

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**EVANDRO RAFAEL WENDLER**

**INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE ARESTA NO PROCESSO DE  
FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO FC300**

**CURITIBA**

**2023**

**EVANDRO RAFAEL WENDLER**

**INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE ARESTA NO PROCESSO DE  
FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO FC300**

**Influence of cutting-edge preparation on the drilling process of gray cast iron  
FC300**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Milton Luiz Polli.

**CURITIBA**

**2023**



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba**



EVANDRO RAFAEL WENDLER

**INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE ARESTA NO PROCESSO DE FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO  
CINZENTO FC300**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 18 de Agosto de 2023

Dr. Milton Luiz Polli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fred Lacerda Amorim, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Dr. Neri Volpato, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 20/10/2023.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que através de Jesus me deu força e coragem para chegar ao fim deste desafio. Obrigado senhor.

Aos meus pais, que foram sempre os maiores incentivadores ao estudo como meio para o alcance dos objetivos profissional e pessoal.

Ao meu prezado orientador, Prof. Dr. Milton Luiz Polli, pelo conhecimento transmitido, paciência exercida e crença na ciência e na tecnologia.

Ao Prof. Dr. Manolo Lutero Gipiela e Prof. Dr. Jeferson Gil Furman que fizeram parte da minha formação e confiaram no meu potencial.

Ao Prof. Me. Sergio Luiz Manenti por acreditar e me incentivar a iniciar o curso de mestrado.

Ao Me. Moises Izaias de Santana pela disponibilidade e auxílio nas medições dos insertos.

Ao Prof. PhD. Neri Volpato e Dr. Paulo Andre De Camargo Beltrao, pelas valiosas sugestões durante o exame de qualificação e que se tornaram parte deste trabalho.

À Fecial, por propiciar o ambiente para a execução das preparações de arestas.

Ao SENAI CIC por disponibilizar os equipamentos para os ensaios de usinagem.

À PUCPR e seus Professores, pela disponibilidade de tempo para me auxiliar nas análises e uso dos equipamentos.

Ao mestre Alexandre Gonçalves do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR, pelo modo divertido de cooperar durante a aquisição das imagens.

Ao Me. José Alexandre de Campos pela disponibilidade durante os experimentos de aquisição das forças.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela contribuição durante o curso de mestrado.

Por fim, minha eterna gratidão a todos os envolvidos durante o processo de execução e análise dos experimentos.

## RESUMO

A preparação de aresta de corte tem sido destaque em recentes estudos, proporcionando melhores resultados aos processos de usinagem em âmbito industrial. Devido à grande complexidade para obtenção dessa microgeometria, os fabricantes costumam manter em segredo os processos para sua produção. O presente trabalho traz a análise da influência da preparação das arestas de corte de insertos intercambiáveis utilizados em suportes para furação em cheio do ferro fundido cinzento FC300. Foi utilizado um processo automático de escovamento com pasta diamantada para a obtenção do arredondamento da aresta de corte. Foram elaborados experimentos controlados utilizando ferramentas de corte apenas afiadas e outras preparadas com raios de aresta de 15, 30 e 50  $\mu\text{m}$ . Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem CNC Romi modelo Discovery 560. Para a caracterização das microgeometrias foram realizadas medições com um microscópio confocal  $\mu\text{CMM}$  (Alicona). A análise do tipo de desgaste da aresta de corte foi realizada com o microscópio eletrônico de varredura (MEV). Também foram medidas a força e torque, as temperaturas do cavaco (câmera termográfica), diâmetro, circularidade, e rugosidade do corpo de prova. Os resultados mostram que houve aumento na força de avanço, no torque e na temperatura do cavaco com o aumento do raio de aresta. Por outro lado, o processo de preparação da aresta proporcionou menor incidência de irregularidades e reforçou a aresta de corte. Além disso, o emprego de maiores raios de aresta influenciou positivamente na qualidade dos furos, resultando em menores valores de rugosidade. Houve adesão de material na aresta de corte em todas as ferramentas, porém esta foi menor nas ferramentas com maior arredondamento.

**Palavras-chave:** Furação, Microgeometria; Preparação da aresta de corte; Ferro fundido cinzento; Raio de aresta.

## ABSTRACT

The cutting-edge preparation has been the focus of recent studies, providing better results in industrial machining processes. Due to the complexity of obtaining this micro-geometry, manufacturers often keep the process for its production secret. This study analyzes the influence of the preparation of the cutting edges of interchangeable inserts used in holders for full drilling of FC300 gray cast iron. An automatic diamond paste brushing process was used to obtain a rounded cutting edge. Controlled experiments were carried out using cutting tools that were only sharpened and others prepared with edge radii of 15, 30, and 50  $\mu\text{m}$ . The experiments were carried out on a Romi Discovery 560 CNC machining center. To characterize the micro geometries, the measurements were taken with a  $\mu\text{CMM}$  confocal microscope (Alicona). The type of cutting edge wear was analyzed using a scanning electron microscope (MEV). It was also measured the force and torque, chip temperatures (thermographic camera), diameter, roundness, and roughness of the specimen. The results showed an increase in feed force, torque, and chip temperature as the edge radius increased. Furthermore, the edge preparation process led to a lower incidence of irregularities and strengthened the cutting edge. In addition, the use of larger edge radii had a positive influence on the quality of the holes, resulting in lower roughness values. There was material adhesion on the cutting edge in all tools, but it was lower in tools with greater cutting edge radius.

**Keywords:** Edge radius; Drilling, Microgeometry; Cutting edge preparation; Gray cast iron.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Erros comuns em um processo de furação.....	18
Figura 2 - Formação do cavaco e o plano de cisalhamento .....	19
Figura 3 - Sequência de formação de cavacos em ferros fundidos .....	20
Figura 4 - Formatos de cavacos de um processo de furação .....	21
Figura 5 - Tipo de cavacos .....	21
Figura 6 - Seguimento da força de atrito ( $\Delta F_{ui}$ ) e força normal ( $\Delta F_{vi}$ ) .....	23
Figura 7 - Posição dos inserto no suporte da broca em coordenadas globais (x, y, z) .....	23
Figura 8 - Forças de usinagem no eixo x .....	24
Figura 9 - Forças de usinagem no eixo y .....	24
Figura 10 - Forças de usinagem no eixo z .....	24
Figura 11 - Torque ao redor do eixo z .....	24
Figura 12 - Diagrama de fases do sistema ferro-carbono.....	25
Figura 13 - Diagrama de fases do sistema ferro-carbono.....	29
Figura 14 - Influência dos parâmetros de usinagem no desgaste .....	30
Figura 15 - Desgaste característico em ferramentas de corte.....	32
Figura 16 - Torque em um processo de furação.....	33
Figura 17 - Transição da macro para micro geometria de corte com relação às condições de corte.....	34
Figura 18 - Aresta de corte após afiação.....	34
Figura 19 - Imprecisão ao descrever a geometria da aresta de corte com um único raio .....	35
Figura 20 - Método de fator de forma .....	35
Figura 21 - Caracterização da média S .....	36
Figura 22 - Caracterização de uma aresta de corte.....	37
Figura 23 - Caracterização de uma aresta de corte.....	37
Figura 24 - Caracterização de micro geometria de corte .....	38
Figura 25 - Aspectos relacionados a ferramenta.....	38
Figura 26 - Geometrias utilizadas na preparação de arestas de corte .....	39
Figura 27 - Influência do raio da aresta de corte $r_{\beta}$ e avanço f nas forças de corte $F_c$ e forças de avanço $F_f$ para torneamento TiAl6V4, padronizado para uma largura de corte de $a_p = 1$ mm, $v_c = 70$ m / min.....	41
Figura 28 - Influência de arestas de corte arredondadas no fluxo de material na zona de separação .....	42
Figura 29 - Influência de arestas de corte chanfradas no fluxo de material na zona de separação .....	42
Figura 30 - Temperatura na ferramenta de corte .....	43
Figura 31 - Componentes das forças resultantes .....	44
Figura 32 - Comparação da aresta da ferramenta sem preparação e com preparação .....	45
Figura 33 - Tempo de vida entre arestas preparadas.....	47
Figura 34 - Comparação de aresta preparada por micro jateamento (B) e AFM (C) em relação a aresta retificada (A) .....	48
Figura 35 - Métodos para preparação de arestas de corte .....	49
Figura 36 - Dispositivo de fixação da ferramenta.....	49
Figura 37 - Acabamento superficial após preparação de arestas de corte .....	50
Figura 38 - Valores de rugosidade e textura .....	51

Figura 39 - Comparação do acabamento superficial de aresta afiada, <i>Drag finished</i> e polida .....	51
Figura 40 - Representação do processo de eletroerosão para preparação da aresta.....	52
Figura 41 - Representação da aresta de corte e contraface de alumínio .....	52
Figura 42 - Comparação de aresta afiada com arredondamento por EDM de ferramentas de HSS e metal duro .....	53
Figura 43 - Taxa de variação do arredondamento da aresta de corte por EDM.....	53
Figura 44 - Fixação de ferramentas no cabeçote <i>Drag Finishing</i> .....	54
Figura 45 - Detalhamento da máquina <i>Drag finishing</i> .....	54
Figura 46 - Droplets na superfície (esquerda) e removidos (direita) .....	55
Figura 47 - Fluxograma de atividades .....	58
Figura 48 - corpo de prova .....	59
Figura 49 – Fixação do corpo-de-prova e ferramenta no centro de usinagem Discovery 560 .....	60
Figura 50 - Suporte helicoidal modelo DR025-075-32-09 .....	60
Figura 51 – Insertos do modelo SOMT 09T306-DT do fabricante Iscar .....	61
Figura 52 - Inseto após afiação.....	61
Figura 53 - Câmera termográfica .....	62
Figura 54 – Peça com a divisão para medição de temperatura.....	63
Figura 55 – Sistema de fixação da plataforma piezoelétrica .....	63
Figura 56 - Máquina de medição por coordenadas $\mu$ CMM Alicona.....	64
Figura 57 – Exemplo análise de desgaste.....	65
Figura 58 – Rugosímetro do centro de caracterização de materiais (CMCM) da UTFPR .....	65
Figura 59 – Máquina de medições por coordenadas CNC do laboratório de metrologia da PUC-PR .....	66
Figura 60 – Caracterização gráfica inserto 1 .....	69
Figura 61 - Caracterização gráfica inserto 2 .....	70
Figura 62 - Perfil gerado pela Alicona da aresta de corte afiada .....	70
Figura 63 - Perfil gerado pela Alicona do raio de quina afiada .....	71
Figura 64 - Caracterização gráfica inserto 3 .....	72
Figura 65 - Caracterização gráfica inserto 4 .....	73
Figura 66 - Perfil gerado pela Alicona da aresta de corte arredondada 15 $\mu$ m..	74
Figura 67 - Perfil gerado pela Alicona do raio de quina arredondado 15 $\mu$ m.....	74
Figura 68 - Caracterização gráfica inserto 5 .....	75
Figura 69 - Caracterização gráfica inserto 6 .....	76
Figura 70 - Perfil gerado pela Alicona da aresta de corte arredondada 30 $\mu$ m..	77
Figura 71 - Perfil gerado pela Alicona do raio de quina arredondado 30 $\mu$ m.....	77
Figura 72 - Caracterização gráfica inserto 7 .....	78
Figura 73 - Caracterização gráfica inserto 8 .....	79
Figura 74 - Perfil gerado pela Alicona da aresta de corte arredondada 50 $\mu$ m..	80
Figura 75 - Perfil gerado pela Alicona do raio de quina arredondado 50 $\mu$ m.....	80
Figura 76 – Microlascamento de aresta afiada .....	81
Figura 77 – Aresta arredondada ( $r_{\beta} = 15 \mu$ m) .....	82
Figura 78 – Aresta arredondada ( $r_{\beta} = 30 \mu$ m) .....	82
Figura 79 – Aresta arredondada ( $r_{\beta} = 50 \mu$ m) .....	83
Figura 80 – Comparação das temperaturas no processo de usinagem primeiro quarto .....	87

