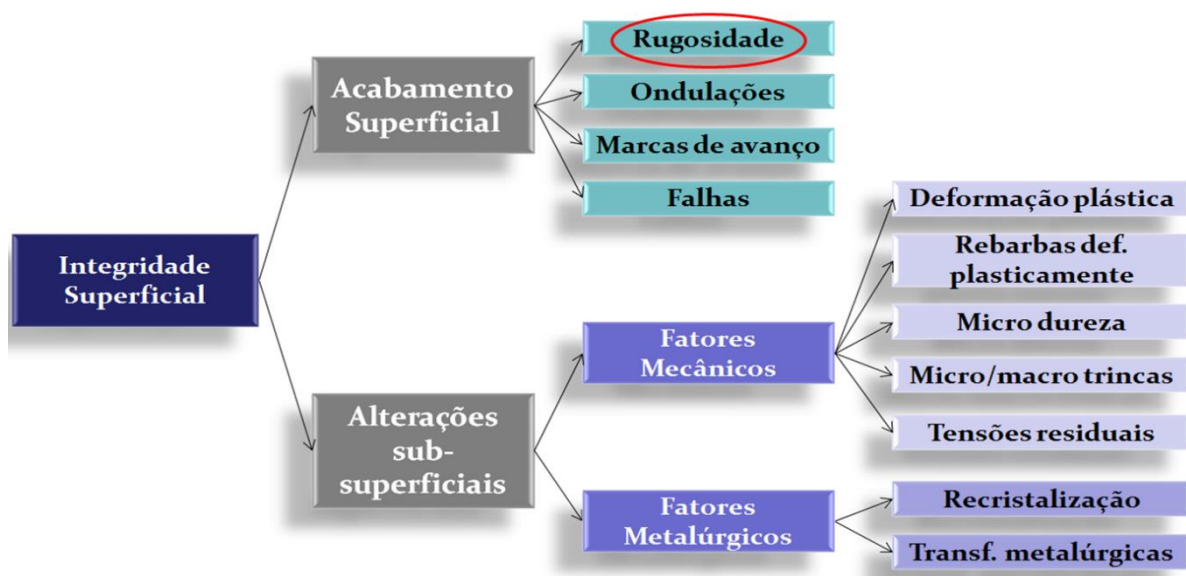


Figura 23 - Classificação da Integridade Superficial
Fonte: (MACHADO et al., 2015)

2.7.2 Rugosidade

Normalmente, os menores erros são buscados e ondulações e falhas devem ser evitados pois podem gerar refugos no processo de fabricação. Uma rugosidade baixa é primordial em peças que deslizarão sob outras ou que possuam superfícies que tem a finalidade de vedação (MACHADO et al., 2015).

A rugosidade é composta de irregularidades de pequena escala (μm) ou de erros micro geométricos. Tem-se casos que a rugosidade é utilizada para controlar um processo de usinagem, como fim de vida da ferramenta, por exemplo (MACHADO

et al., 2015), pois este parâmetro de qualidade é diretamente influenciado pelo desgaste da ferramenta.

2.7.2.1 Fatores que influenciam a rugosidade

A rugosidade pode ser influenciada por diversos fatores, como rigidez da fixação, rigidez da máquina, formação da aresta postiça de corte (APC), geometria da ferramenta, condições de corte, fluido de corte etc.

Quando ocorre APC no processo de usinagem, os fragmentos que se soltam da aresta postiça podem ficar aderidos sob a superfície da peça, piorando o acabamento superficial substancialmente.

Com relação à geometria da ferramenta, o ângulo de saída (γ_o) tem influência sob o fluxo lateral, que consiste em uma poção de material que sofre deformação plástica sem se separar da peça durante a ação da ferramenta, ou seja, durante a formação do cavaco uma porção se torna cavaco e outra fica na peça em forma de rebarba, prejudicando o acabamento (CORRÊA, 2014).

Com relação às condições de corte, o avanço é a variável que mais tem influência sob a rugosidade, quanto maior o avanço maior será a rugosidade gerada.

Com relação ao fluido de corte, as características lubrificantes e refrigerantes são fundamentais para determinar baixa rugosidades. Um bom lubrificante tende a diminuir a rugosidade, enquanto a função refrigerante pode aumentar as forças e eventualmente piorar a rugosidade.

2.7.2.2 Rugosidade bidimensional

De acordo com a norma ABNT ISO 4287 (2002) os parâmetros de avaliação de rugosidade são classificados em parâmetros de amplitude, parâmetros de espaço e parâmetros híbridos. Os parâmetros de amplitude são determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície. Os parâmetros de espaço são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície. Os parâmetros híbridos são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço. A tabela 8 mostra os principais parâmetros de rugosidade bidimensionais.

Símbolo	Nome	Definição
Rp	Altura máxima do pico do perfil	Altura máxima do pico do perfil
Rv	Altura máxima do vale do perfil	Altura máxima do vale do perfil
Rz	Altura máxima do perfil	Distância entre maior altura e menor vale
Rc	Altura média do perfil	O valor médio das alturas dos elementos do perfil Z_t (picos e vales) no comprimento de amostragem.
Ra	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem
Rq	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem
Rsk	Fator de assimetria (skewness)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e Rq ao cubo, no comprimento de amostragem
Rku	Fator de achatamento (kurtosis)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e Rq ao cubo, no comprimento de amostragem
Rdq	Inclinação média quadrática do perfil em avaliação	Raiz quadrada da média das inclinações, dZ/dX , no comprimento de amostragem

Tabela 8 - Parâmetros de rugosidade bidimensionais
Fonte: Modificado (ABNT ISO 4287, 2002; MACHADO, 2015)

O parâmetro Ra é um dos mais utilizados, no entanto ele não deve ser utilizado sozinho pois é passível de uma interpretação errada em alguns casos. O parâmetro Rq amplia os valores dos picos e vales isolados ou esporádicos, evidenciando algum defeito ou marcas em superfícies bem-acabadas. Há alguns parâmetros que se destacam que são de natureza estatística, por exemplo o Rsk e o Rku – skewness e kurtosis, respectivamente. O primeiro representa o fator de assimetria e o segundo seu achatamento. O parâmetro Rsk indica se as irregularidades são na maioria picos ou vales, se o seu valor numérico for positivo as irregularidades têm predominância de picos e se o seu valor for negativo há predominância de vales. Se a distribuição da rugosidade tiver uma forma gaussiana perfeita o valor do parâmetro Rku será igual a três (uma superfície retificada com um rebolo afiado, por exemplo) no entanto se uma superfície tiver predominância de vales e for uma superfície áspera o valor será menor que três, por outro lado se a superfície tiver predominância de picos os valores serão maiores que três (MACHADO et al., 2015; WHITEHOUSE, 2002). O coeficiente de atrito tende a diminuir quando o parâmetro Rsk está ficando mais negativo, para testes realizados com lubrificante (SEDLAČEK; PODGORNIK; VIŽINTIN, 2009).

2.7.2.3 Rugosidade tridimensional

Os parâmetros de rugosidade tridimensionais descrevem as mesmas condições e métodos para os bidimensionais, no entanto avaliam uma área ao invés de somente uma linha. A tabela 9 apresenta os principais parâmetros tridimensionais de rugosidade bem como a descrição de cada um deles.

SIMBOLOGIA	PARÂMETROS
Sa	Altura média da área selecionada
Sq	Altura da Raiz-Média-Quadrada da área selecionada
Sp	Altura máxima do pico da área selecionada
Sv	Profundidade máxima do vale da área selecionada
Sz	Altura máxima da área selecionada
S10z	Altura de dez pontos da área selecionada
Ssk	Skewness da área selecionada
Sku	Kurtosis da área selecionada
Sdq	Gradiente médio da raiz
Sdr	Índice de área interfacial desenvolvido
FLTt	Planicidade usando plano de referência de mínimos quadrados
Sk	Profundidade da rugosidade do núcleo, altura do material do núcleo
Spk	Altura de pico reduzida, altura média dos picos acima do material do núcleo
Svk	Altura do vale reduzida, profundidade média dos vales abaixo do material do núcleo
Rmr1	Componente de material de pico, a fração da superfície que consiste em picos acima do material do núcleo
Rmr2	Componente de material de pico, a fração da superfície que irá carregar a carga
Vmp	Volume do pico de material da superfície topográfica (ml / m ²)
Vmc	Volume do material do núcleo da superfície topográfica (ml / m ²)
Vvc	Vazio do núcleo da superfície (ml / m ²)
Vvv	Vale Vazio Vale da Superfície (ml / m ²)
Vvc/Vmc	Relação do parâmetro Vvc para o parâmetro Vmc

Tabela 9 - Parâmetros de rugosidade tridimensionais

Fonte: (ABNT ISO 4287, 2002; Resultados Alicona, 2019; WHITEHOUSE, 2002)

2.7.3 Alterações subsuperficiais

As alterações subsuperficiais são agrupadas de acordo com sua origem, podendo ser de natureza mecânica ou metalúrgica (MACHADO et al., 2015).

2.7.3.1 Alterações de natureza mecânica

Deformação plástica: Consiste na deformação plástica na subsuperfície do componente. É identificada pelas estruturas metalúrgicas alongadas na direção do fluxo de deformação.

Rebarbas: Podem ser oriundos da aresta postiça ou ainda na retificação de materiais dúcteis, onde neste caso, as rebarbas surgem pela incapacidade do abrasivo de transformar em cavaco o material deformado plasticamente.

Alterações de microdureza: A dureza da peça pode sofrer significativas alterações ao longo da seção transversal. Em caso de usinagem de aços, a temperatura atingida na superfície, aliada à rápida velocidade de resfriamento, podem levar à formação de martensita não revenida ou ao super revenimento dessa martensita. No primeiro caso há um aumento na dureza e no segundo há uma redução da dureza com relação a dureza inicial.

Trincas: Podem surgir micro ou macrotrincas durante a usinagem. Tendem a ser mais frequentes em materiais frágeis e são prejudiciais à resistência à fadiga e à corrosão sob tensão, portanto devem ser evitadas.

Tensões residuais: Podem ser de tração ou compressão, de intensidades e profundidades variadas. Normalmente, quanto maior o desgaste da ferramenta, mais intensa e profunda será a tensão residual, que quando de natureza compressiva é benéfica ao componente, pois aumenta a resistência a fadiga da peça. As tensões residuais de origem mecânica são normalmente de natureza compressiva e as de origem térmicas de natureza trativa.

2.7.3.2 Alterações de natureza metalúrgica

Recristalização: Pode ocorrer em qualquer material quando suas superfícies são deformadas plasticamente, podendo sofrer recristalização quando aquecido a temperaturas superiores às temperaturas de recristalização.

Transformação de fases: Esta alteração pode ocorrer devido a altas temperaturas desenvolvidas durante a usinagem. Na usinagem de aços, pode ocorrer a formação de martensita frágil não revenida ou um super revenimento da matensita.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O propósito desta seção é descrever os experimentos e metodologias utilizadas para a realização do estudo. A figura 24 apresenta um fluxograma das atividades realizadas neste trabalho.

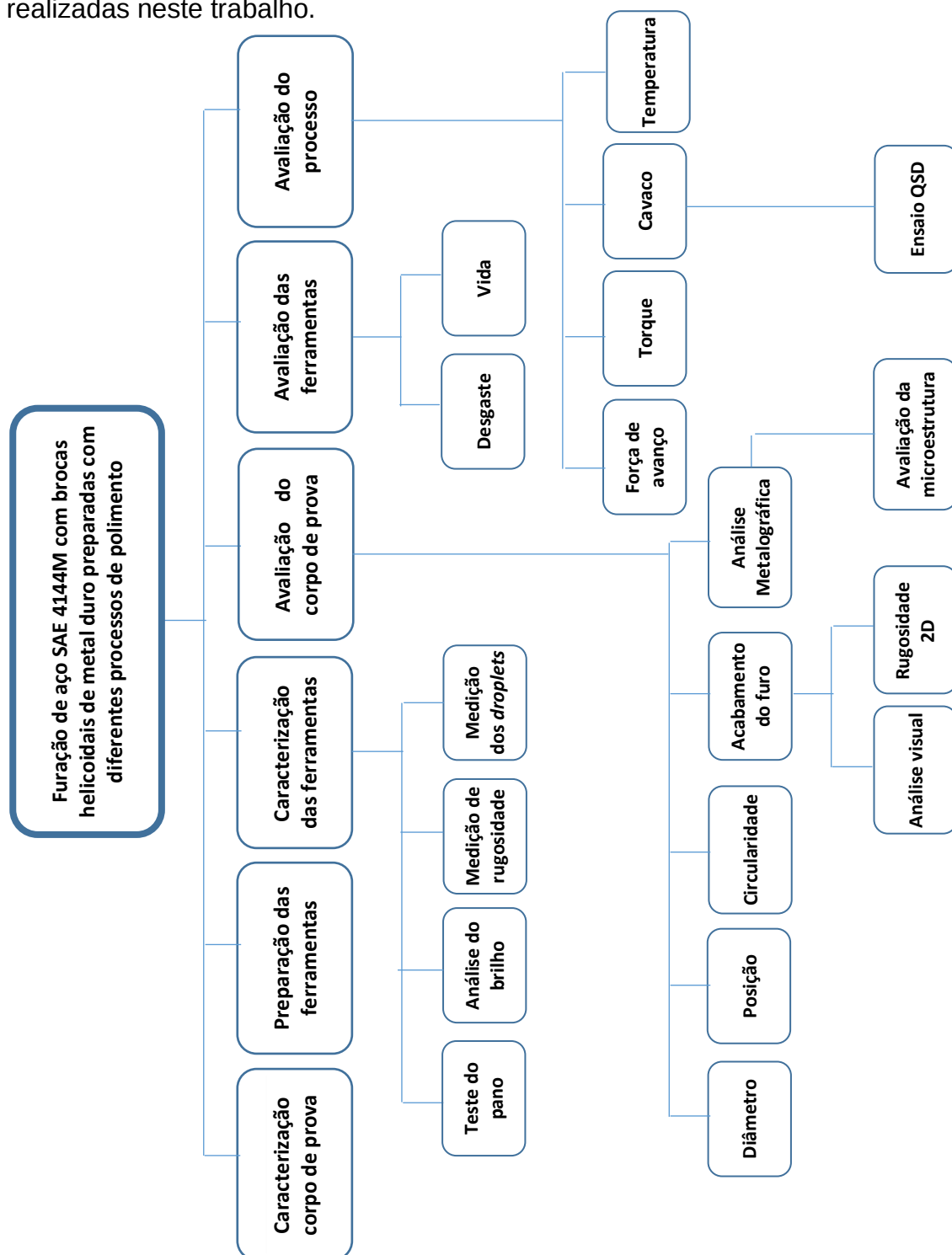


Figura 24 - Fluxograma dos experimentos abordados
Fonte: O autor (2019)

Os experimentos apresentados nesta dissertação foram realizados parte nos laboratórios da PUC-PR, parte nos laboratórios da UNIFEBE e parte em uma empresa que, para preservar sua identidade, não será divulgada seu nome, com isto será tratada aqui como Multinacional.

3.1 CORPOS DE PROVA

O material utilizado para os testes é o aço SAE 4144M que é utilizado em componentes automobilísticos. O material é temperado e revenido e sua composição química está apresentada na tabela 10.

SAE 4144M		
Elemento Químico	Sigla	Teor teórico (wt%)
Cromo	Cr	1,15 a 1,30
Manganês	Mn	0,90 a 1,00
Carbono	C	0,42 a 0,46
Cobre	Cu	0,35 máx.
Molibdênio	Mo	0,25 a 0,35
Silício	Si	0,20 a 0,30
Níquel	Ni	0,25 máx.
Alumínio	Al	0,015 a 0,040
Fósforo	P	0,025 máx.
Enxofre	S	0,01 a 0,02

Tabela 10 - Composição Química Aço 4144M
Fonte: (O autor)

Os corpos de prova possuem a geometria apresentada na figura 25. Após a matéria prima ser disponibilizada para o processo de usinagem há algumas operações que precedem a furação, que são o desbaste e o acabamento da matéria prima (resultando na figura 25). Neste caso, o processo de furação é realizado em uma superfície desbastada e acabada, portanto não tem contato com a carepa – dura - do forjado.

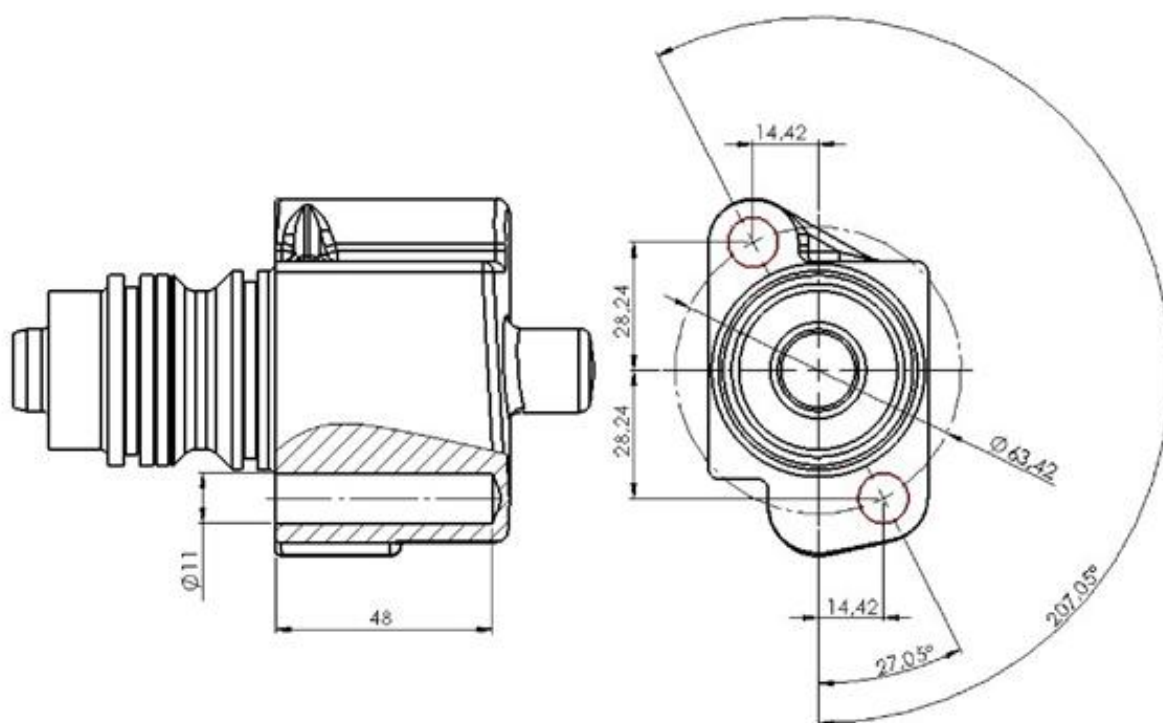


Figura 25 - Desenho esquemático do corpo de prova.
Fonte: (Multinacional)

A empresa Multinacional recebe o material forjado e realiza o processo de têmpera e revenimento (nesta ordem). A dureza dos corpos de prova é controlada com frequência pré-estabelecida e tem uma variação de 36 HRC a 42 HRC. A microestrutura resultante do processo descrito é uma matriz de martensita revenida, conforme figura 26.

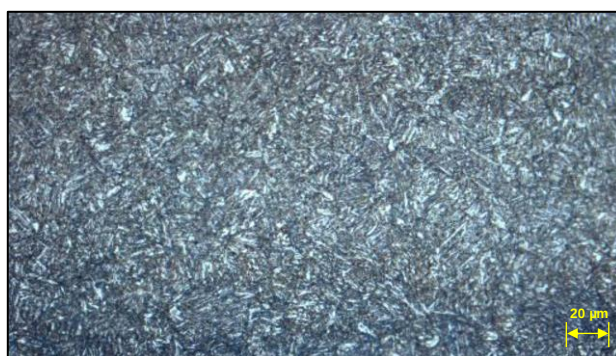


Figura 26 - Microestrutura do Aço 4144M
Fonte: (O autor)

3.2 PREPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE

As brocas helicoidais foram fabricadas pela Multinacional a partir de um blank de metal duro. Todo o processo de fabricação, com exceção do processo de revestimento, foi realizado dentro da Multinacional. A partir do blank de metal duro da classe K40UF são realizados os seguintes processos de fabricação:

- Retificação do diâmetro externo
- Abertura dos canais helicoidais
- Afiação de ponta
- Preparação da aresta de corte
- Deposição de revestimento
- Polimento

Todas as ferramentas utilizadas foram fabricadas de forma igual e em sequência até o processo de deposição do revestimento. Para este estudo, as ferramentas receberam processos de polimento e tempos diferentes entre si, com o intuito de variar a qualidade final da ferramenta para averiguação das consequências na furação do aço SAE 4144M.

3.2.1 Processos de fabricação das brocas

O primeiro estágio do processo de fabricação é a retificação do diâmetro externo da broca, para esta fase foi utilizado uma retífica cilíndrica CNC do fabricante Studer, modelo S36 e um rebolo de espessura de 18 mm do fabricante Winter, com granulometria D151C75 de liga K+91B. As rotações da haste de metal duro e do rebolo foram de 1600 e 450 RPM, respectivamente, com avanço de mergulho de 1,4 mm/min e avanço lateral de 300 mm/min. Foi deixado 0,02 mm para o centelhamento, utilizando-se a_e de 0,005 mm. A dressagem do rebolo é realizada a cada 500 peças. Para o processo foi utilizado o fluido EcoCut 610B integral de base mineral, fabricado pela Fuchs, com pressão de 6 bar.

O próximo estágio é o de abertura do canal helicoidal, quando foi utilizada uma afiadora do fabricante Walter, modelo “Walter Power Production e Power Regrinder”, com comando HMC 500 WWM com rebolo do fabricante Tyrolit de granulometria D54XPP. Para o processo de desbaste foram utilizados 5 passes com a_e de 0,92 mm e velocidade periférica do rebolo de 18 m/s e velocidade de avanço de 68 mm/min.

Para o processo de acabamento foi utilizado 1 passe de 0,1 mm, com velocidade periférica do rebolo de 18 m/s e avanço de 60 mm/min. O canal helicoidal tem um ângulo de hélice de 30° e passo de 70,7 mm. O fluido utilizado foi o EcoCut 610B integral de base mineral, fabricado pela Fuchs, aplicado com pressão de 20 bar. O rebolo é dressado a cada setup de ferramenta, portanto a cada início de fabricação de um lote de ferramentas é realizado a dressagem. A cada 3 ferramentas o operador da afiadora CNC utiliza-se de uma “pedra” do fornecedor Tyrolit, código 9529280, com o intuito de realizar uma dressagem intermediária de forma manual. As figuras 27 e 28 apresentam desenhos com os detalhes dimensionais da ferramenta.

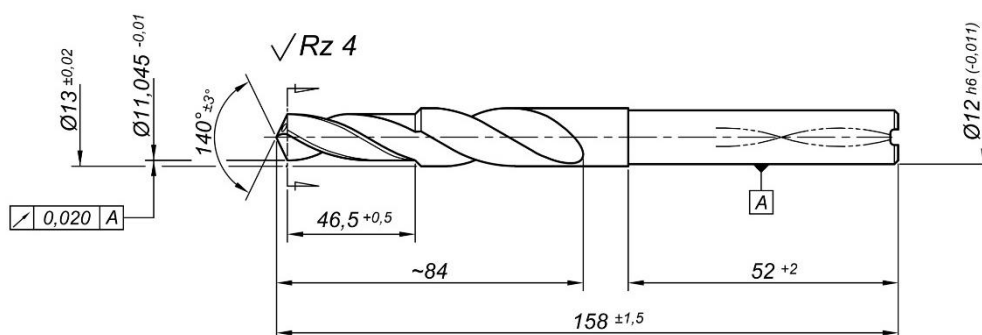


Figura 27 - Desenho de fabricação da ferramenta
Fonte: Departamento de desenvolvimento (Multinacional)

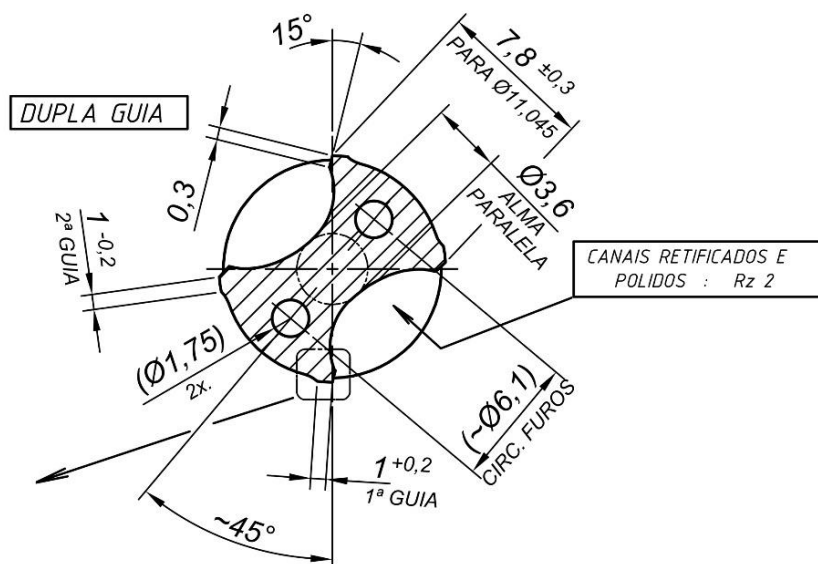


Figura 28 - Detalhes da seção transversal - Desenho de fabricação
Fonte: Departamento de desenvolvimento (Multinacional)

O processo de afiação de ponta da ferramenta foi realizado também na máquina Walter com velocidade de avanço de 140 mm/min e rotação periférica do rebolo de 35 m/min. O rebolo é fornecido pela Royal Diamond, com granulometria D64 C100. A dressagem do rebolo de afiação é realizada da mesma forma que o rebolo para abertura de canal. A figura 29 ilustra os detalhes da ponta da broca, retificados nesta etapa do processo.

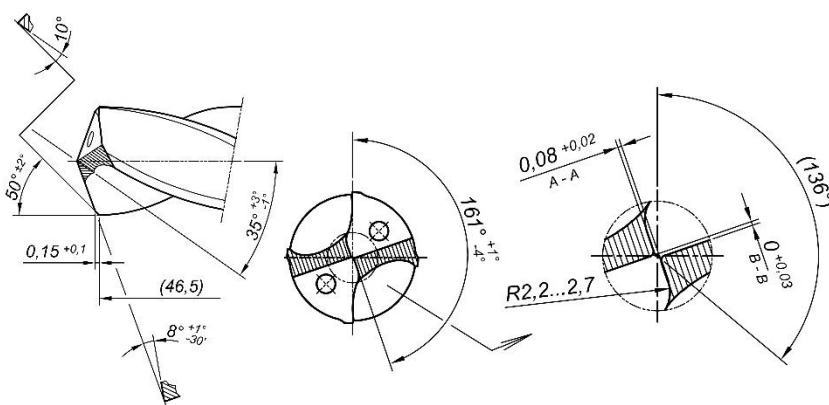


Figura 29 - Detalhes do desenho de afiação da ferramenta
Fonte: Departamento de desenvolvimento (Multinacional)

Para a preparação da aresta de corte – *honing* – foi utilizado uma máquina Drag Finishing, Serie DF Basic da OTEC, com abrasivo TZMS 4/5, também do fabricante OTEC. O tamanho do arredondamento da aresta deve respeitar a tolerância de 30 µm até 40 µm.

Após a etapa de afiação das ferramentas, elas são enviadas ao fornecedor de revestimentos, a empresa Oerlikon Balzers Revestimentos Metálicos Ltda, para o revestimento PVD Helica® (TiSiN/AlCrN) com espessura de camada de aproximadamente 3 µm. O revestimento possui microdureza (HV 0.05) de 3.000, coeficiente de atrito à seco de 0.25 e temperatura máxima de serviço de 1.100°C (BALZERS, 2019).

3.2.1.1 Polimento das ferramentas de corte

Para o polimento das ferramentas, foram utilizados dois métodos, o manual e o automático. Para o polimento automático foi utilizada a máquina “Drag Finishing”, alterando-se o abrasivo utilizado. Foram utilizados dois tipos de abrasivos para realizar o polimento automático das ferramentas, ambos fabricados pelo fornecedor OTEC, o HSC 1/300 e o H 4/400, conforme figura 30. Foram feitos polimentos variando

o tempo de cada abrasivo utilizado, resultando, assim, em quatro diferentes processos de forma automática.



Figura 30 - Abrasivo HSC 1/300 (à esquerda) e H 4/400 (à direita)
Fonte: (OTEC, 2019)

O HSC 1/300 tem em sua constituição casca de noz e óxido de silício e foi adicionado 1 kg do pó M21 do fabricante OTEC, o que corresponde a 1,25% do tambor abrasivo (80 kg). O H 4/400 tem em sua constituição casca de noz e foi adicionado 100 gramas de pó PP02 (pó de diamante) também fabricado pela OTEC, o que corresponde a 0,125% de todo o tambor de abrasivo (80 kg).

Com intuito de caracterizar os dois abrasivos e os pós, foram realizadas análises no MEV e EDS para avaliar a geometria das partículas e a composição química de cada abrasivo. Os resultados são apresentados nas figuras 31, 32 e 33 e nas tabelas 11, 12 e 13.

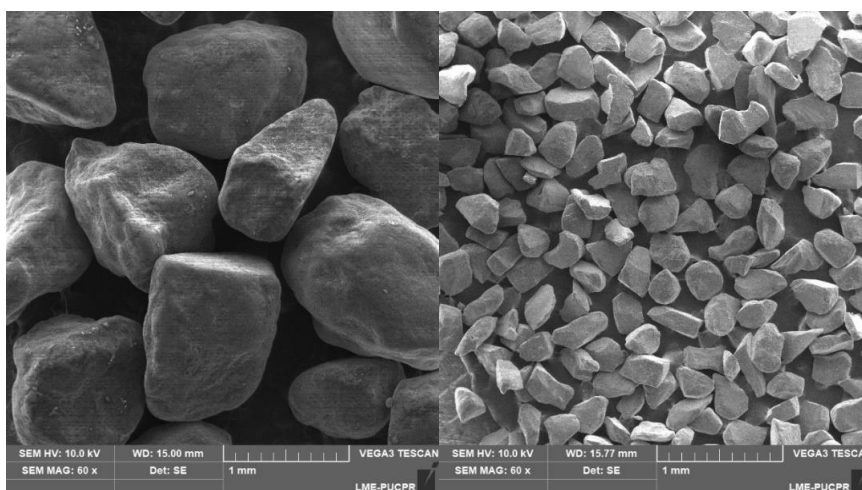


Figura 31 – Análise MEV abrasivos HSC 1/300 - Casca de noz (à esquerda) e óxido de silício (à direita)
Fonte: O autor (2019)

	O Wt %	C Wt %	Al Wt %	Si Wt %	Mg Wt %	Na Wt %
Casca de Noz - 1/300	70,50	25,00	4,00	0,30	0,20	-
Óxido de silício	58,40	8,95	10,45	22,15	0,10	-

Tabela 11 – Resultados EDS - Abrasivos HSC 1/300 - Casca de noz e óxido de silício
Fonte: O autor (2019)

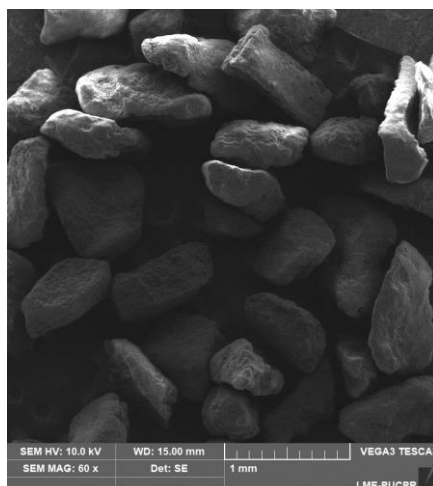


Figura 32 – Análise MEV abrasivo H 4/400 - Casca de noz
Fonte: O autor (2019)

	O	C	Al	Si	Mg	Na
	Wt %	Wt %	Wt %	Wt %	Wt %	Wt %
Casca de Noz - 4/400	72,60	27,20	0,30	-	-	-

Tabela 12 - Resultados EDS – Abrasivo H 4/400 - Casca de noz
Fonte: O autor (2019)

Apesar de ambos abrasivos conterem casca de nozes, elas têm diferenças geométricas entre si. Em termos de grandeza, o abrasivo HSC 1/300 apresenta um tamanho maior e arestas mais arredondadas, tendendo a uma geometria de esfera; a casca de noz do abrasivo H 4/400 possui comprimento maior que sua espessura, gerando “arestas” mais vivas. Em termos de composição química as duas cascas de nozes são muito parecidas. O óxido de silício é o que possui menor tamanho dentre os abrasivos caracterizados e a análise de EDS descreve sua composição química, com uma presença de 10% de Alumínio. Os resultados da caracterização da geometria dos abrasivos encontrados no MEV são similares aos encontrados na literatura (CARRER, 2018; OST, 2016; ZEILMANN; OST; FONTANIVE, 2018).

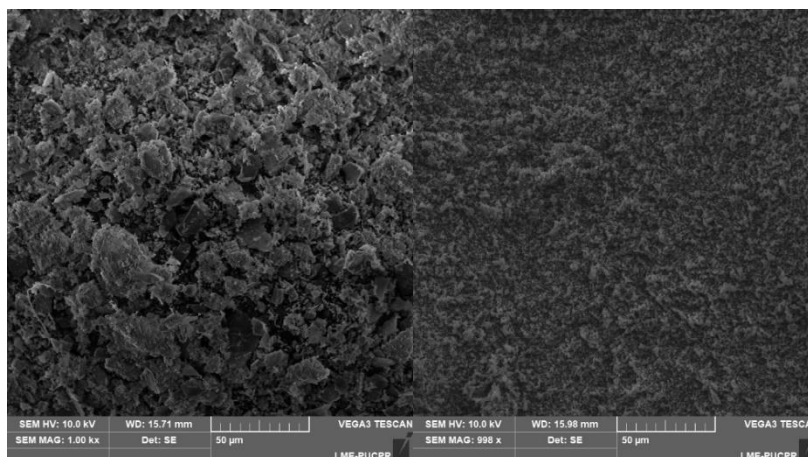


Figura 33 - Resultados MEV – Pó M21 (à esquerda) e Pó PP02 (à direita)
Fonte: O autor (2019)

	O Wt %	C Wt %	Al Wt %	Si Wt %	Mg Wt %	Na Wt %
M21	50,5	-	39,0	6,2	4,3	-
PP02	-	99,6	-	0,4	-	-

Tabela 13 - Resultados EDS – Pó M21 e Pó PP02
Fonte: O autor (2019)

De acordo com a figura 33 e a tabela 13, ambos abrasivos se apresentam em forma de pó e o PP02 apresenta um menor tamanho comparado ao M21. Conforme expectativa, o resultado de EDS para o PP02 foi predominantemente carbono, o que prova que o abrasivo é um pó de diamante, já para o M21 pode-se afirmar que é constituído basicamente de óxido de alumínio.

Quando se trata de um processo de polimento automático, utilizando-se uma máquina *Drag Finishing*, o conceito básico se baseia em rotacionar a ferramenta em meio a um tambor de um determinado abrasivo. De maneira geral o tempo de processo, a profundidade e a velocidade de rotação são os parâmetros que são programáveis. A figura 34 mostra uma máquina *Drag Finishing* e algumas de suas partes.

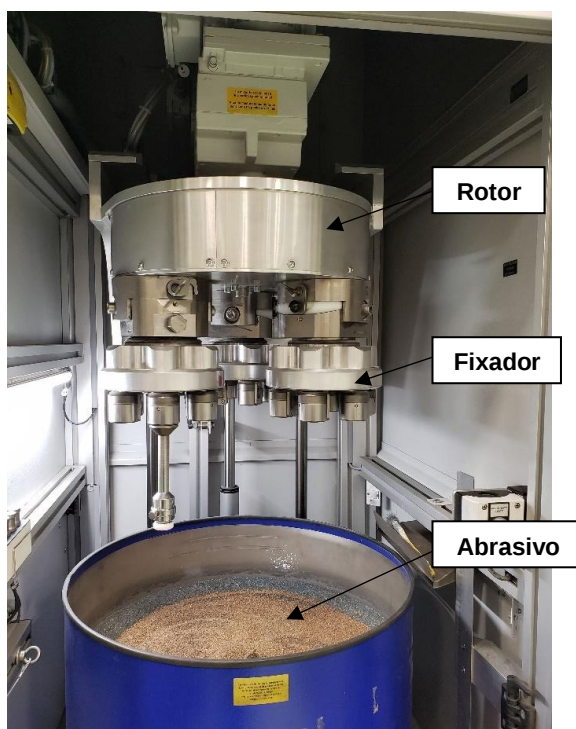


Figura 34 - Máquina Drag Finishing
Fonte: O autor (2019)

Os parâmetros programáveis tanto para o rotor quanto para o fixador são os de velocidade de rotação e o de tempo de processo, para ambos os parâmetros são necessários definir um valor para o sentido horário e outro para o sentido anti-horário. A rotação da ferramenta é uma resultante da combinação das duas velocidades programadas. A máquina utiliza-se da profundidade programada por meio de um laser que mede o comprimento da ferramenta e define o quanto o conjunto precisa movimentar-se para obter a profundidade de imersão programada.

A escolha dos parâmetros utilizados no processo Drag Finishing foi dada a partir de um manual do fabricante (OTEC) que sugere os parâmetros de processo de acordo com o abrasivo utilizado e ferramentas a serem polidas. Para cada abrasivo foram utilizados dois programas diferentes, portanto ao total foram utilizados quatro processos automáticos diferentes entre si, sendo que a única variável que foi alterada entre eles foi o tempo de processo. Os valores utilizados para o rotor foram 30 RPM para à direita e 30 RPM para à esquerda, 50 RPM para o fixador concordante e de 50 RPM discordante. A profundidade de imersão utilizada foi de 200 mm. Para os tempos de processo foi utilizado sempre a divisão pela metade, por exemplo para um tempo total de 10 minutos foi utilizado o rotor em 5 minutos a direita e 5 minutos a esquerda, já para o fixador 2,5 minutos concordante e 2,5 minutos discordante. A proposta dos

parâmetros tanto para rotação quanto para o tempo é de sempre utilizar os mesmos valores para a rotação horário e anti-horário, proporcionando desta forma um polimento uniforme em toda ferramenta. Em termos de tempo total foram utilizados os tempos de 5 e 20 minutos para o abrasivo HSC 1/300 e os tempos de 1 e 10 minutos para o abrasivo H 4/400.

Para o polimento manual foi utilizado uma massa abrasiva azul para polimento, adicionada a um rebolo do tipo “feltro”, conforme figura 35.



Figura 35 - Massa de polimento + Feltro de algodão
Fonte: O autor (2019)

A figura 36 e a tabela 14 apresentam a caracterização do abrasivo utilizado para o polimento manual.

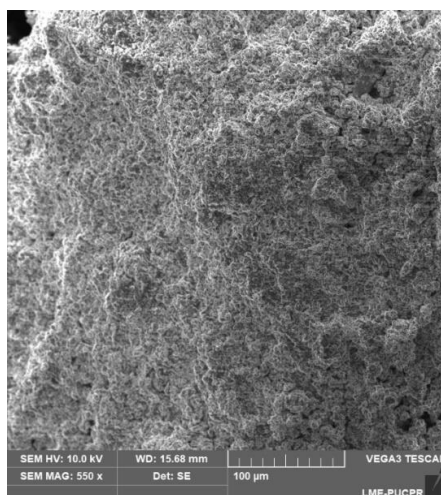


Figura 36 - Análise MEV abrasivo massa azul
Fonte: O autor (2019)

	O Wt %	C Wt %	Al Wt %	Si Wt %	Mg Wt %	Na Wt %
Massa azul	64,50	18,60	16,80	0,10	-	0,10

Tabela 14 - Resultados EDS – Abrasivo Massa azul
Fonte: O autor (2019)

De acordo com o resultado de EDS (tabela 14) o abrasivo massa azul possui em sua composição cerca de 17% de alumínio, que se apresenta na forma de óxidos, sendo um abrasivo bastante usado para polimento.

O processo de polimento manual é realizado utilizando-se de dois movimentos simultâneos, o primeiro de avanço da ferramenta sobre o feltro e o segundo o da rotação da ferramenta. Estes dois movimentos garantem o polimento nos canais da ferramenta bem como as suas guias, como ilustrado na figura 37.



Figura 37 - Processo de polimento manual
Fonte: Departamento de desenvolvimento (Multinacional)

A tabela 15 descreve os 6 diferentes processos de polimento que serão abordados nesta dissertação, com os respectivos tempos e abrasivos utilizados em cada um.

Nº	Processo	Abrasivo	Tempo
2	Sem polimento	-	-
3	Manual	Massa abrasiva	-
4	Automático	HSC 1/300	5 min
5	Automático	HSC 1/300	20 min
6	Automático	H 4/400	10 min
7	Automático	H 4/400	1 min

Tabela 15 - Processos de polimento
Fonte: (O autor)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS

Em termos de caracterização das ferramentas antes dos ensaios de usinagem foram realizadas quatro rodadas de experimentos em que as ferramentas foram preparadas conforme processo de polimento descrito no capítulo 3.2.1. Para as três primeiras rodadas todas as ferramentas foram caracterizadas em termos de rugosidade e de tamanho de honing. A quarta rodada destinou-se somente para realizar os testes qualitativos e análises no MEV.

Como ponto de partida foram utilizados dois métodos qualitativos para caracterizar os polimentos utilizados. O primeiro ensaio está sendo apresentado na figura 38 e consiste em utilizar um pano de algodão (ou um papel) e deslizar a ferramenta sobre o pano, aplicando uma pequena pressão. São executados dois movimentos simultâneos, o de rotação da ferramenta e o de deslizamento da ferramenta sobre o pano. O propósito do teste é avaliar a restrição ao “deslizamento” da ferramenta sobre o pano, simulando de forma rudimentar o processo de usinagem. Apesar de parecer um teste sem muita confiabilidade, pois depende diretamente da experiência de quem o faz, ele é amplamente aplicado no chão de fábricas e os principais fornecedores/consumidores de ferramentas utilizam-no para atestar se a ferramenta está polida ou se o polimento está de acordo com o esperado.



Figura 38 - Teste qualitativo para polimento em ferramentas – Restrição ao pano
Fonte: O autor (2019)

O segundo teste qualitativo realizado foi comparar o brilho da superfície das ferramentas de acordo com os processos de polimento aplicados. Portanto, foram tiradas fotos que comparam o aspecto visual dos polimentos.

A caracterização das ferramentas em termos de tamanho de *honing* e rugosidade foi realizada no laboratório da UNIFEFE e foi utilizado um microscópio modelo “Infinite Focus” do fabricante Alicona (figura 39).

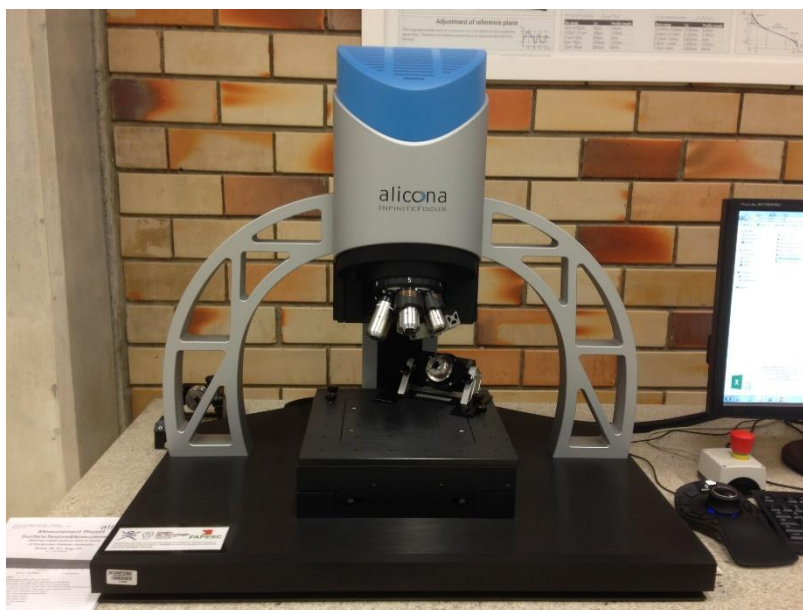


Figura 39 - Microscópio Alicona
Fonte: (Laboratório UNIFEFE)

Para medição do tamanho de honing foi utilizado o software Edgemaster® do fabricante Alicona, com a proposta de apresentar uma estabilidade entre todas as ferramentas, com intuito de eliminar influência desta variável no estudo.

Para as medições de rugosidade foi padronizado uma superfície de 1 mm², sendo medida na guia e no centro da superfície de saída de cada ferramenta (canal), conforme figuras 40 e 41. Os parâmetros utilizados para a análise de rugosidade das ferramentas foram os seguintes: Resolução Vertical: 0,159 µm, Resolução Lateral: 2,135 µm, Ampliação: 50x, Lc: 250 µm.

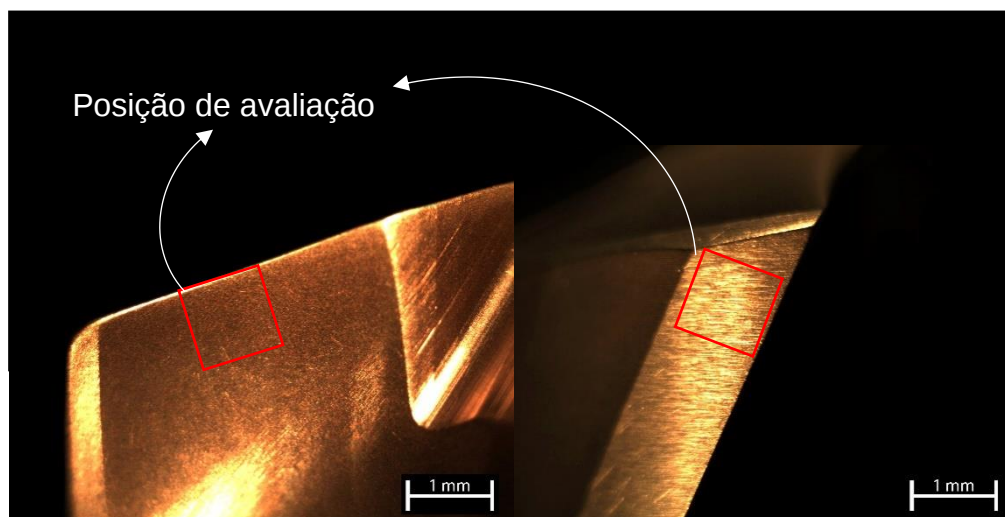


Figura 40 - Padrão de avaliação da rugosidade - Canal (à esquerda), Guia (à direita)
Fonte: (O autor)

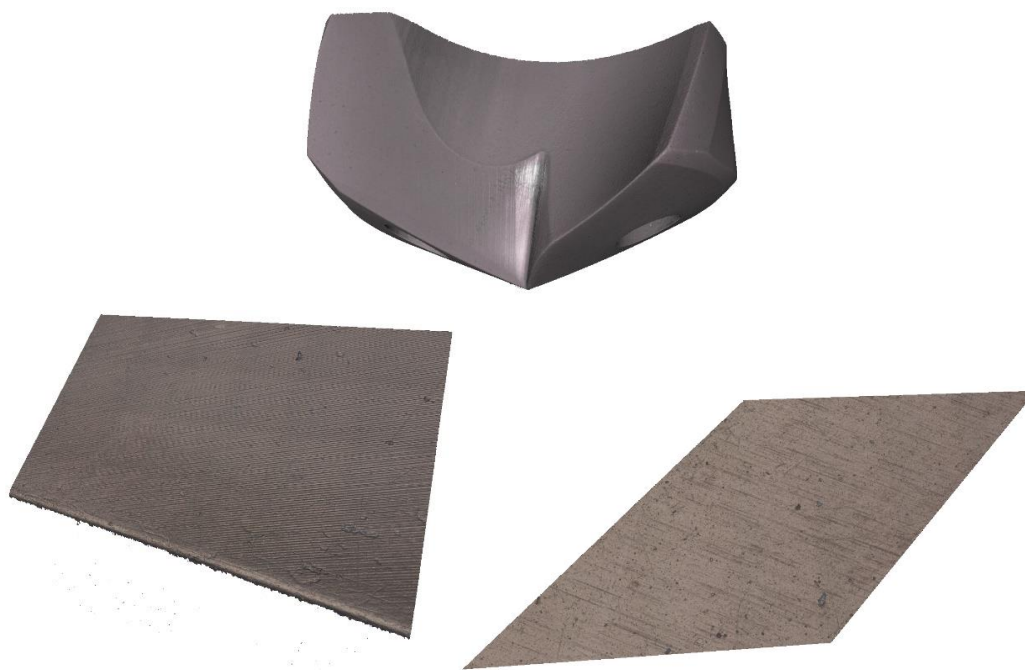


Figura 41 – Imagens geradas pelo Alicona no processo de avaliação da superfície de saída (inferior esquerda) e da guia (inferior direita)
Fonte: (Laboratório UNIFEBE)

Utilizando-se do padrão apresentado na figura 40, foi possível obter medições de diversos parâmetros de rugosidade tridimensional, conforme apresentados no próximo capítulo e no Apêndice A.

Para caracterizar o revestimento de cada ferramenta e a área de *droplets* por área total, remanescente do processo de revestimento sobre a superfície de saída (canal) e da guia, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Veja 3 do fabricante Tescan. Para analisar as imagens geradas no MEV e quantificar

a área de *droplets* por área total foi utilizado o software *Image J*, versão 1.49v. As imagens geradas no MEV foram importadas para o software *Image J* (figura 42.a.) e convertidas para 8-bit. O filtro *threshold* foi utilizado para definir a área de *droplets* (figura 42.b.) que se baseia em uma definição manual e por isso foram realizadas mais de uma análise com cálculo das médias e dos desvios padrões. Os resultados do tratamento da imagem são apresentados na figura 42.c. Após o tratamento final foi avaliado a quantidade de partículas com o comando “*Analyze Particles*”.

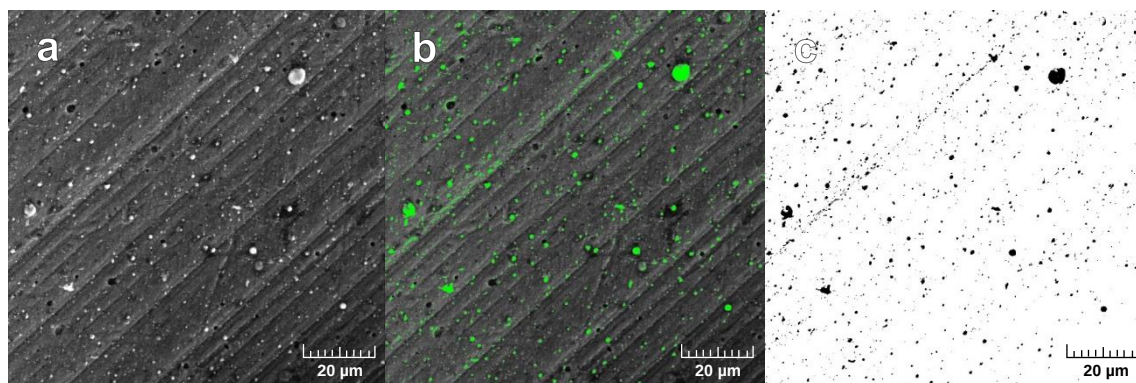


Figura 42 - Tratamento imagem MEV - Medição droplets - Software Image J
Fonte: (O autor)

3.4 MÁQUINA FERRAMENTA

Os ensaios de usinagem foram desenvolvidos na linha de produção de bombas injetoras da Multinacional. Foi utilizado um torno vertical de 4 eixos, modelo VSC-250, do fabricante EMAG, com potência de 8,5 kW e torque de 40 Nm. O fluido de corte utilizado foi o “Ecocool durant 71” da Fuchs Lubrificantes do Brasil Ltda, em uma concentração de 10 a 12 %, com adição de antisséptico 16, 17,21 e antiespumante W e FM, com pressão de 40 bar.

A fixação da broca foi realizada em um mandril hidráulico que está alocado em uma posição de troca do magazine, onde possui acionamento de um motor para realizar a furação fora do centro da máquina, com rotação utilizada de 2333 RPM ($V_c=81\text{m/min}$). O processo de usinagem consiste em aproximar a ferramenta em movimento rápido (G0) até 2 mm da face da peça, furando em cheio uma profundidade de 48 mm com avanço de 500 mm/min ($f_z = 0,107 \text{ mm/dente}$), com um tempo de permanência de 0,2 segundos (7,8 rotações), seguido de retorno da ferramenta em movimento rápido (G0) até 2 mm da face da peça. O segundo furo na peça (são dois furos por peça) é realizado a 180° do primeiro e utilizando-se dos mesmos parâmetros de processo.

3.5 AVALIAÇÃO DAS FERRAMENTAS

Para a análise de desgaste e vida das ferramentas, foram realizadas três rodadas de ensaios de usinagem com cada tipo de broca testada. Na primeira rodada as ferramentas foram levadas até o critério de fim de vida preestabelecido (ver item 3.6), na segunda rodada as ferramentas foram levadas até a vida de 500 peças (ou 1000 furos) e na terceira rodada as ferramentas foram levadas até a vida de 600 peças (ou 1200 furos). Nas duas primeiras rodadas, os desgastes das ferramentas foram acompanhados durante todo o teste, até o final da vida. Na terceira rodada apenas no final do teste. Os critérios adotados foram modificados devido à quebra prematura das ferramentas na primeira rodada, neste caso o propósito da segunda e terceira rodada foi de comparar tamanho de desgaste e não vida (proposta da primeira rodada).

Ao longo das duas primeiras rodadas, as ferramentas foram analisadas em um microscópio óptico modelo TecSart fabricado pela Fersart, (figura 43). Foram medidos os desgastes de flanco máximo, o desgaste na guia cilíndrica e o desgaste do tipo cratera na superfície de saída. Os desgastes foram medidos ao longo da vida da ferramenta a cada 25 peças usinadas até as primeiras 100 peças e depois a cada 50 peças até o fim de vida. Cada ferramenta foi analisada nas superfícies de folga e na guia cilíndrica, como ilustrado na figura 44.

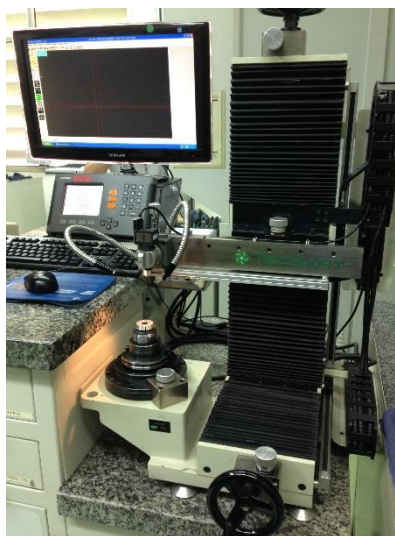


Figura 43 - Máquina de medição TecSart
Fonte: Departamento de desenvolvimento (Multinacional)

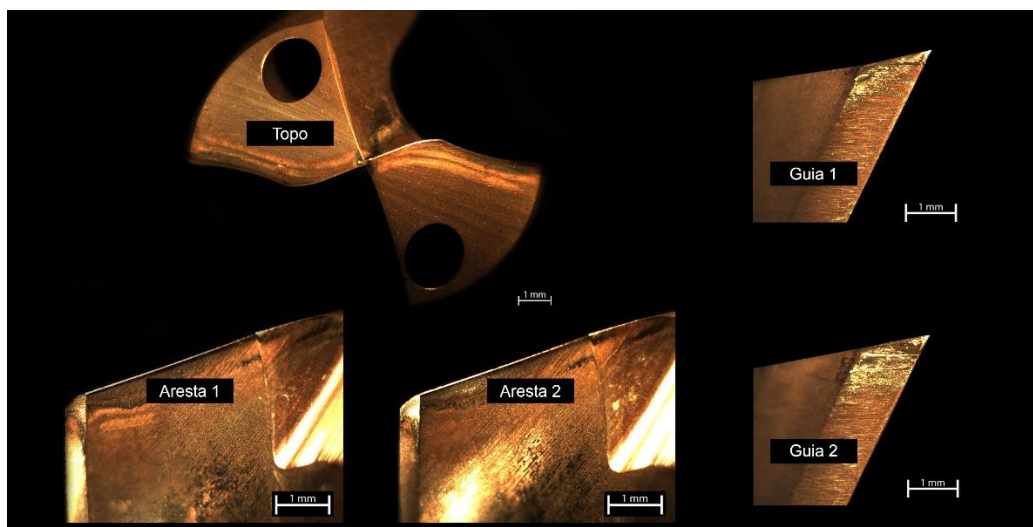


Figura 44 - Modelo de avaliação de ferramenta
Fonte: O autor (2019)

Na guia cilíndrica, devido a não uniformidade, o desgaste foi medido na forma de área, considerando toda a área desgasta, enquanto nas superfícies de folga, foi considerado o desgaste de flanco máximo.

No fim dos ensaios da terceira rodada de experimentos, os desgastes das ferramentas que alcançaram a vida definida de 600 peças (1200 furos) foram analisados no microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Veja 3 do fabricante Tescan. Antes das ferramentas serem levadas para análise todas foram cortadas por eletro erosão a fio (WEDM) na máquina Charmilles – Robofil 290 CNC (5 eixos programáveis), pertencente ao LAUS/PUCPR, em um comprimento de 20 mm devido a um requisito dimensional do MEV. Depois de cortadas, as ferramentas foram limpas em álcool e analisadas no MEV, onde foi detectado muito material aderido na superfície desgastada. Na sequência as ferramentas foram atacadas com ácido sulfúrico (H_2SO_4) em um tempo de 80 segundos, com intuito de remover o material aderido. As análises foram realizadas em ampliações de 200x, 1000x, 1500x e 8000x. As posições escolhidas para análise foram as mesmas usadas na medição do desgaste no microscópio óptico, ou seja, nas superfícies de folga e guias cilíndricas. Estas análises foram feitas em cada tipo de broca testada.

3.6 CRITÉRIO DE FIM DE VIDA

Para a primeira rodada dos ensaios foi adotado como critério de fim de vida o desgaste de flanco ou microlascamentos de 0,3 mm, sendo possível se apresentar tanto na superfície de folga ou na guia cilíndrica.

O desgaste de flanco (médio ou máximo) é comumente utilizado para controlar as condições da ferramenta de usinagem, no entanto para estes ensaios prevaleceu também o microlascamento, similar ao que ocorreu nos trabalhos de Santana (2015) e o Caitano (2016). O modelo adotado de medição do desgaste ou microlascamento pode ser visto na figura 45.

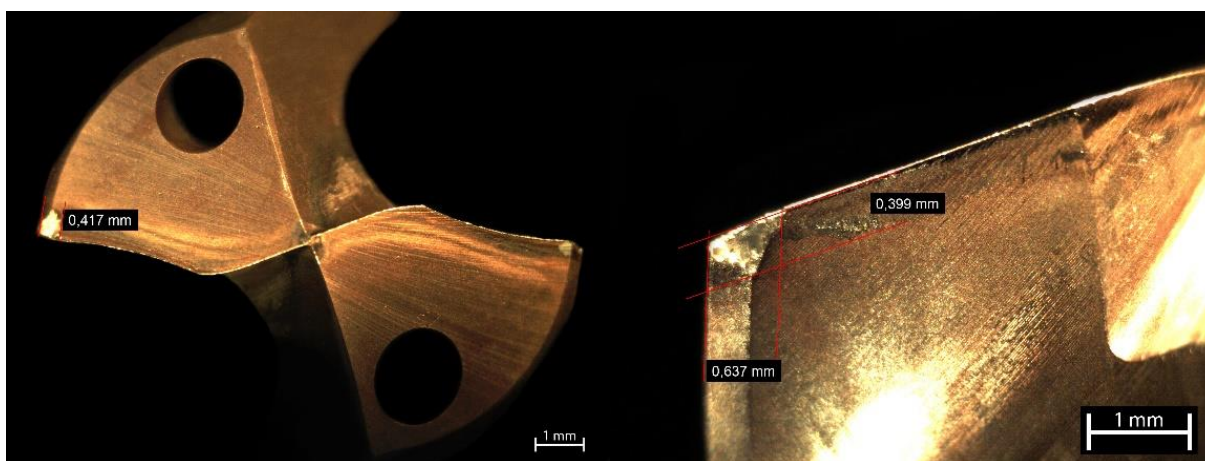


Figura 45 - Modelo de ferramenta no fim de vida
Fonte: O autor (2019)

3.7 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO FURO USINADO

Para a avaliação da qualidade dos furos usinados foram utilizadas as peças obtidas nas duas primeiras rodadas dos ensaios de vida das ferramentas descritos na seção anterior, considerando as médias encontradas.

Os itens avaliados nos corpos de prova bem como a frequência de medição são apresentados na tabela 16.

Característica Avaliada	Frequência de Medição
Análise Visual	Somente primeira peça
Análise Metalográfica	Somente primeira peça
Diâmetro	Primeira e a cada 50 peças
Circularidade	Primeira e a cada 50 peças
Posição	Primeira e a cada 50 peças
Rugosidade	Primeira e a cada 50 peças

Tabela 16 - Itens de qualidade dos furos avaliados e frequência de medição
Fonte: O autor (2019)

Para a análise metalográfica e visual dos furos da primeira peça produzida pelas ferramentas de cada processo de polimento foi definido avaliar somente o furo N. Foram realizados dois cortes nos corpos de prova (furo N) e as figuras 46 e 47 apresentam detalhes das duas posições avaliadas (corte longitudinal e corte transversal).

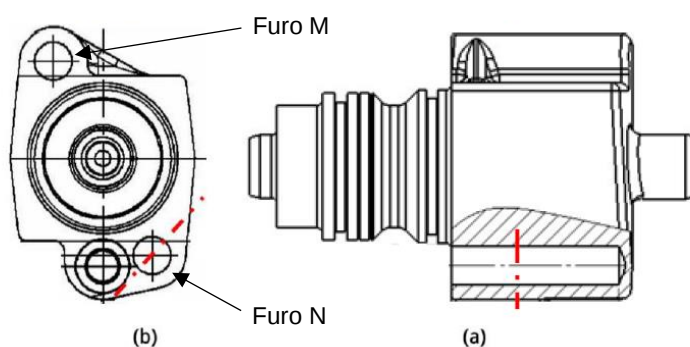


Figura 46 - Croqui dos cortes para análise metalográfica
Fonte: Adaptado (Multinacional)

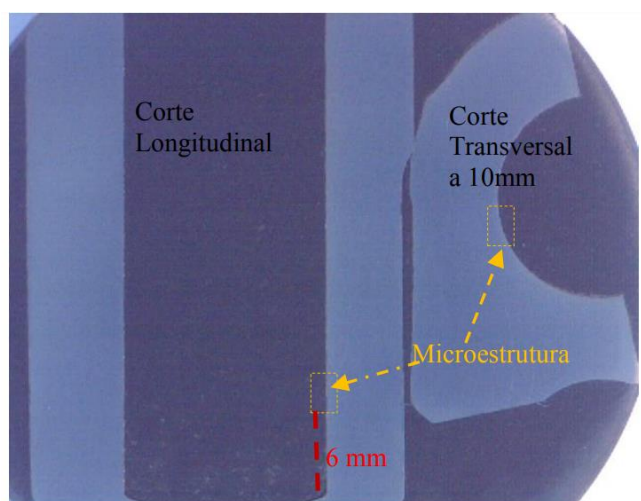


Figura 47 - Modelo de cortes para análise metalográfica
Fonte: O autor (2019)

Conforme mostrado na figura 47, para o corte longitudinal a posição de análise fica a 6 mm do fundo do furo, e para o corte transversal a posição de análise é a 10 mm do início do furo. Para realizar a análise metalográfica nas amostras, depois de embutidas, lixadas e polidas, foi utilizado o reagente Nital a 2% para o ataque químico. O objetivo dessa análise é avaliar e medir possível deformação plástica e camada branca no material. A análise visual foi realizada antes do embutimento das amostras longitudinais, com registro por foto para comparação.

As medições de diâmetro, circularidade e erro de posição foram realizadas em uma máquina tridimensional modelo Contura, com cabeçote Vast, do fabricante Zeiss. Para os três parâmetros avaliados foram realizadas duas medições em cada corpo de prova, uma a 5 mm do início do furo e outra a 40 mm do início do furo, avaliando-se os dois furos (M e N). Os resultados apresentados consideraram o segundo furo como sendo uma repetição do primeiro desconsiderando a pequena variação da geometria da peça. Os resultados de erro de posição consideraram somente um único valor, apesar de terem sido medidos a 5 mm e 40 mm da entrada do furo. Assim foi feito pois o objetivo é avaliar somente o desvio de posição (variação ao longo do furo) e não propriamente a posição absoluta, desta forma é possível eliminar qualquer influência de ajuste de máquina nos resultados.

As medições de rugosidade dos furos foram realizadas com um rugosímetro modelo Form TalySurf, Series 2 120i, do fabricante Taylor Robson Pneumo. Padronizou-se iniciar a medição a 5 mm do início do furo e utilizar 4,8 para o comprimento de avaliação bem como *cutoff* de 0,8 mm. Foram avaliados os dois furos de cada peça, considerado uma repetição, da mesma forma que os resultados dos parâmetros avaliados na máquina tridimensional.

3.8 AVALIAÇÃO DE OUTRAS VARIÁVEIS DO PROCESSO

Aqui foram avaliados os esforços (força de avanço e torque), a temperatura e análise do cavaco.

3.8.1 Torque e Força de Avanço

Para a análise da força de avanço e do torque foram preparados os 6 processos de polimento conforme descritos no capítulo 3.2.1.1 e usinados 3 furos com cada uma das ferramentas. Foi utilizado um centro de usinagem do fabricante Cincinnati Milacron modelo “Arrow 300” com fluido de corte Mobilcut 5% do fabricante Mobil, aplicado externamente. Foi utilizada uma plataforma dinamométrica modelo 9272, um amplificador modelo 5070, uma placa de aquisição de dados modelo 5697A e um software Dynoware® versão 2.6.3.12 todos do fabricante Kistler Instrument (conforme figura 48).



Figura 48 - Placa de aquisição de dados + amplificador e computador (à esquerda), Plataforma dinamométrica (à direita)
Fonte: LAUS (PUCPR)

No software Dynoware® os parâmetros utilizados foram 10 segundos de tempo de aquisição de sinais, o que, pelas condições usadas, permitiu a medição durante o tempo total do experimento; e frequência de aquisição de dados de 150 Hz.

Os parâmetros de corte utilizados foram os mesmos que são aplicados na linha de fabricação da empresa Multinacional, velocidade de corte igual a 81 m/min (2333 RPM), velocidade de avanço de 500 mm/min ($f_z = 0,107$ mm/dente) e a matéria prima utilizada para o experimento foi o aço SAE 4144M. Diferindo de como é utilizado na Multinacional o método de aplicação do fluido utilizado foi o jorro externo e não internamente a ferramenta e o comprimento usinado de cada furo foi de apenas 15 mm.

3.8.2 Temperatura

Para os ensaios de temperatura foram utilizados termopares soldados em uma barra laminada de aço ABNT 1020, com 1140 mm de comprimento e seção quadrada de 50,8 mm de lado, com dureza média de 120 HB. A utilização deste aço foi em função da disponibilidade dessa barra no LAUS/PUCPR, considerando que o material não é uma variável de ensaio e sim os tipos de preparação das brocas. Foram utilizados termopares do tipo “T” (Cu-Cu/Ni), com faixa de medição de -180°C a 370°C. Para realizar a soldagem do termopar na barra de aço, foi utilizado um dispositivo de descarga capacitiva micro controlada, pertencente ao LAUS/PUCPR, desenvolvido pela UNIFEI (figura 49).



Figura 49 - Dispositivo de descarga capacitiva micro controlada
Fonte: LAUS - Laboratório de Usinagem (PUCPR)

Os termopares foram soldados na lateral da barra de aço, no centro do furo. Foram utilizados dois termopares para cada furo, um a 5 mm, outro a 30 mm abaixo da superfície superior, como mostrado na figura 50.

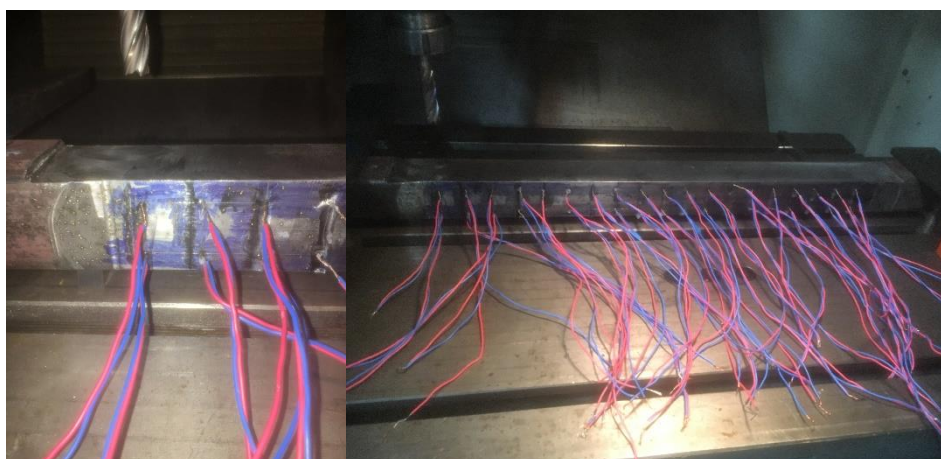


Figura 50 - Fixação dos termopares no corpo de prova
Fonte: O autor (2019)

Os parâmetros de corte utilizados nestes ensaios foram diferentes aos utilizados nos demais, pois os cortes foram realizados a seco, uma vez que a aplicação de fluido de corte afetaria os resultados da medição. Foram utilizadas velocidade de corte igual a 52 m/min (1500 RPM) e velocidade de avanço de 300 mm/min ($f_z = 0,1$ mm/dente), usinando 40 mm de profundidade. A saída da broca do furo foi realizada em movimento controlado (G01) de 300 mm/min. Os furos foram

posicionados a 0.5 mm da parede da barra e 10 mm de distância entre si, conforme figura 51.



Figura 51 - Barra de aço ABNT 1020 utilizada nos ensaios de temperatura
Fonte: O autor (2019)

Para o ensaio foi utilizada uma placa de aquisição de dados modelo 34970A do fabricante Agilent e o software Agile BenchLink Data Logger versão 1.4.000.512. A aquisição dos sinais dos dois termopares ocorreu durante todo o percurso de avanço da broca, desde o início até o final da operação, usando uma taxa de aquisição de 150 Hz.

3.8.3 Análise da Raiz do Cavaco

O processo de formação de cavaco tem grande importância para o estudo da usinagem. Alterando-se o tipo de preparação da broca e, conseqüentemente o acabamento da superfície de saída, a expectativa é de que a interação cavaco-ferramenta seja alterada também, devido ao fato de o tamanho da zona de aderência entre cavaco-ferramenta ter seu tamanho modificado.

Para realizar a análise da raiz do cavaco é requerida uma técnica que é chamada de parada rápida, utilizando um dispositivo conhecido por QSD, sigla em inglês para *Quick Stop Device*. Esta técnica consiste, em linhas gerais, em retirar o corpo de prova ou a ferramenta mais rápida que a velocidade de corte. Para este trabalho, foi utilizado um dispositivo desenvolvido por Moreno et al. (2013), pertencente à Unifebe. O dispositivo funciona por meio de uma morsa e duas molas comprimidas, de modo que quando acionadas por uma alavanca as respectivas energias atuam para a abertura da morsa, com velocidade elevada, no caso maior

que a velocidade de corte. O tempo para abertura da morsa é de aproximadamente 0,1 milissegundos (MORENO, 2013). Nesta ação, o corpo de prova gira junto com a broca, sem esforços atuando, deixando as raízes dos cavacos no final do furo disponíveis para análises. A figura 52 mostra o dispositivo, bem como onde é realizada a aplicação da carga para a abertura do dispositivo.