Figura 81 – Comparação das temperaturas no processo de usinagem no último quarto .....	87
Figura 82 – Desgaste VB para os insertos da periferia.....	91
Figura 83 – Análise da aresta de corte afiada e aresta 1 após usinagem. ....	92
Figura 84 – Análise da aresta de corte $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ e aresta 1 após usinagem....	92
Figura 85 – Análise da aresta de corte $r_{\beta} = 30 \mu\text{m}$ e aresta 1 após usinagem....	92
Figura 86 – Análise da aresta de corte $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ e aresta 1 após usinagem....	93
Figura 87 – Análise da aresta de corte afiada e aresta 1 após usinagem. ....	93
Figura 88 – Análise da aresta de corte $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ e aresta 1 após usinagem....	94
Figura 89 – Análise da aresta de corte $r_{\beta} = 30 \mu\text{m}$ e aresta 1 após usinagem....	94
Figura 90 – Análise da aresta de corte $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ e aresta 1 após usinagem....	95
Gráfico 1 – Análise de força de avanço das arestas .....	84
Gráfico 2 – Análise do torque das arestas .....	85
Gráfico 3 – Análise da temperatura do cavaco.....	88
Gráfico 4 – Média do desgaste VB dos insertos centrais .....	89
Gráfico 5 – Média do desgaste VB dos insertos periféricos .....	90
Gráfico 6 – Média da rugosidade do furo a 25 mm de profundidade.....	96
Gráfico 7 – Média dos diâmetros a 5, 10 e 40 mm de profundidade .....	97
Gráfico 8 – Média das circularidades a 5, 10 e 40 mm de profundidade .....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo versus rugosidade .....	55
Tabela 2 - Composição química (%) FC 300.....	59
Tabela 3 - Valores de referência para o arredondamento da aresta de corte ....	62
Tabela 4 - Especificações técnicas da câmera termográfica .....	62
Tabela 5 - Parâmetros de usinagem .....	67
Tabela 6 – Caracterização do inserto 1 .....	68
Tabela 7 – Caracterização do inserto 2 .....	69
Tabela 8 - Caracterização do inserto 3 .....	72
Tabela 9 - Caracterização do inserto 4 .....	73
Tabela 10 - Caracterização do inserto 5 .....	75
Tabela 11 - Caracterização do inserto 6 .....	76
Tabela 12 - Caracterização do inserto 7 .....	78
Tabela 13 - Caracterização do inserto 8 .....	79
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) de força de avanço .....	84
Tabela 15 – Teste Tukey de força de avanço .....	84
Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) do torque .....	85
Tabela 17 – Teste Tukey do torque .....	86
Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) da temperatura do cavaco .....	88
Tabela 19 – Teste Tukey da temperatura do cavaco .....	88
Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA) do desgaste VB.....	90
Tabela 21 – Análise de variância (ANOVA) do desgaste VB.....	90
Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA) do desgaste VB.....	96
Tabela 23 – Teste Tukey da rugosidade Ra .....	96
Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA) do diâmetro .....	97
Tabela 25 – Teste Tukey do diâmetro .....	98
Tabela 26 – Análise de variância (ANOVA) das circularidades .....	99

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Dr.	Doutor
Eng.	Engenheiro
<i>et al.</i>	<i>And others</i>
Me.	Mestre
PhD	<i>Doctor of Philosophy</i>
Prof.	Professor
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AlCrN	Nitreto de cromo e alumínio
AlTiN	Nitreto de titânio e alumínio
B-Spline	Curva básica definida matematicamente por dois ou mais pontos de controle
CAC	Camada afetada pelo calor
CBN	<i>Cubic boron nitride</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i>
EDM	Eletroerosão
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EP	Extrema Pressão
HRC	Extrema Pressão
HSS	<i>High Speed Steel</i>
HT-CVD	<i>High Temperature - Chemical Vapor Deposition</i>
HV0,01	Unidade de dureza Vickers na escala de microdureza
PM-HSS	<i>Powder metallurgy - High Speed Steel</i>
PVD	<i>Physical vapor deposition</i>
SKF	<i>Svenska Kullagerfabriken</i>
TaC	Carboneto de tântalo
TiAlN	Nitreto de titânio alumínio
TiC	Carboneto de titânio
TiCN	Carboneto de titânio
TiN	Carboneto de titânio
(Ti, Ta)C	Carboneto de titânio e tântalo

UP	<i>Unit pump</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VDI	<i>Verein Deutsche Ingenieure</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Unidade	Descrição
$l/d$	-	Relação entre comprimento e diâmetro
Rz	$\mu\text{m}$	Rugosidade da superfície média
Ra	$\mu\text{m}$	Rugosidade média
N7	$\mu\text{m}$	Classe da Rugosidade (N1-N12)
VB	mm	Largura média de desgaste de flanco ou incidência
Kw	mm	Desgaste de cratera
CT	mm	Desgaste da aresta transversal (profundidade)
Cm	mm	Desgaste da aresta transversal (largura)
W	mm	Desgaste de quina
Mw	mm	Desgaste de guia
Pt	mm	Parâmetros de lascamento de aresta (profundidade)
Pm	m	Parâmetros de lascamento de aresta (largura)
VB <sub>máx</sub>	mm	Largura máxima de desgaste de incidência ou flanco
W	-	Tungstênio
Ti	-	Titânio
Ta	-	Tântalo
Nb	-	Nióbio
Vc	m/min	Velocidade de corte
a <sub>e</sub>	mm	Largura de corte
a <sub>p</sub>	mm	Profundidade de corte
f <sub>z</sub>	mm	Avanço por dente
V <sub>e</sub>	m/min	Velocidade resultante (efetiva) de corte
P <sub>fe</sub>	-	Plano de trabalho
V <sub>f</sub>	mm/min	Velocidade de Avanço
f	mm/min	Avanço
h	mm	Espessura do cavaco antes de formado
h'	mm	Espessura do cavaco depois de formado
V	m/min	Velocidade
F <sub>c</sub>	N	Força de corte
F <sub>t</sub>	Nm	Torque

V	m/min	Velocidade de avanço
T	min	Tempo de vida da ferramenta
K	-	Constante do modelo da taxa de remoção
lc	m	Vida em metros lineares
C	-	Carbono
Mn	-	Manganês
P	-	Fósforo
S	-	Enxofre
Si	-	Silício
Cu	-	Cobre
Cr	-	Cromo
Ni	-	Níquel
Al	-	Alumínio
Mo	-	Molibdênio
Rq	μm	Rugosidade quadrática média
Rp	μm	Altura máxima do pico do perfil
Rv	μm	Profundidade máxima do vale do perfil
O	-	Oxigênio
FC	-	Ferro fundido cinzento
Fe	-	Ferro
Co	-	Cobalto
Ca	-	Cálcio
N	-	Nitrogênio
Wc	-	Carboneto de tungstênio

## LISTA DE SÍMBOLOS DO ALFABETO GREGO

Símbolo	Unidade	Descrição
$\emptyset$	mm	Diâmetro
$d$	mm	Diâmetro da broca
$\sigma$	graus	Ângulo entre as arestas principais de corte
$\Psi$	graus	Ângulo da aresta transversal
$\alpha_f$	graus	Ângulo de folga (incidência)
$\beta_f$	graus	Ângulo de cunha
$\gamma_f$	graus	Ângulo de saída
$\epsilon_r$	graus	Ângulo de quina
$r_\beta$	$\mu\text{m}$	Raio de cunha
$\Pi$	graus	Ângulo da direção resultante (efetiva) de corte
$\varphi$	graus	Ângulo da direção de avanço
$\Phi$	graus	Ângulo de cisalhamento
$S_\gamma$	$\mu\text{m}$	Comprimento do arredondamento na superfície de saída
$S_\alpha$	$\mu\text{m}$	Comprimento do arredondamento na superfície de incidência
$\gamma_\beta$	graus	Ângulo do chanfro
$l_\beta$	mm	Comprimento do ângulo
$\Delta r$	$\mu\text{m}$	Parâmetro que descreve o arredondamento da aresta de corte
$\varphi$	graus	Ângulo do ponto mais alto do contorno

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo da pesquisa .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Organização do trabalho .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Furação .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Formação de cavacos .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Forças no processo de furação .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4</b>	<b>Ferro fundido .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5</b>	<b>Usinabilidade .....</b>	<b>26</b>
<b>2.6</b>	<b>Mecanismos de desgaste da ferramenta.....</b>	<b>29</b>
<b>2.7</b>	<b>Crítérios de fim de vida de ferramenta .....</b>	<b>32</b>
<b>2.8</b>	<b>Preparação da aresta de corte .....</b>	<b>33</b>
<b>2.9</b>	<b>Importância da preparação de arestas .....</b>	<b>37</b>
<b>2.10</b>	<b>Influência da preparação de aresta nas forças de usinagem, cargas térmicas e cargas mecânicas.....</b>	<b>41</b>
<b>2.11</b>	<b>Influência da preparação de aresta no desgaste das ferramentas ..</b>	<b>45</b>
<b>2.12</b>	<b>Métodos utilizados para preparação de aresta.....</b>	<b>48</b>
<b>2.13</b>	<b>Análise de variância (ANOVA).....</b>	<b>55</b>
<b>2.14</b>	<b>Oportunidade de pesquisa .....</b>	<b>57</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>58</b>
<b>3.1</b>	<b>Material usinado .....</b>	<b>59</b>
<b>3.2</b>	<b>Corpos-de-prova.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3</b>	<b>Máquina-ferramenta .....</b>	<b>60</b>
<b>3.4</b>	<b>Ferramenta de furação com inserto intercambiável.....</b>	<b>60</b>
<b>3.5</b>	<b>Equipamento para medição de temperatura .....</b>	<b>62</b>
<b>3.6</b>	<b>Equipamento para aquisição de força e torque.....</b>	<b>63</b>
<b>3.7</b>	<b>Equipamentos de aquisição de imagem e análise .....</b>	<b>64</b>
<b>3.8</b>	<b>Equipamento para medição de rugosidade .....</b>	<b>65</b>
<b>3.9</b>	<b>Equipamento para avaliação de diâmetro e circularidade.....</b>	<b>65</b>
<b>3.10</b>	<b>Análises estatísticas ANOVA e teste tukey.....</b>	<b>66</b>
<b>3.11</b>	<b>Parâmetros de usinagem.....</b>	<b>67</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>68</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização das ferramentas de corte .....</b>	<b>68</b>

<b>4.2</b>	<b>Avaliação do processo de usinagem.....</b>	<b>83</b>
<b>4.3</b>	<b>Avaliação dos insertos .....</b>	<b>89</b>
<b>4.4</b>	<b>Avaliação dos corpos de prova.....</b>	<b>95</b>
4.4.1	Avaliação da rugosidade dos furos.....	95
4.4.2	Avaliação do diâmetro dos furos .....	97
4.4.3	Avaliação da circularidade dos furos .....	98
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>100</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>100</b>
<b>5.2</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria de produção, os processos de usinagem têm grande aplicação para obter geometrias desde as mais simples até as mais complexas. Eles têm destaque na manufatura moderna de vários segmentos, sendo que a alta competitividade do mercado globalizado leva à necessidade de redução de custos e menores tempos de processo. De modo que, altas taxas de remoção de material são cada vez mais empregadas, o que afeta diretamente a vida das ferramentas.