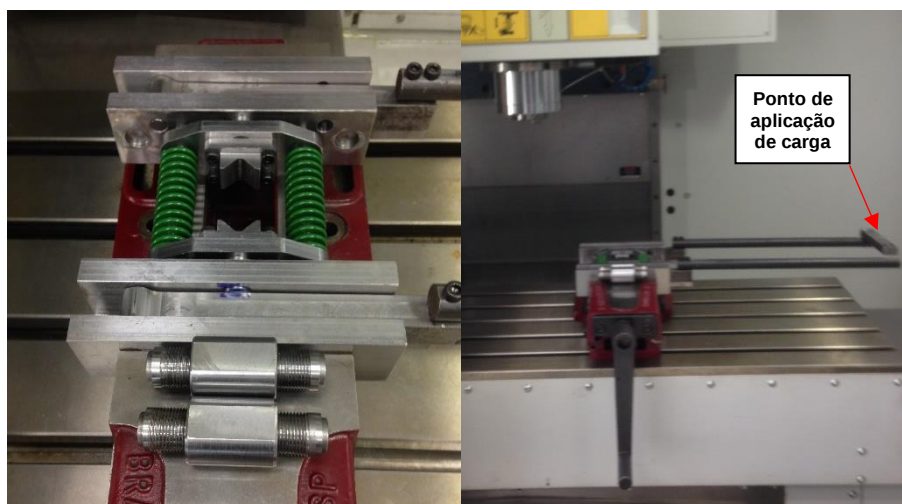


Figura 52 - QSD Furação - Quick Stop Device
Fonte: Laboratório de Usinagem (UNIFEFE)

O corpo de prova preparado para o ensaio de QSD é um cilindro com 22 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento, do aço ABNT 4144M. Para a realização do ensaio QSD foi utilizada a velocidade de corte de 81 m/min (2333 RPM) e foram utilizadas duas velocidades de avanço: 940 mm/min ($f_z = 0,201$ mm/dente) e 500 mm/min ($f_z = 0,107$ mm/dente). A usinagem foi realizada a seco. A figura 53 apresenta alguns dos corpos de prova obtidos nos ensaios QSD.

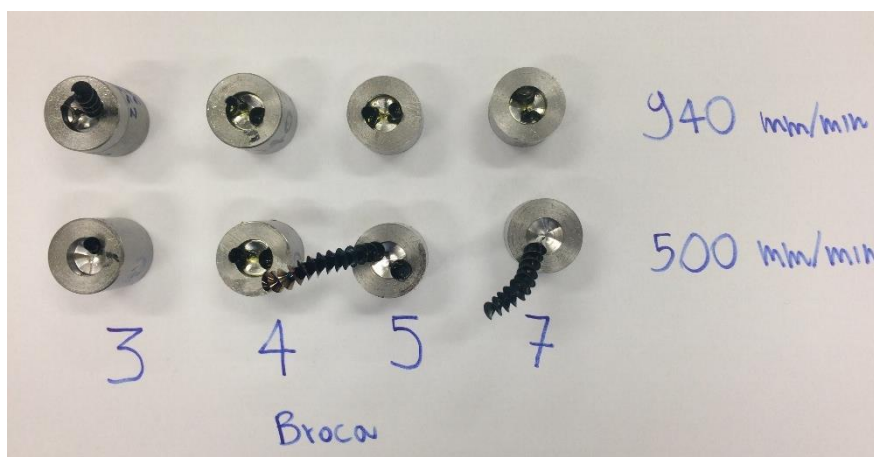


Figura 53 - Corpos de prova QSD
Fonte: O autor (2019)

Para ser possível a análise e obter os resultados é necessário realizar cortes nos corpos de prova de modo a que cada corte seja perpendicular ao fundo do furo, que é impactado diretamente pelo ângulo de ponta da ferramenta, e ao mesmo tempo perpendicular a aresta principal de corte ou transversal, dependendo onde se quer desenvolver a análise. Para a realização dos cortes, foi utilizada uma eletro erosão a fio modelo Robofil 290 CNC – 5 Eixos do fabricante Charmilles Technologies. As figuras 54 e 55 apresentam o desenho esquemático de como foram realizados os cortes. As figuras apresentam planos de análise perpendiculares entre si.

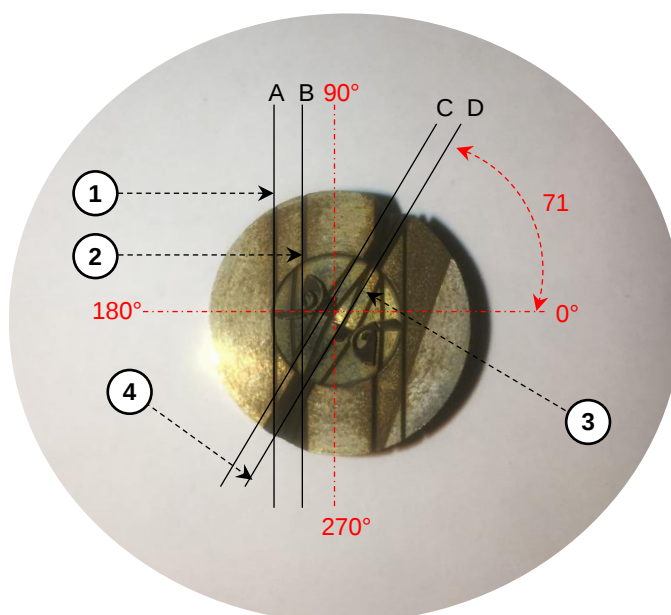


Figura 54 - Modelo de corte para a eletro erosão a fio – Plano A
Fonte: O autor (2019)

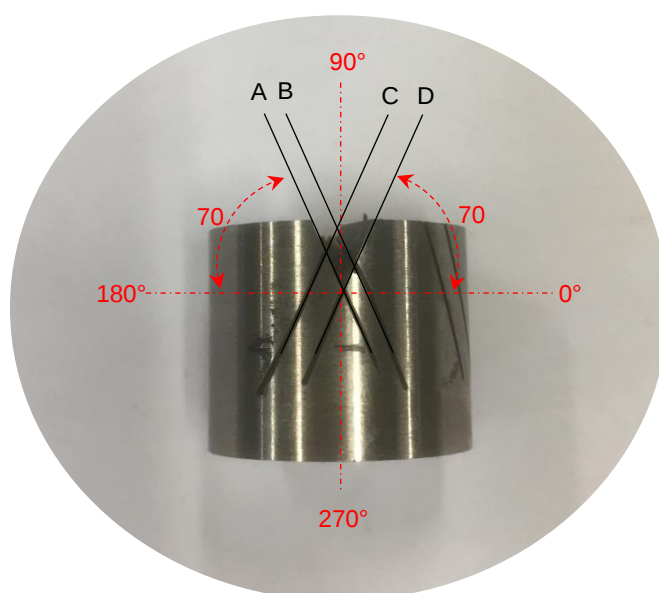


Figura 55 - Modelo de corte para eletro erosão a fio - Plano B (Perpendicular a A)
Fonte: O autor (2019)

Conforme cortes apresentados nessas figuras, foram obtidas 4 posições para cada processo de polimento ensaiado, sendo que na posição 4 só é possível analisar uma em cada amostra, pois resulta em um corte que ocupa a região da aresta transversal, diferindo das demais que ocupam a região da aresta principal de corte, sendo, portanto, possível avaliar as posições nas duas arestas de corte de cada corpo de prova.

Todas as posições de cada corpo de prova foram embutidas em baquelite, em uma máquina modelo PR-25 do fabricante Leco e avaliadas em um microscópio óptico modelo BX60 do fabricante Olympus. Para a obtenção das imagens em conjunto ao microscópio foi utilizado o software *analySYS*, versão 5.1 do fabricante Olympus. As medições das espessuras das raízes dos cavacos foram avaliadas no software *Image J*, versão 1.49v realizando duas medições para cada corpo de prova. A figura 56 mostra o padrão utilizado para realizar a medição da espessura do cavaco para as posições de espessura máxima e mínima. Para ambas posições a espessura máxima da linha no software foi utilizada para ser possível medir a espessura do cavaco perpendicularmente ao contato com a ferramenta. Outra referência utilizada foi de medir a espessura exatamente no ponto 1.

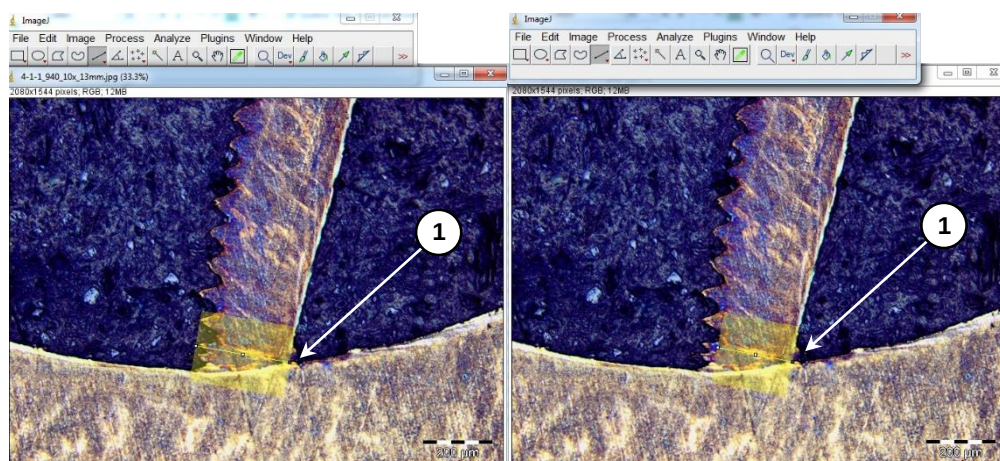


Figura 56 - Modelo de medição de espessura do cavaco – Espessura máxima (à esquerda) e mínima (à direita) - Corpos QSD
Fonte: O autor (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS

A figura 57 apresenta os resultados das medições do honing (raios de arestas) das ferramentas preparadas por cada processo de polimento, conforme tabela 15.

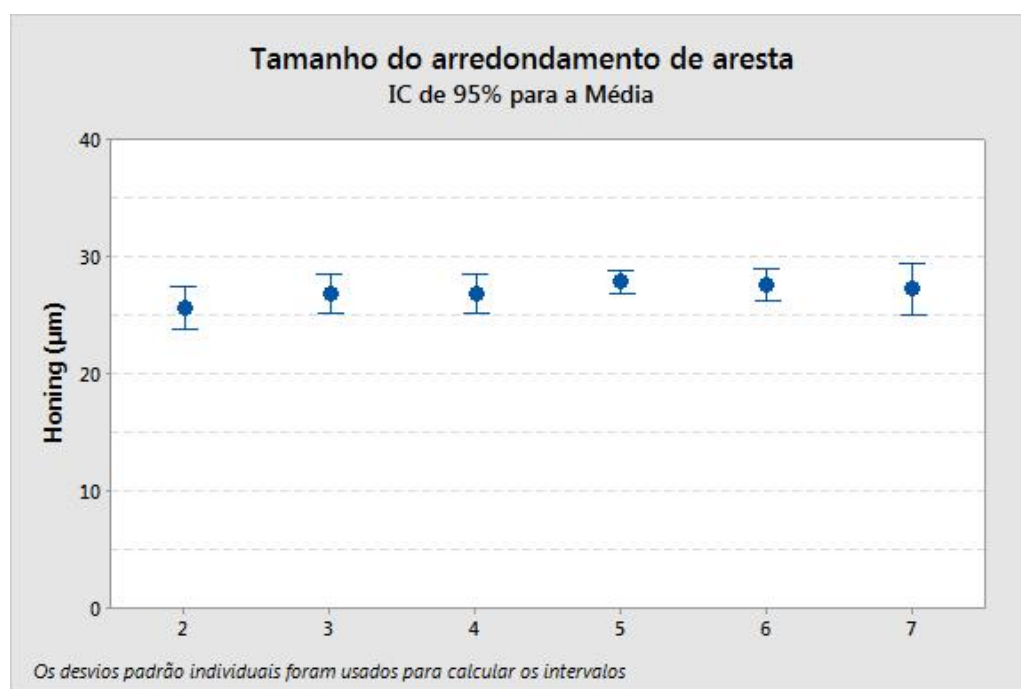


Figura 57 - Honing das ferramentas
Fonte: O autor (2019)

Conforme objetivo, os tamanhos do honing das ferramentas utilizadas se mantiveram em valores estatisticamente similares, considerando os desvios padrões. Portanto, pode-se afirmar que os raios de arestas das ferramentas não influenciaram nos resultados do comportamento dos parâmetros investigados neste trabalho.

4.1.1 Caracterização da superfície - Qualitativa

O teste com o pano foi realizado três vezes por três operadores diferentes sem o conhecimento deles sobre qual processo havia sido utilizado para preparar a ferramenta, a figura 58 apresenta o resultado classificando os processos de polimento em um ranking de “mais polido” para o “menos polido”.

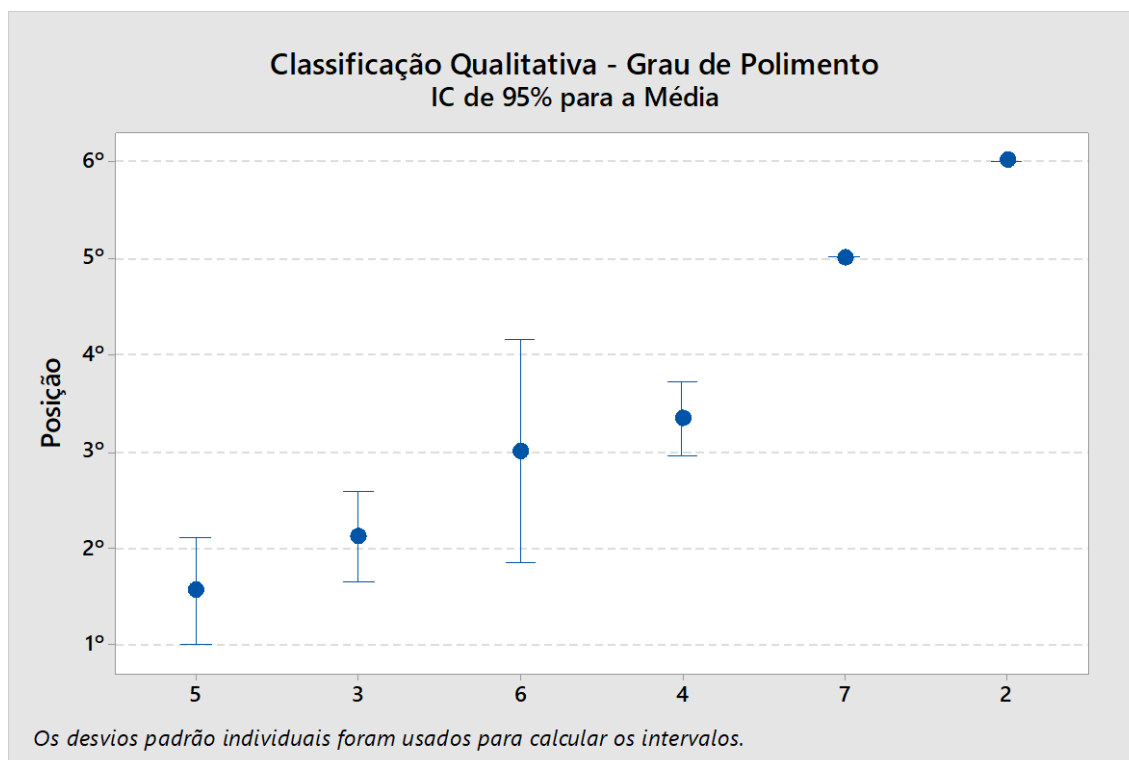


Figura 58 - Classificação qualitativa – Teste do pano
Fonte: O autor (2019)

Em termos de média, o processo 5 (muito polido – 20 minutos – Abrasivo HSC 1/300) foi classificado como o “mais polido” e o processo 2 (sem polimento) o “menos polido”. Realizando-se este teste é possível claramente separar uma ferramenta polida de uma não polida, sendo para todas as três rodadas de todos os operadores o processo 2 (sem polimento) foi classificado na última posição (desvio padrão igual a zero). No entanto para os processos 5, 3, 6 e 4 não é possível classificar ou avaliar uma diferença entre eles somente com o teste qualitativo, devido à grande semelhança entre eles no momento do teste. O processo 7 (pouco polido – 1 minuto – abrasivo H 4/400) também teve seu desvio padrão igual a zero e todos os operadores o colocaram em última posição dos processos que sofreram polimento, se aproximando muito do processo 2 (sem polimento), o que é justificado pelo pouco tempo de polimento aplicado para este processo (7).

A figura 59 mostra uma comparação visual entre os processos de polimento avaliados.



Figura 59 - Comparação visual processos de polimento
Fonte: O autor (2019)

É possível detectar uma diferença visual entre as ferramentas pela diferença de brilho entre os processos de polimento. Assim como a figura 57 é possível separar claramente uma ferramenta polida de uma não polida, no entanto no aspecto visual é possível classificar o processo 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) como sendo o que apresenta o maior brilho dentre todos e o processo 2 (sem polimento) o menor brilho, a figura 60 coloca os dois processos lado a lado para facilitar a comparação.



Figura 60 - Comparação visual processos de polimento – 2 (à esquerda) e 6 (à direita)
Fonte: O autor (2019)

Em geral, ambos os testes qualitativos apresentaram uma diferença entre os processos de polimento, no entanto somente com tais testes tal diferença não é passível de distinção quantitativa, portanto os capítulos seguintes fizeram-se necessários para explicar tais diferenças.

4.1.2 Caracterização da superfície - Rugosidade

Os resultados de rugosidade das guias e dos canais estão sendo apresentados em um mesmo gráfico, para facilitar a comparação entre ambos. Os gráficos apresentados nas figuras 110 a 126, do apêndice A comparam os diferentes tipos de preparação das brocas (diferentes tipos de polimento) mais detalhadamente, utilizando vários parâmetros tridimensionais de rugosidade.

Observa-se nas figuras 61 e 62 que as brocas sem polimento (processo 2) foram as que apresentaram os maiores valores médios de parâmetros de rugosidade Sp e Sz , tanto no canal (superfície de saída) como na guia cilíndrica. Considerando que Sp expressa o maior pico de rugosidade na área analisada e Sz a distância entre o maior pico e o maior vale na área de análise, esses resultados indicam que o polimento foi eficaz para reduzir os maiores picos de rugosidade das ferramentas para ambas posições de análise (Canal + Guia), apesar da variabilidade dos resultados (conforme barras de desvio padrão) indicarem igualdade estatística para alguns tipos de polimento.

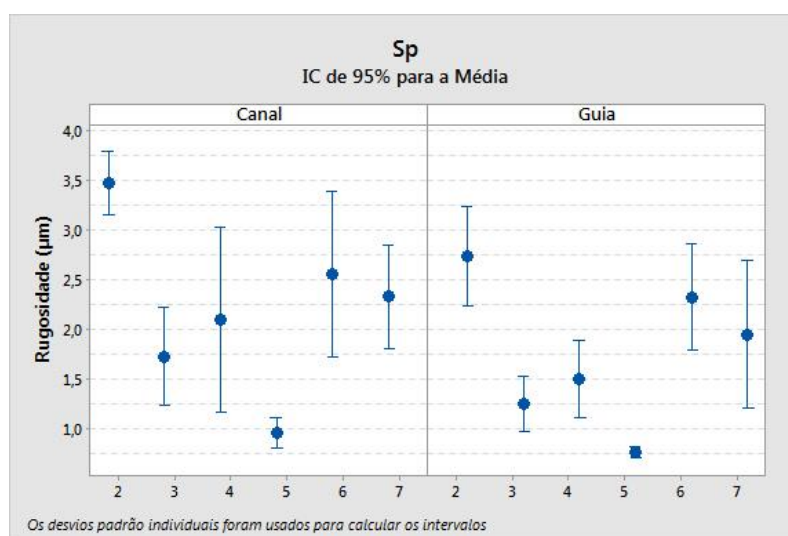


Figura 61 - Rugosidade Sp dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

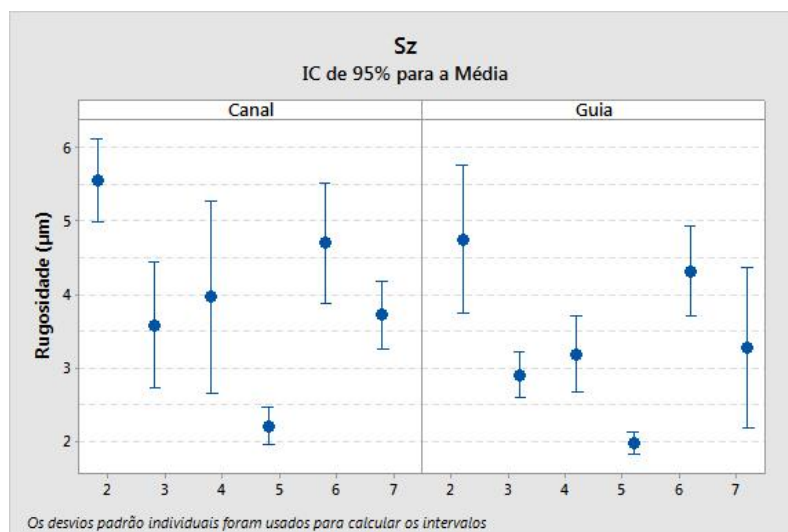


Figura 62 - Rugosidade Sz dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

Conforme descrito no capítulo 3, a resolução vertical do equipamento utilizado para obter os resultados de rugosidade foi de $0,159 \mu\text{m}$, portanto, qualquer resultado de rugosidade inferior a esta resolução não pode ter seu valor numérico levado em consideração. Para estes casos, outros métodos avaliativos devem também ser considerados. Assim, alguns resultados do apêndice A e da figura 63, devem ser usados apenas para uma análise comparativa.

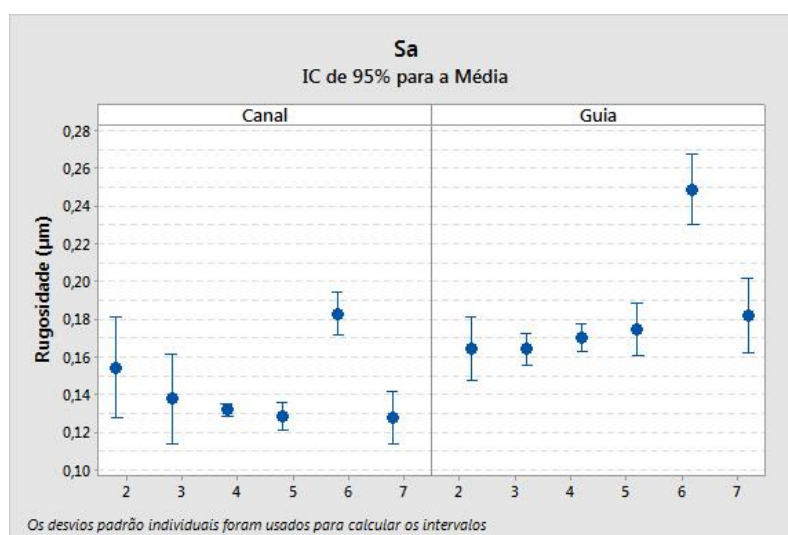


Figura 63 - Rugosidade Sa dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

Apesar de observar uma tendência do processo 2 (sem polimento) apresentar uma média superior as demais, não é possível criar uma correlação entre os resultados qualitativos apresentados na seção anterior com os resultados de

rugosidade apresentados nas figuras 61 a 63 e apêndice A. Conforme trabalho realizado por HUANG et al. (2011) a rugosidade do substrato é reproduzida “grandemente” para a rugosidade do revestimento, portanto a rugosidade do substrato contribuiu significativamente para os resultados apresentados nas figuras acima. Os estudos realizados por VICTOR (2012) apontam um incremento na rugosidade S_a na ordem dos centésimos de μm , quando comparado às amostras antes e depois do revestimento (realizando-se deposição do mesmo tipo de revestimento do atual trabalho). Tais resultados corroboram com os de Rosa (2013), onde além de os valores de rugosidade das ferramentas após o revestimento terem aumentado, houve a redução de tais valores após o polimento das ferramentas. Tendo em vista de que a ordem de grandeza apresentada na figura 63 entre a variação do processo 6 para o processo 5 encontra-se na ordem dos décimos de μm , é possível atribuir as rugosidades encontradas das figuras acima e no apêndice A à rugosidade do substrato (antes do revestimento).

O que pode ter contribuído para a variação da rugosidade do substrato entre a fabricação das ferramentas é que o rebolo que foi utilizado para afiação do canal foi dressado somente no início da fabricação das mesmas e somente a cada 3 ferramentas foi utilizada uma pedra abrasiva para “abertura dos poros do rebolo”. Além de o rebolo para retificação das guias das ferramentas também não ser dressado regularmente e não ter sido dressado para a fabricação das ferramentas.

Apesar das discussões realizadas no parágrafo anterior apontarem um norte do porque as rugosidades obtidas não estavam de acordo com a expectativa, um fato de que não se pode negligenciar é de que qualitativamente as ferramentas foram classificadas e foram separadas de acordo com um “grau de polimento” que foi observado pela restrição ao movimento do pano. Este teste é fundamental para mostrar que de alguma forma as ferramentas se diferem entre si e que a rugosidade medida das ferramentas não contribuiu significativamente para o resultado do teste qualitativo, portanto o capítulo seguinte se faz necessário para explicar tais discussões.

4.1.3 Caracterização da superfície - MEV

Com intuito de dar continuidade na investigação dos capítulos anteriores os processos de polimento foram avaliados em um microscópio eletrônico de varredura conforme descrito no capítulo 3.3. O resultado das análises está sendo apresentado nas figuras 64 e 65.

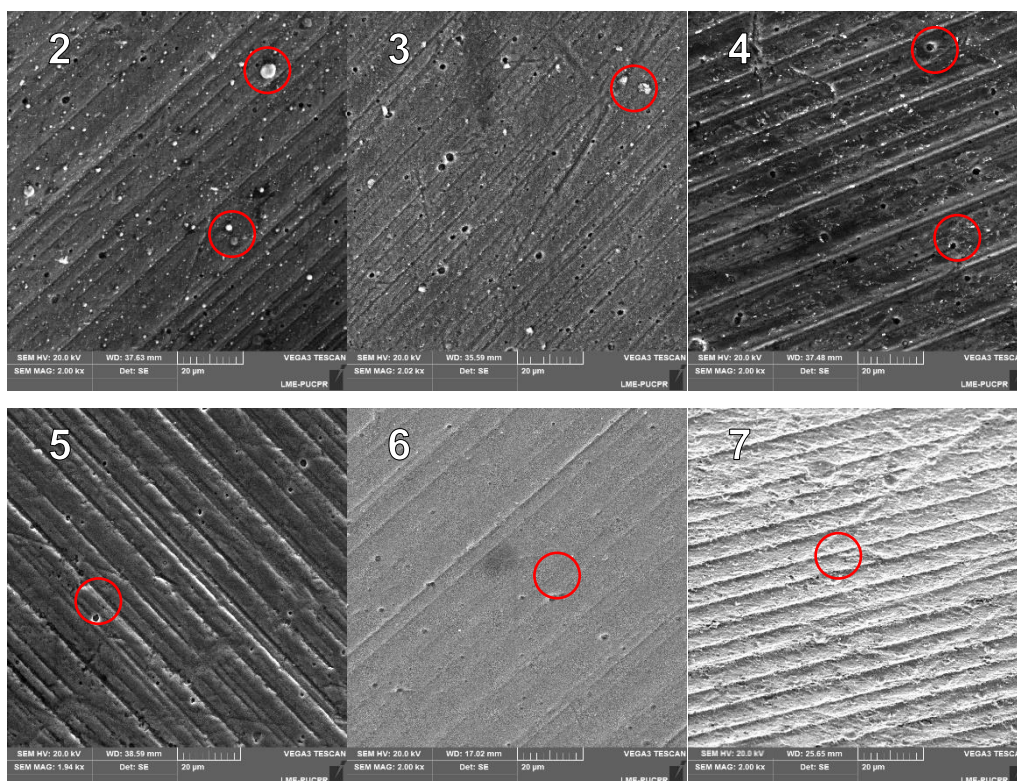


Figura 64 – Análise MEV – 2.000x – Canal das ferramentas
Fonte: O autor (2019)

Na região do canal (figura 64) é possível identificar em todos os polimentos as marcas de usinagem no substrato geradas pelo rebolo no processo de retificação realizado para abrir os canais da ferramenta. É possível também identificar a presença de micropartículas de revestimento (*droplets*) sobre a superfície das ferramentas (identificados pelos círculos vermelhos). Rosa (2013) também encontrou *droplets* sobre a superfície do revestimento Hélica (AlCrN) e apresentou figuras parecidas as 64 e 65, sendo que após o polimento a quantidade de *droplets* diminuiu, mas a de poros aumentou, podendo ter sido causado pelo arrancamento das micropartículas no processo de polimento.

Conforme figura 64, a quantidade destes *droplets* varia de acordo com o processo utilizado e o processo 2 (sem polimento) é o que tem a maior área de

droplets sobre área total, e os processos 5 (muito polido – 20 minutos – Abrasivo HSC 1/300) e 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) são os que apresentam a menor área de *droplets* sobre área total.

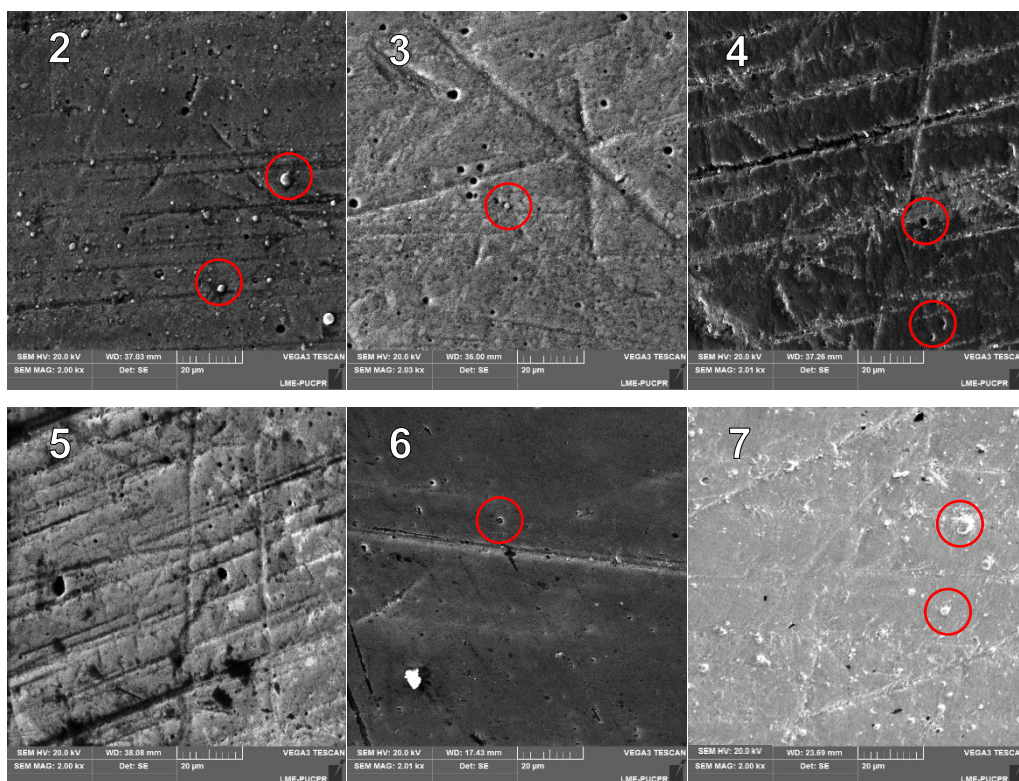


Figura 65 - Análise MEV – 2.000x – Guia das ferramentas
Fonte: O autor (2019)

Na região da guia (figura 65) é possível identificar os *droplets* (círculos vermelhos) sobre a superfície da ferramenta, da mesma forma que identificados na figura 64. Assim como na superfície de saída o processo 2 (sem polimento) foi o que apresentou a maior área de *droplets* sobre área total e os processos 5 (muito polido – 20 minutos – Abrasivo HSC 1/300) e 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) apresentaram a menor área de *droplets* sobre área total. A grande novidade em relação a região de saída da ferramenta é que o processo 7 (pouco polido – 1 minuto – abrasivo H 4/400) apresentou-se muito próximo ao que mais tem a presença de *droplets*, ou seja, está muito próximo ao processo 2 (sem polimento).

Os riscos encontrados nas superfícies das ferramentas, seja no processo 3 da figura 64 ou em todos os processos de polimento na figura 65 são resultantes do tamboreamento abrasivo do processo Drag Finishing, que antes do revestimento das ferramentas produz tais “imperfeições” sobre a superfície das mesmas.

As figuras 66 e 67 apresentam os resultados das medições realizadas conforme descrito no capítulo 3.3, quando foram realizadas três medições para cada imagem, pelo fato de que há uma definição do filtro que é manual.

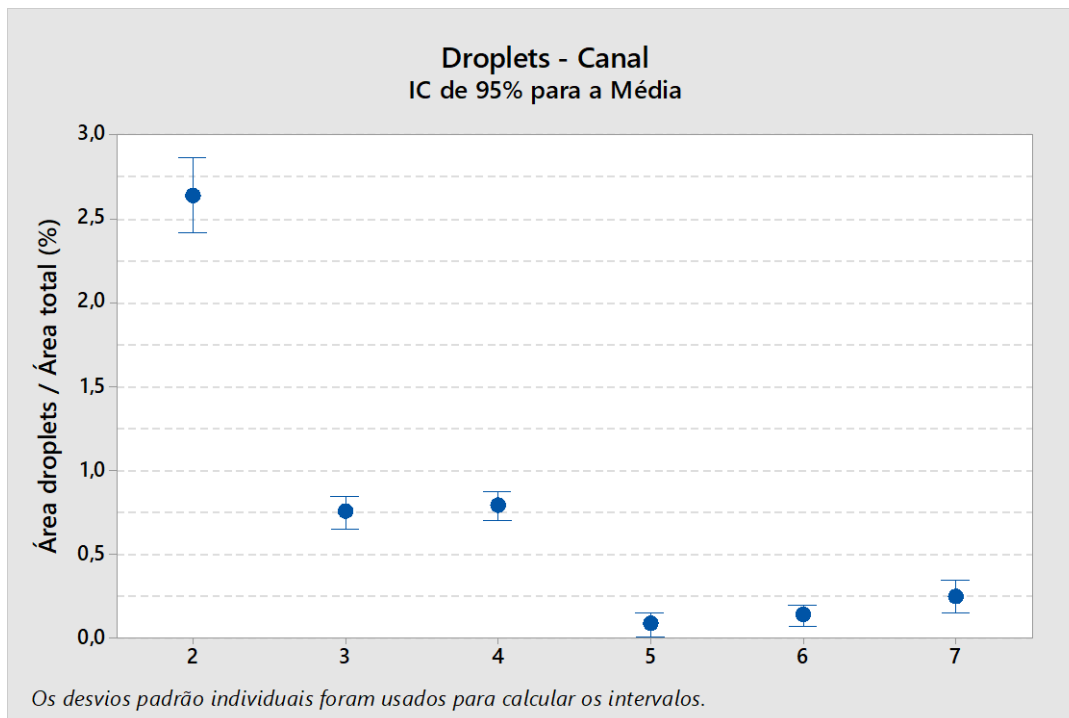


Figura 66 – Área de *droplets*/Área total – Canal
Fonte: O autor (2019)

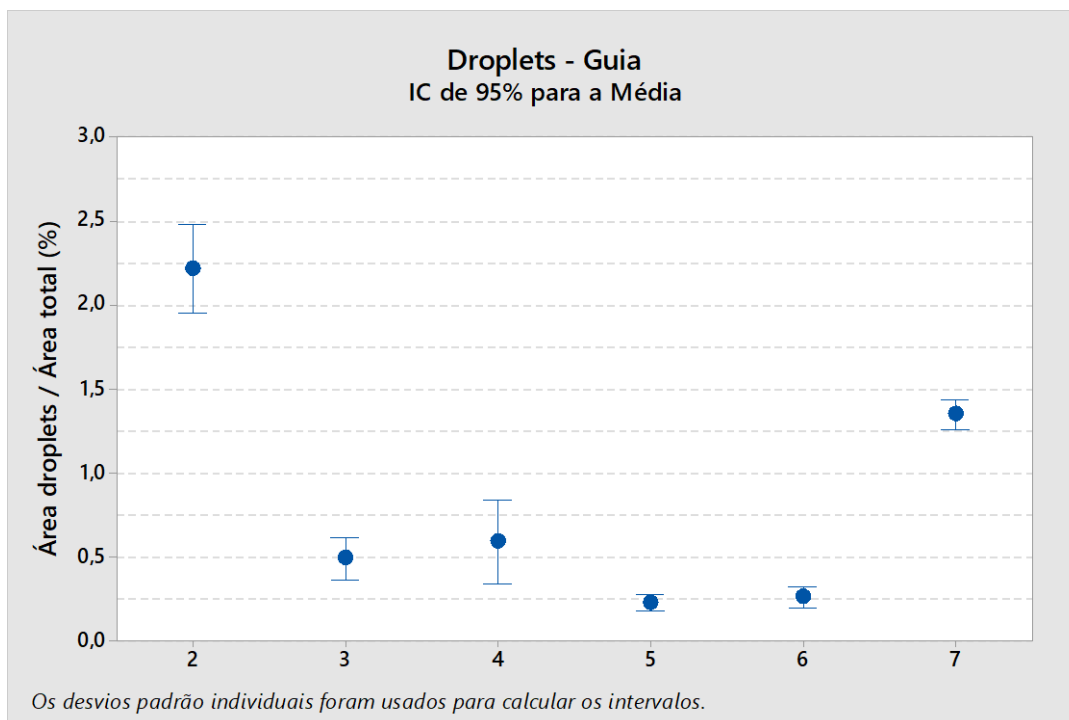


Figura 67 - Área de *droplets*/Área total – Guia
Fonte: O autor (2019)

Para ambas as posições (figuras 66 e 67) os processos 5 (muito polido – 20 minutos – Abrasivo HSC 1/300) e 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) apresentaram-se como tendo a menor área de *droplets* por área total e o processo 2 (sem polimento) foi o que apresentou a maior área de *droplets* por área total. O processo 2 representa em média uma quantidade de *droplets* 10 vezes superior aos polimentos 5 e 6. Os resultados das figuras 66 e 67 endossam e podem ser correlacionados com os encontrados pelos ensaios qualitativos. Na figura 58 os processos 5 e 6 foram classificados na primeira e terceira posição (respectivamente) e o processo 2 na última posição para o teste realizado com o pano. Assim como o processo 6 foi apontado como o mais polido no aspecto visual e o processo 2 menos polido.

De maneira geral, a área de *droplets* na superfície apresentou um resultado e classificou os polimentos exatamente igual ao encontrado pelos ensaios qualitativos o que não aconteceu para os resultados de rugosidade. Portanto, para a restrição ao movimento do pano (teste qualitativo) e ao aspecto visual a quantidade de *droplets* sobre a superfície tem maior influência do que a rugosidade do substrato das ferramentas (medidas de forma tridimensional).

4.2 AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM

Para discutir e entender melhor o processo de usinagem foi calculado o ângulo da direção efetiva de corte (η) de acordo com o diâmetro da ferramenta, iniciando de 0 mm até o diâmetro máximo de 11,05 mm, considerando o RPM de 2333. Apesar de ser comumente desprezado para determinados tipos de processo, a figura 68 apresenta uma variação do ângulo (η) para as diversas posições da ferramenta.

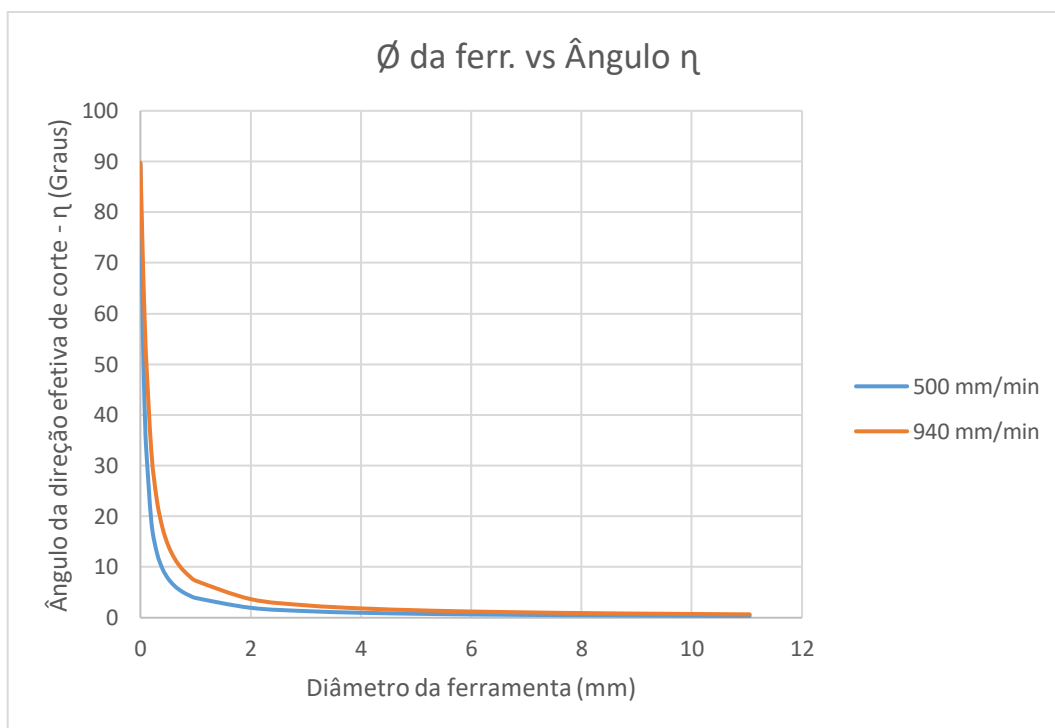


Figura 68 - Ø da ferramenta vs Ângulo η
Fonte: O autor (2019)

A partir de um diâmetro de aproximadamente 2 mm o ângulo da direção efetiva de corte tende a zero, devido a velocidade de corte ser quase 30 vezes maior que a velocidade de avanço, essa relação só tende a crescer quando se aumenta o diâmetro, chegando até o diâmetro máximo da ferramenta. Para diâmetros menores que 2 mm o ângulo da direção efetiva de corte cresce consideravelmente devido ao fato de que a velocidade tende a zero no centro da ferramenta (0 mm), portanto ao mesmo tempo que a velocidade de corte tende a 0 o ângulo da direção efetiva de corte tende a 90°. Um ângulo de 90° significa que nesta região da ferramenta o material está sendo cisalhado colinearmente à direção de avanço da ferramenta o que é um outro viés de explicação para o aumento dos esforços nesta região. Quando avaliado a geometria do cavaco nas diversas posições da ferramenta este resultado deve ser levado em consideração.

4.2.1 Avaliação de Força de avanço

Foram realizados os ensaios de análise de força de avanço e os resultados das médias encontradas para cada broca são apresentados na figura 69.

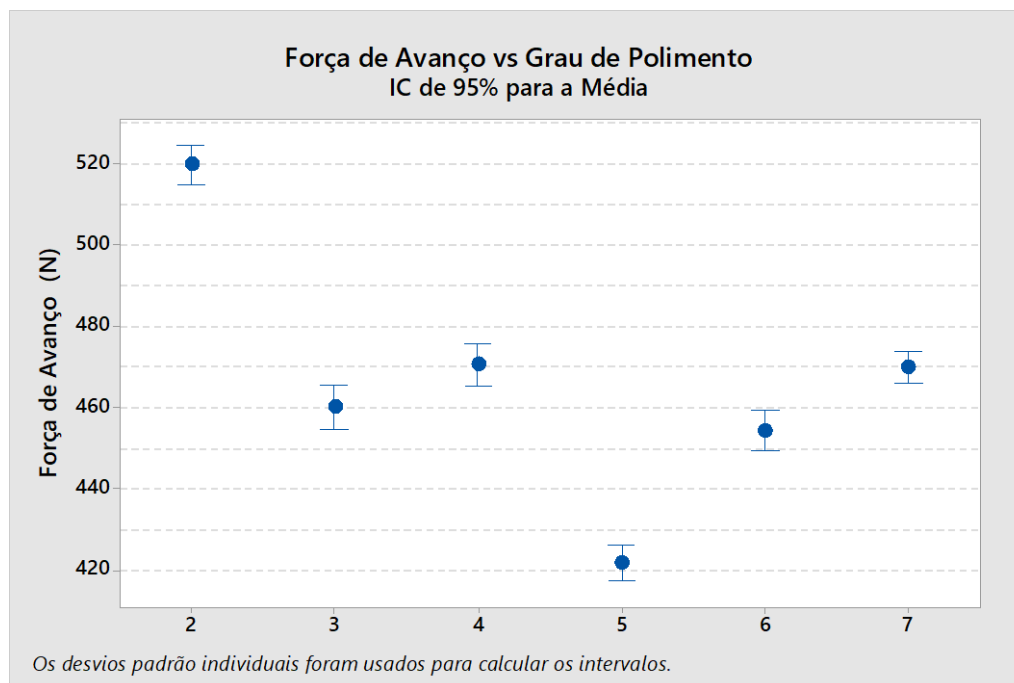


Figura 69 - Força de avanço vs Tipo de processo de polimento
Fonte: O autor (2019)

Observa-se nestes resultados que há uma correlação muito grande da força de avanço com a área de *droplets* na superfície da ferramenta (figuras 66 e 67). Conforme expectativa, o processo 2 (ferramenta sem polimento) foi o que apresentou as maiores forças de avanço, enquanto o processo 5 (Muito polido – 20 minutos – Abrasivo HSC 1/300) foi o que apresentou a menor força de avanço. Comparando os resultados do processo 2 com o processo 5 há aproximadamente 24% de redução da força de avanço em favor da broca com o polimento. É importante salientar que na composição da força de avanço nos processos de furação de aços, 70% da força é gerada no processo de esmagamento do material pela aresta transversal da broca e 30% pelo corte (formação do cavaco) na aresta principal (Boeira, 2010).

4.2.2 Avaliação de Torque

Foram realizados os ensaios de análise de torque e os resultados das médias encontradas para cada broca são apresentados na figura 70.

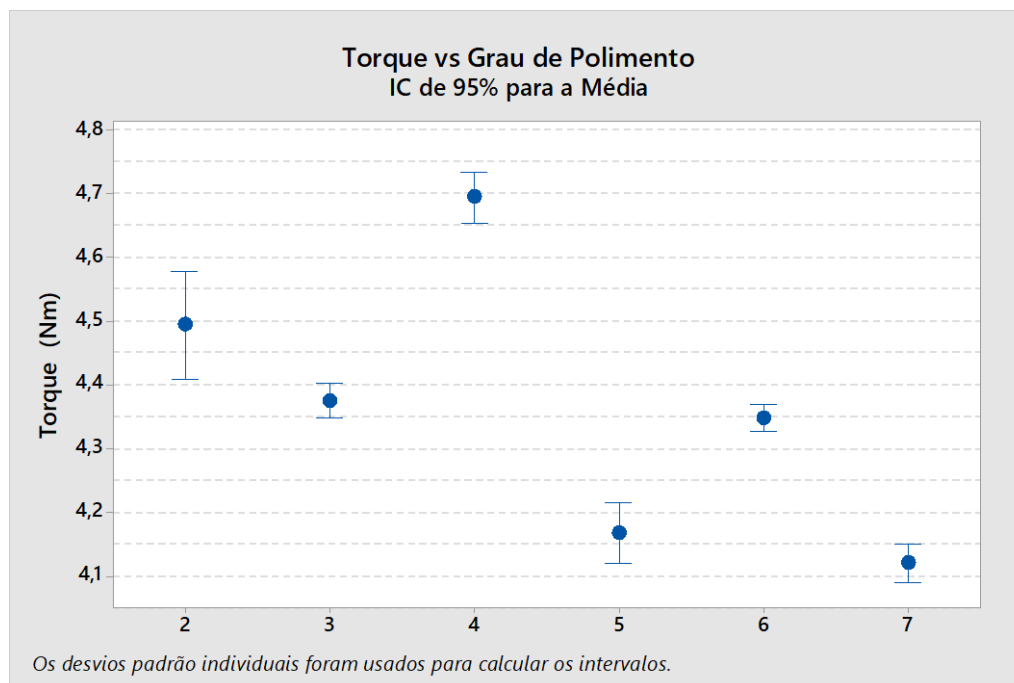


Figura 70 – Torque vs Tipo de processo de polimento
Fonte: O autor (2019)

O torque não seguiu a correspondência que a força de avanço teve com o acabamento dos canais e guias cilíndricas das brocas. O processo 4 (pouco polido – 5 minutos – abrasivo HSC 1/300) apresentou o maior torque e o processo 7 (pouco polido – 1 minuto – abrasivo H 4/400) apresentou o menor torque. Observa-se nas figuras 61 e 62 que estes dois processos de polimentos geraram valores intermediários de S_p e S_z nos canais e guias cilíndricas. Isto indica que o acabamento dessas superfícies são aspectos sem significância para o torque. Outros fatores, portanto, são responsáveis por estes resultados. Considerando que o torque é diretamente relacionado com a componente de força de corte (com muito menos influência do trabalho de esmagamento de material na aresta transversal), possivelmente o processo 7 (pouco polido – 1 minuto – abrasivo H 4/400) proporcionou as menores áreas de contato com o cavaco e peça e o processo 4 (pouco polido – 5 minutos – abrasivo HSC 1/300) as maiores.

4.2.3 Avaliação da raiz do cavaco

As figuras 71 e 72 apresentam as espessuras máximas e mínimas dos cavacos, respectivamente, formados durante a furação com brocas que passaram pelos diversos processos de polimento, medidos na posição 2 (conforme figura 54), com a velocidade de avanço de 940 mm/min. O processo 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) não será apresentado devido a um problema na preparação das amostras que resultou na impossibilidade de medição da espessura dos cavacos.

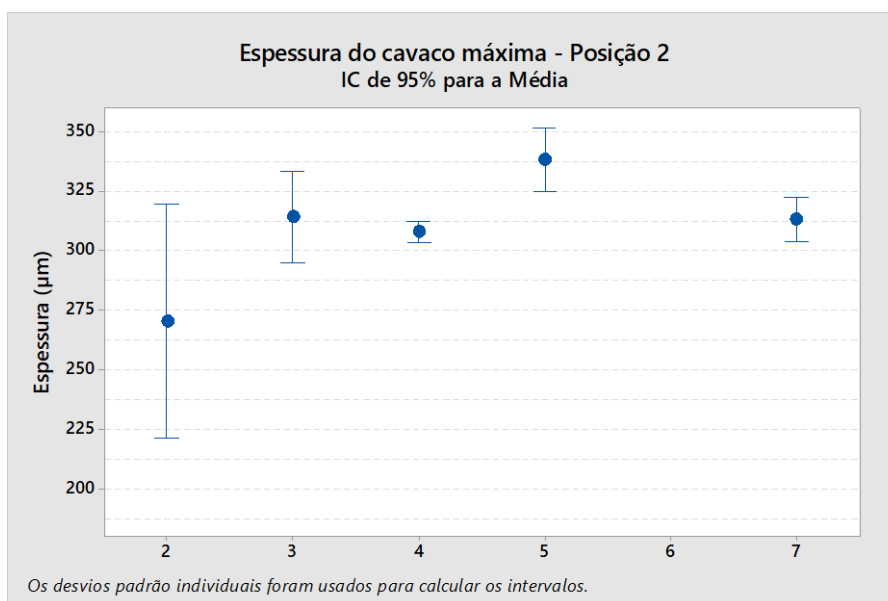


Figura 71 - Espessura do cavaco – Máxima – 940mm/min – Posição 2
 Fonte: O autor (2019)

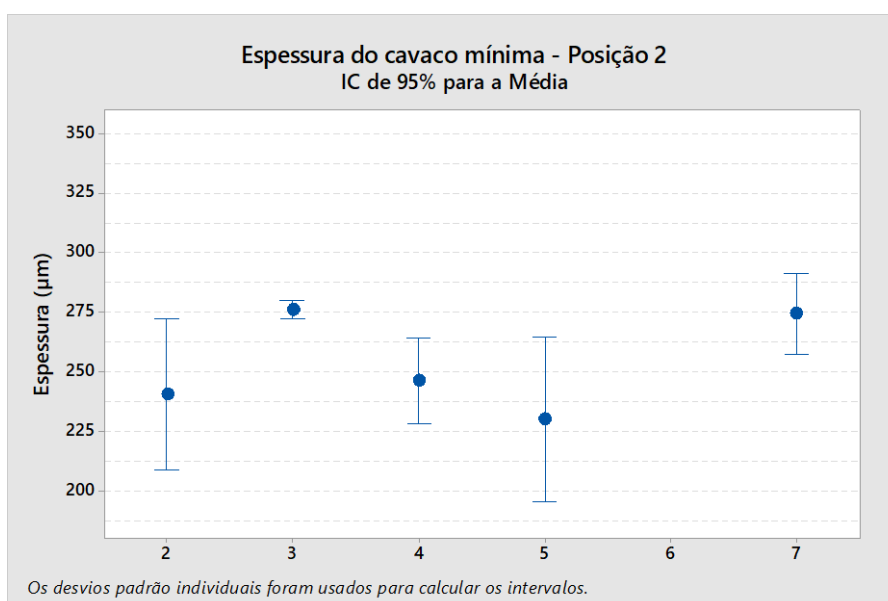


Figura 72 - Espessura do cavaco – Mínima – 940 mm/min – Posição 2
 Fonte: O autor (2019)

Apesar de contrapor a expectativa do trabalho o processo 2 (sem polimento) apresentou as menores espessuras máxima do cavaco, próximo a região de corte e o processo 5 (muito polido – 20 minutos – abrasivo HSC 1/300) as maiores. O processo 5 ao mesmo tempo que apresentou a maior espessura máxima do cavaco também é o que apresentou a menor espessura mínima do cavaco. A espessura mínima foi sempre medida na raiz do cavaco, junto ao plano de cisalhamento primário enquanto a espessura máxima é medida no cavaco a uma certa distância do plano de cisalhamento primário, conforme figura 73. Nesta figura, é nítido que para os processos 4 e 5 houve a redução dessa espessura do cavaco na raiz junto, ao plano de cisalhamento primário, causado pelo processo de desengate da broca com a peça, no momento do acionamento do QSD. Portanto, a análise deve ser focada nas espessuras máximas dos cavacos, onde não há a interferência do processo de geração das amostras.

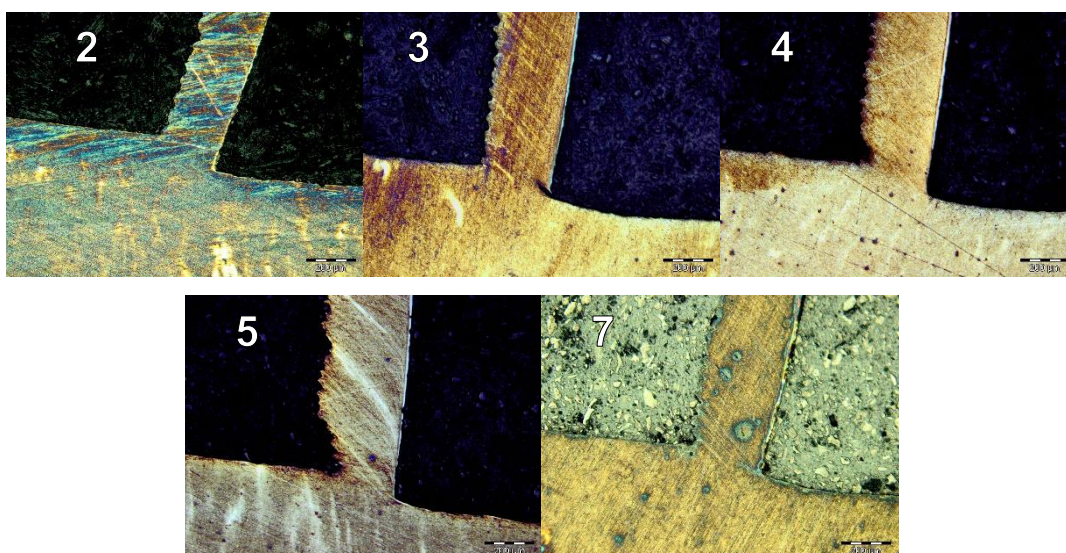


Figura 73 - Raízes dos cavacos produzidos com os diferentes processos, velocidade de avanço de 940 mm/min - Posição 02
Fonte: O autor (2019)

A maior espessura de cavaco, h' , apresentado pelo processo 5, significa um maior grau de recalque, que por sua vez, maior deformação sofrida no plano de cisalhamento primário. Normalmente, este maior grau de recalque, implica em maior energia necessária para formar o cavaco, que depende da temperatura (MACHADO, et al., 2015). Entretanto, ao se observar os resultados da figura 70, o processo 5 apresentou menor torque que o processo 2, o que não corrobora para explicar os resultados de grau de recalque. Entretanto, nota-se na figura 94, que apresenta a temperatura da peça no início do furo (considerando que o resultado mostra a

temperatura no início do furo sendo mais representativa que a temperatura do final do furo, uma vez que a posição no início do furo recebe um input maior de energia das fontes de calor durante todo o percurso de avanço da broca), que na comparação dos processos 2 e 5, o processo 5 apresentou temperatura média mais baixa (mais baixa que todos os demais processos de polimento). Essa maior geração de calor na usinagem com a broca preparada pelo processo 2, pode estar favorecendo o cisalhamento, gerando menores graus de recalques.

Foram feitos ensaios para geração de amostras QSD para a velocidade de avanço de 500 mm/min também. A figura 74 mostra as raízes dos cavacos gerados pelo processo 3 (polimento manual) para os avanços de 500 e 940 mm/min e a tabela 17 apresenta os valores das espessuras dos cavacos. Conforme expectativa (MACHADO et al., 2015), a condição de maior avanço produziu cavacos mais espessos e grau de recalques menores.

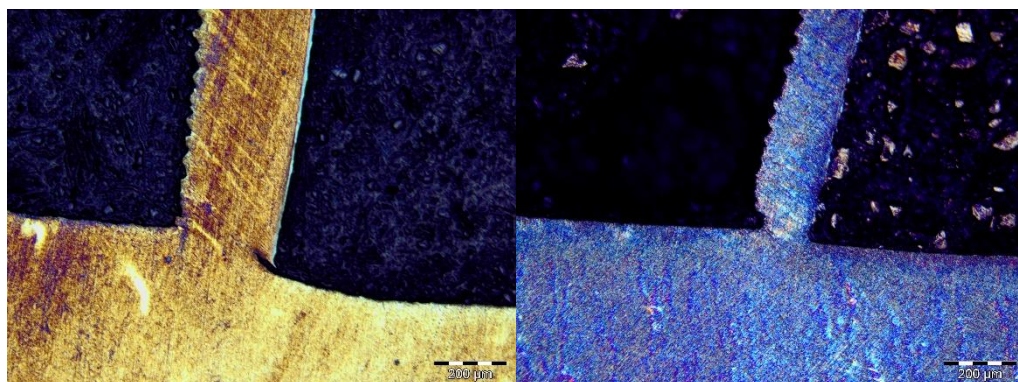


Figura 74 - Processo 03 – Posição 02 - 940 mm/min (à esquerda) e 500 mm/min (à direita)
Fonte: O autor (2019)

	500 mm/min	Rc ₅₀₀	940 mm/min	Rc ₉₄₀
Espessura mínima	0,132 mm	1,65	0,274 mm	1,61
Espessura Máxima	0,185 mm	2,31	0,303 mm	1,78

Tabela 17 - Espessuras dos cavacos produzidos pelo processo 3 e graus de recalques para as duas velocidades de avanço utilizadas
Fonte: O autor (2019)

Para se ter uma ideia da variação das raízes dos cavacos ao longo da aresta principal, a figura 75 apresenta as fotos das amostras obtidas nas 4 posições de análise (ver figura 54) com a broca preparada pelo processo 4 utilizando avanço de 940 mm/min.

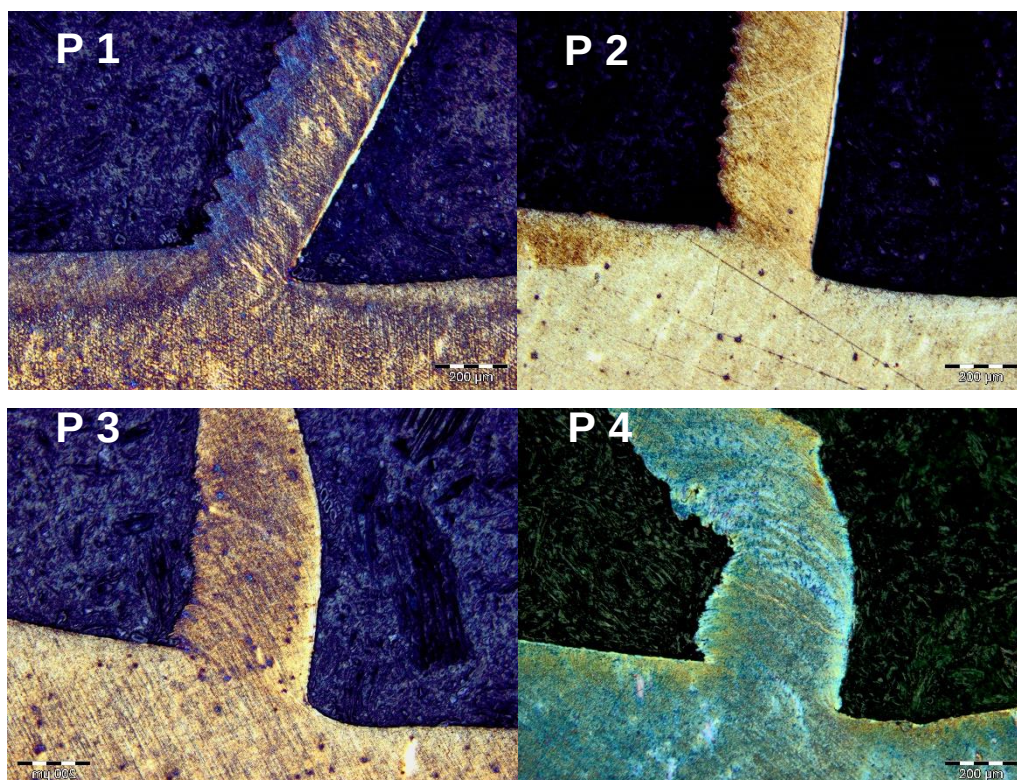


Figura 75 - Amostras QSD produzidas pelo processo 4, observadas nas 4 posições de análise, para $v_f = 940$ mm/min
Fonte: O autor (2019)

Visualmente observa-se que a espessura do cavaco e, conseqüentemente, o grau de recalque é modificado de acordo com a posição da aresta principal avaliada. Nota-se também que o cavaco se apresenta com maior grau de serrilhamento, nas posições mais externas da broca (posições 1 e 2, figura 54), onde a velocidade de corte é maior. Na região 4, devido a geometria da aresta transversal e a direção efetiva do corte tender a 90° (colinearmente a direção de avanço), conforme discutido anteriormente, o cavaco se mostra completamente diferente, tendo uma mudança abrupta no seu ângulo em poucos milímetros.

4.2.4 Avaliação de Vida

A figura 76 apresenta os resultados de vida para a primeira rodada de experimentos onde foi utilizado um critério de fim de vida da ferramenta de 0,3 mm para o desgaste de flanco.

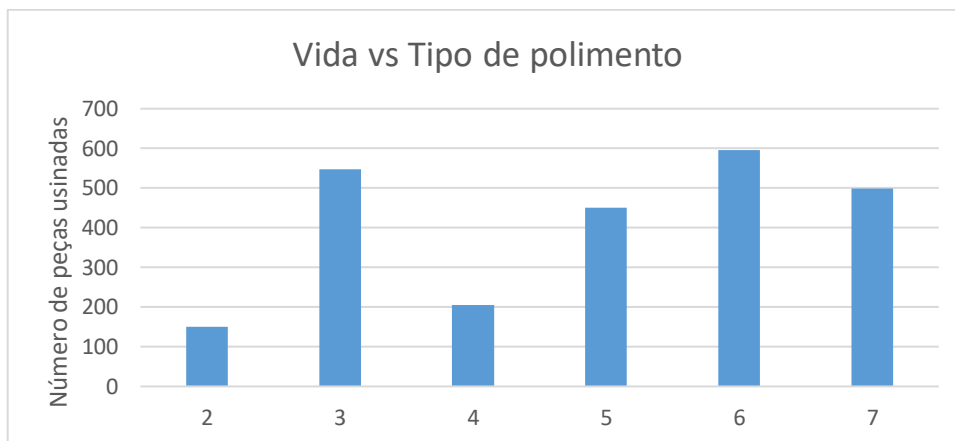


Figura 76 – Vida das brocas preparadas pelos diferentes processos de polimento
Fonte: O autor (2019)

Considerando o critério de fim de vida, o processo 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) foi o que apresentou maior vida – 595 peças usinadas (1190 furos) em um dos testes e o processo 2 (sem polimento) foi a que apresentou a menor vida – 150 peças usinadas (300 furos).

O processo 2 foi o único que no primeiro ensaio de vida apresentou lascamento do escalonado, conforme figura 77, ultrapassando o critério de fim de vida prematuramente. Os processos 3 (polida manualmente), 5 (muito polido – 10 minutos – abrasivo HSC 1/300) e 7 (pouco polido – 1 minuto – abrasivo H 4/400) apresentaram vidas próximas de 500 peças (1000 furos) nos dois ensaios.

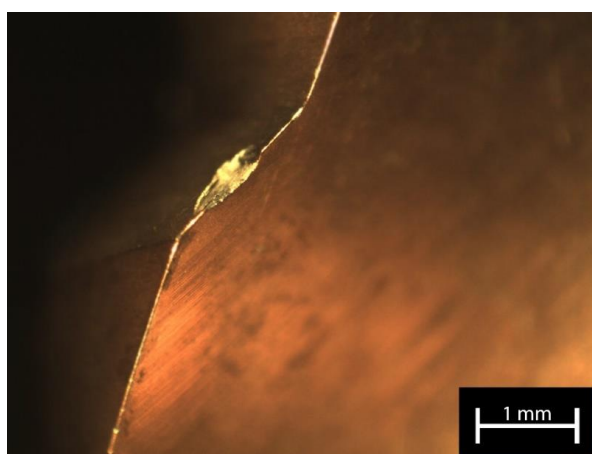


Figura 77 - Lascamento da ferramenta do processo 02 - 150 peças
Fonte: O autor (2019)

4.2.5 Análise de desgaste – Microscópio óptico

A figura 78 apresenta imagens da superfície de saída (canal) das ferramentas usadas nos ensaios da segunda rodada, onde todas as ferramentas foram levadas para vida de 500 peças com intuito de comparar o desgaste. Nestas fotos, ao contrário das vistas da superfície de folga principal, é possível identificar desgastes de cratera em todas as ferramentas. Bem próximo à aresta de corte é possível observar a perda por desgaste do revestimento na superfície de saída das brocas.

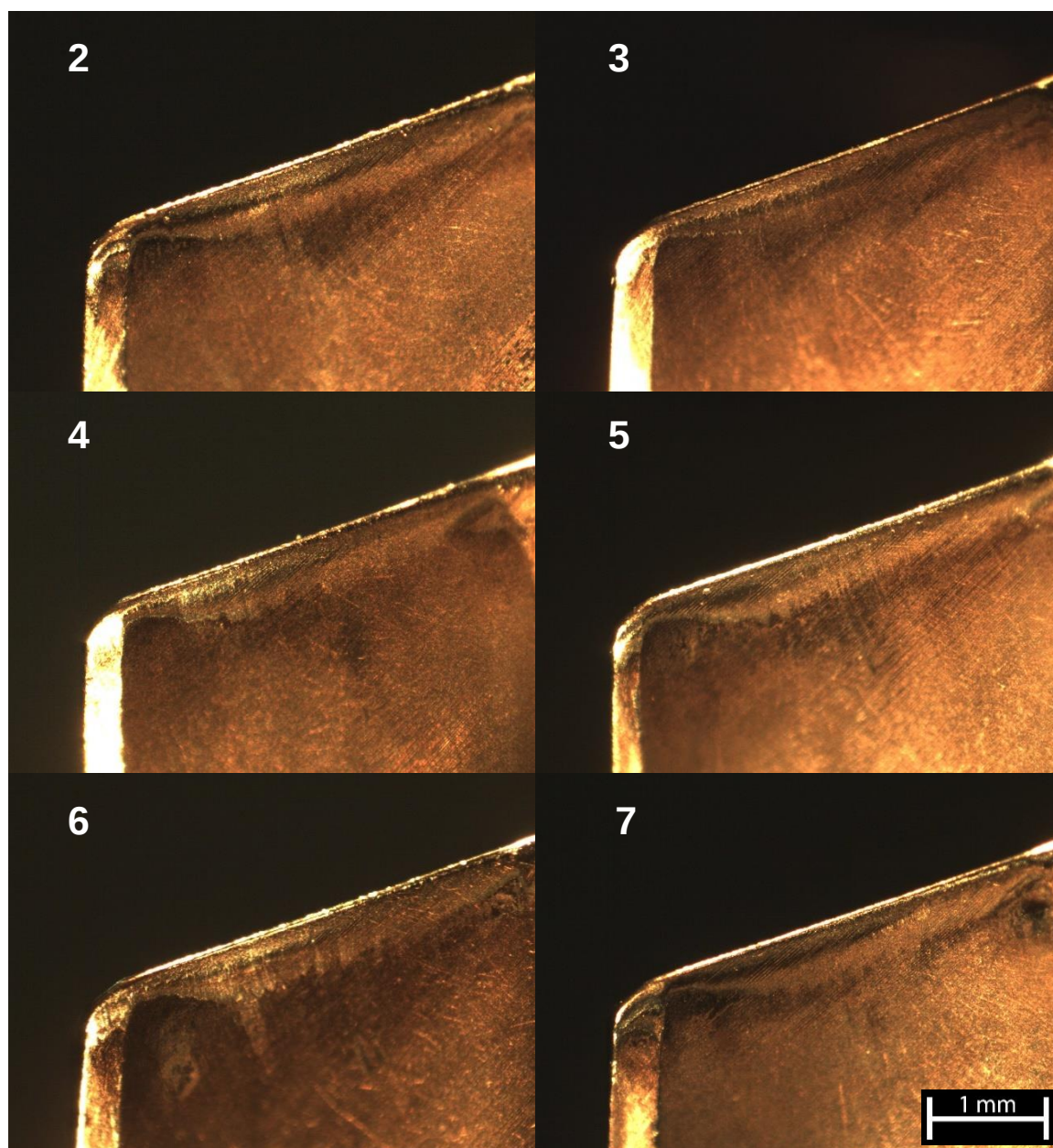


Figura 78 - Vistas das superfícies de saída das brocas após a usinagem de 500 peças (ou 1000 furos)

Fonte: O autor (2019)

A figura 79 apresenta a média e os desvios padrões das larguras dos desgastes de cratera, considerando as duas arestas de corte da broca. Observa-se que o processo 2 (sem polimento) foi o que apresentou menor média de largura da cratera e os processos 4 e 5 (polimento automático – abrasivo HSC 1/300) as maiores.

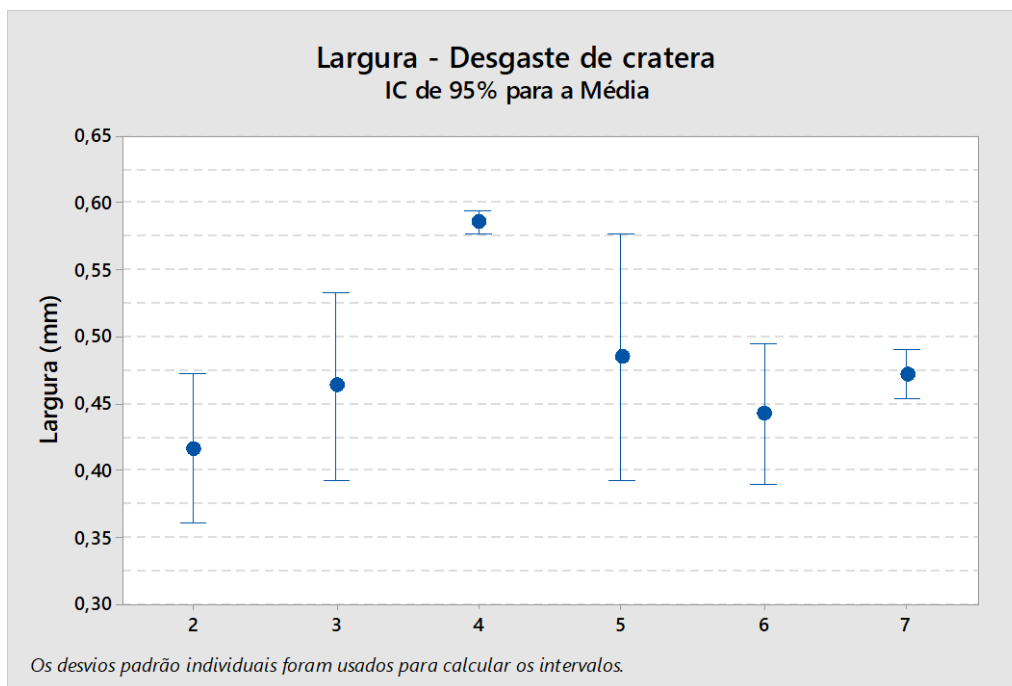


Figura 79 - Largura da cratera após a usinagem de 500 peças (1000 furos).
Fonte: O autor (2019)

A figura 80 apresenta fotos da guia cilíndrica, na região das proximidades da aresta principal de corte, para todas as brocas testadas. Nesta superfície da broca, devido ao desgaste ter atingido toda a largura da guia cilíndrica das brocas, ao invés de um comprimento de desgaste foi medido a área desgastada.