O processo de furação é uma operação de usinagem que utiliza de ferramentas de corte rotativas com geometria definida para remoção de material. Para garantir uma otimização do processo, a estabilidade do corte é um pré-requisito para uma usinagem eficiente e de alta precisão. Os processos de furação representam na indústria de manufatura cerca de 36% do total de tempo dos processos de usinagem (Elzenheimer *et al.* 2003). Quando se trata de processos de furação, é possível obter desde pré-furos para posteriores usinagens quanto furos acabados dependendo das exigências de qualidade (DINIZ *et al.* 2013; STEMMER, 2008).

Com o desenvolvimento da manufatura industrial os fabricantes estão partindo para um novo conceito a fim de suprir as necessidades do mercado com relação à melhoria do desempenho da ferramenta. Técnicas já difundidas como a aplicação de revestimento e alterações da geometria da ferramenta auxiliam na obtenção de ferramentas com maior durabilidade. Com base nesse quesito, tem-se a preparação de aresta de corte. Apesar dos avanços tecnológicos na produção de ferramentas, ainda há defeitos na fabricação. Ao preparar a aresta de corte, é possível gerar uma aresta com geometria controlável que modifica a microtopografia. Como consequência, reduz os defeitos, reforça a aresta de corte e melhora a qualidade da superfície usinada (RODRÍGUEZ, 2009).

A preparação da aresta de corte com um raio ou um chanfro, altera o aspecto fundamental da mecânica de corte, em que também gera mudanças nas forças de corte, formação do fluxo de cavaco, na distribuição de temperaturas, no desgaste da ferramenta e na integridade da superfície da peça usinada (DENKANA *et al.*, 2011).

Na fabricação de ferramentas de alto desempenho existem quatro aspectos correlacionados: substrato, revestimento, macrogeometria e preparação da aresta de corte. Quanto ao substrato, é possível encontrar uma grande variedade de classes e tamanhos de grãos. Os revestimentos podem ser escolhidos de acordo com o que o

mercado oferece associado à aplicação da ferramenta (FRIEMUTH, 2002; PRENGEL *et al.* 1998; TÖNSHOFF *et al.* 2004). A macrogeometria é definida de acordo com o tipo de material a ser usinado. No entanto, a preparação de aresta ainda é pouco estudada, especialmente em aplicações de furações. Grande parte dos estudos estão atrelados aos processos de torneamento ou fresamento (RODRÍGUES, 2009).

Com relação aos processos de preparação de arestas, existem vários métodos para obter a geometria desejada como: fluxo abrasivo magnético, polimento, máquina de fluxo abrasivo, escovamento, jateamento, eletroerosão, jato de água, microafiação, laser entre outros (GILLESPIE, 1999; RODRIGUES, 2009).

Segundo DENKENA *et al.* (2011), a preparação da aresta contribui para melhorias significativas nos aspectos termomecânicos do processo de corte, como na distribuição de temperatura, formato da zona de deformação, forças de usinagem, formação e fluxo de cavacos, resistência da ferramenta ao desgaste e integridade superficial da peça usinada. As falhas na aresta de corte geram descontinuidades o que acarreta um desgaste prematuro da ferramenta, a fim de melhorar a resistência, foi objeto de estudo de vários autores a realização da preparação de aresta por vários meios de fabricação (BIERMANN *et al.* 2008, BIERMANN *et al.*, 2012, BOUZAKIS *et al.* 2000). Apesar de ser de grande importância, há poucos trabalhos sobre preparação de arestas, o que pode ter contribuído para isso, seria a ineficiência no processo fabricar e mensurar a microgeometria.

Autores como Denkena *et al.* (2002) apresentaram um método para caracterização do arredondamento de arestas, que se aplica bem para insertos. Este método foi questionado por Wyen *et al.* (2012) que revelou em sua publicação, os pontos fracos da metodologia desenvolvida por Denkena *et al.* (2002). Geometrias completamente diferentes com o mesmo valor de raio podem ocorrer no método proposto por Denkena *et al.* (2002). Tikal *et al.* (2006) se depararam com a dificuldade de representar o perfil do arredondamento da aresta de corte e propuseram um método complexo que prevê o fracionamento da aresta em 4 partes, para que sejam analisadas individualmente e posterior definição do raio de arredondamento. Rodrigues (2009) propôs um método que é uma melhoria do proposto por Tikal *et al.* (2006), mas este também é complexo. Wyen *et al.* (2012) também propuseram um método que também não é simples para ser aplicado. Yussefian *et al.* (2013) mostraram uma proposta baseada em curvas (B-Spline) que podem facilmente serem

representadas em sistemas CAD/CAM/CAE e que consegue descrever o perfil do arredondamento com boa precisão.

Com base em informações obtidas junto a empresa fabricante de ferramentas especiais e parceira no trabalho, observou-se um grande interesse na usinagem com a utilização de brocas com insertos intercambiáveis para usinagem de ferro fundido cinzento. Esse material é muito utilizado por seus clientes na fabricação de cabeçotes de motores a combustão para a linha de caminhões e máquinas pesadas, conexões hidráulicas de alta pressão, manifolds, tampas e êmbolos.

Resultados foram apresentados sobre a influência da preparação de aresta no que tange melhorias ao desgaste, distribuição das temperaturas na aresta de corte e integridade da superfície usinada principalmente na usinagem de aços (FANG *et al.* 2005; BOUZAKIS *et al.* 2003; ÖZEL *et al.* 2005; RANGANATH *et al.* 2007). Neste contexto, este trabalho analisa a influência da preparação das arestas de corte de insertos intercambiáveis por escovamento sobre o processo de furação do ferro fundido cinzento FC300. Para tal são analisados os esforços de usinagem, temperatura do cavaco, desgaste de ferramenta e a qualidade dos furos obtidos. Com a evolução da tecnologia em máquinas de medição, optou-se pela utilização de um equipamento de medição 3D óptico (Alicona  $\mu$ CMM) com sistema de varredura por nuvem de pontos capaz de representar com mais clareza e exatidão a microgeometria da aresta de corte.

### **1.1 Objetivo da pesquisa**

O objetivo principal deste trabalho é analisar a influência da preparação de aresta de corte no processo de furação com broca de insertos intercambiáveis, utilizando a preparação conhecida como *honing* (arredondamento da aresta de corte por escovação), na usinagem do material ferro fundido cinzento FC300. A análise leva em conta o desgaste das ferramentas, esforços de usinagem, temperatura do cavaco e a qualidade dos furos obtidos.

Os objetivos específicos deste trabalho atendem aos seguintes tópicos:

- a) Verificar as forças de avanço e torque no processo;
- b) Analisar as temperaturas do cavaco durante o processo;
- c) Identificar o tipo de desgaste predominante nos insertos de corte;
- d) Analisar a qualidade do furo obtido (circularidade, diâmetro e rugosidade);

- e) Determinar a microgeometria mais adequada para a usinagem do material proposto.

## **1.2 Organização do trabalho**

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo está a introdução sobre o assunto. O segundo capítulo traz a revisão bibliográfica dos assuntos abordados para melhor compreensão do trabalho. O terceiro capítulo apresenta materiais e métodos. No quarto capítulo estão os resultados e discussões. Também são apresentadas as referências bibliográficas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo desta revisão bibliográfica é formar uma base teórica a fim de fundamentar a pesquisa, considerando os principais tópicos que exercem influência no trabalho:

- Furação: definição, aplicações e processo;
- Formação do cavaco;
- Forças durante o processo de furação;
- Ferro fundido: comportamento mecânico, tipos e usinabilidade.
- Mecanismos de desgaste de ferramenta;
- Critério de fim de vida da ferramenta;
- Preparação da aresta de corte: importância e Influência na usinagem;
- Métodos utilizados para preparação de aresta;
- Análise de Variância (ANOVA).

### 2.1 Furação

A furação é um processo de usinagem no qual a retirada de material da peça se realiza pelo movimento rotativo da ferramenta, gerando perfis cilíndricos. Onde a peça e ou a ferramenta realiza o movimento de avanço, ao passo que a ferramenta faz o movimento de corte (REIS, 2000).

De acordo com a norma ABNT 6175 a furação faz parte de um processo de usinagem para a obtenção de um furo cilíndrico em uma peça na maioria das vezes, sendo realizado com o auxílio de uma ferramenta multicortante. O processo é feito por meio do giro da ferramenta ou da peça, ocorrendo um deslocamento em uma trajetória retilínea da ferramenta ou da peça que pode ser paralela ou coincidente ao eixo de rotação da máquina.

Na usinagem, o processo de furação representa cerca de 36% do tempo total empregado na usinagem de peças, sendo o processo que mais demanda tempo comparado ao torneamento com 25% e o fresamento com 26% entre outros com 13% (ELZENHEIMER *et al.*, 2003).

A furação realizada com brocas helicoidais tem uma importância maior comparada com as ferramentas de furação para obter furos sem furos de guia ou alargamento de furos pré-existentes (KLOKE, 2011). Dos processos de usinagem, a

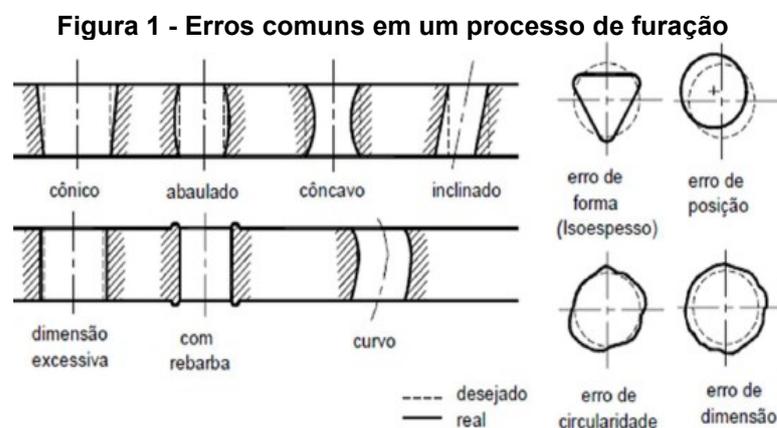
furação representa de 20% a 25% dos processos sendo a broca a ferramenta mais produzida e a mais difundida (HÄUSER, 1979 e TIKAL, 1993).