Os resultados das médias e dos desvios padrões dessas áreas, considerando as duas arestas de corte das brocas, são mostrados na figura 81. Na guia cilíndrica os processos 3 (polida manualmente) e 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) foram os que apresentaram maiores desgastes e os processos 2 (sem polimento), 4 e 5 (polimento automático – abrasivo HSC 1/300) e 7 (pouco polido – 1 minuto – abrasivo H 4/400) os menores.

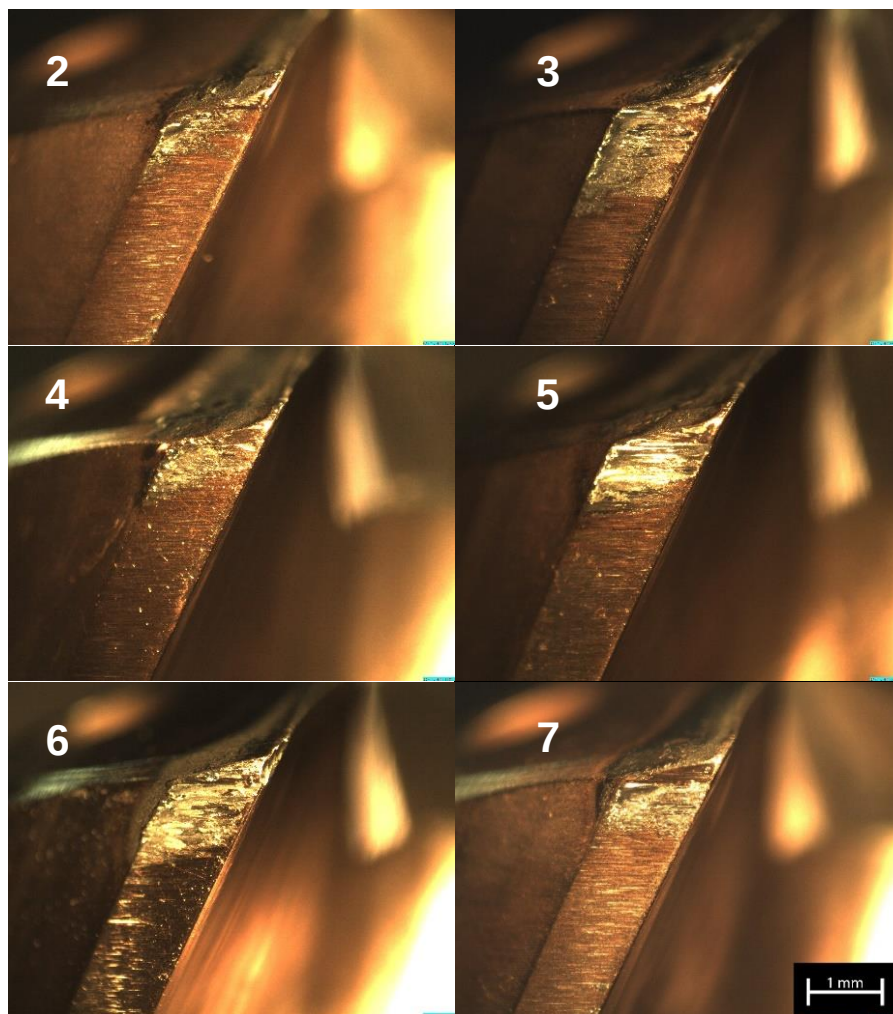


Figura 80 - Guia cilíndrica das brocas após usinagem de 500 peças (1000 furos).
Fonte: O autor (2019)

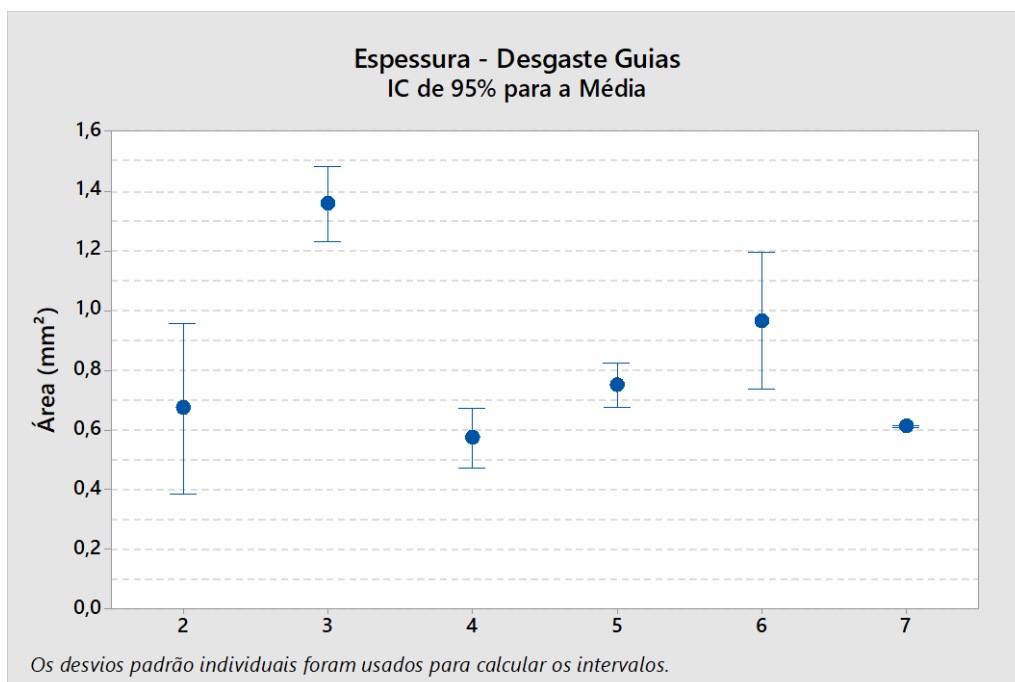


Figura 81 - Área desgastada na guia cilíndrica após a usinagem de 500 peças (1000 furos)
Fonte: O autor (2019)

4.2.6 Análise de desgaste – MEV / EDS

Para melhor compreender o comportamento das ferramentas quanto aos desgastes, as brocas foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura – MEV e por espectroscopia de energia dispersiva - EDS, para identificar os mecanismos de desgaste envolvidos. É importante comentar que as análises no MEV das ferramentas dos diferentes processos de polimento (2 a 7) apresentaram muita semelhança entre si, quanto às características e mecanismos dos desgastes predominantes, indicando que apenas a taxa do desgaste pode ter sido alterada.

Somente as brocas da terceira rodada foram avaliadas no MEV, portanto as ferramentas que alcançaram a vida de 600 peças (1200 furos) foram avaliadas neste capítulo, sendo elas o processo 2, o 3 e o 7. Portanto, os resultados e discussões que se seguirão serão a respeito da comparação dos 3 processos.

Nas análises no MEV verifica-se a presença de material aderido na superfície de folga principal da ferramenta, conforme pode-se verificar na figura 82 e na tabela 18. Foram feitas algumas análises de EDS nas regiões indicadas na figura, cujos resultados são apresentados na tabela 18. A presença de oxigênio revela a formação de óxidos na superfície da ferramenta.

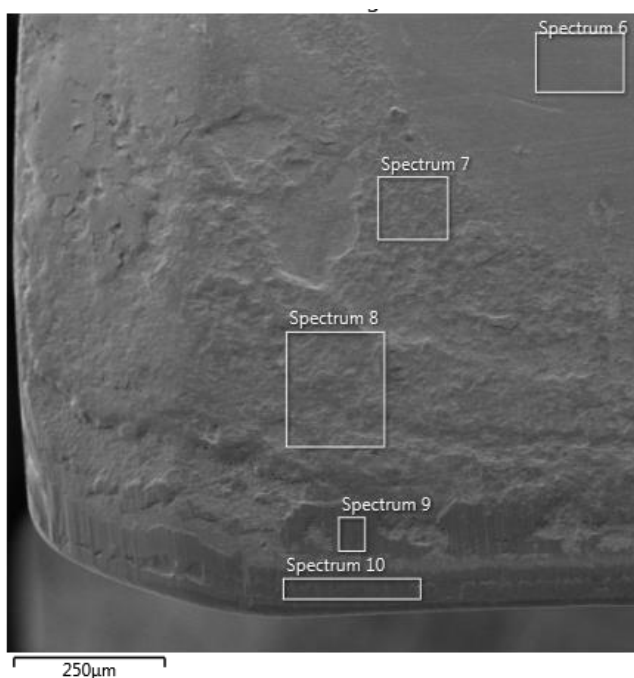


Figura 82 - Vista no MEV da superfície de folga principal de uma das arestas da broca - Processo 7

Fonte: O autor (2019)

	O Wt%	C Wt%	Cu Wt%	N Wt%	P Wt%	Mg Wt%	Na Wt%	S Wt%	Al Wt%
Spectrum 6	48,50	25,30	9,10	8,10	6,40	2,80	-	-	-
Spectrum 7	49,50	37,50	-	-	-	3,20	0,80	-	-
Spectrum 8	38,80	44,40	11,00	-	2,50	-	-	3,20	-
Spectrum 9	50,40	35,00	-	-	8,90	2,60	3,10	-	-
Spectrum 10	51,20	32,00	-	-	-	-	-	-	16,80

Tabela 18 - Resultados das análises de EDS para broca - Processo 7 (figura 82)

Fonte: O autor (2019)

Os espectros de 6 a 10 identificam a presença de P, Mg, Na e S na superfície da ferramenta, o que evidenciam material da peça aderido na superfície da ferramenta, pois tais elementos provêm do material da peça.

A figura 83 mostra a superfície de folga principal da ferramenta do processo 3 (polida manualmente) antes (à esquerda) e depois (à direita) de ser atacada por ácido sulfúrico por um tempo de 80 segundos para retirada do material aderido em diferentes ampliações. As fotos da direita desta figura provam que o ataque foi eficaz para a remoção do material aderido à superfície das ferramentas, possibilitando visão mais clara da área desgastada e análise correta dos mecânicos de desgaste envolvidos.

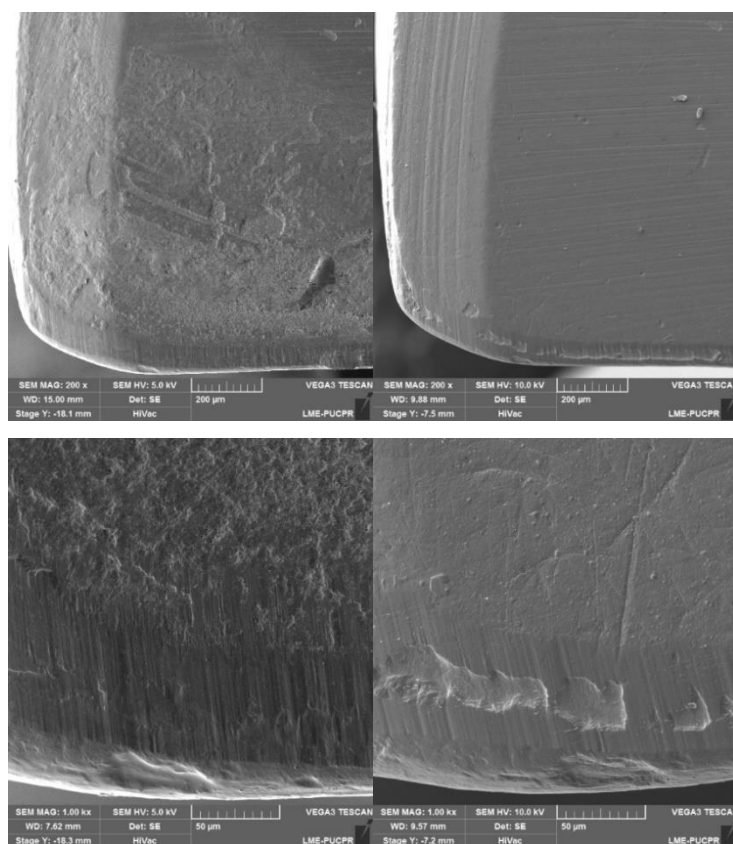


Figura 83 – Vista da superfície de folga principal da ferramenta – Processo 3 - Antes do ataque (à esquerda) e depois do ataque (à direita) com ampliações de 200x (acima) e 1000x (abaixo)

Fonte: O autor (2019)

Observa-se nas fotos da superfície de folga com maior ampliação (1000x) e após o ataque químico, que as superfícies apresentam sulcos paralelos ainda no revestimento da ferramenta, característicos do mecanismo de desgaste abrasivo. Outro detalhe são os microlascamentos identificados na aresta de corte e também na superfície de folga, estes últimos estavam camuflados pelo material da peça aderido, antes do ataque químico. Estes microlascamentos atingem o substrato, onde a aparência áspera indica que o mecanismo adesivo (também conhecido por *attrition*) predomina nestas regiões e, possivelmente são fontes de partículas duras para promover a abrasão no revestimento na sequência, como já comentado.

A figura 84 apresenta a região de desgaste na superfície de folga principal da ferramenta do processo 2 (sem polimento), após o ataque químico para remoção do material aderido. Nesta ferramenta o desgaste em formação próxima à aresta de corte é nitidamente observado.

O mecanismo de “Abrasão” pode novamente ser evidenciado antes e depois da cratera devido a características dos sulcos paralelos entre si e perpendiculares a aresta de corte. O mecanismo “Attrition” ou “Adesão” também é observado na região da cratera que atingiu o substrato, pois ela apresenta característica áspera, indicando a remoção característica deste mecanismo, que é o arranchamento de grãos de carbonetos da superfície. Microlascamentos também são evidentes nesta broca.

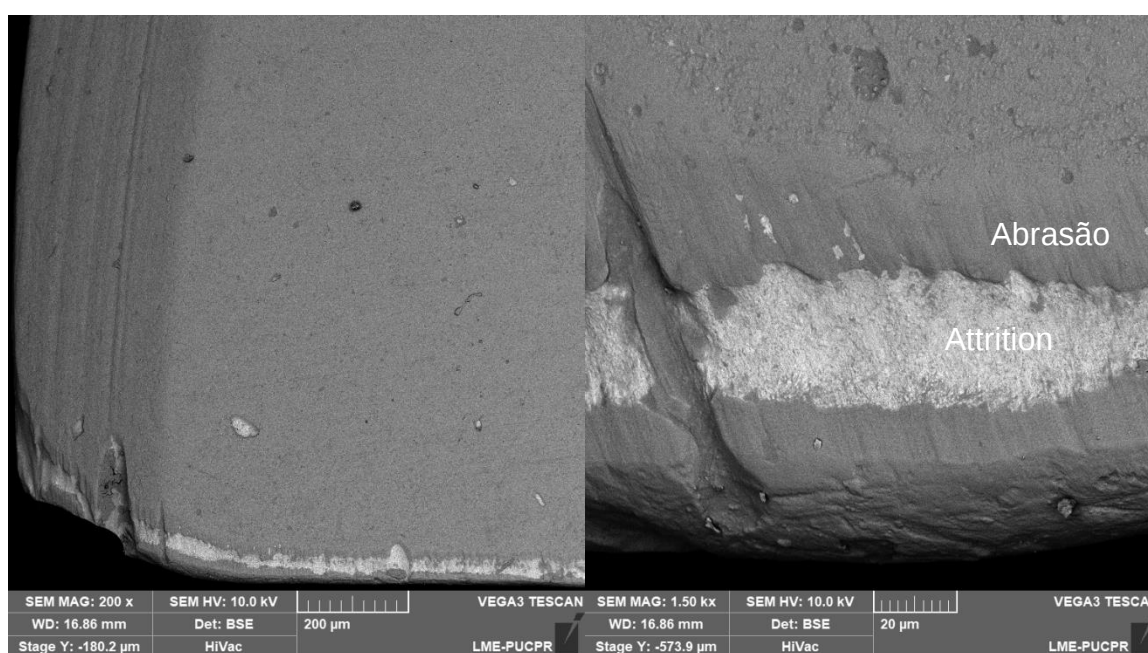
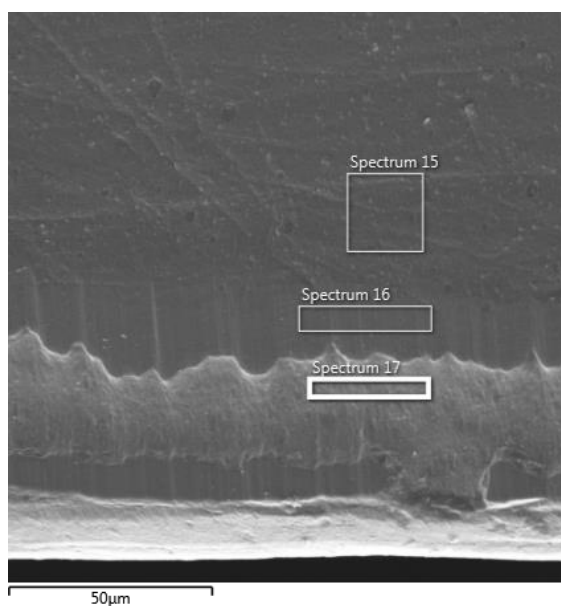


Figura 84 – Vista geral (à esquerda) do topo da ferramenta após o ataque químico e detalhe do desgaste de flanco (à direita) – Processo 2
Fonte: O autor (2019)

O desgaste de flanco ocorre pelo contato com atrito da superfície de folga da ferramenta e a peça. A penetração da cunha da ferramenta na peça juntamente com a recuperação elástica desta garante o contato e a possibilidade de desgaste. O aumento do ângulo de folga pode diminuir o desgaste de flanco apresentado acima, no entanto, a ferramenta poderá ser fragilizada, tendo em vista que o ângulo de cunha, neste caso, se reduzirá.

A figura 85 apresenta a superfície de folga da ferramenta do processo 3 (polida manualmente) e a figura 86 mostra os mapas de EDS desta mesma ferramenta (processo 3) identificando os elementos especificados.

Com base nos resultados do EDS nos espectros 15 e 16 identificados na figura, observa-se que se trata do revestimento. Na região do espectro 15, praticamente não há desgaste, aparecendo somente elementos que compõem a última camada do revestimento Hélica®, com índice predominantemente de Titânio.



	O Wt%	Ti Wt%	Si Wt%	C Wt%	N Wt%	V Wt%	Al Wt%	Cr Wt%	Al Wt%	W Wt%
Spectrum 15	46,2	45,7	2,9	2,3	1,9	0,6	0,4	-	-	-
Spectrum 16	44,5	19,3	1,4	3,7	-	-	13,5	17,5	-	-
Spectrum 17	30,3	-	-	5,0	-	-	-	-	-	64,5

Figura 85 - Vista da superfície de folga da ferramenta do processo 3 após a usinagem de 600 peças (1200 furos), após ataque químico e resultado do EDS nos pontos indicados

Fonte: O autor (2019)

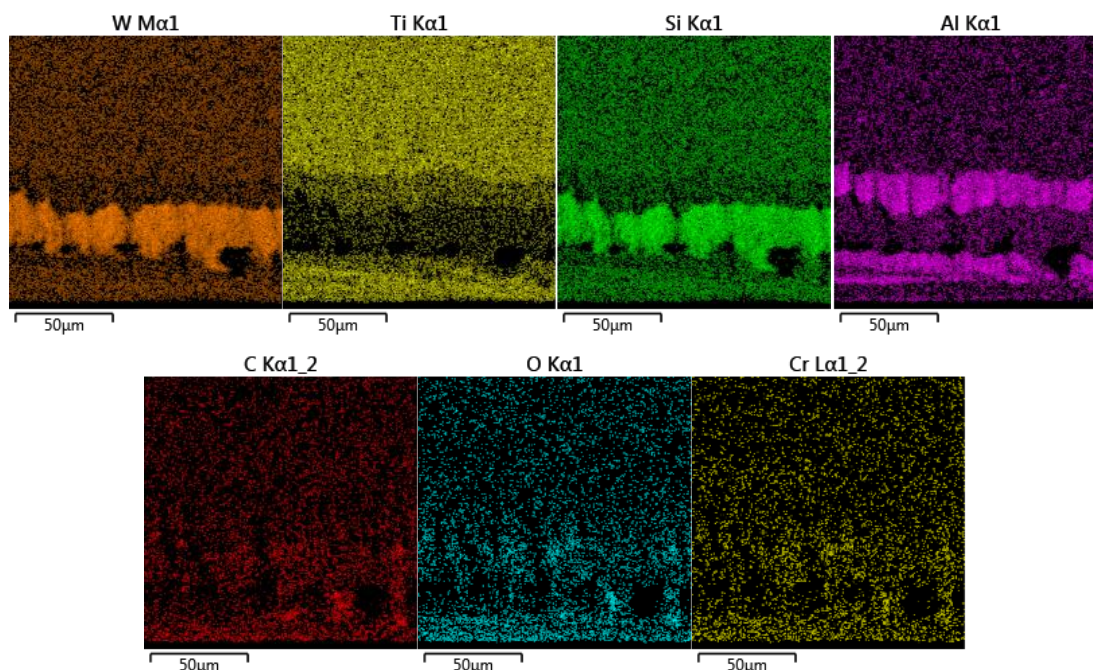


Figura 86 – Mapa EDS na Superfície de folga principal da ferramenta do processo 3 após a usinagem de 600 peças (1200 furos), após ataque químico
Fonte: O autor (2019)

Na região do espectro 16, o desgaste ocorreu apenas na camada do revestimento, sem atingir o substrato, revelando os elementos Al e Cr, que compõem as camadas intermediárias do revestimento Hélica®. Os microsulcos paralelos observados na figura 85 indicam a predominância do mecanismo de desgaste por abrasão, nesta região.

Na região do espectro 17, entretanto, o desgaste atingiu o substrato da ferramenta, evidenciado pela identificação dos elementos que compõem o WC. Entretanto, a figura 86 indica também a presença forte do Silício nesta região, o que sugere que há uma primeira camada espessa do revestimento onde o Silício tem predominância. Nesta região o desgaste tem a aparência áspera, característico de predominância do mecanismo de desgaste adesivo (*attrition*).

A figura 87 apresenta o desgaste ocorrido na superfície de saída da ferramenta (canal helicoidal) da ferramenta do processo 2 ao final da vida, após o ataque químico.

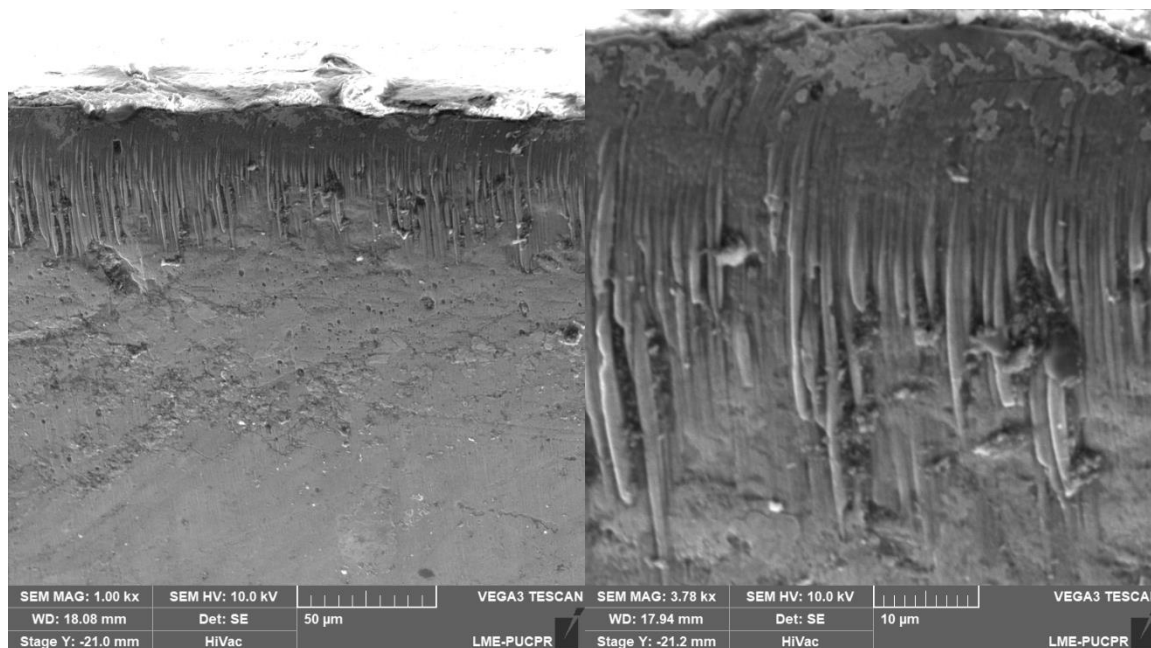


Figura 87 - Desgaste na superfície de saída da broca, processo 2, ao final da vida (600 peças ou 1200 furos), após ataque químico
Fonte: O autor (2019)

Observa-se nesta figura que o substrato foi atingido apenas bem próximo à aresta de corte, sendo o mecanismo predominante o adesivo (*attrition*), nestas regiões. Em regiões mais afastadas da aresta de corte, o desgaste na superfície de saída é predominantemente gerado pelo mecanismo de abrasão devido à presença de sulcos paralelos entre si que estão contidos entre as camadas de revestimento. Assim como ocorreu na superfície de folga principal, o desgaste se desenvolveu somente na última camada (predominantemente Titânio), não atingindo a profundidade da camada que contém alumínio.

A figura 88 apresenta o desgaste ocorrido na guia cilíndrica da ferramenta da ferramenta do processo 2.

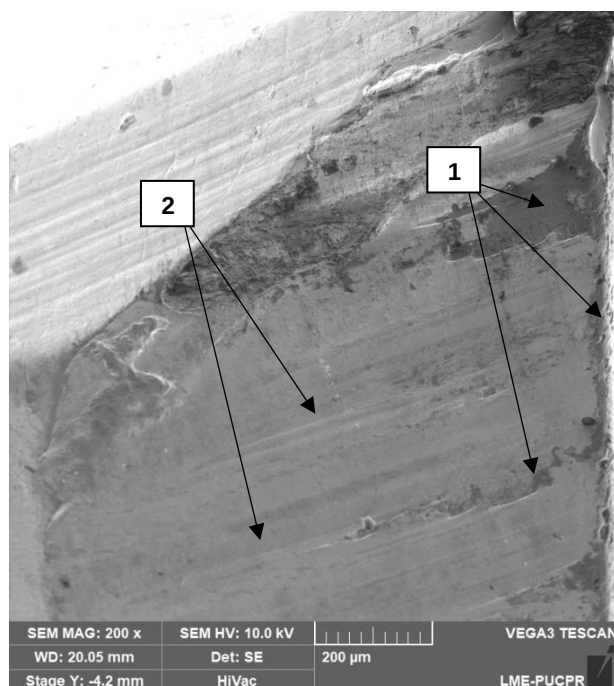


Figura 88 - Vista do desgaste da guia cilíndrica da ferramenta, processo 2 ao final da vida, após ataque químico
Fonte: O autor (2019)

Observa-se na figura 88 que há algumas regiões onde o revestimento não foi removido (região 1). Onde o substrato da ferramenta está exposto, observa-se algumas regiões com microsulcos (região 2) típicos do mecanismo de desgaste por abrasão. Tais microsulcos estão posicionados a um certo ângulo e são paralelos entre si o que salienta e sustenta a teoria de que alguma partícula abrasiva (provavelmente o revestimento) tenha atritado sob a região. O ângulo que os microsulcos estão posicionados é uma resultante da velocidade de avanço e de corte.

4.2.6.1.1 Comparação dos desgastes entre processos de polimento

A figura 89 apresenta a comparação de desgaste ocorrido em uma das guias cilíndricas para os processos 2 (sem polimento), 3 (polida manualmente) e 7 (pouco polido – 1 minuto – abrasivo H 4/400) ao final das respectivas vidas (usinagem de 600 peças ou 1200 furos).

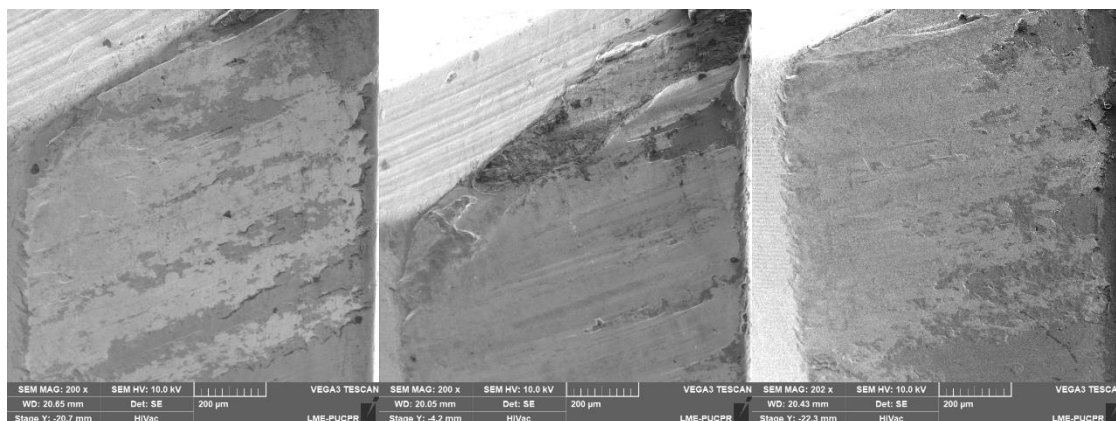


Figura 89 - Desgaste da guia cilíndrica das ferramentas processos 7 (à esquerda), 2 (ao centro) e 3 (à direita), ao final da vida, após o ataque químico
Fonte: O autor (2019)

Observa-se que as três brocas apresentam regiões com deslocamento do revestimento (como mostrado na figura 80), e o processo 2 foi o que apresentou a maior região de deslocamento do revestimento. O processo 3, diferindo-se das demais, não apresenta os microssulcos apresentados na figura 80 tampouco mantém o padrão do ângulo de deslocamento presente nos outros modelos. Portanto, no processo 3 teve menor ou quase nenhuma predominância do desgaste do tipo abrasivo.

A figura 90 apresenta a região desgastada de uma das duas superfícies de saída (canal helicoidal) das mesmas brocas mostradas na figura anterior (processos 2, 3 e 7), ao final da vida (usinagem de 600 peças ou 1200 furos).

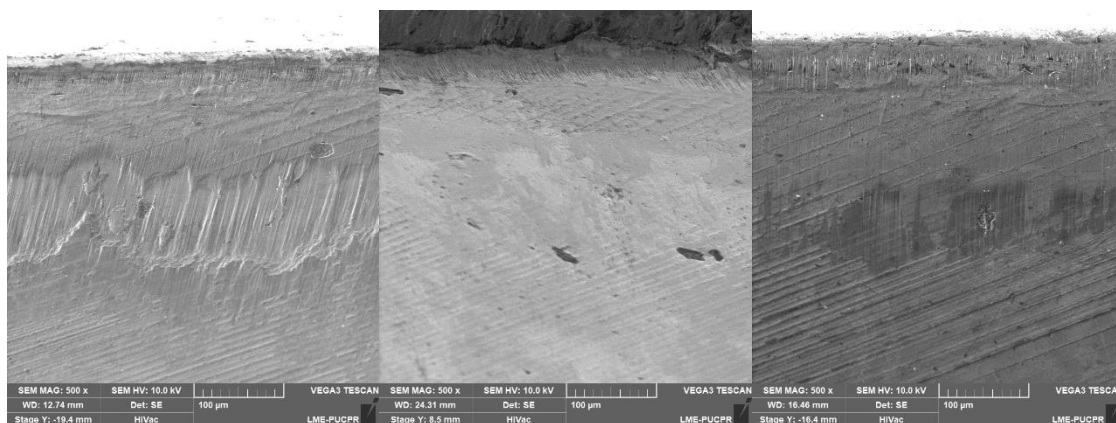


Figura 90 - Vistas dos desgastes na superfície de saída (em um dos canais helicoidais) das brocas dos processos 7 (à esquerda), 2 (ao centro) e 3 (à direita) ao final das vidas
Fonte: O autor (2019)

Observa-se que essas ferramentas apresentam um pequeno desgaste próximo à aresta principal de corte, seguido de uma região sem desgaste e uma região com o desgaste mais afastado da aresta. Esse desgaste mais afastado da aresta é a cratera

que está se formando. Na ferramenta do processo 7 (foto mais à esquerda da figura 90) essa cratera já está mais adiantada, onde a primeira camada de revestimento já foi superada. Para as outras duas brocas, processos 2 (foto do centro) e 3 (foto mais à direita), esse desgaste é bem superficial, sem romper a primeira camada de revestimento. Nos processos 7 e 3, os microssulcos paralelos indicam predominância do mecanismo de desgaste abrasivo, enquanto o processo 2 a aparência é de predominância de mecanismo de desgaste adesivo (*attrition*).

A figura 91 apresenta a região desgastada da superfície de folga principal das mesmas brocas dos processos 2, 3 e 7 mostradas nas figuras anteriores.

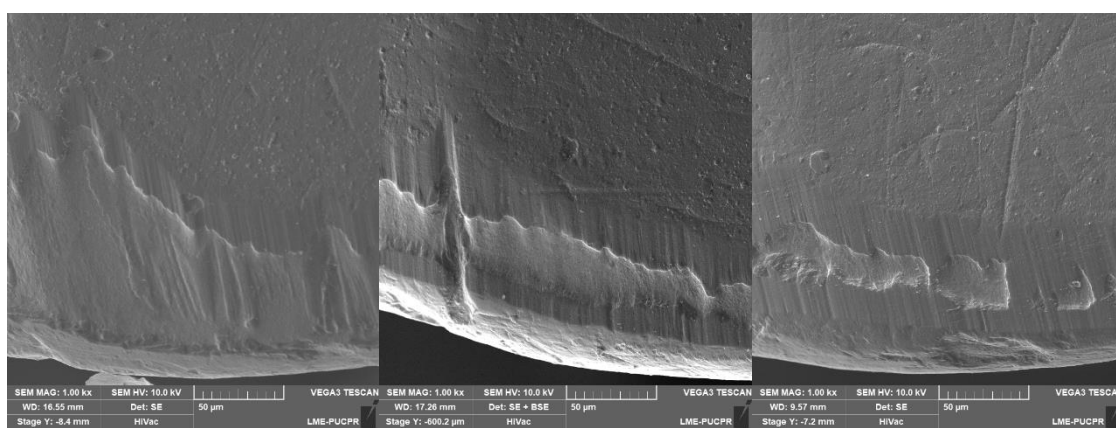


Figura 91 - Vistas dos desgastes de flanco das brocas dos processos 7 (à esquerda), 2 (ao centro) e 3 (à direita), ao final das vidas
Fonte: O autor (2019)

O processo 7 apresenta um comprimento de desgaste de flanco superior aos demais tipos de processos, onde os revestimentos foram superados de forma uniforme, desde a aresta principal da cunha cortante. Por outro lado, os processos 2 e 3 apresentam desgastes a partir da aresta principal de corte mais superficial, onde o substrato ainda não foi atingido. A uma certa distância da aresta, observa-se uma região de desgaste mais acentuado, em que o substrato é revelado, sendo mais acentuado na broca do processo 2. Como já comentado para a ferramenta com processo 3 (figura 83) a origem destes desgastes está na formação de microlascamentos localizados na superfície de folga principal das brocas, que se evoluem por algum outro mecanismo, adentrando o substrato. Pelo aspecto áspero dessas regiões, o mecanismo que predomina é o adesivo (*attrition*).

4.2.7 Avaliação de temperatura

A figura 92 apresenta modelos de comportamento dos sinais gerados pelos termopares colados externamente, mais próximo (5 mm - em azul) e mais afastado (30 mm - em laranja) da borda da peça durante a execução de um furo. Ela também apresenta em sua parte superior a profundidade da ferramenta no momento da obtenção dos sinais.

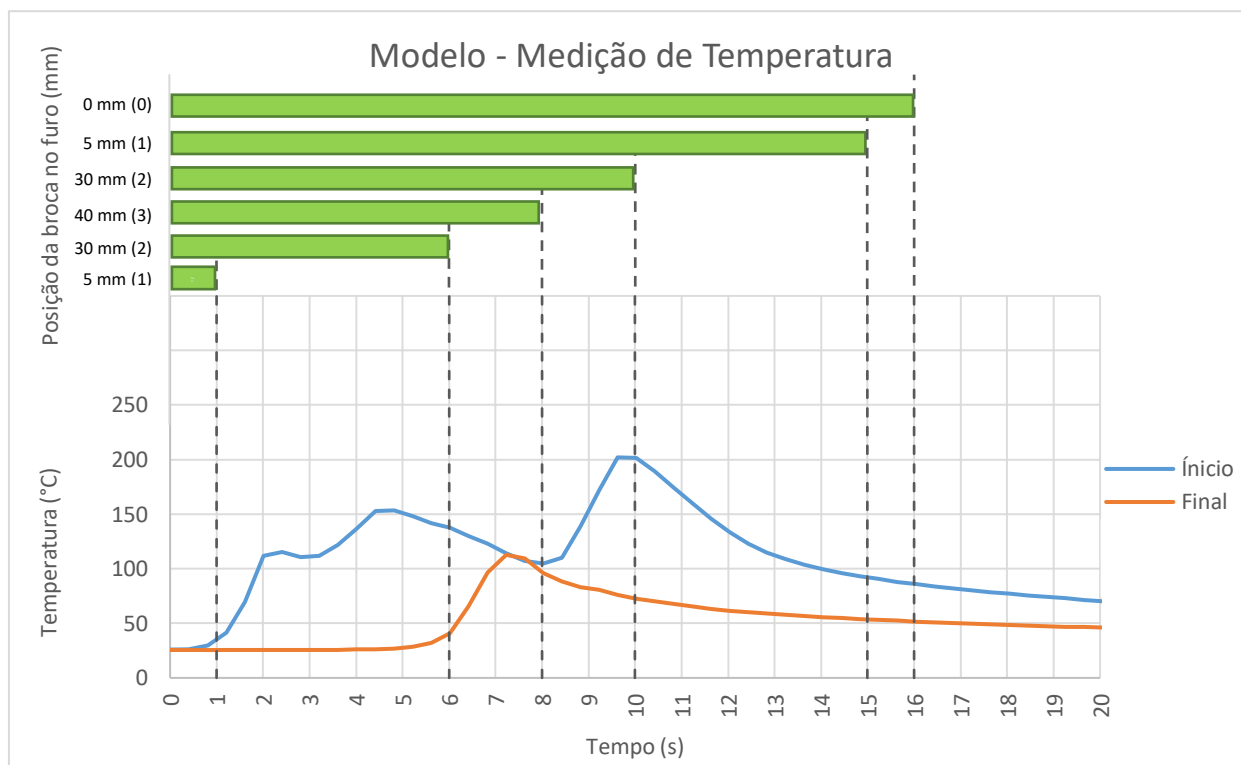


Figura 92 - Modelo de comportamento da temperatura na superfície externa da peça
Fonte: O autor (2019)

Foram tracejadas (figura 92) 6 posições específicas da broca dentro do furo, a número 1 está situada a 5 mm da face furo e é a posição onde o primeiro termopar está posicionado, a de número 2 está posicionada a 30 mm do início do furo e é a posição onde o segundo termopar está posicionado, a de número 3 é a posição do final do furo (40 mm de profundidade) e a número 0 é quando a ferramenta é retirada de dentro do furo (superfície superior da peça). Estas posições foram identificadas pela velocidade de avanço utilizada (300mm/min), representando o percurso de avanço da ferramenta, tendo como referência a ponta da broca. Entretanto, deve-se levar em conta que para o termopar fixado externamente à peça o momento de maior temperatura é na passagem da guia cilíndrica e não da ponta da broca. Como tem-se um comprimento de aproximadamente 2 mm da ponta da broca até o início da guia

cilíndrica, leva-se um tempo de aproximadamente 0,4 segundos para a guia passar sobre cada posição plotada em tracejado no gráfico. Portanto, considerando o início da guia a figura 95 está defasada em 0,4 segundos. Além do tempo para a guia passar pelos pontos tracejados é necessário levar em consideração o tempo para o calor ser conduzido por uma espessura de 0,5 mm, pois este processo não é instantâneo, de acordo com o primeiro tracejado há uma divergência de aproximadamente 1 segundo no gráfico.

O termopar que foi soldado no início do furo (a 5 mm de distância da borda) apresentou um comportamento de temperatura como descrito pela curva azul do gráfico. Em uma análise em valores aproximados, a temperatura sobe de 26°C (temperatura ambiente) para 112°C após ter passado a posição exata do termopar (5 mm), no entanto com *delay* de 1 s, como já discutido acima. Há uma estagnação do sinal nesta faixa de temperatura até o tempo de 3,2 s, para crescer novamente até a temperatura de 153°C no tempo de 4,8 s, o que pode ser atribuído à influência da continuidade da geração de calor ao longo do furo. A partir deste ponto, a temperatura desce para 110°C, no tempo de 8 s do gráfico e sobe novamente para o valor máximo de 202°C no tempo de 9,6 s quando inicia o processo de resfriamento lento. No momento em que a temperatura estava em 202°C a broca estava retornando no furo, portanto este valor máximo pode ser explicado pela presença de material (cavaco) dentro dos canais da ferramenta, que impactou no aumento de temperatura no termopar fixado no início do furo.

A curva laranja representa o sinal medido pelo termopar colado a 30 mm da borda da peça. O sinal deste termopar começa a subir da temperatura ambiente no tempo de 6 s, atingindo a temperatura máxima de 113°C no tempo de 7 s, quando começa a resfriar lentamente a partir deste ponto.

O comportamento da curva azul, no início do furo, se mostrou mais crítico, com maiores temperaturas, como esperado, pois mede a temperatura mais próxima à principal fonte geradora de calor (zona de corte) por um tempo maior, pois ainda tem um percurso de avanço de 35 mm após a passagem no nível onde este termopar foi colado. O termopar colado a 30 mm da borda (curva laranja), só tem mais 10 mm de percurso de corte após este nível. O primeiro termopar (a 5 mm da borda), além de sofrer influência da fonte geradora de calor por mais tempo, sobre também maior influência do cavaco gerado atritando a borda do furo, além de maior tempo para o retorno da broca.

Este comportamento das curvas é para furos executados sem a utilização de fluidos refrigerantes, condição normalmente encontrada na prática, não correspondendo, portanto, à situação “normal”. Nestes experimentos, a condição a seco foi utilizada para permitir verificar se os diferentes tipos de preparação das brocas alteram o comportamento das temperaturas da peça. Para as comparações, o valor de pico indicando as maiores temperaturas dos dois termopares foram utilizadas para a comparação dos resultados de temperatura.

As figuras 93 e 94 apresentam as médias com respectivas barras de dispersão (determinadas pelo desvio padrão com 95% de intervalos de confiança) das máximas temperaturas medidas pelos termopares colados no início e no final dos furos. Análise de variância (ANOVA) dos resultados mostraram que as médias das temperaturas máximas medidas pelos termopares colados no final dos furos (a 30 mm da borda) não apresentam diferenças estatisticamente significativas, quando desconsiderado o processo 4. As figuras 127 e 128 do Apêndice B mostram estas análises, para um intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 5%. Em outras palavras, a alteração do tipo do processo de polimento da broca não exerceu influência sobre a temperatura do termopar que estava posicionado no final do furo. Uma análise apenas nos valores médios das temperaturas máximas, entretanto, indica que os processos 6 e 7 (polimento automático – abrasivo H 4/400) foram os que apresentaram maiores valores de temperaturas no final dos furos e o processo 4 (pouco polido – 5 minutos – abrasivo HSC 1/300) os menores valores.

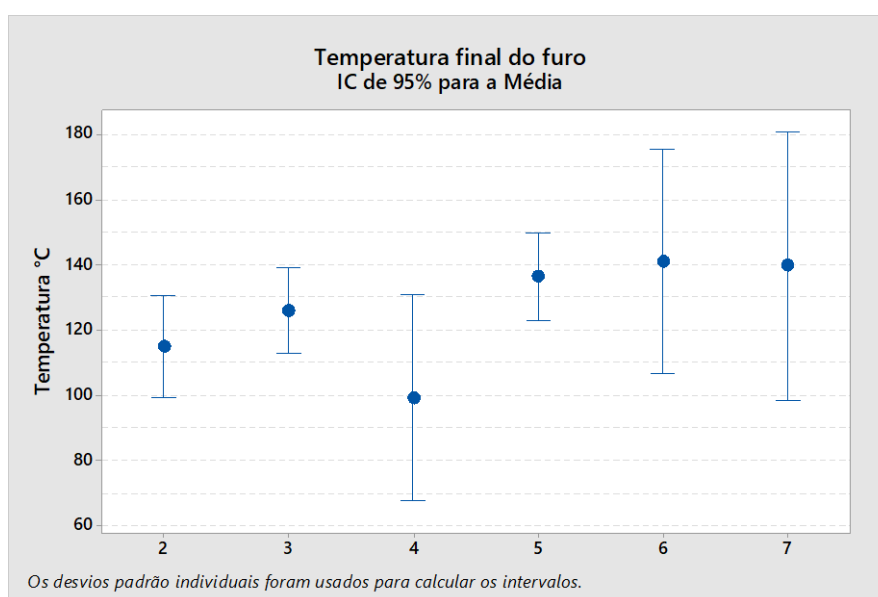


Figura 93 - Temperaturas máximas medidas pelos termopares colados no final dos furos (a 30 mm da borda) com uso dos diferentes processos de polimento das brocas
Fonte: O autor (2019)

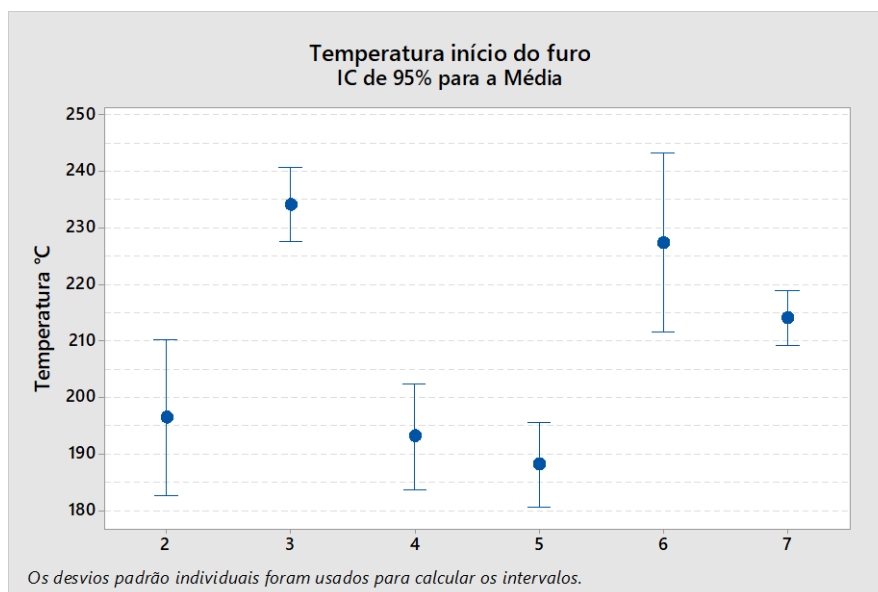


Figura 94 - Temperaturas máximas medidas pelos termopares colados no início dos furos (a 5 mm da borda) com uso dos diferentes processos de polimento das brocas
Fonte: O autor (2019)

Para as temperaturas medidas pelos termopares colados no início do furo (a 5 mm da borda), ANOVA dos resultados indicam que há diferenças estatisticamente significativas para alguns processos. Os processos 3, 6 e 7 apresentaram maiores temperaturas que os processos 2, 4 e 5. As figuras 129 e 130 do Apêndice B mostram os resultados estatísticos para tais afirmações. Estas diferenças são resultados do calor gerado na formação do cavaco, do atrito da guia cilíndrica com a parede do furo e do atrito (e temperatura) do cavaco escorregando nos canais das brocas.

4.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS FUROS

4.3.1 Diâmetro

As figuras 95 e 96 apresentam os resultados dos diâmetros medidos no início dos furos, a 5 mm da face da peça, e no final dos furos, a 40 mm da face da peça, quando utilizando os diferentes processos de polimento das brocas, ao longo de suas vidas.

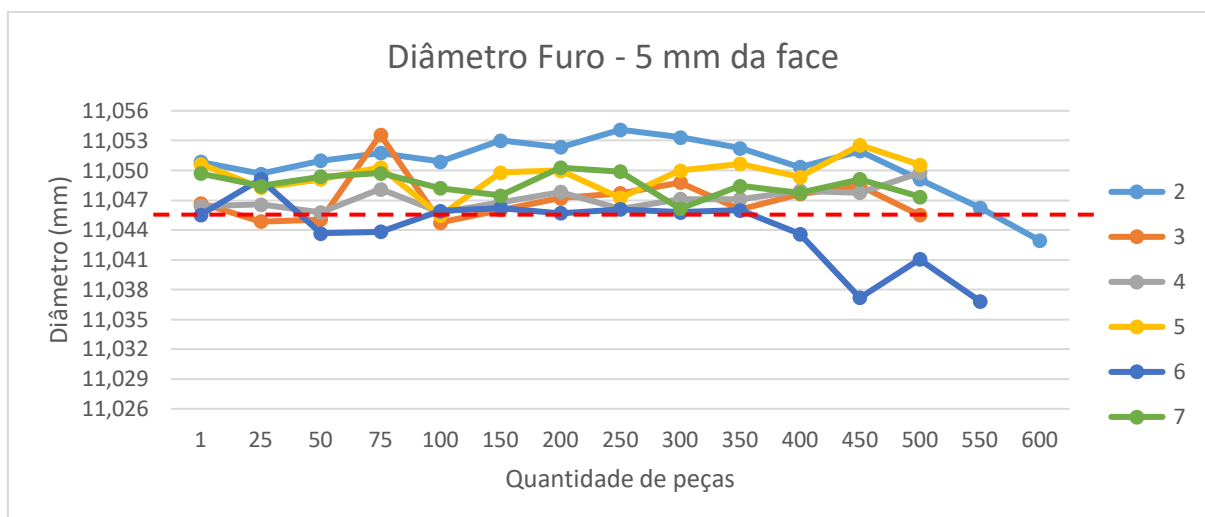


Figura 95 - Diâmetros dos furos medidos a 5 mm da face da peça
Fonte: O autor (2019)

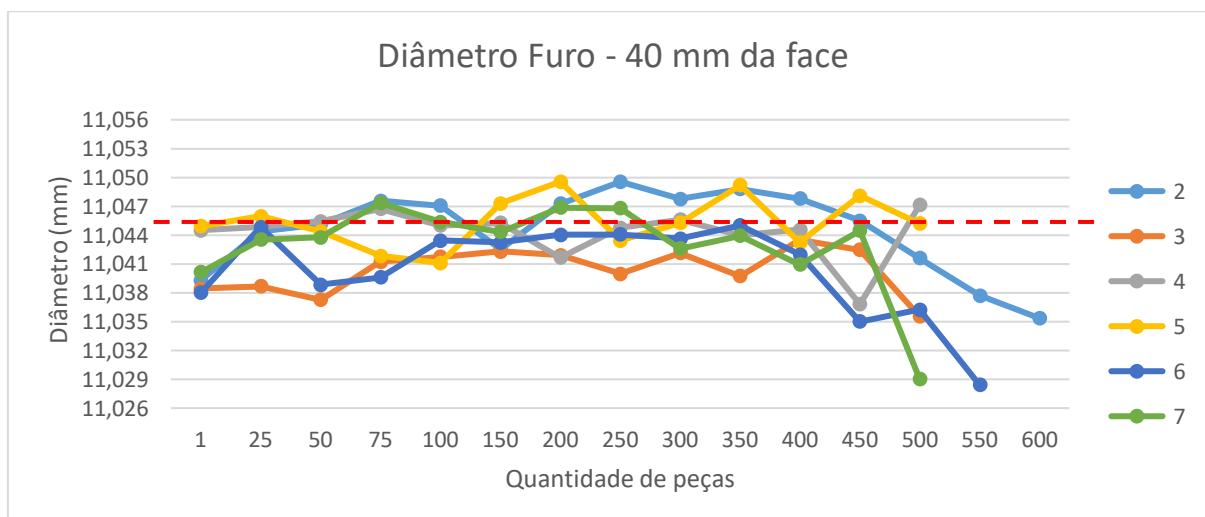


Figura 96 - Diâmetro dos furos medidos a 40 mm da face da peça
Fonte: O autor (2019)

Observa-se na figura 95 que houve a tendência de praticamente todas as brocas testadas apresentarem diâmetros no início do furo ligeiramente maiores que o diâmetro nominal das brocas de 11,045 mm (linha vermelha), durante praticamente todas suas vidas. O processo 2 (sem polimento), no geral produziu as peças que apresentaram os maiores diâmetros no início do furo (5 mm) e o processo 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) apresentou os valores de diâmetros mais próximos do nominal durante grande parte da sua vida, com queda desse diâmetro mais acentuadamente em relação às demais, a partir de 350 peças usinadas (700 furos). No final do furo (figura 96) é difícil identificar uma broca que tenha apresentado diâmetros mais próximos do nominal da broca (11,045 mm), onde os valores

apresentados oscilam em torno desse valor, sendo que a maioria tende a diminuir o diâmetro no final do furo quando se aproxima do final da vida. Para eliminar a influência do desgaste nos resultados, a análise dos valores no primeiro furo indica que os processos 3 (polimento manual), 4 (pouco polido – 5 minutos – abrasivo HSC 1/300) e 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) apresentaram os diâmetros no início dos furos mais próximos do valor nominal da broca (figura 95). No primeiro furo, os processos 4 e 5 (polimento automático – abrasivo HSC 1/300) apresentaram os diâmetros mais próximos do nominal no final do furo (figura 96).

4.3.2 Desvio de Circularidade

As figuras 97 e 98 apresentam o resultado de desvio de circularidade dos furos produzidos com os diferentes polimentos de brocas, ao longo de suas vidas, medidos no início e no final dos furos.

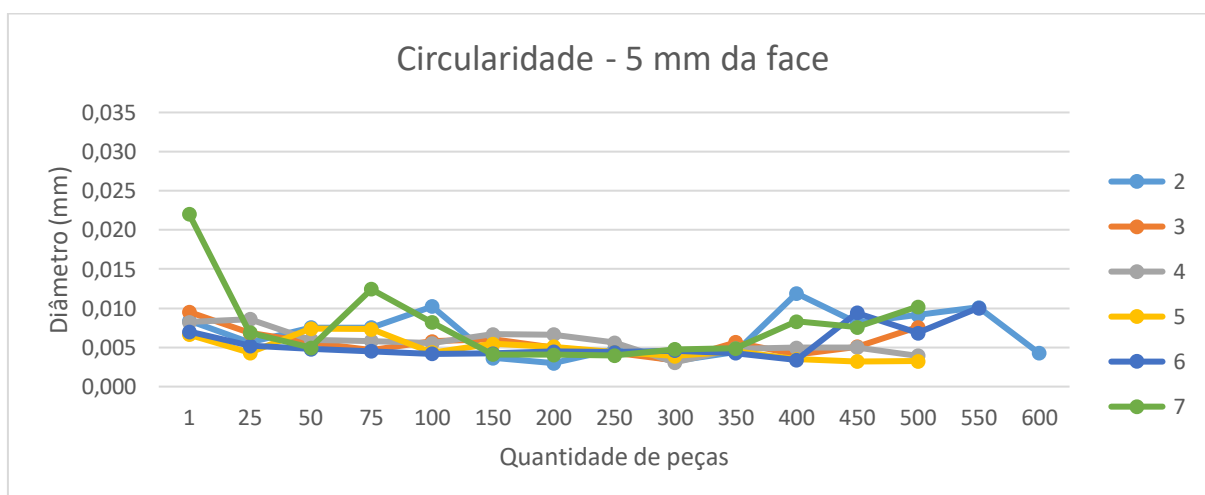


Figura 97 - Desvios de circularidade dos furos medidos a 5 mm da face da peça
Fonte: O autor (2019)

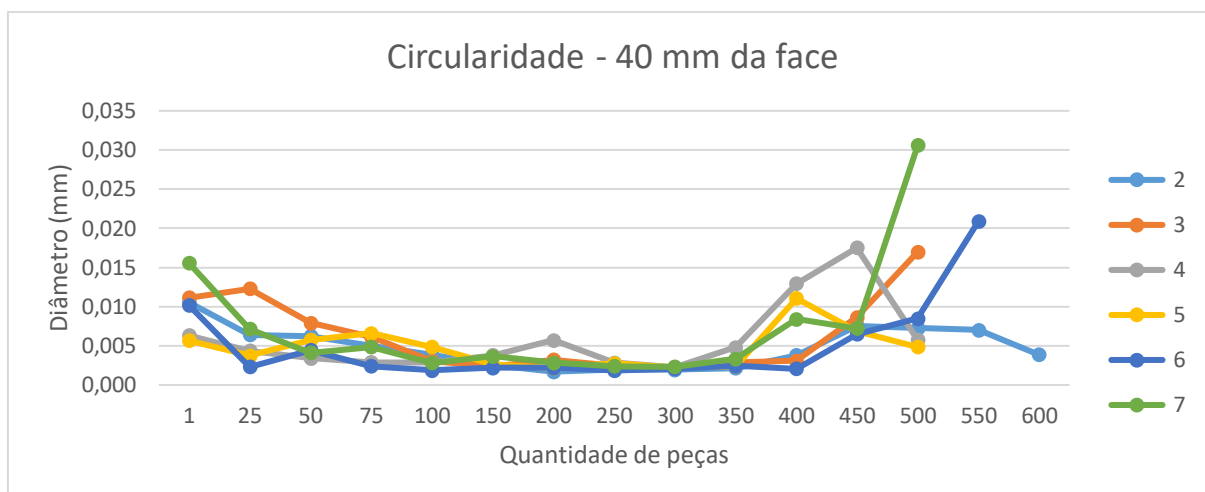


Figura 98 - Desvios de circularidade dos furos medidos a 40 mm da face da peça
Fonte: O autor (2019)

Observa-se que os resultados de desvio de circularidade, apesar de apresentarem alguns *outliers* não mostraram diferenças significativas entre as brocas testadas, pelo menos até a fabricação de 350 peças (700 furos). No início dos furos (a 5 mm da face das peças), com exceção do primeiro furo com a broca do processo 7 (pouco polido – 1 minuto – abrasivo H 4/400), considerado um *outlier*, os desvios de circularidades oscilaram em torno de 4 e 13 μm . No final do furo (a 40 mm da face das peças) os desvios apresentaram oscilações entre 2 e 16 μm até a fabricação de 400 peças (800 furos), aumentando estes valores a partir deste número de peças, para praticamente todos os polimentos de brocas testados, fato creditado ao desgaste das ferramentas. Pelo observado, a conclusão é de que a alteração do processo de polimento, no geral, não impacta diretamente no desvio de circularidade do furo.

4.3.3 Desvio de Posição

A figura 99 apresenta os resultados de desvio de posição dos furos produzidos com os diferentes polimentos de brocas, ao longo de suas vidas.

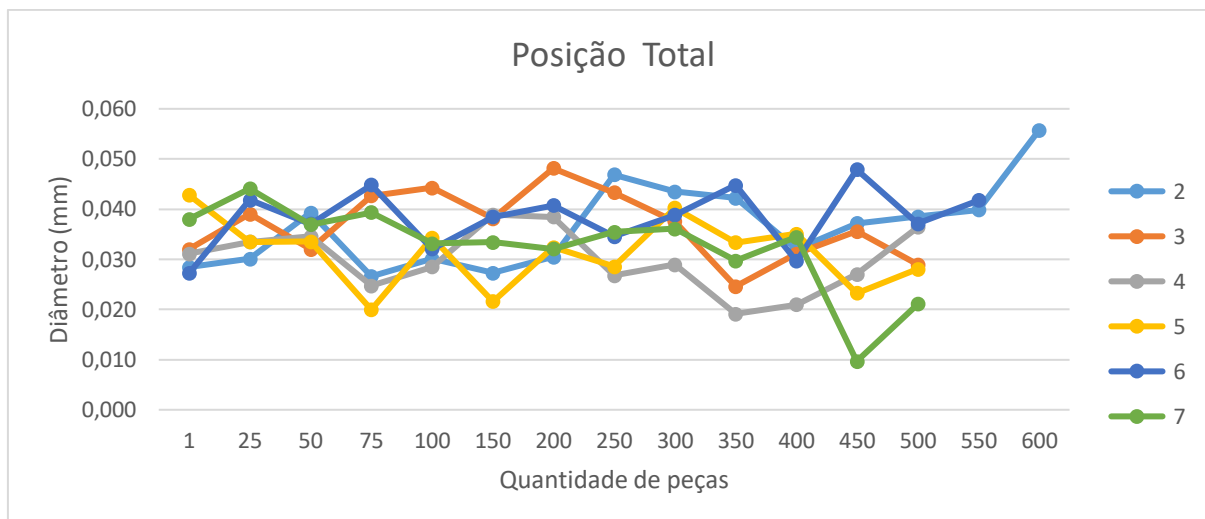


Figura 99 - Desvio de posição dos furos verificados ao longo da vida das brocas
Fonte: O autor (2019)

Ao longo da vida da ferramenta o desvio de posição do furo varia aleatoriamente entre 10 e 50 μm , 500 peças (1000 furos), sem identificar uma broca que tenha se destacado das demais. Tendo em vista as diversas variáveis do processo outros possíveis fatores são responsáveis por tal variação. Portanto, os resultados indicam que o processo de polimento não tem influência significativa sobre o desvio da posição dos furos.

4.3.4 Análise Metalográfica

4.3.4.1 Avaliação da Microestrutura

As figuras 101 a 103 apresentam os resultados de espessura das camadas com transformação martensítica (corte transversal e longitudinal) e com deformação plástica (corte transversal) da primeira peça obtida com tipo de processo utilizado e a figura 100 apresenta uma imagem ilustrando a medição de tais regiões.



Figura 100 - Modelo de medição da camada martensítica e deformação plástica
Fonte: O autor (2019)

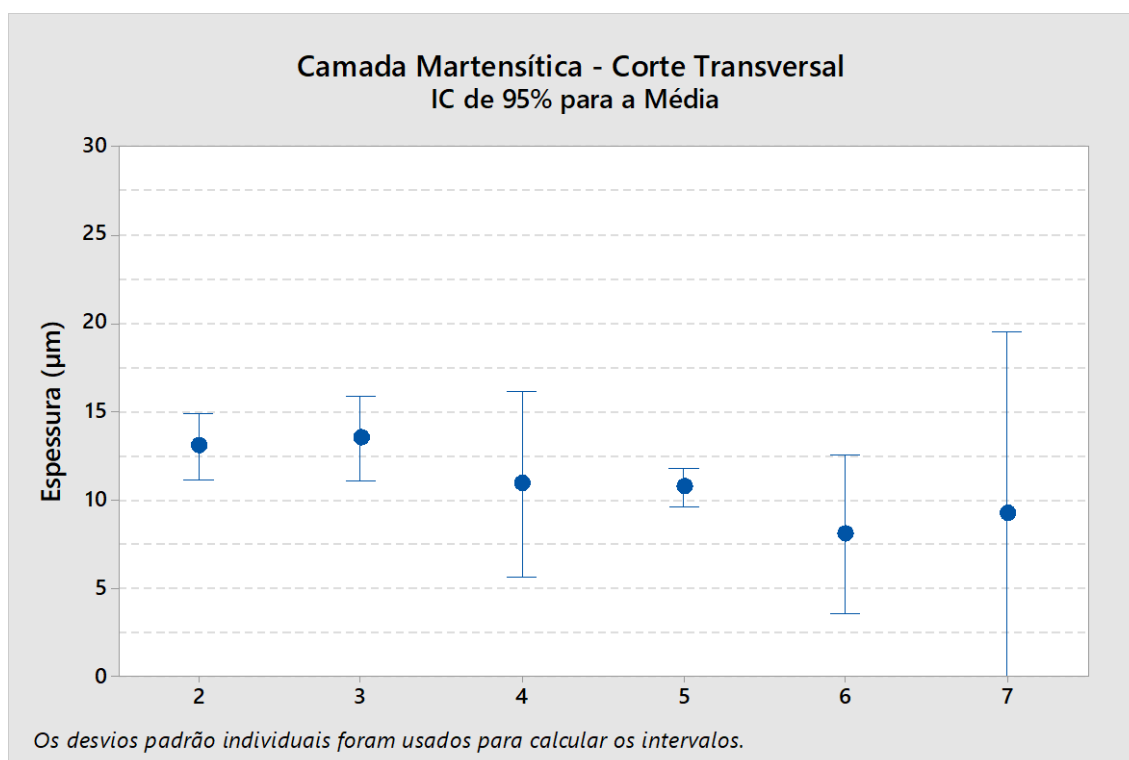


Figura 101 - Espessura camada martensítica - Corte transversal
Fonte: O autor (2019)

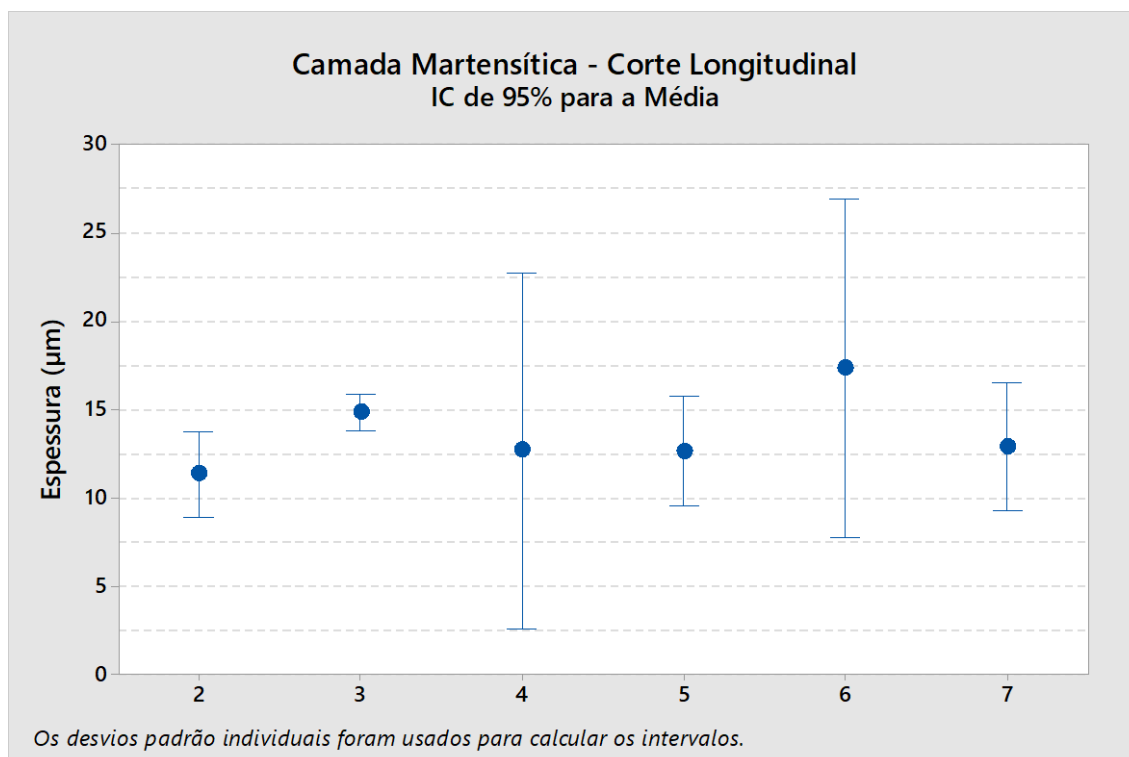


Figura 102 - Espessura camada martensítica - Corte longitudinal
Fonte: O autor (2019)

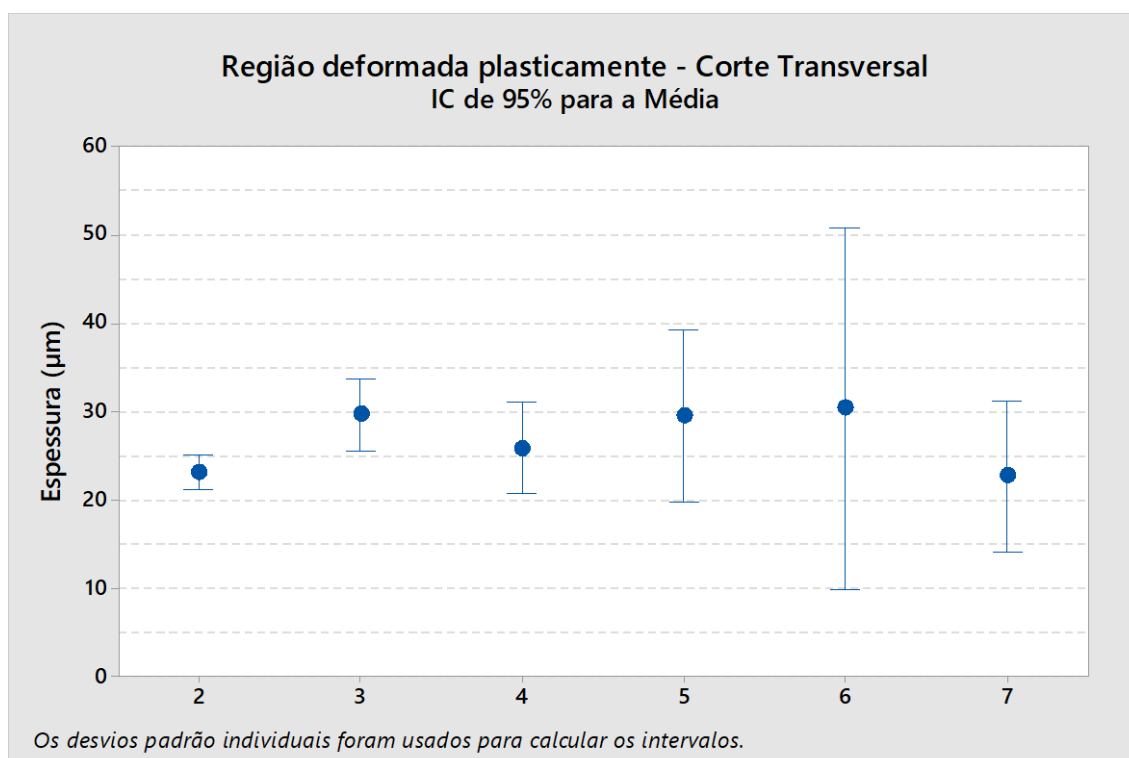


Figura 103 - Espessura da camada deformada plasticamente - Corte transversal
Fonte: O autor (2019)

Os resultados obtidos apresentam um grande desvio padrão o que é resultante de uma grande variação dos resultados entre as réplicas. Avaliando os intervalos de confiança não se tem diferença significativa entre os tipos de polimento, desta forma não se pode realizar qualquer correlação da zona de deformação e da camada martensítica com o tipo do processo empregado em cada ferramenta. Portanto a variação do processo de polimento não impacta na camada martensítica nem na zona de deformação plástica sub superficial.

4.3.5 Acabamento dos furos

4.3.5.1 Rugosidade

Os resultados de rugosidade Ra e Rz dos furos usinados são apresentados nas figuras 104 e 105.