Em processos de furação onde a divisão do comprimento (L) pelo diâmetro (D) é menor ou igual a 3, um sistema de lubri-refrigeração externa é suficiente, porém ao realizar furações em que a  $(L/D > 3)$ , é necessário a utilização de refrigeração interna para reduzir a temperatura, auxiliar na expulsão do cavaco e diminuir o coeficiente de atrito (DINIZ *et al.*, 2013; FERRARESI, 2003; KÖNIG *et al.*, 1997).

A rugosidade Ra do processo de furação com broca helicoidal pode variar entre 1,6  $\mu\text{m}$  em boas condições e até 12,5  $\mu\text{m}$  em condições normais (KÖNIG *et al.*, 1997). Na furação é possível a obtenção de furos acabados ou pré-furos para outros processos como alargamento, torneamento, fresamento, retificação, entre outros (DINIZ *et al.*, 2013; STEMMER, 2008).

Ao penetrar a cunha de corte da ferramenta na peça há uma deformação elástica e plástica do material da peça que começa um escoamento sobre a superfície de saída da ferramenta passando a formar o cavaco. No processo a energia mecânica do atrito entre a ferramenta e a peça é transformada em energia térmica que é dissipada por meio do cavaco, peça, ferramenta, ambiente e na deformação do cavaco (KÖNIG *et al.*, 1997).

Alguns fatores influenciam no processo de furação como: processo utilizado, parâmetros de usinagem, estabilidade da fixação do conjunto utilizado, a peça e a máquina. Os erros ou imperfeições geométricas podem ser causados pela geometria da ferramenta ou condições do processo de usinagem (WICK *et al.*, 1988). Os erros mais comuns podem ser observados na Figura 1.

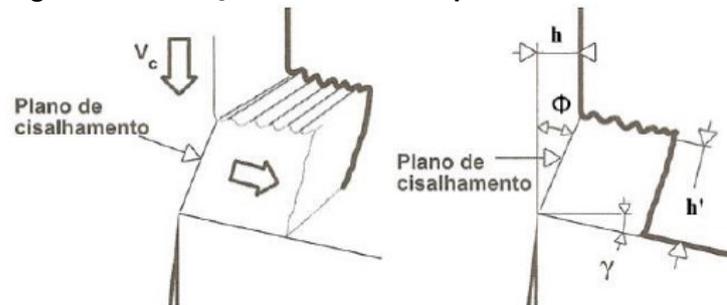


Fonte: Adaptado de Wick *et al.* (1988)

## 2.2 Formação de cavacos

De acordo com DINIZ *et al.* (2006), a usinagem de metais envolve o cisalhamento ao longo de um plano de cisalhamento no qual é gerado o cavaco que influencia no desgaste da ferramenta, nos esforços de corte, na penetração do fluido lubri-refrigerante, no calor gerado na usinagem entre outros. O ângulo de cisalhamento ( $\phi$ ), é formado entre o plano de cisalhamento e a direção de corte, conforme Figura 2. Os esforços de corte aumentam com o aumento da deformação do cavaco e o ângulo de cisalhamento diminui.

**Figura 2 - Formação do cavaco e o plano de cisalhamento**



**Fonte: Adaptado de Diniz *et al.* (2006)**

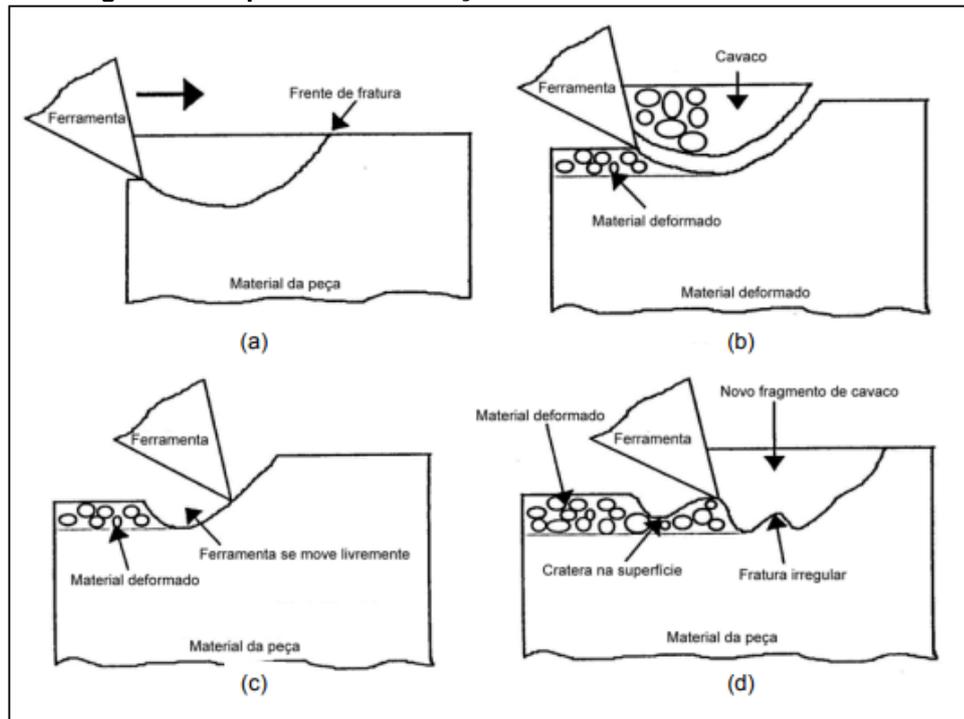
Devido à deformação do cavaco ser homogênea, a parte posterior do cavaco apresenta uma rugosidade mais acentuada o que gera pontos de baixa resistência ou concentração de tensão do material usinado (DINIZ *et al.*, 2006).

Segundo FERRARESI (2003) os cavacos são processados em condições normais geralmente de tal forma:

- a) No processo de entrada da ferramenta na peça, onde uma porção do material é projetada na superfície de saída da ferramenta;
- b) A projeção do material sofre deformação plástica, que progressivamente aumenta junto com as tensões de cisalhamento e assim começa um deslizamento entre o material entre uma parcela do material sendo removido e a peça;
- c) Dependendo das condições de usinagem, pode haver uma ruptura parcial ou completa na área de cisalhamento com a penetração da ferramenta;
- d) O fenômeno é renovado continuamente com o processo de movimento relativo entre a ferramenta e a peça, na qual o material que estava em processo de deslizamento sofre deformação e cisalhamento (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta.

A formação de cavacos dos ferros fundidos é diretamente afetada pela grafita, que possui pouca resistência mecânica e gera descontinuidades na matriz, auxiliando o processo de remoção de material. O mecanismo de formação de cavacos em ferros fundidos cinzentos e nodulares é apresentado na Figura 3. Inicialmente a ferramenta comprime o material abaixo do flanco criando uma frente de fratura que se propaga à frente da aresta (a). Com o movimento de corte da ferramenta o fragmento de material é removido completamente (b). Em alguns casos, especialmente em ferros cinzentos, uma porção de material é arrancada a frente da ferramenta, a qual segue por um certo tempo sem contato com a peça até encontrar o próximo cavaco (c). O arrancamento de material contribui no aumento da rugosidade (d) (COHEN *et al.*, 2000).

**Figura 3 - Sequência de formação de cavacos em ferros fundidos**



Fonte: Cohen *et al.* (2000)

No processo de usinagem é comum a formação de cavacos que se apresentam de diferentes formas de acordo com o material a ser usinado. O formato de cavaco em fita pode representar um alto risco para operadores de máquinas, pois dificultam sua retirada assim como cavacos de forma alongada que podem se acumular na região de usinagem aumentando a temperatura do processo. Para melhorar o processo de usinagem, é preferível obter cavacos curtos que diminuem a transferência de calor para a peça ou máquina além de serem melhores para remoção,

as formas de cavacos estão representadas na Figura 4 (KLOCKE *et al.*, 2011; STEMMER, 2008).

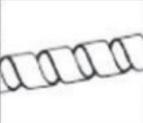
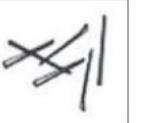
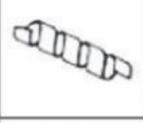
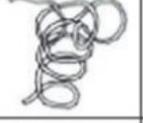
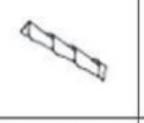
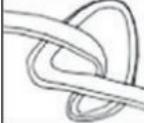
**Figura 4 - Formatos de cavacos de um processo de furação**

Desfavorável		Bom		Favorável	
					
1-Fita longa	2-Zig-zag	3-Espiral cônico	4-Agulha	5-Leque	6-Segmentado

Fonte: Adaptado de Mitsubishi (2015)

O ferro fundido por ser um material frágil, apresenta o cavaco em forma de lascas de pequenas dimensões chamado de cavaco arrancado, tendo forma de pequenos fragmentos independentes e distintos gerados essencialmente por ruptura, pela ação de tensões principais de tração-compressão, rompendo em forma conchoidal, ocorrendo também arrancamentos abaixo da superfície usinada. A Figura 5 demonstra os tipos de cavaco.

**Figura 5 - Tipo de cavacos**

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

Fonte: Normas ABNT ISO 10910 (2014)

### 2.3 Forças no processo de furação

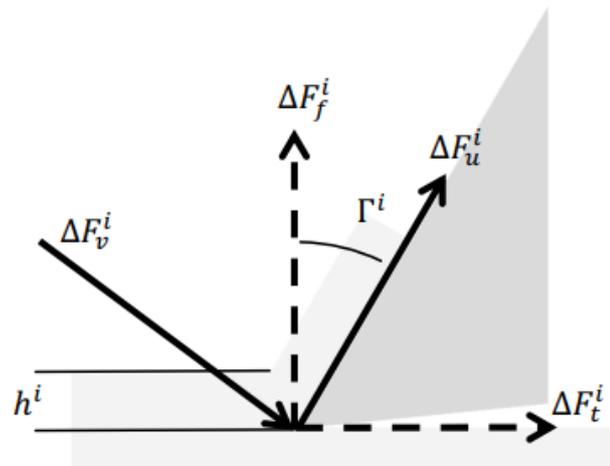
Para os cálculos de força de corte e pressão específica é levada em consideração a potência disponível na aresta de corte efetiva da ferramenta, sendo essa, consumida na remoção de cavacos. Pelo motor da máquina é obtida a potência de acionamento, que sofre perdas devido ao atrito entre mancais, sistema de avanço, engrenagens, sistema de lubrificação e refrigeração dentre outros. Sem haver operações de corte tem-se a potência em vazio que é consumida pela máquina ligada (STEMMER, 2007).