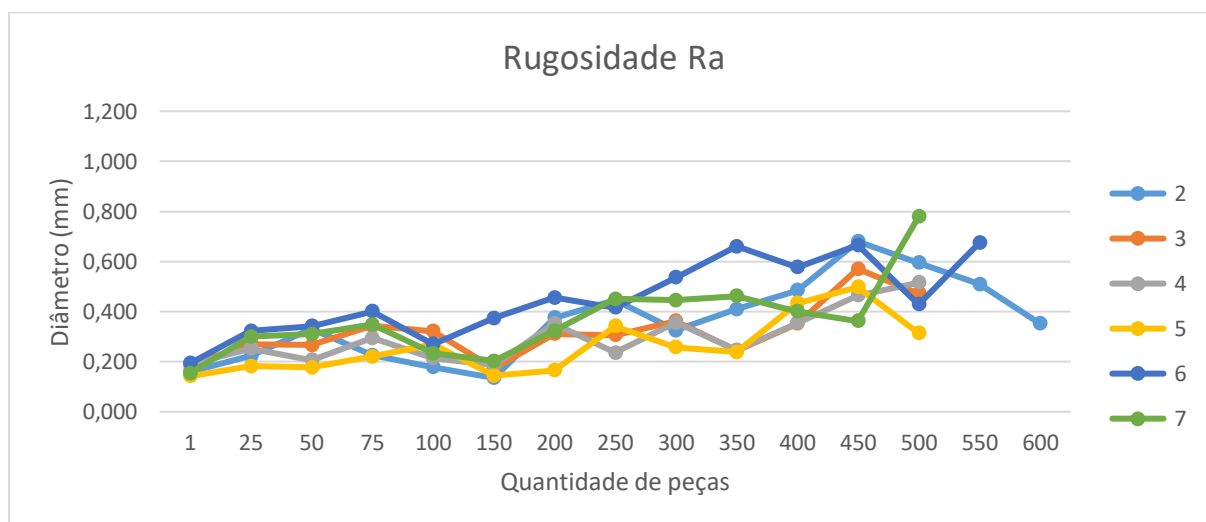


Figura 104 - Rugosidade Ra dos furos usinados ao longo das vidas das brocas com os diferentes processos de preparação testados
Fonte: O autor (2019)

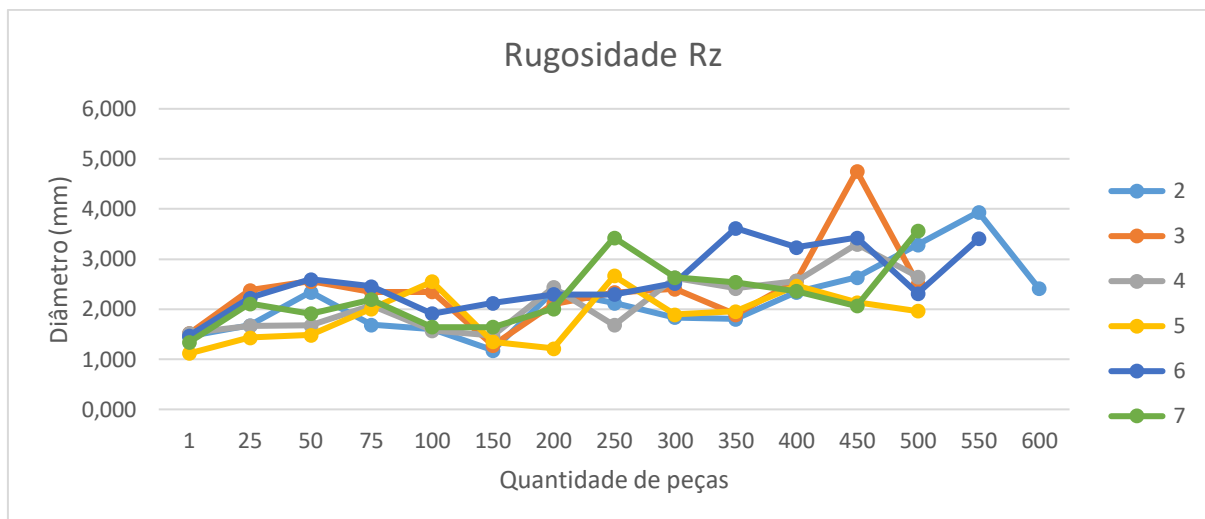


Figura 105 - Rugosidade Rz dos furos usinados ao longo das vidas das brocas com os diferentes processos de preparação testados
Fonte: O autor (2019)

Observa-se nestas figuras que do primeiro furo e até o final da vida das brocas, a rugosidade oscila com ligeira tendência ao crescimento devido ao desgaste, sendo que a oscilação de Ra ocorre entre $0,17\text{ }\mu\text{m}$ e $0,80\text{ }\mu\text{m}$ e Rz entre $1,0\text{ }\mu\text{m}$ e $4,9\text{ }\mu\text{m}$. São valores considerados, no geral, muito bons para o processo de furação em cheio. A avaliação desses gráficos, entretanto, não permite fazer distinção destacada de um processo de polimento da broca sobre outro. Para avaliar os resultados de rugosidade das peças usinadas sem a influência do desgaste das ferramentas, foram criados os gráficos apresentados nas figuras 106 e 107, considerando o primeiro furo apenas.

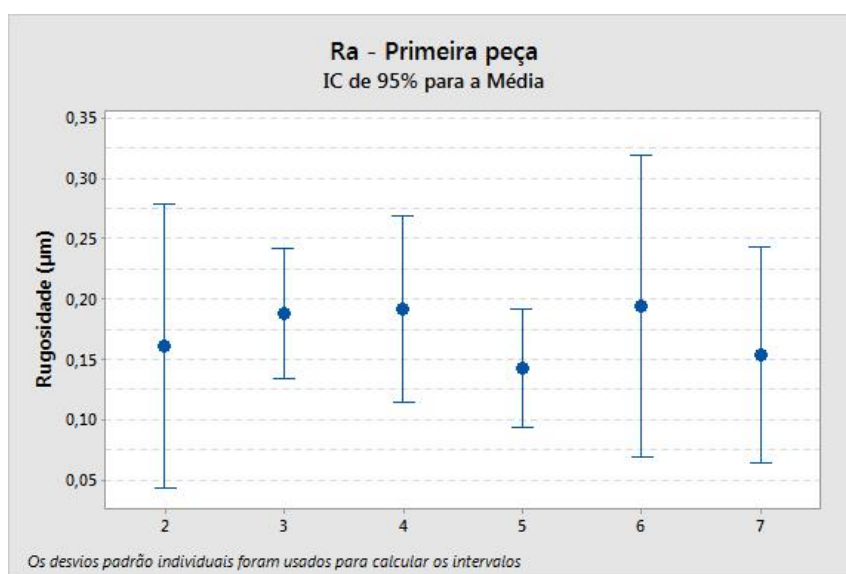


Figura 106 - Rugosidade Ra do primeiro furo usinado com as brocas dos diferentes processos de polimento testados
Fonte: O autor (2019)

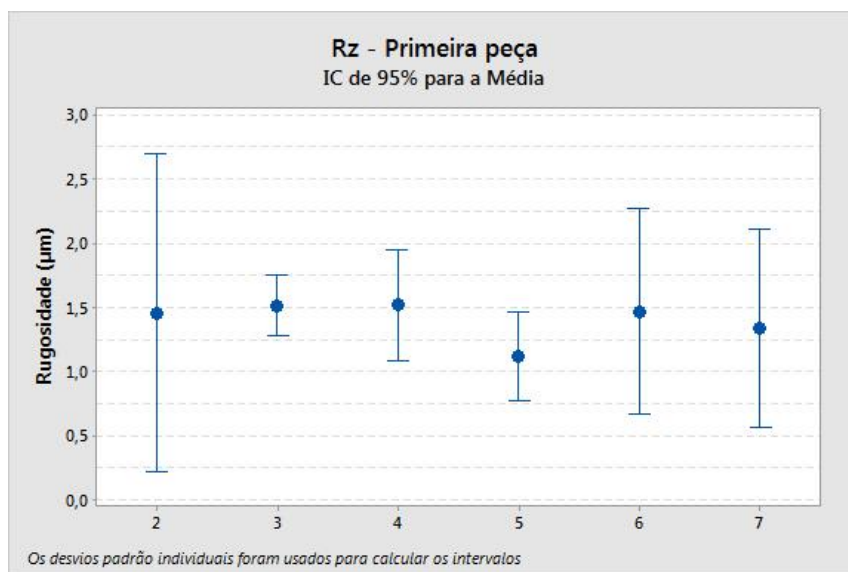


Figura 107 - Rugosidade Rz do primeiro furo usinado com as brocas dos diferentes processos de polimento testados
Fonte: O autor (2019)

Verifica-se que as médias da rugosidade Ra oscilam entre 0,15 μm e 0,19 μm (figura 106) e o parâmetro de rugosidade Rz entre 1,12 μm e 1,52 μm (figura 107). Entretanto, ao se considerar os desvios representados pelas barras de dispersão, não se verifica estatisticamente que algum deles seja diferente entre si. Portanto, pode-se afirmar que o processo de polimento não tem influência sobre os resultados de rugosidade Ra e Rz das primeiras peças.

4.3.5.2 Análise Visual

A figura 108 apresenta fotos das superfícies do início dos primeiros furos produzidos com as diferentes brocas testadas, permitindo uma análise visual dos mesmos.

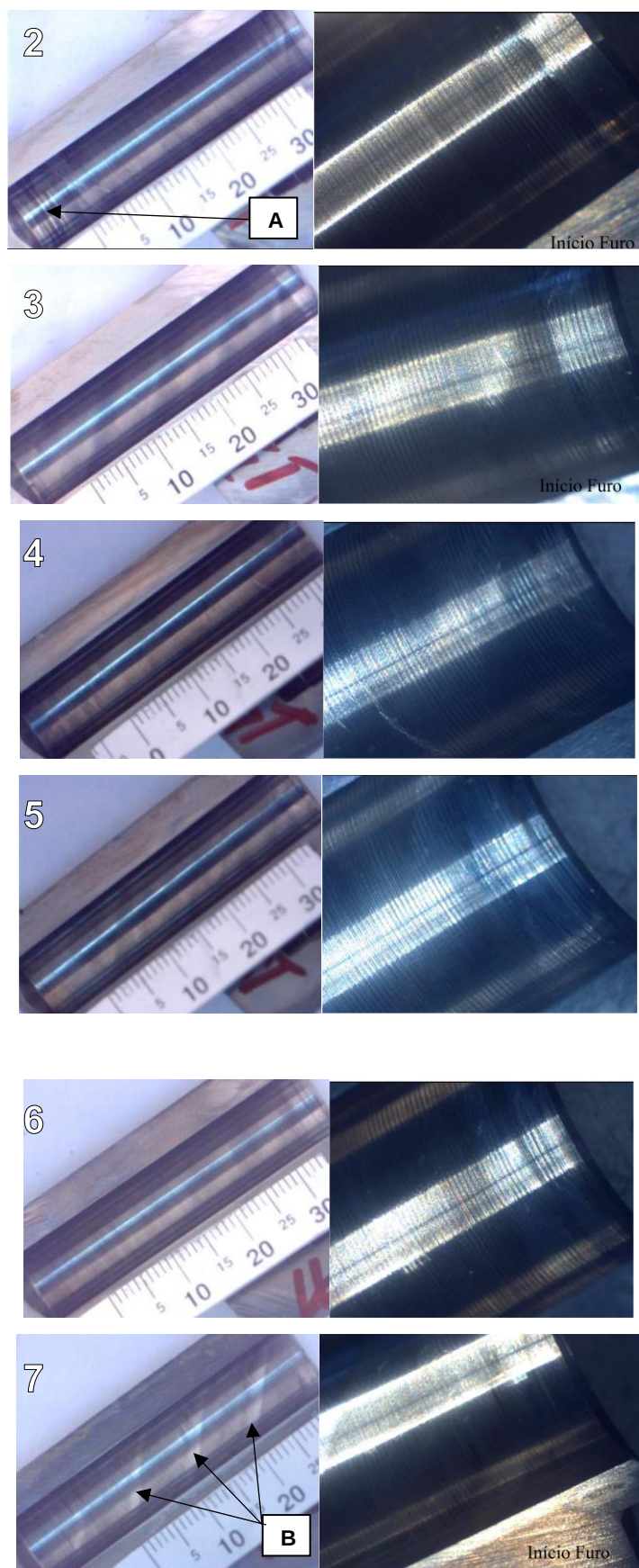


Figura 108 - Vista da superfície no início do primeiro furo (à direita) e ao longo do furo (à esquerda)
Fonte: O autor (2019)

Independentemente do processo de polimento as fotos da superfície dos furos apresentam uma diferença de coloração no início do furo (à direita das de cada foto), sugerindo que houve alguma alteração causada por possível vibração ou oxidação. Entretanto, como ocorreu em todas as fotos analisadas, os processos de polimento das ferramentas não tiveram influência sobre este fenômeno. O processo 7 apresentou uma marca ao longo do furo (região B) que não é possível identificar nos demais. Tendo em vista a distância entre cada marca, provavelmente aconteceu no momento da saída da ferramenta de dentro do furo (realizada em avanço rápido). O processo 2 foi o único que apresentou uma marca no fundo do furo (região A), o que pode ser explicado por apresentar o maior esforço de corte, possivelmente gerando uma maior restrição ao escoamento do cavaco ao longo do furo usinado, resultando em uma vibração no fundo do furo (posição que tem-se a maior quantidade de cavaco nos canais da ferramenta).

4.4 RESUMO DOS EXPERIMENTOS

A tabela 19 apresenta um resumo dos principais experimentos realizados, colocando o polimento que obteve o melhor e o pior desempenho e apresentando uma porcentagem entre eles, calculado entre o valor do “melhor” e do “pior” desempenho.

	Melhor desempenho		Pior desempenho		% de aumento
	Processo	Valor	Processo	Valor	
Teste do pano	5	1º	2	6º	N/A
Análise Visual	6	1º	2	6º	N/A
Rugosidade Sp - Canal	5	0,9 µm	2	3,5µm	289
Rugosidade Sz - Canal	5	2,2µm	2	5,5µm	150
Rugosidade Sa - Canal	5	0,127µm	6	0,18µm	42
Rugosidade Sq - Canal	5	0,16µm	6	0,23µm	44
Área <i>droplets</i> / Área total	5 e 6	0,09%	2	2,63%	2822
Força de avanço	5	420 N	2	520 N	24
Torque	5 e 7	4,15 N*m	4	4,7 N*m	13
Espessura máxima do cavaco	2	270 µm	5	340 µm	26
Espessura mínima do cavaco	5	230 µm	3	275 µm	20
Vida - Primeira rodada	6	595 peças	2	150 peças	-75
Desgaste cratera - Segunda rodada	2	0,416 µm	4	0,585 µm	41
Desgaste guias - Segunda rodada	4	0,569 mm ²	3	1,358 mm ²	139
Temperatura final do furo	4	100 °C	5, 6, 7	140 °C	40
Temperatura início do furo	5	190 °C	3	235 °C	24
Camada martensítica - Corte Transversal	6	8,052 µm	2	13,05 µm	62

Tabela 19 - Resumo dos experimentos
Fonte: O autor (2019)

Em termos de caracterização da ferramenta antes da usinagem, o resultado que teve a maior diferença entre o melhor e o pior desempenho foi a área de *droplets* por área total, nesta análise o processo 2 é 2822 % maior que os processos 5 e 6. Os resultados de rugosidade apesar de ao serem avaliados separadamente (considerando os intervalos de confiança) não apresentarem uma tendência de melhor ou pior, ao se analisar somente a média dos resultados o processo 5 apresenta-se como o melhor resultado para os parâmetros Sp, Sz, Sa e Sq. Os dois resultados acima condizem com as análises qualitativas realizada pelo teste do pano e a análise visual do brilho das ferramentas, colocando o processo 2 como o pior dos resultados e o 5 e 6 como o melhor resultado. No entanto se considerarmos os intervalos de confiança para os resultados de rugosidade pode-se afirmar que a rugosidade das ferramentas tem menor influência nos testes qualitativos do que a área de *droplets* por unidade de área.

Analisando as variáveis de processo, o processo de polimento 5 foi o que obteve o melhor resultado pois para o esforço de corte é 24 % menor que o processo 2, assim como para o torque é 13 % menor que o processo 4 (pior polimento) na análise do torque e para a temperatura no início do furo é 24 % menor que o processo 3. Correlacionando estes resultados com o parágrafo anterior pode-se afirmar de que o processo de polimento 5, caracterizado como o “mais polido”, foi o que obteve o melhor desempenho das análises do processo de usinagem.

Os desgastes das ferramentas não apresentaram uma correlação direta com o “grau de polimento” colocando como o melhor processo o 2 e o 4 para os desgastes das superfícies de saída e da guia, respectivamente. No entanto para a vida na primeira rodada o processo 6 obteve vida de 75 % maior que o processo 2, sendo possível correlacionar-se novamente com a quantidade de *droplets* por unidade de área.

Estes resultados corroboram com as afirmações do fornecedor do equipamento Drag Finishing de que só realizar o polimento das ferramentas após o revestimento (removendo os *droplets*), há uma melhora no fluxo do cavaco, aumento na vida da ferramenta e redução nas forças de corte (OTEC, 2008).

Em resumo o processo de polimento 5 (muito polido – 20 minutos – abrasivo HSC 1/300) foi o classificado e caracterizado como o mais polido e o que obteve o melhor desempenho nos testes realizados, portanto este processo é o recomendado para esta aplicação.

5 CONCLUSÃO

O processo de caracterização das ferramentas em termos quantitativos (restrição ao pano e análise do brilho) permitiu classificar as ferramentas, colocando os processos de polimento 5 (muito polido – 20 minutos – abrasivo HSC 1/300) e 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) como os “mais polidos” e o processo 2 (sem polimento) como o “menos polido”. No entanto para a caracterização quantitativa os resultados de rugosidade das ferramentas, contrariando a expectativa, não apresentaram uma diferença significativa entre os processos usados na preparação das brocas, considerando o intervalo de confiança de 95%. Os resultados de área de *droplets* por área total apresentaram os processos 5 e 6 tendo uma quantidade de 2822 % menor que o processo 2, este resultado foi passível de correlacionar com as análises quantitativas. Portanto a quantidade de *droplets* sobre o revestimento teve mais influência do que a rugosidade do substrato nos ensaios realizados com o pano e a análise do brilho (quantitativos).

A espessura do cavaco obtida pelos ensaios QSD coloca o processo 2 (sem polimento) como sendo o que produziu a menor espessura de cavaco, 26 % menor do que o processo 5 (muito polido – 20 minutos – abrasivo HSC 1/300) que foi o que produziu a maior espessura de cavaco. Isso contrapõe a expectativa de que quanto maior o polimento menor a espessura do cavaco, os resultados mostraram exatamente o contrário.

Em relação a vida das brocas, o processo 6 (muito polido – 10 minutos – abrasivo H 4/400) foi o que apresentou maior vida – 595 peças usinadas (1190 furos) e o processo 2 (sem polimento) foi o que apresentou a menor vida – 150 peças usinadas (300 furos).

Os mecanismos de desgaste predominantes para as ferramentas são o adesivo (*attrition*), o abrasivo, além de microlascamentos. O mecanismo abrasivo predomina quando ainda há a presença de revestimento, até o momento da remoção de todas as camadas dele. O mecanismo adesivo (*attrition*) predomina no substrato, quando o revestimento foi perdido por desgaste. Os diferentes modelos de brocas não alteraram os mecanismos de desgaste predominantes, apenas a sua taxa.

Os resultados da avaliação do corpo de prova (circularidade, posição, diâmetro, rugosidade, espessura da camada martensítica, espessura da camada deformada

plasticamente, análise visual do primeiro furo) não foram influenciados pelo o processo de polimento das brocas.

Os resultados de esforços na furação com ferramentas polidas mostraram uma redução de aproximadamente 24% na força de avanço no melhor caso quando comparado a ferramenta não polida, mesmo sem haver alteração na rugosidade das ferramentas. Estes resultados confirmam a expectativa de que polir a ferramenta melhora algum aspecto da usinagem, e a força de avanço é uma das respostas do processo que exige um polimento adequado para as ferramentas de corte. A menor força de avanço foi apresentada pelo processo 5 (muito polido – 20 minutos – abrasivo HSC 1/300) e o menor torque pelo processo 7 (pouco polido – 1 minuto – abrasivo H 4/400). Houve uma variação da temperatura de usinagem relacionando-se o tipo de polimento utilizado, avaliando a posição chamada de “início do furo” o processo 3 (polida manualmente) para a posição definida como “Início do furo” apresentou a maior temperatura, 24 % superior que a do processo 5 (muito polido – 20 minutos – abrasivo HSC 1/300).

De acordo com os resultados obtidos o “grau de polimento” deve ser levado em conta na fabricação das ferramentas para usinagem do aço SAE 4144M e foi escolhido o processo de polimento 5 como o processo de polimento que obteve o melhor desempenho de acordo com todos os ensaios e resultados obtidos.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade e/ou aprofundamento dos temas abordados neste trabalho, sugere-se:

- Avaliar o impacto da variação do processo de polimento da ferramenta usinando-se alumínio pois tem-se a expectativa de que as diferenças estatísticas dos resultados sejam ainda mais significativas que os apresentados
- Avaliar o impacto da variação do processo de polimento da ferramenta utilizando-se de outros revestimentos, diferentes do que foi utilizado nesta pesquisa com intuito de escolher o melhor revestimento para o processo
- Promover o processo de polimento antes de aplicar o revestimento com os diferentes abrasivos e tempos de polimentos no substrato das ferramentas com intuito de melhorar ou equalizar o nível de acabamento pós retificação
- Avaliar o impacto da variação do processo de polimento da ferramenta em brocas de menor diâmetro
- Realizar análise de nano dureza nas amostras de QSD, analisando a dureza da zona de fluxo e na região de cisalhamento primário.
- Utilizar parâmetros tridimensionais do desgaste, para caracterizar o fim de vida das ferramentas
- Variar geometria de afiação e construção da ferramenta avaliando o desempenho da mesma
- Utilizar as imagens e resultados no MEV para determinar a rugosidade da superfície das ferramentas com maior precisão

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3002-1**: Grandezas básicas em usinagem e retificação. Parte 1 - Geometria da parte cortante - Termos gerais, sistemas de referências, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebracavacos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 5419**: Brocas helicoidais - Termos, definições e tipos. Rio de Janeiro, 2009

ARUMUGAM, P. U.; MALSHE, A. P.; BATZER, S. A. **Dry machining of aluminum – silicon alloy using polished CVD diamond-coated cutting tools inserts**. Surface & Coating Technology, v. 200, p. 3399–3403, 2006.

ASTAKHOV, V. P. **Drills: Science and Technology of Advanced Operations**. New York: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2014.

BALZERS O. BALINIT® HELICA. **Oerlikon Balzers**, 2014. Disponível em: <<http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bbr/por/01-products-services/02-balinit-coatings/151-balinit-helica>>. Acesso em: 27 out. 2019.

BARLETTA, M. et al. **Drag finishing of sensitive workpieces with fluidized abrasives**. Journal of Manufacturing Processes, v.14, p. 494-502, 2014.

BOEIRA, A. **Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos**. Tese (Doutorado em engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. 179 p.

BONO, M.; NI, J. The location of the maximum temperature on the cutting edges of a drill. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 7–8, p. 901–907, 2006.

BORK, C. A. S. **Otimização de Variáveis de Processo para a Furação do Aço Inoxidável Austenítico 14541**. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

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

CARRER, M. **Influência do tratamento do gume por arraste sobre a qualidade superficial da peça e a vida da ferramenta para o processo de fresamento**. Monografia (Graduação em engenharia) - Engenharia Mecânica, Universidade de

Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.

CAITANO, T. L. **Análise do desgaste e vida de brocas helicoidais em função da variação da microgeometria da aresta de corte**. Monografia (Graduação em engenharia) - Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2016.

CIMM. **Usinagem como Referencial Pré-Histórico**. Disponível em: < www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3347-introducao >. Acesso em: 27 jul. 2019.

CORRÊA, J. G. **Usinabilidade de aços inoxidáveis martensíticos aplicados na indústria de petróleo**. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2000.

Dos SANTOS, A. V.; et al. **Usinagem em altíssimas velocidade: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica**. São Paulo: Érica, 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1412. Twist drills made of high-speed steel - shape of points**. 1966, 2 pg.

ENDRINO, J. L. et al. **Oxidation tuning in AlCrN coatings**. Surface & Coatings Technology, v. 201, p. 4505–4511, 2007.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

HAAN, D. M. et al. **An experimental study of cutting fluid effects in drilling**. Journal of Materials Processing Technology, v. 71, 1997.

HARRIS, S. G. et al. **A study of the wear mechanisms of $Ti_{1-x}Al_xN$ and $Ti_{1-x-y}Al_xCr_yN$ coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions**. Wear, v. 254, p. 723–734, 2003.

HUANG, R. et al. **Influence of substrate roughness on structure and mechanical property of TiAlN coating fabricated by cathodic arc evaporation**. Physics Procedia, v. 18, p. 160–167, 2011.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold, 1992.

K. NARASIMHA, M. O. M. OSMAN, S. CHANDRASHEKHAR, J. F. **An Investigation into the Influence of Helix Angle on the Torque-Thrust Coupling Effect in twist drills**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 2, n. 1, p. 91–105, 1987.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. London: Springer, 2011.

KOEHLER, W. **Analysis of the High Performance Drilling Process: Influence of Shape and Profile of the Cutting Edge of Twist Drills**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 130, p. 051001-051007, 2008.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

MACHADO, A. R. **Condições da interface cavaco/ferramenta. Parte I: generalidades**. XI COBEM, 11-13 dez. 1991, p. 381-384.

MO, J. L. et al. **Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAlN coatings — Deposited by physical vapor deposition**. Wear, v. 263, p. 1423–1429, 2007.

MORENO, D. A. N. **Validação De Um Dispositivo De Interrupção Subita Da Furação Com Brocas Helicoidais Para Análise Da Raiz De Cavaco**. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

NIKETH, S.; SAMUEL, G. L. **Surface texturing for tribology enhancement and its application on drill tool for the sustainable machining of titanium alloy**. Journal of Cleaner Production, v.167, p. 253-270, 2017.

OLIVEIRA, V. V. **Influência da geometria de brocas na furação do ferro fundido vermicular**. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

OST, C. A. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço p20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificação**. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

OTEC. **Edge Rounding and Polishing of Tools**. Apresentação, 2008.

OTEC. Disponível em: <<https://www.otec.de/pt/produtos/media/processo-a-seco/granulado-de-desbaste/>>. Acesso em: 27 out. 2019.

PEREIRA, A. C. **Análise de capacidade para avaliar a influência da geometria de brocas helicoidais em furação profunda de uma liga de alumínio – um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

RODRÍGUEZ, C. J. C., **Cutting edge preparation of precision tools by applying microabrasive jet machining and brushing**. Dissertation. Kassel University, 2009

ROSA, S. DO N. **Avaliação da superfície modificada de brocas de metal duro revestidas pelo processo de deposição física de vapor**. Tese (Doutorado em

engenharia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SANTANA, Moises I. de. **Influência da preparação das arestas de corte de brocas helicoidais no processo de furação**. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SEDLAČEK, M.; PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J. **Influence of surface preparation on roughness parameters , friction and wear**. Wear, v. 266, p. 482–487, 2009.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. 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**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995. 110 p.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

VIANA, R. **Estudo da caracterização de ferramentas de corte texturizadas a laser e revestidas utilizadas no fresamento frontal de ferro fundido vermicular**. Tese (Doutorado em engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

VICTOR, S. **Estudo do efeito de revestimentos de ncralsi, no comportamento tribológico de aços ferramenta**. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

WHITEHOUSE, D. **Profile and areal (3D) parameter characterization**. Surfaces and their Measurements, p. 48-95, 2002.

YAMAGUCHI, H. et al. **Polishing of uncoated cutting tool surfaces for extended tool life in turning of Ti – 6Al – 4V**. Journal of Manufacturing Processes, v. 24, p. 355–360, 2016.

ZEILMANN, R. P.; OST, C. A.; FONTANIVE, F. **Characterization of edge preparation processes and the impact on surface integrity after milling of AISI P20 steel**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 7, 2018.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE RUGOSIDADE

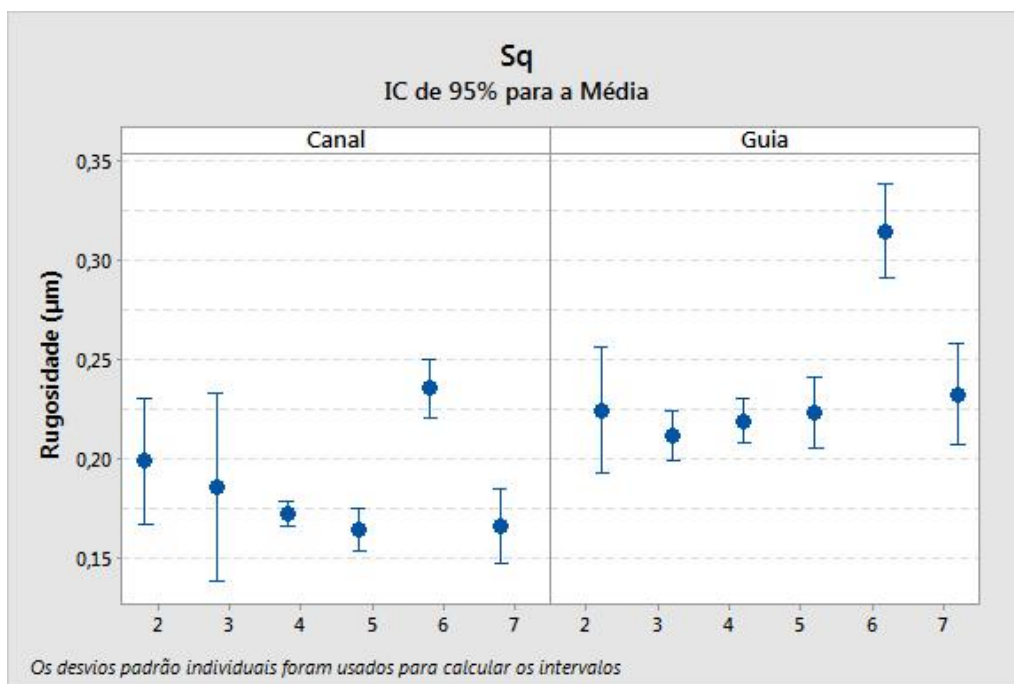


Figura 109 - Rugosidade Sq dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

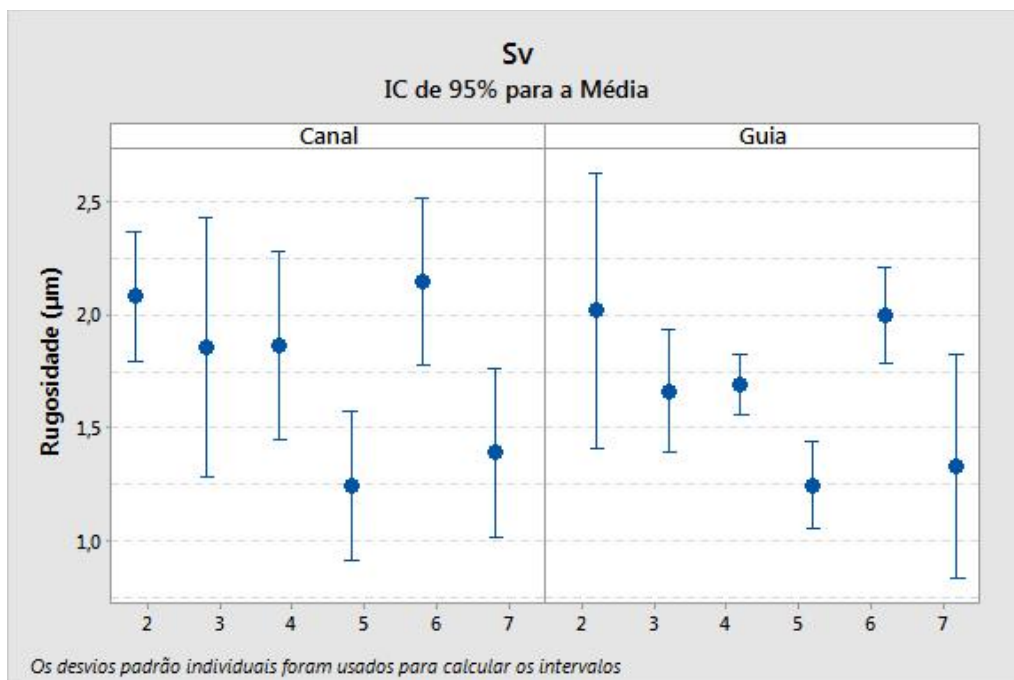


Figura 110 - Rugosidade Sv dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

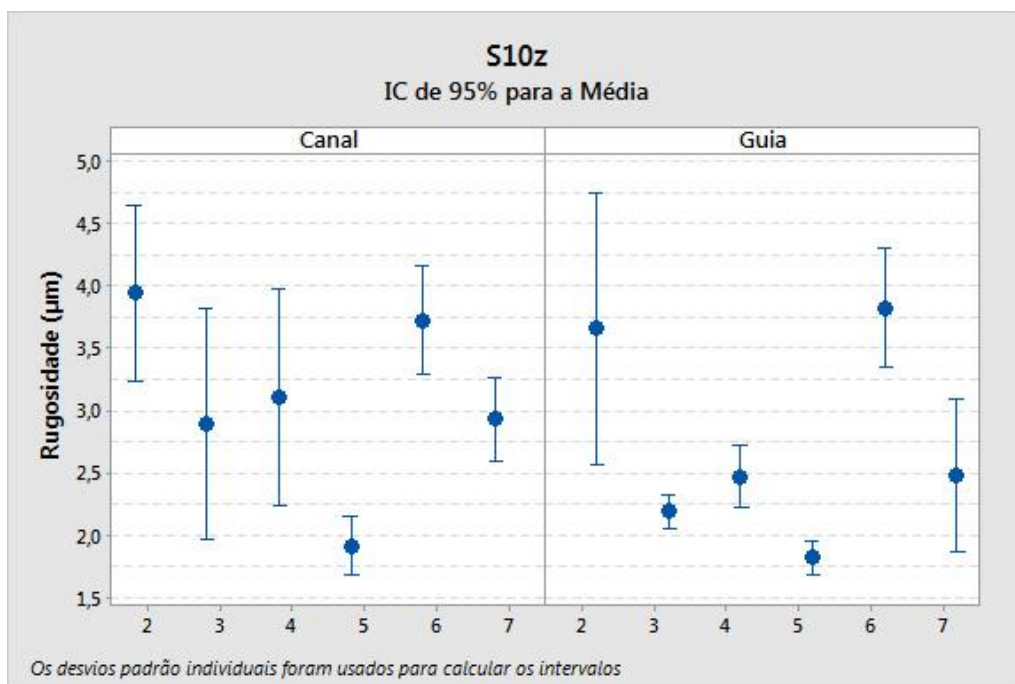


Figura 111 - Rugosidade S10z dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

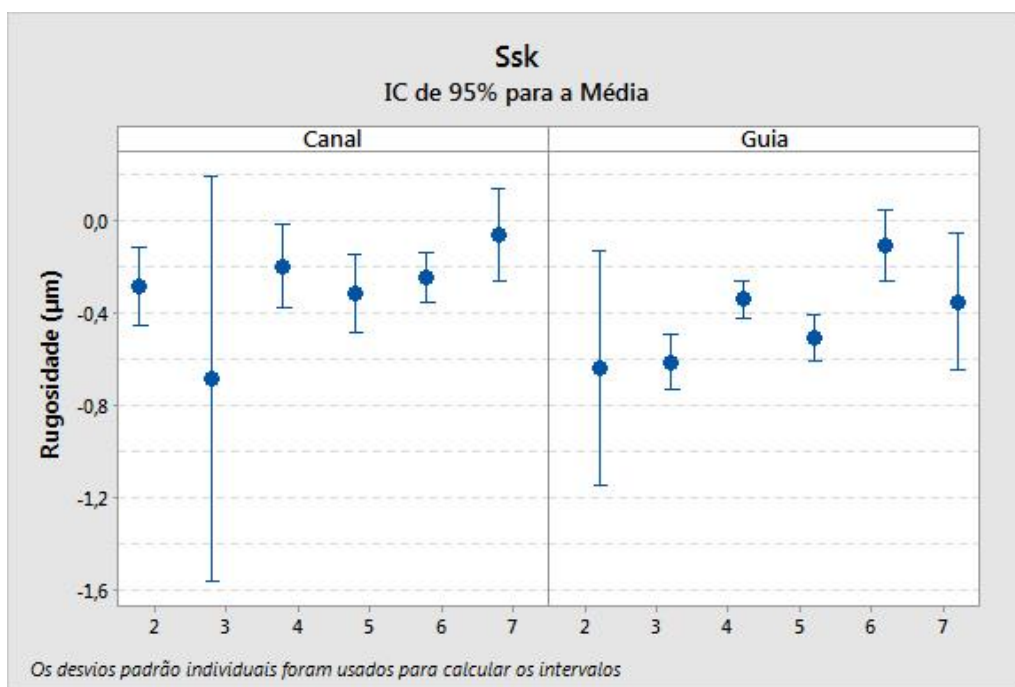


Figura 112 - Rugosidade Ssk dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