A potência de corte é influenciada também pela velocidade de corte, desgaste da ferramenta, material da ferramenta, dimensões de corte, dureza do material a ser usinado, microestrutura, temperatura da peça usinada, encruamento, ângulo de folga e ângulo de incidência (STEMMER, 2007).

No processo de furação as forças aumentam com o desgaste da ferramenta. A força de avanço e o torque estão presentes na furação e para o monitoramento é relativamente comum a medição da componente axial (THANGARAJ *et al.*, 1988; REHORN *et al.*, 2005).

Para estimar as forças de corte no processo de furação com brocas com insertos intercambiáveis é necessário usar diferentes coeficientes de força de corte para os insertos centrais e periféricos, desse modo é possível aplicar uma relação linear entre as forças de corte e a espessura do cavaco obtendo uma boa estimativa para o torque e a força de avanço, bem como a força de corte no plano perpendicular ao eixo da broca. As arestas de corte são perpendiculares à direção da velocidade de corte, onde, o princípio básico é dividir cada aresta de corte em pequenos segmentos e em seguida identificar quais estão em real contato com a peça e calcular as componentes direcionais de força para cada segmento assumindo serem ortogonais. A Figura 6 apresenta as forças de atrito e normal  $\Delta F_u^i$  e  $\Delta F_v^i$ , respectivamente transformadas em força tangencial  $\Delta F_t^i$  e de avanço  $\Delta F_f^i$ , onde o  $h^i$  é o cavaco sem cortes e  $\Gamma^i$  é o segmento do ângulo de saída (PARSIAN *et al.*, 2014).

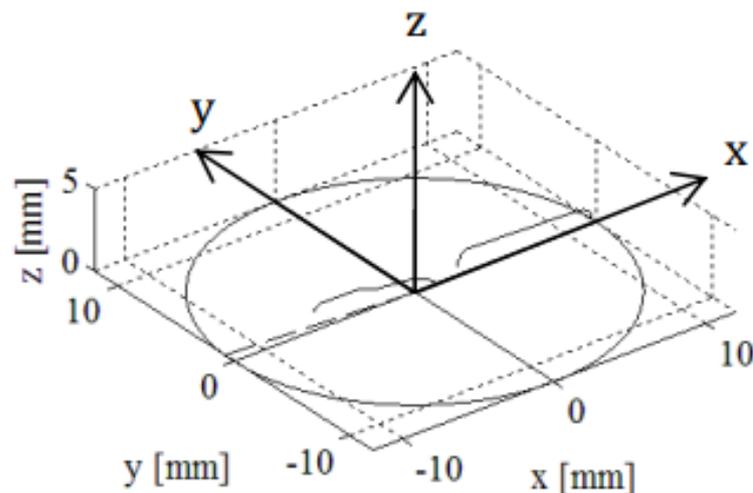
Figura 6 - Seguimento da força de atrito ( $\Delta F_u^i$ ) e força normal ( $\Delta F_v^i$ )



Fonte: Parsian *et al.* (2014)

As coordenadas globais mudam com o movimento de rotação da ferramenta onde, x é paralelo à aresta de corte do inserto periférico, z está alinhado ao eixo central da ferramenta e y é perpendicular a x e z, o sistema de coordenadas é apresentado na Figura 7.

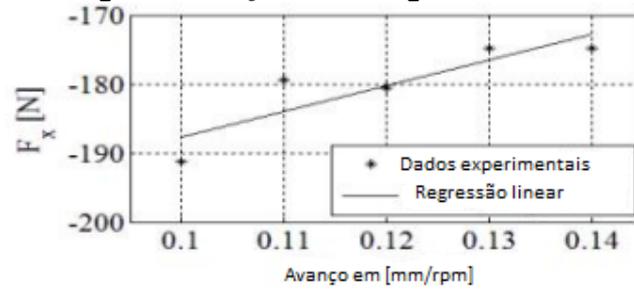
Figura 7 - Posição dos inserto no suporte da broca em coordenadas globais (x, y, z)



Fonte: Parsian *et al.* (2014)

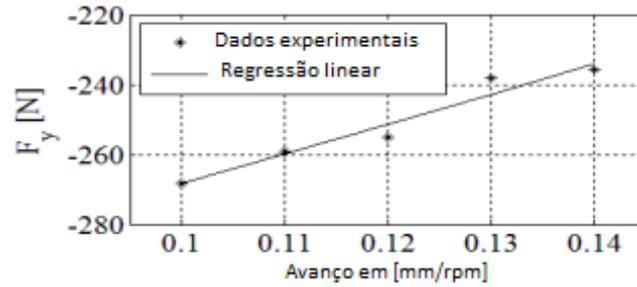
PARSIAN *et al.* (2014) em sua pesquisa obteve resultados para as forças de usinagem em cada eixo mensurando através de dinamômetro para uma velocidade de corte de 200 m/min e seus resultados para cada eixo em função do avanço, assim como o torque versus avanço ao redor do eixo z são apresentados nas Figuras 8, 9, 10 e 11.

**Figura 8 - Forças de usinagem no eixo x**



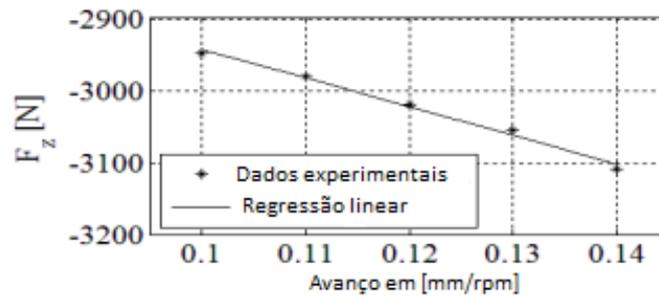
Fonte: Adaptado de Parsian *et al.* (2014)

**Figura 9 - Forças de usinagem no eixo y**



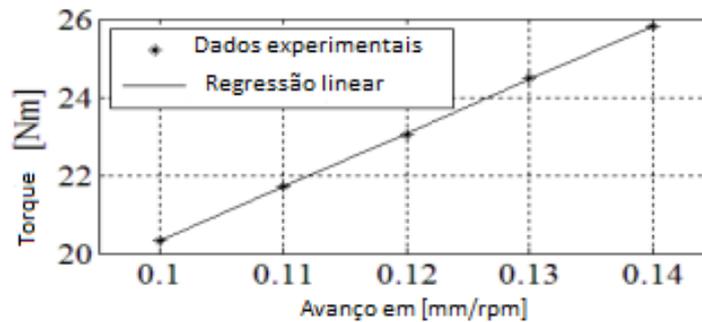
Fonte: Adaptado de Parsian *et al.* (2014)

**Figura 10 - Forças de usinagem no eixo z**



Fonte: Adaptado de Parsian *et al.* (2014)

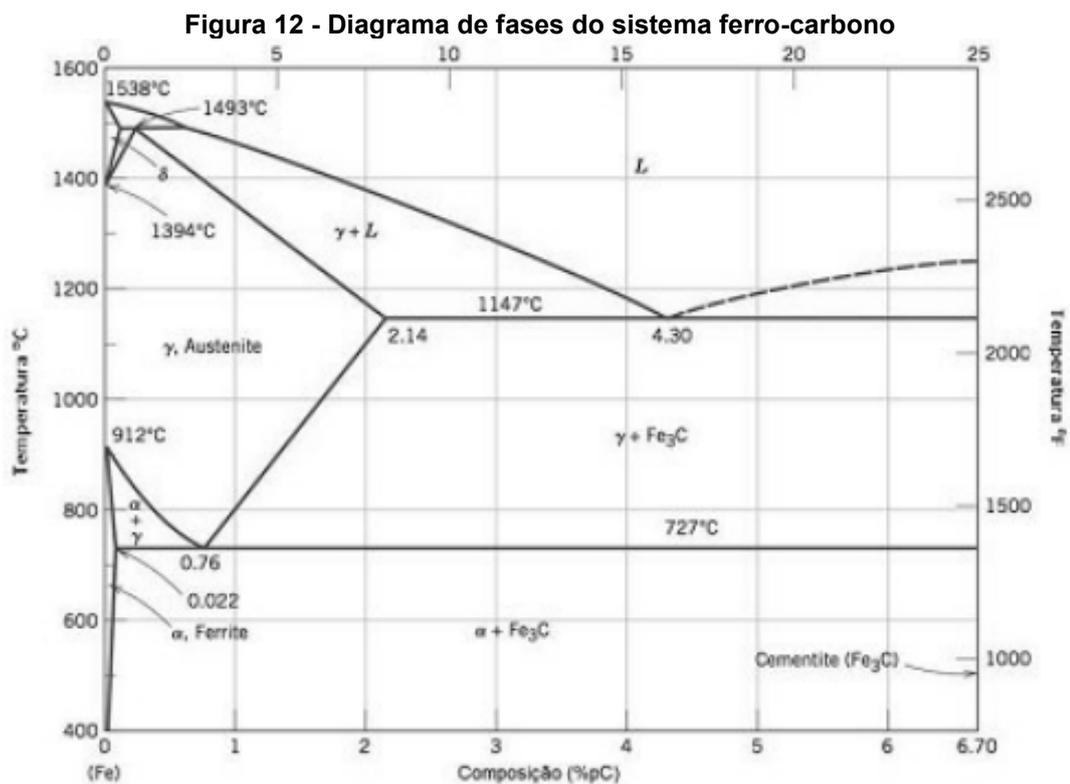
**Figura 11 - Torque ao redor do eixo z**



Fonte: Adaptado de Parsian *et al.* (2014)

## 2.4 Ferro fundido

Os ferros fundidos são uma liga ferro-carbono com teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita ( $\gamma$ ), de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita. Para o estudo metalúrgico dos ferros fundidos utiliza-se o diagrama de equilíbrio ferro-carbono, que é um Gráfico temperatura versus teor de carbono (C). Nele estão traçadas todas as fases que a mistura líquida Ferro-Carbono pode passar até se solidificar dependendo do teor de carbono presente na mistura (CALLISTER, 2002). O diagrama, mostrado na Figura 12, permite ao metalúrgico compreender quais foram as transformações de fase que o material sofreu desde a sua fase líquida até o posterior resfriamento, atingindo sua fase sólida estável.



Fonte: Callister (2002)

Na solidificação dos ferros fundidos há um fator de complicação que é a possibilidade da formação da cementita ( $Fe_3C$ ) associada à grafita, durante o processo de nucleação da fase líquida, conforme apresentado na Figura 12. A cementita é um carboneto de ferro que apresenta alta dureza quando comparada com a matriz ferrítica, sendo assim sua presença geralmente indesejável para a indústria

devido a ser um complicador na usinabilidade (GUESSER, 2019). Quanto maior for a velocidade de resfriamento, maior será a probabilidade de formação de carbonetos (PIESKE *et al.*, 1975). Para solucionar ou amenizar esse problema os fabricantes utilizam inoculantes, os quais são aditivos especiais que irão favorecer a precipitação do carbono na forma de grafita durante a solidificação da mistura. O modo com que o fabricante realiza a inoculação impacta diretamente nas propriedades mecânicas finais do ferro fundido produzido, visto que a quantidade de inoculante utilizada favorece a criação de um maior número de nódulos de grafita (GUESSER, 2019).

Além dos elementos ferro (Fe) e carbono (C), os ferros fundidos ainda contêm outros elementos de liga, tais como: silício (Si), manganês (Mn), enxofre (S), fósforo (P), cobre (Cu), molibdênio (Mo) e nióbio (Nb). O silício é um elemento que favorece a formação de grafita, enquanto evita a formação do carboneto de ferro. Já o manganês, geralmente presente em menor quantidade, promove a presença de cementita, desfavorecendo a formação da grafita. Por possuírem resistência mecânica inferior à da matriz, a grafita comporta-se como uma segunda fase, de modo com que seu formato é utilizado para classificar os diferentes tipos de ferro fundido, além de influenciar diretamente nos campos de concentração de tensões (FANG *et al.*, 2020; UPADHYAY *et al.*, 2020; SINGHAL *et al.*, 2020; BENIWAL *et al.*, 2020).

O ferro fundido FC 300 é amplamente utilizado na indústria na fabricação de componentes que requerem resistência, sendo utilizado para fabricação de discos de freio, manifolds, corpos de válvulas, cabeçotes, tampas, êmbolos, conexões, mancais entre outros componentes.

## 2.5 Usinabilidade

DINIZ *et al.* (2013), definem como usinabilidade uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. O termo usinabilidade compreende todas as propriedades de um material que tem influência sobre o processo de usinagem (KÖNIG *et al.*, 1997). A usinabilidade é influenciada pelas propriedades mecânicas como a dureza, resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e a taxa de encruamento do material (DINIZ *et al.*, 2013; KÖNIG *et al.*, 1997). A dureza e a resistência mecânica influenciam a usinabilidade do material, porém outros fatores também são importantes como a quantidade de inclusões e de aditivos para melhorar a usinabilidade, a quantidade de

partículas duras, a microestrutura e a tendência ao empastamento do cavaco do material na superfície de saída da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2013).

O que gera influências na usinabilidade são os elementos de liga e alguns são adicionados para aumentar a usinabilidade como o enxofre, selênio, telúrio, chumbo, bismuto, estanho, fósforo, e nitrogênio que isoladamente ou formando compostos, interrompem a matriz ferrítica, austenítica ou martensítica do aço, facilitando a quebra do cavaco, a lubrificação da ferramenta e conseqüentemente, diminuindo os esforços de corte (DINIZ *et al.*, 2013). Os fatores metalúrgicos também afetam a usinabilidade do material tais como o teor de carbono, forma de fornecimento (forjado, laminado, trefilado e grau de encruamento), microestrutura (normalizado, recozido ou temperado) e inclusões. Para avaliar a usinabilidade geralmente são utilizados os critérios de vida da ferramenta, forças de usinagem, qualidade superficial da peça e forma de cavacos (KÖNIG *et al.*, 1997).

A usinagem de ferro fundido cinzento pode variar dependendo da composição química e da microestrutura. Com o aumento da porcentagem de perlita e cementita ocorre o aumento da dureza, desta forma aumentando o desgaste da ferramenta. Flocos de grafita no ferro fundido cinzento diminuem a ductibilidade ajudando a quebrar os cavacos diminuindo o comprimento de contato cavaco-ferramenta, gerando baixas forças de usinagem e potência consumida, baixas taxas de desgaste e altas taxas de remoção de material (MACHADO *et al.*, 2009).

No ferro fundido a dureza não é um indicador tão eficiente, assim a microestrutura tem predominância. A seguir é apresentado a influência de vários constituintes da matriz do ferro fundido sobre a vida da ferramenta (AFS, 2003).

- a) Ferrita: Constituinte essencialmente livre de carbono. Com exceção da grafita apresenta dureza mais baixa, se comparada com os demais constituintes.
- b) Perlita: Mais comum constituinte nos ferros fundidos. Apresenta resistência e dureza média. É composta de uma estrutura fina, alternada de ferrita mole e carbonetos duros. Essa estrutura pode variar entre fina e grossa. A estrutura fina é mais dura e é usinada com menores velocidades de corte. A perlita no ferro fornece a melhor combinação entre usinabilidade e resistência ao desgaste.
- c) Martensita: Possui grande dureza. Aparece mediante a tratamentos térmicos nos ferros fundidos. Na condição de não revenida, apresenta

difícil usinagem, ao revenir a estrutura surgem os carbonetos esferoidais em uma matriz ferrítica reduzindo a dureza e garantindo uma usinabilidade até mesmo melhor que a perita de mesma dureza.

- d) Bainita: Obtida após a austêmpera. Por ser mais difícil de usar, são usadas velocidades de corte menores que as usadas na estrutura da martensita revenida de mesma dureza.
- e) Austenita: Principal constituinte nos ferros fundidos cinzentos com elevados teores de níquel e dos ferros dúcteis não magnéticos. Considerado de dureza relativamente baixa e de usinabilidade similar ao da ferrita.
- f) Carbonetos: Extremamente duros, variando de simples carbonetos de ferro até complexos carbonetos contendo elementos de liga. Em formas finas camadas na estrutura perlítica, facilita o cisalhamento não representando prejuízo na vida da ferramenta. Maiores quantidades de carbonetos como constituintes livres prejudicam a usinabilidade. Podem estar presentes nas extremidades das peças fundidas devido ao rápido resfriamento dessas regiões.
- g) Esteadita: Formado pela presença de fósforo no ferro fundido é considerado um constituinte duro. Em concentrações da ordem de 0,4% dificultam a usinabilidade em operações críticas como rosqueamento. Ao aumentar a quantidade de fósforo tem-se uma redução significativa na vida da ferramenta.
- h) Estrutura mista na matriz: Formada por dois ou mais constituintes, causa efeito intermediário na vida da ferramenta, comparado ao efeito devido a cada um dos componentes isolados. Más o efeito combinado não é proporcional as quantidades relativas de cada constituinte.

Em usinagens de ferro fundido é comum utilizar ferramentas de metal duro da classe K, o que limita a vida da ferramenta é o desgaste de flanco. Aumentando a temperatura e taxa de remoção de material é possível normalizar o desgaste da ferramenta ocorrendo desgaste de flanco e de cratera sendo desenvolvido por abrasão e difusão (MACHADO *et al.*, 2009).

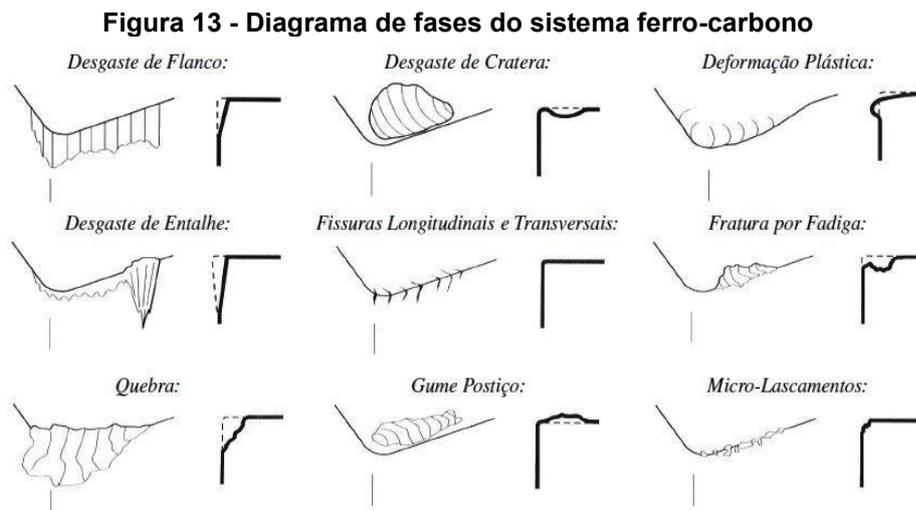
A microestrutura do ferro fundido cinzento FC 300 é constituída de grafita em forma de lamelas, com a matriz predominante perlítica e presença de sulfeto de

manganês, que auxilia na usinabilidade. As grafitas lamelares facilitam a formação de cavaco (Massirer-Junior; Luiz-Guesser, 2011).

## 2.6 Mecanismos de desgaste da ferramenta

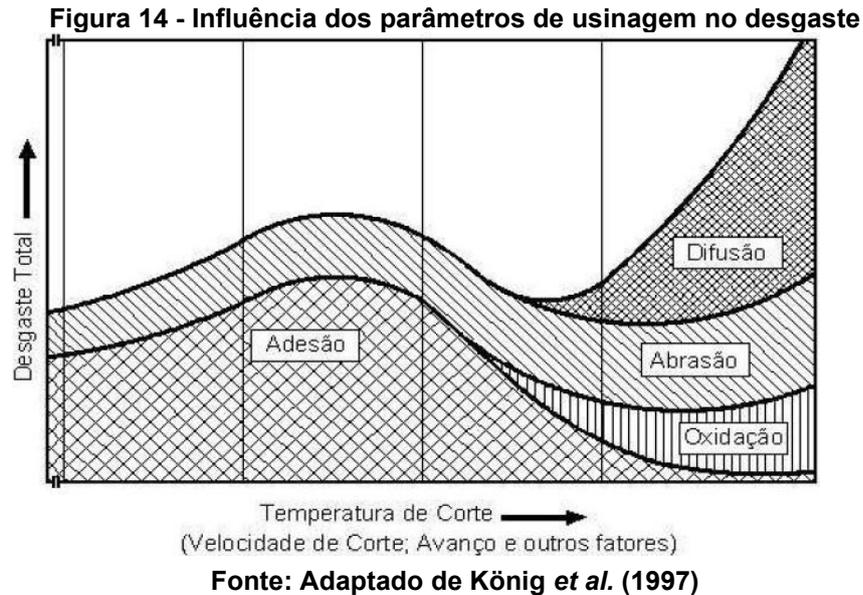
Para que seja possível aumentar a vida das ferramentas se faz de extrema importância conhecer as causas do desgaste. A abrasão mecânica, aderência entre a peça e a ferramenta, difusão de elementos de liga da peça com os da ferramenta, aresta postiça de corte, oxidação do material da ferramenta, correntes elétricas iônicas devido a atrito da ferramenta com a peça (STEMMER, 2001). A seguir são detalhados cada um desses mecanismos.

A Figura 13 apresenta os principais tipos de desgaste em ferramentas de corte.



**Fonte: Adaptado de König e Klocke (2002)**

Os mecanismos de adesão, abrasão, difusão e oxidação são apresentados em função da temperatura, velocidade de corte, avanço e outros. Os mecanismos de abrasão e de adesão estão presentes em baixas temperaturas de usinagem, já em temperaturas altas no processo ocorre a difusão e a oxidação. Com o aumento da temperatura a difusão tem um crescimento exponencial, conforme mostra a Figura 14 (KÖNIG *et al.*, 1997).