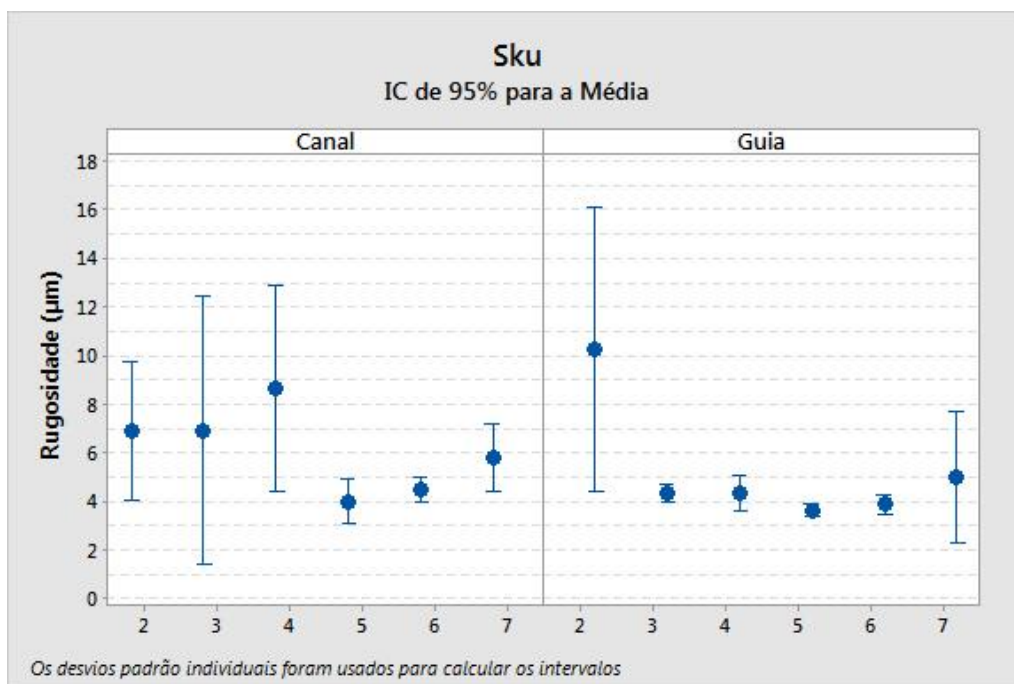


Figura 113 - Rugosidade Sku dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

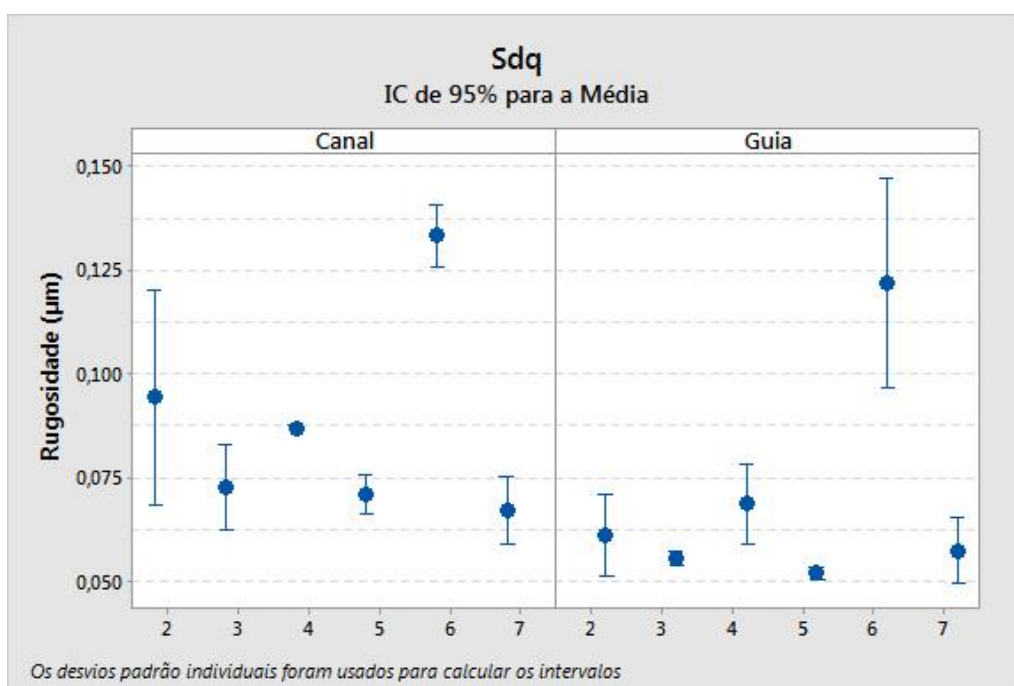


Figura 114 - Rugosidade Sdq dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

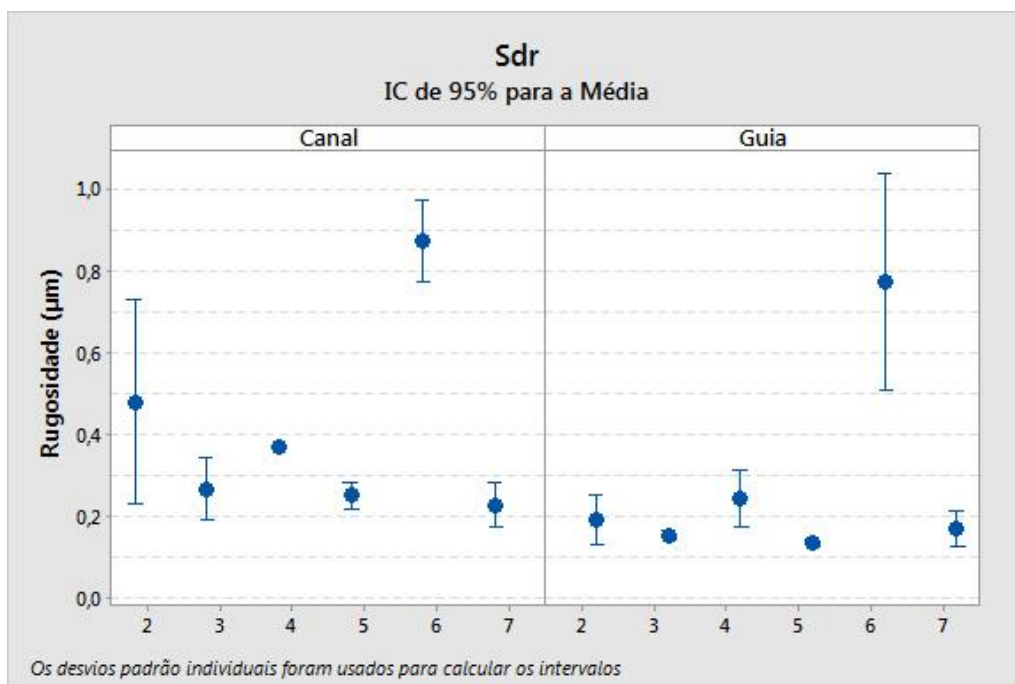


Figura 115 - Rugosidade Sdr dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

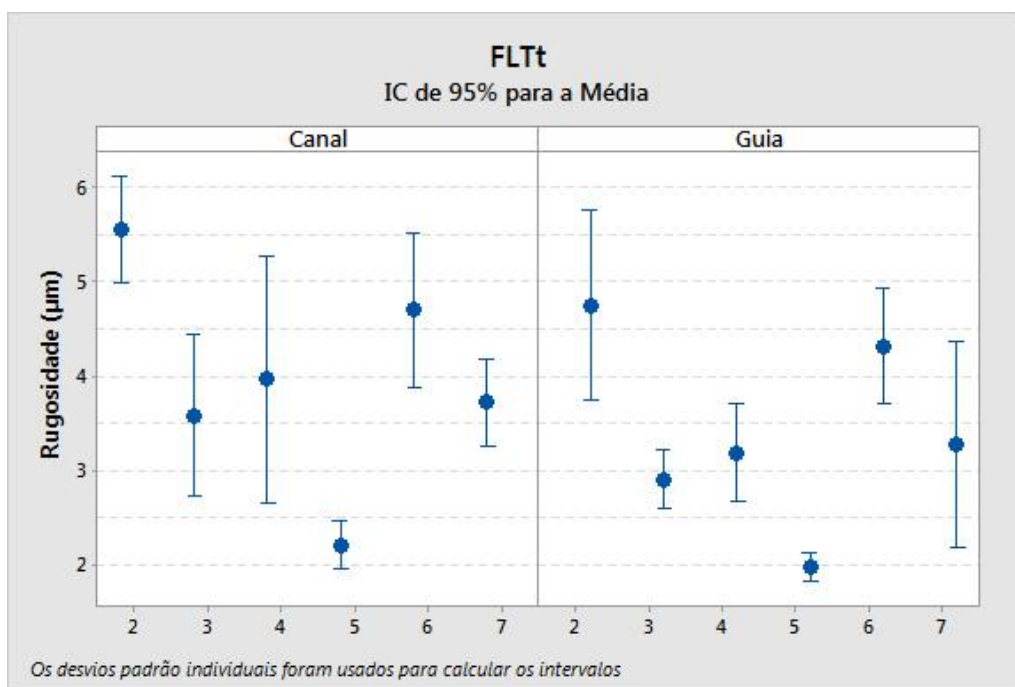


Figura 116 - Rugosidade FLTt dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

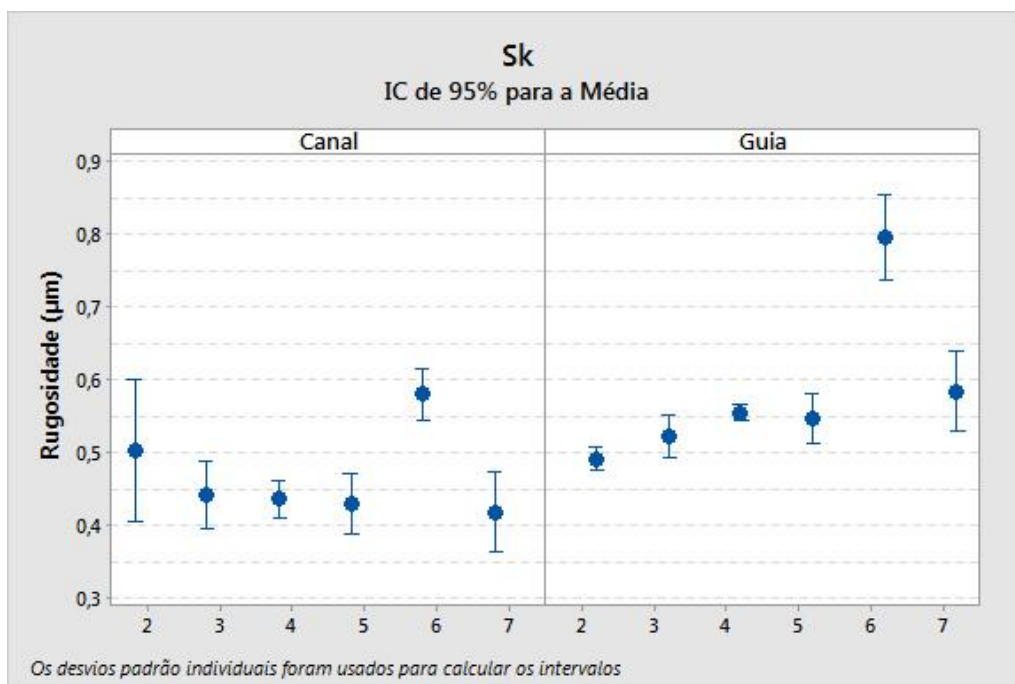


Figura 117 - Rugosidade Sk dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

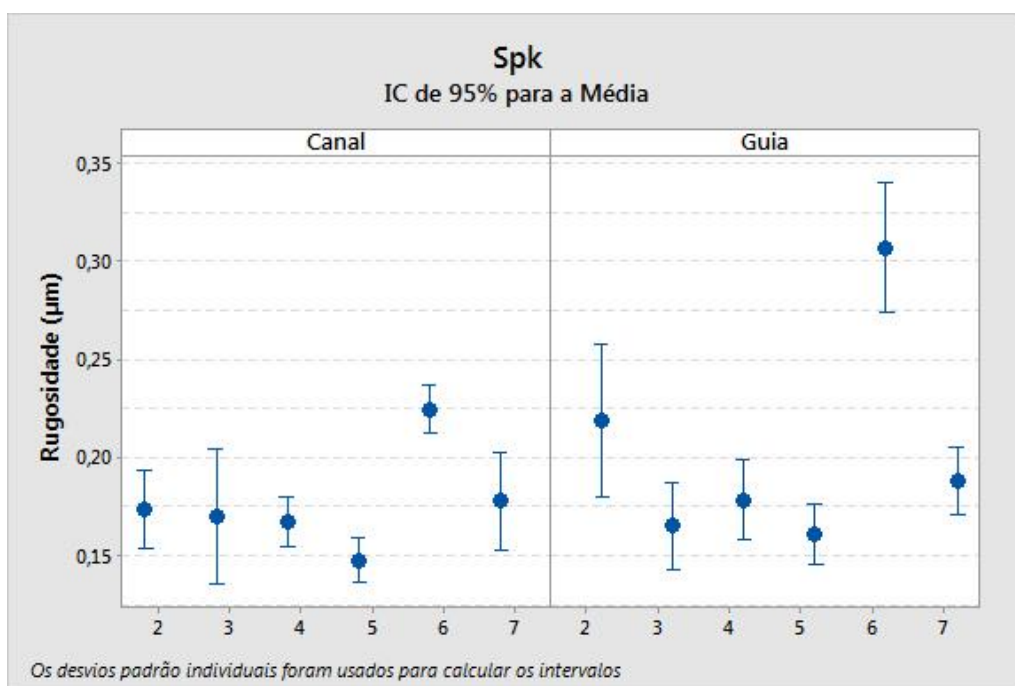


Figura 118 - Rugosidade Spk dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

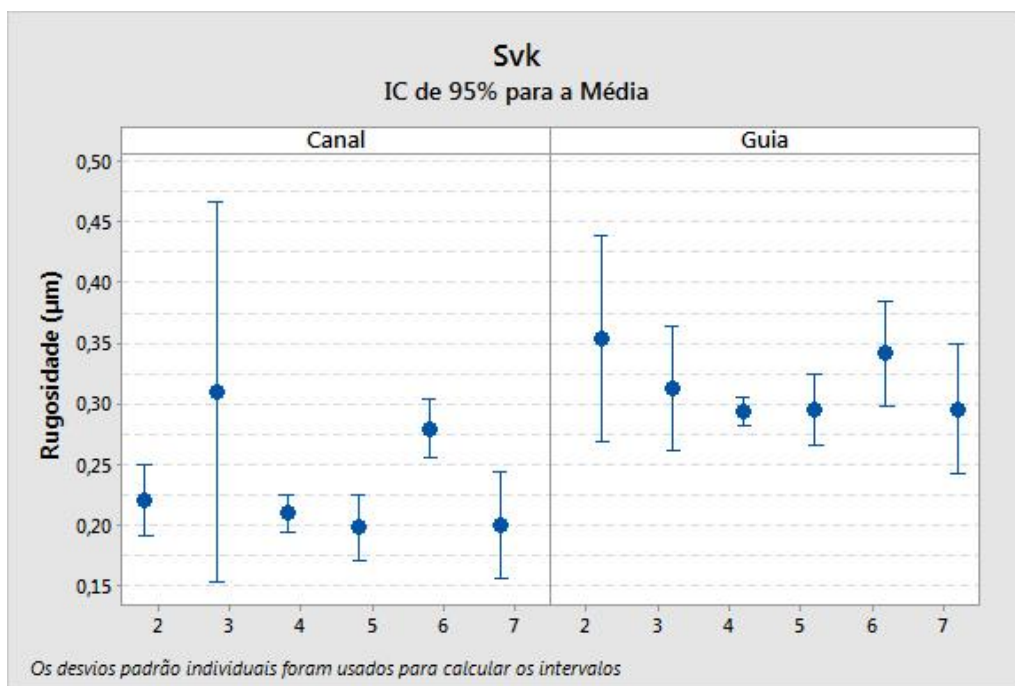


Figura 119 - Rugosidade Svk dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

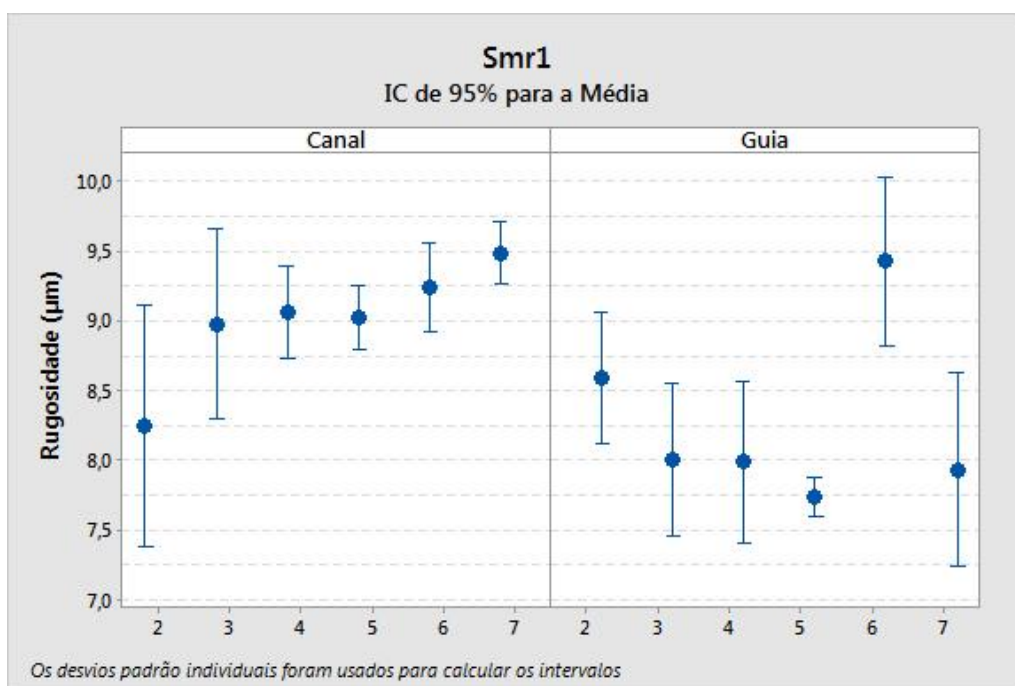


Figura 120 - Rugosidade Smr1 dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

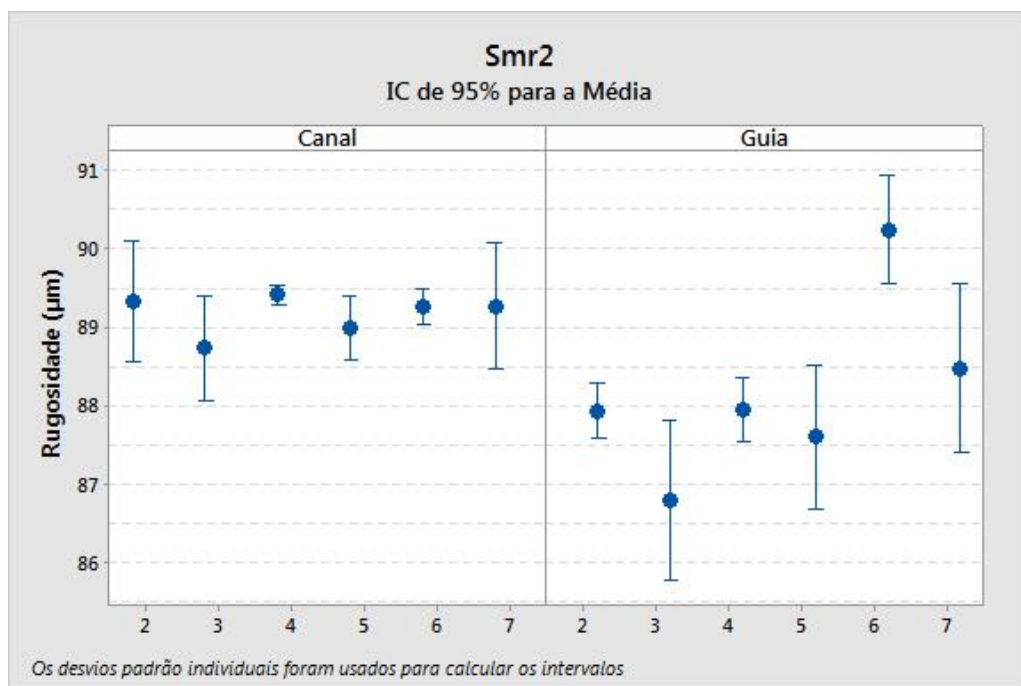


Figura 121 - Rugosidade Smr2 dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

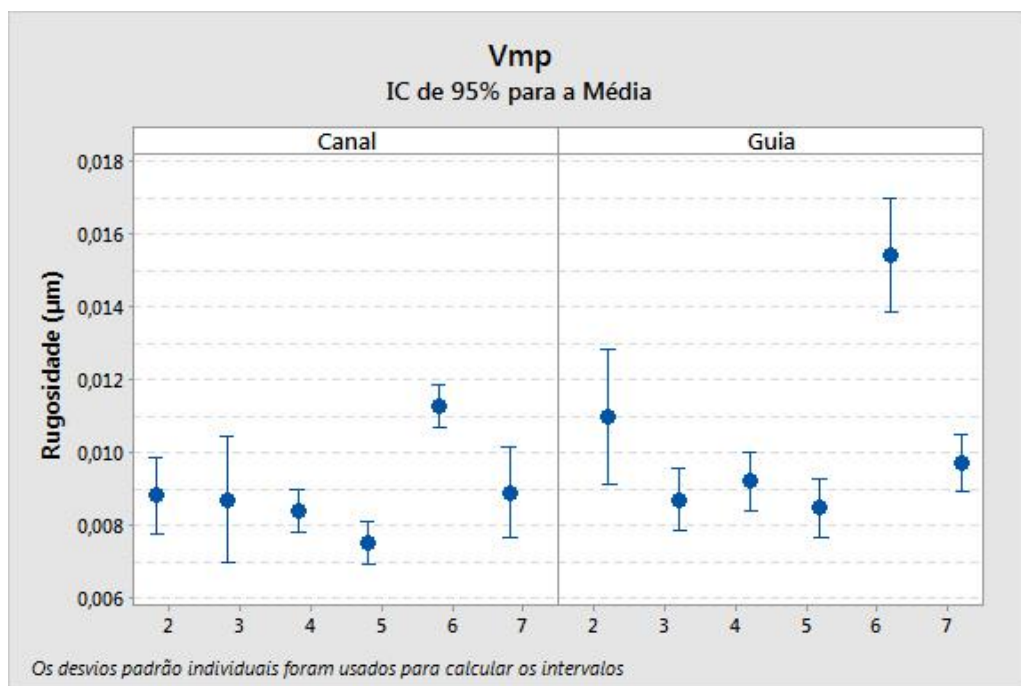


Figura 122 - Rugosidade Vmp dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

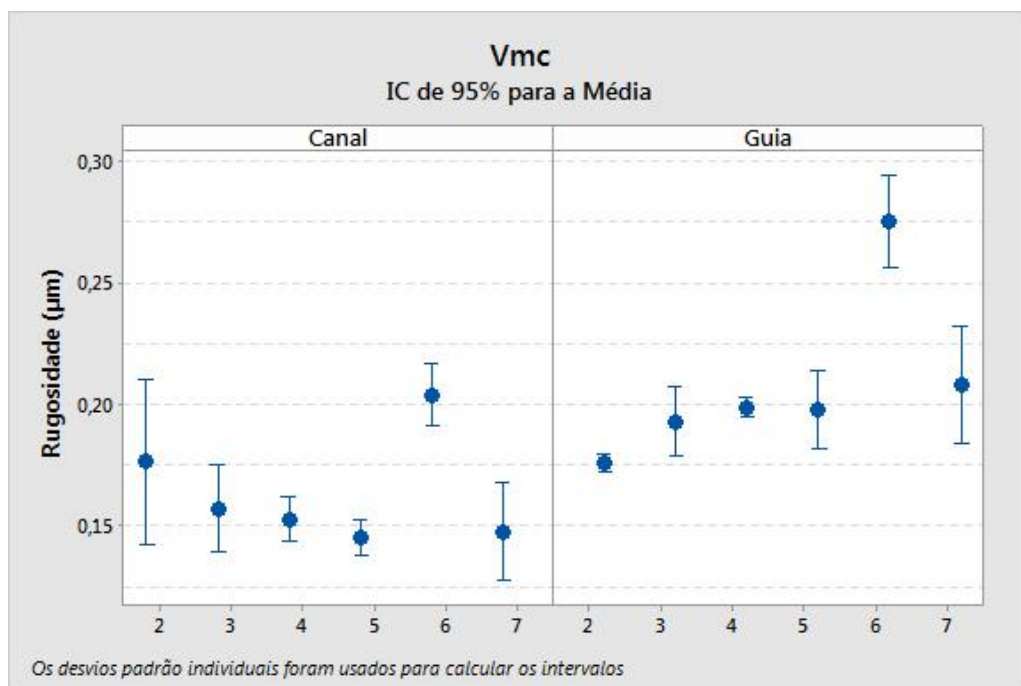


Figura 123 - Rugosidade Vmc dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

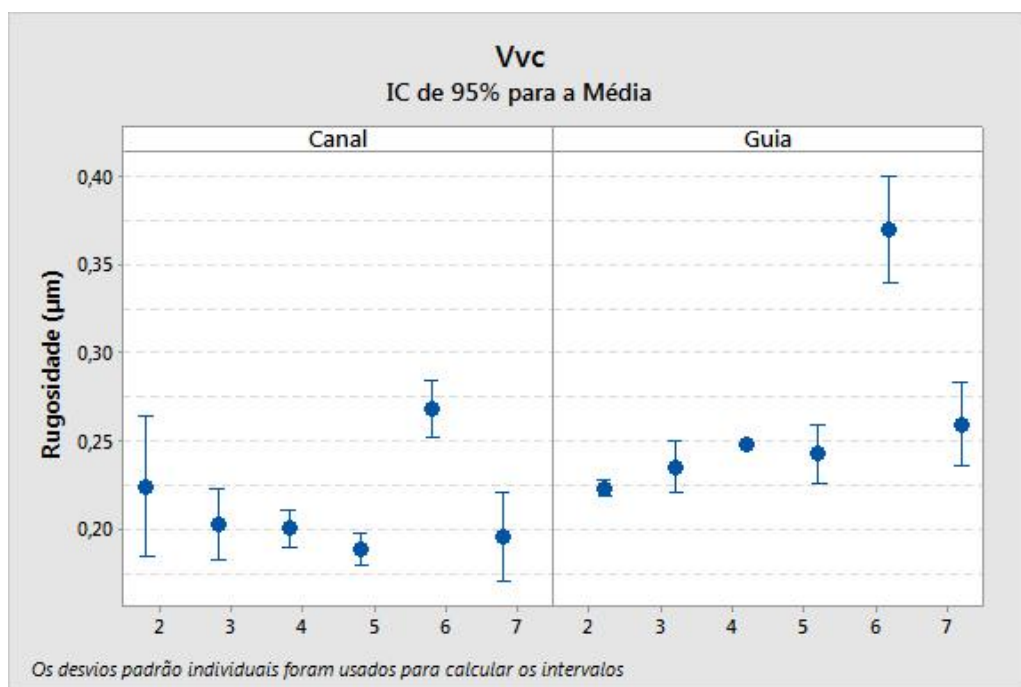


Figura 124 - Rugosidade Vvc dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

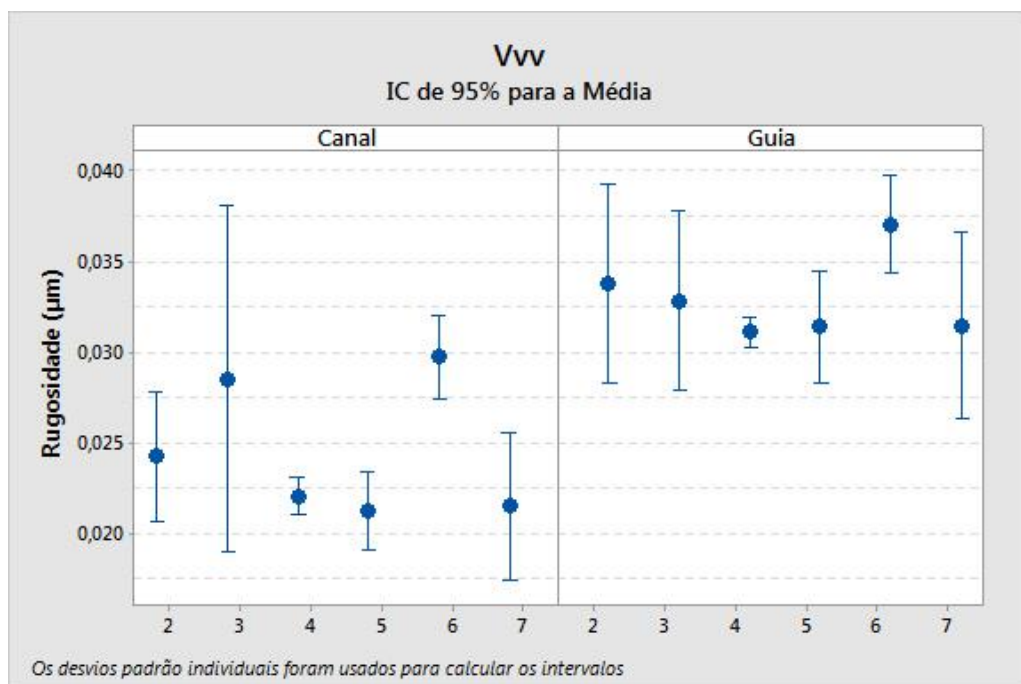


Figura 125 - Rugosidade Vvv dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

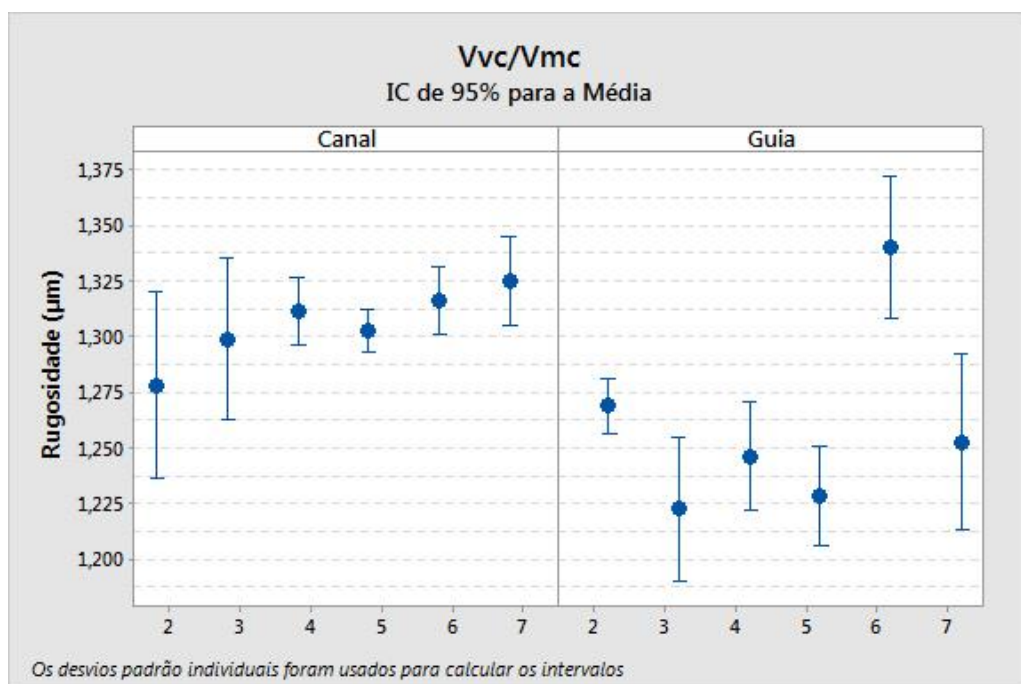


Figura 126 – Relação Vvc/Vmc dos seis processos investigados
Fonte: O autor (2019)

APÊNDICE B – RESULTADOS ESTATÍSTICOS

ANOVA com um fator: Temperatura_1 versus Ferramenta_1

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta_1	6	T2; T3; T4; T5; T6; T7

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ferramenta_1	5	6674	1334,7	2,93	0,029
Erro	30	13670	455,7		
Total	35	20344			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
21,3467	32,80%	21,60%	1,17%

Médias

Ferramenta_1	N	Média	DesvPad	IC de 95%
T2	6	114,77	14,83	(96,97; 132,57)
T3	6	125,80	12,49	(108,00; 143,60)
T4	4	98,88	19,92	(77,08; 120,68)
T5	10	136,17	18,90	(122,39; 149,96)
T6	6	140,9	32,8	(123,1; 158,7)
T7	4	139,6	25,9	(117,8; 161,4)

DesvPad Combinado = 21,3467

Gráfico de Intervalos de Temperatura_1 versus Ferramenta_1

Figura 127 - Teste Anova - Temperatura termopar final do furo
Fonte: O autor (2019)

ANOVA com um fator: Temperatura_1 versus Ferramenta_1

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$
Linhas não usadas	4

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta_1	5	T2; T3; T5; T6; T7

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ferramenta_1	4	2884	721,0	1,56	0,213
Erro	27	12480	462,2		
Total	31	15364			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
21,4991	18,77%	6,74%	0,00%

Médias

Ferramenta_1	N	Média	DesvPad	IC de 95%
T2	6	114,77	14,83	(96,76; 132,78)
T3	6	125,80	12,49	(107,79; 143,81)
T5	10	136,17	18,90	(122,22; 150,12)
T6	6	140,9	32,8	(122,9; 158,9)
T7	4	139,6	25,9	(117,5; 161,6)

DesvPad Combinado = 21,4991

Gráfico de Intervalos de Temperatura_1 versus Ferramenta_1

Figura 128 - Teste Anova - Temperatura termopar final do furo – Desconsiderando processo 4
Fonte: O autor (2019)

ANOVA com um fator: Temperatura versus Ferramenta

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta	6	T2; T3; T4; T5; T6; T7

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ferramenta	5	30584	6116,7	12,66	0,0000000027
Erro	89	43013	483,3		
Total	94	73596			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
21,9838	41,56%	38,27%	34,45%

Médias

Ferramenta	N	Média	DesvPad	IC de 95%
T2	15	196,29	25,00	(185,02; 207,57)
T3	15	234,08	11,83	(222,80; 245,36)
T4	20	192,99	19,94	(183,23; 202,76)
T5	15	188,02	13,63	(176,74; 199,30)
T6	20	227,39	33,83	(217,62; 237,15)
T7	10	213,99	6,75	(200,18; 227,81)

DesvPad Combinado = 21,9838

Gráfico de Intervalos de Temperatura versus Ferramenta

Figura 129 - Teste Anova - Temperatura termopar início do furo
Fonte: O autor (2019)

ANOVA com um fator: Temperatura versus Ferramenta

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$
Linhas não usadas	15

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta	3	T2; T4; T5

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ferramenta	2	521,7	260,9	0,65	0,527
Erro	47	18902,2	402,2		
Total	49	19424,0			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
20,0543	2,69%	0,00%	0,00%

Médias

Ferramenta	N	Média	DesvPad	IC de 95%
T2	15	196,29	25,00	(185,88; 206,71)
T4	20	192,99	19,94	(183,97; 202,01)
T5	15	188,02	13,63	(177,60; 198,44)

DesvPad Combinada = 20,0543

Gráfico de Intervalos de Temperatura versus Ferramenta

Figura 130 - Teste Anova - Temperatura termopar início do furo – Desconsiderando processos 3, 6 e 7
Fonte: O autor (2019)

ANOVA com um fator: Temperatura versus Ferramenta

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$
Linhas não usadas	50

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta	3	T3; T6; T7

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ferramenta	2	2441	1220,5	2,13	0,132
Erro	42	24111	574,1		
Total	44	26552			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
23,9595	9,19%	4,87%	0,00%

Médias

Ferramenta	N	Média	DesvPad	IC de 95%
T3	15	234,08	11,83	(221,60; 246,57)
T6	20	227,39	33,83	(216,57; 238,20)
T7	10	213,99	6,75	(198,70; 229,29)

DesvPad Combinada = 23,9595

Gráfico de Intervalos de Temperatura versus Ferramenta

Figura 131 - Teste Anova - Temperatura termopar início do furo - Desconsiderando processos 2, 4 e 5
Fonte: O autor (2019)