Segundo KÖNIG *et al.* (1997), no processo de usinagem os desgastes ocorrem simultaneamente dificultando a distinção entre eles, os mecanismos de desgaste são:

- **Adesão:** a aderência entre a peça e a ferramenta deve-se às altas temperaturas, pressões presentes na área de corte e, quando o cavaco é retirado, a superfície inferior apresenta-se sem camadas protetoras de óxidos, assim sendo quimicamente muito ativa. A prova de que isso ocorre é a formação de arestas postiças, ou seja, material encruado, duro e resistente, estes dificultam o escoamento do cavaco aumentando o atrito e um maior recalque do cavaco. Com o aumento do atrito também se aumenta progressivamente a força de deslizamento do cavaco, até que arranca o material soldado na aresta. Por fim, têm-se três formas de estar acontecendo esse arrancamento: por cisalhamento das asperezas da ferramenta, por separação da solda e por cisalhamento dentro das próprias partículas (STEMMER, 2001).

- **Difusão:** dificilmente pode-se retirar informações sobre a difusão entre a ferramenta e a peça por meio de testes de usinagem, sendo que, em geral, as evidências da interação são removidas com os cavacos. Acontece em altas temperaturas, onde as moléculas adquirem determinada mobilidade. Em temperaturas de 700 a 1300°C podem ocorrer alguns fenômenos como: Difusão do ferro na fase de cobalto, formando um baixo ponto de fusão e fácil desgaste. Difusão do cobalto no aço, formando uma camada de cristais mistos. Difusão do carbono que sai dos carbonetos e migra para o aço (STEMMER, 2001 e XAVIER, 2009).

- **Oxidação:** é ocasionada por altas temperaturas e presença de ar e água existentes nos fluidos de corte. Nos fluidos, há elementos antioxidantes, sendo assim, não são propriamente os fluidos que causam a oxidação, mas sim a falta de cuidados para sua conservação que os tornam ácidos e provocam a corrosão da ferramenta. A ferramenta que contém tungstênio e cobalto tende a formar filmes de óxidos porosos que são levados embora pelo atrito gerando desgaste. Porém, ferramentas que contém óxido de alumínio são mais resistentes e duras, assim diminuindo o desgaste por oxidação. Na extremidade de contato cavaco-ferramenta é formado o desgaste gerado pela oxidação devido ao acesso de ar na região, sendo assim uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe (DINIZ *et al.*, 1999 e DESCHAMPS *et al.*, 2004).

- **Abrasão:** é a retirada de finas camadas de material, devido ao escorregamento sob alta pressão e temperatura, e pode aumentar ainda mais com a inclusão de partículas duras no aço, a resistência à abrasão depende muito do material em que a ferramenta é construída e, na medida em que se aumenta a velocidade de corte, também, aumenta a velocidade de desgaste (STEMMER, 2001).

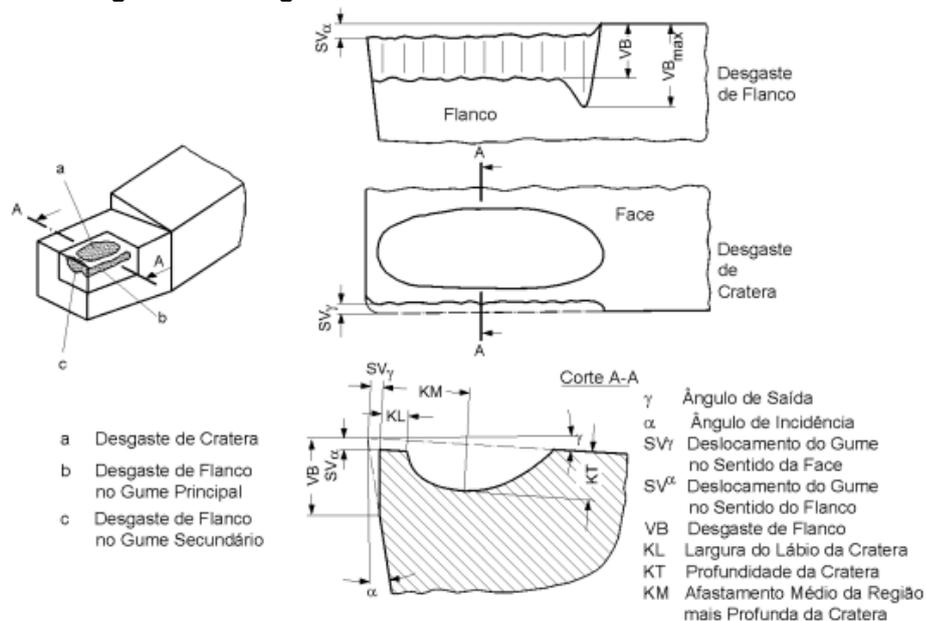
- **Solicitações mecânicas e térmicas excessivas:** fissuras transversais e longitudinais, micro quebras e deformação plástica na aresta de corte, são falhas oriundas dessas solicitações (SANTANA, 2015).

- **Lascamento:** ocorre de uma falha acidental e prematura da ferramenta, contudo, não há materiais de ferramentas capazes de resistir integralmente e por longo período aos efeitos de contato e escorregamento sob temperaturas elevadas e altas pressões como as que são geradas na usinagem, sem haver desgaste e ou alterações na forma e no aspecto de seus contornos. O desgaste ocorre progressivamente e acaba “cegando” a ferramenta, ou seja, sem a propriedade de corte com eficiência. O desgaste é devido a problemas de origem mecânica ou térmica da aresta de corte. Alguns cuidados na afiação da ferramenta auxiliam a diminuir problemas de lascamento, como o uso de um acabamento fino ou polido da superfície de folga e de saída da ferramenta, as raias do retificado na superfície devem ser normais à aresta principal, para evitar atritos desnecessários e o desgaste (STEMMER, 2001).

## 2.7 Critérios de fim de vida de ferramenta

O fim de vida de uma ferramenta é definido pelo tempo em que trabalha efetivamente até perder a propriedade de corte, dentro de parâmetros previamente definidos (DINIZ *et al.*, 2014). O fim de vida de uma ferramenta está associado ao tamanho ou nível de desgaste pré-estabelecido. Para determinar o fim da vida são analisados alguns fatores críticos como: largura da marca de desgaste de flanco, profundidade de cratera, deficiência no acabamento superficial usinado, aumento sonoro do processo, variações dimensionais das peças, desvios de forma entre outros. Geralmente definindo o desgaste pela dimensão da marca de desgaste de flanco, conhecido como desgaste VB, como pode ser observado na Figura 15.

**Figura 15 - Desgaste característico em ferramentas de corte**

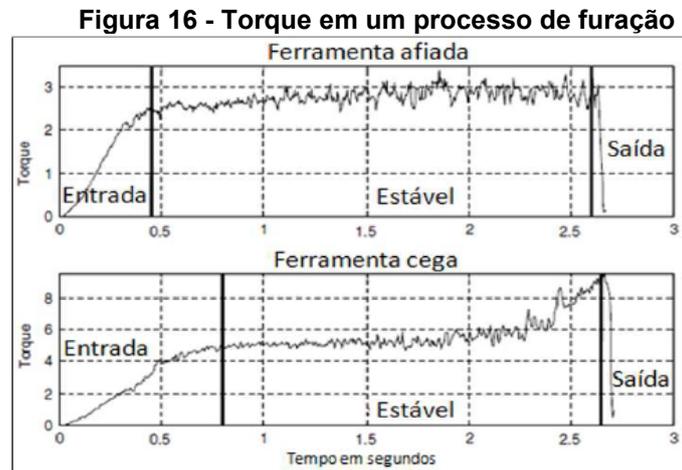


**Fonte: Norma ISSO 3585 (1993)**

A marca de desgaste de VB de dimensão característica em geral, é estipulada entre 0,25 mm e 0,30 mm. O desgaste excessivo da ferramenta de metal duro causa aumento considerável nas forças de corte, o que está ligado às falhas na ferramenta como as microtrincas em que ocasiona o lascamento da aresta até a perda total da ferramenta. Não é aconselhável a utilização da ferramenta de corte até este ponto, devido a gerar um longo processo para a reafiação tendo que remover grande quantidade de material (STEMMER, 2008; FERRARESI, 2003).

De acordo com as características exigidas no processo de furação se faz necessário o estudo e desenvolvimento de diferentes métodos de furação (KLOCKE,

2011). O torque durante a furação é um método de verificação para determinar a vida da ferramenta, sendo capaz de revelar se ela está no início ou fim de vida (ERTUNC, 2004), conforme Figura 16.



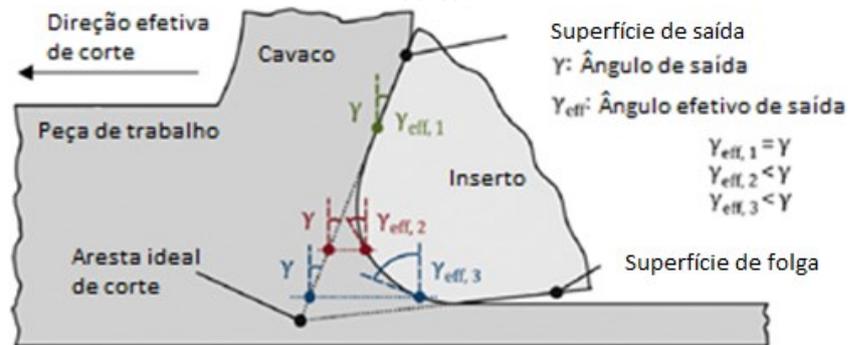
Fonte: Adaptado de Ertunc (2004)

## 2.8 Preparação da aresta de corte

A preparação da aresta de corte influencia nas forças de corte do processo como relatado inicialmente por (ALBRECHT, 1960; MASUKO, M. 1953).

A geometria da ferramenta de corte pode ser dividida em macroscópica e microscópica. A dimensão espacial é denominada macrogeometria e os detalhes geométricos da parte ativa da ferramenta é denominada de microgeometria (DENKENA e BIERMANN, 2014). A forma da aresta de corte é definida pelas microgeometrias que são as transições entre a superfície de saída e a superfície de folga. É importante uma diferenciação entre as microgeometrias e as macrogeometrias. O ângulo de saída do cavaco é determinado na zona de formação de cavaco que é na forma macroscópica da ferramenta, este pode ser relacionado à forma da cunha ou na orientação de um chanfro. No processo de corte, o ponto de contato entre a peça e a ferramenta define o ângulo de saída. A transição da macro e da microgeometria de corte é definida no ponto em que o ângulo de saída efetivo se difere do ângulo de saída nominal, conforme Figura 17.

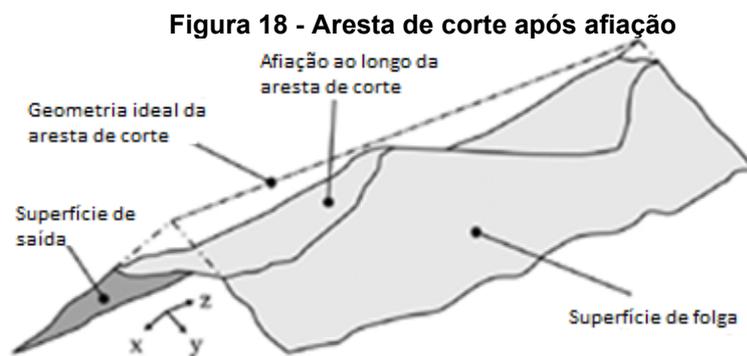
**Figura 17 - Transição da macro para micro geometria de corte com relação às condições de corte**



Fonte: Adaptado de Denkena e Biermann (2014)

Três formas fundamentais de aresta de corte são definidas atualmente entre a superfície de saída e de folga, podem ser arredondadas ou chanfradas, a combinação de diferentes formas arredondadas e chanfradas também é possível. Aresta de corte afiada ideal torna-se impossível de ser obtida (DENKENA e BIERMANN, 2014).

Uma aresta afiada tem em sua geometria a presença de microirregularidades e microlascamentos, de modo a não ser possível parametrizar especificamente sua descrição. A Figura 18 representa uma aresta afiada após a retificação (REILLY *et al.*, 2004).

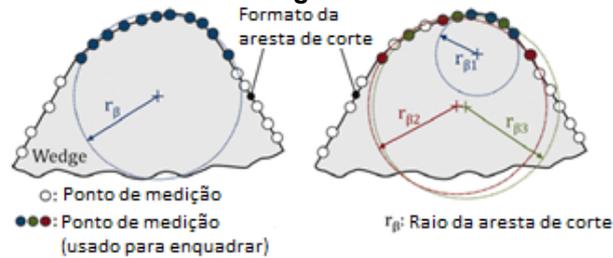


Fonte: Adaptado de Koehler (2008)

Para WYEM (2011) a inserção do raio na aresta é mais complexa, já que os formatos reais da aresta de corte não são circulares. A determinação do raio  $r_{\beta}$  é feita por uma circunferência contínua posicionada na intersecção da superfície de saída e da superfície de folga. Através de um sistema de medição é possível definir vários pontos na intersecção. No mínimo três pontos são necessários para a definição do raio  $r_{\beta}$ . Desse modo não é possível obter uma única caracterização do raio, tornando a

precisão da medição dependente da posição dos pontos selecionados conforme Figura 19.

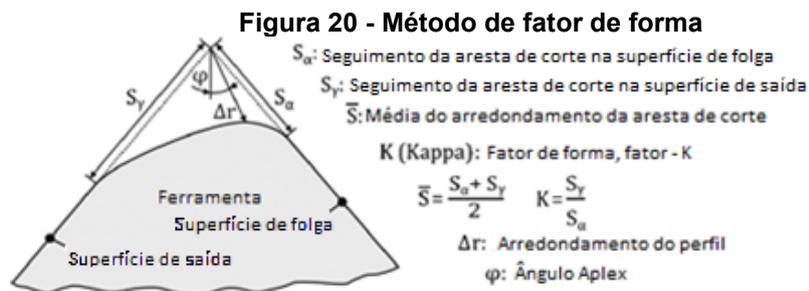
**Figura 19 - Imprecisão ao descrever a geometria da aresta de corte com um único raio**



Fonte: Adaptado de Wyen (2011)

É possível usar um número maior de pontos medidos para melhorar a representação da aresta de corte com uma circunferência contínua (WYEN, 2011). Para arestas não simétricas torna-se impossível a caracterização por meio da circunferência ajustada. De modo que esse método não é recomendado para representar com precisão a aresta de corte. (WYEN, 2011).

DENKENA *et al.* (2005) definiu o método de fator de forma (K) com parâmetros adicionais descrevendo com mais precisão a aresta de corte como mostra a Figura 20.

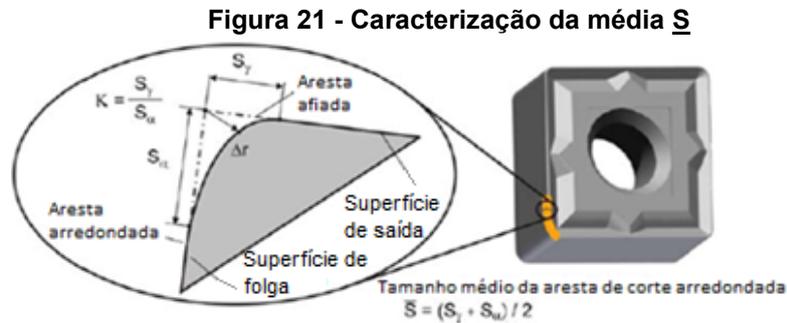


Fonte: Adaptado de Denkena (2005)

Para melhorar a precisão da medição foram introduzidos os parâmetros  $S_a$  e  $S_y$  que representam a distância entre o ponto de separação do arredondamento da aresta com relação a ponta da aresta de corte com afiação ideal. Através da média do arredondamento ( $\bar{S}$ ), conforme Equação 1, é possível especificar a dimensão e o uso do fator de forma K (Kappa), esse por sua vez caracteriza a orientação do arredondamento na aresta de corte e utilizando o achatamento do perfil ( $\Delta r$ ) com o Ângulo de vértice ( $\varphi$ ) podem ser determinados os picos, mensurando a menor distância e a mudança entre a ponta afiada ideal para a ponta de raio real (DENKENA

et al., 2005). Assim se torna viável a definição do arredondamento da ponta como mostra a Figura 21.

$$\bar{S} = \frac{S_{\alpha} + S_{\gamma}}{2} \quad (1)$$



**Fonte: Adaptado de Denkena et al. (2011)**

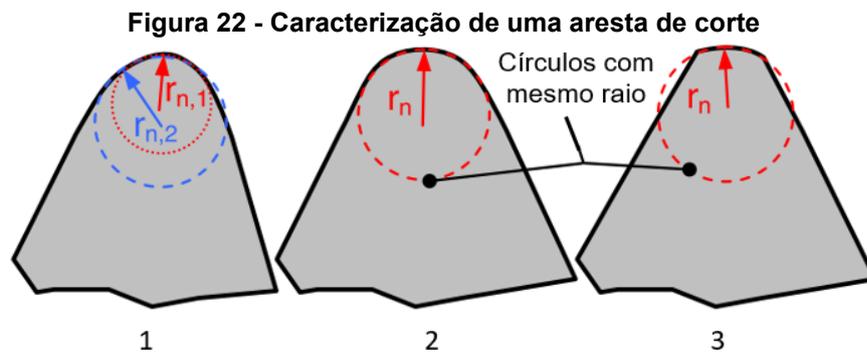
Em ferramentas de corte o perfil assimétrico traz boas vantagens em relação a outras geometrias. A confiabilidade do método depende da posição e direção das tangentes usadas na medição dos parâmetros  $S_{\alpha}$  e  $S_{\gamma}$ . É utilizado o método de regressão parcial para calcular as tangentes de pequenas retas da superfície principal e da superfície de saída, com a precisão dependendo da quantidade de pontos e a localização para o cálculo das tangentes. Durante a medição a aproximação da localização dos pontos gera imprecisão. Ainda há a limitação de definir o perfil em uma face curva ou inclinada. Por não existir padrão, o resultado depende da decisão do operador em relação à área de ajuste para as tangentes (DENKENA et al., 2005).

Para BASSETT et al. (2012) são quatro parâmetros básicos para preparação de aresta, esses parâmetros são:  $S_{\alpha}$ ,  $S_{\gamma}$ ,  $\Delta r$  e  $\varphi$ . A aresta pode ser simétrica e assimétrica. De acordo com o fator de forma apresentado na Equação 2.

$$K = \frac{S_{\gamma}}{S_{\alpha}} \quad (2)$$

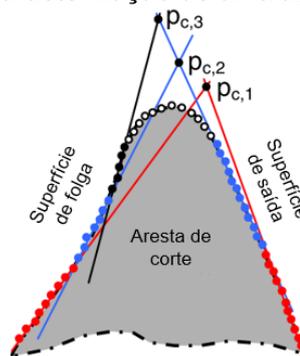
O fator de forma de simetria é chamado de K. Para a inclinação do perfil em direção à superfície de saída o K é maior que 1 e para o perfil em direção a superfície de folga o é K menor que 1. O algoritmo pode ser aplicado a dados obtidos por meio de medição em microscópio eletrônico de varredura. Para esse tipo de geometria é necessário ter repetibilidade e confiabilidade nas medições (FULEMOVÁ e ŘEHOŘ, 2015).

Os métodos até então sugeridos para caracterização e medição da geometria da aresta de corte não são tão precisos para uma análise de elementos finitos (WYEN *et al.*, 2012). O problema é causado pelo fato de que depende da perícia de quem realizará a medição (TIKAL e HOLSTEN, 2006; RODRÍGUEZ, 2009). Desse modo é possível observar que para uma mesma aresta de corte podem ser encontrados diferentes valores de raios, conforme Figura 12. Para medição são selecionados pontos, isso faz com que a precisão dependa da quantidade de pontos ou em muitos casos são selecionados apenas três pontos. Em uma mesma aresta foi possível encontrar o mesmo valor de raio, porém as geometrias são diferentes de acordo com a Figura 22 (2 e 3). O problema se agrava ainda mais quando a aresta é formada por superfícies não lineares de acordo com a Figura 23.



Fonte: Adaptado de Wyen *et al.* (2012)

**Figura 23 - Caracterização de uma aresta de corte**

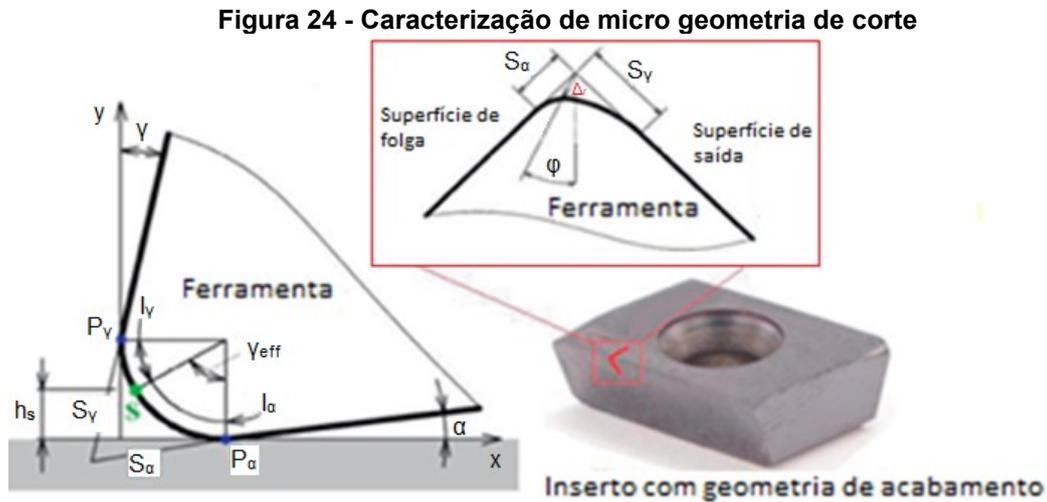


Fonte: Adaptado de Wyen *et al.* (2012)

## 2.9 Importância da preparação de arestas

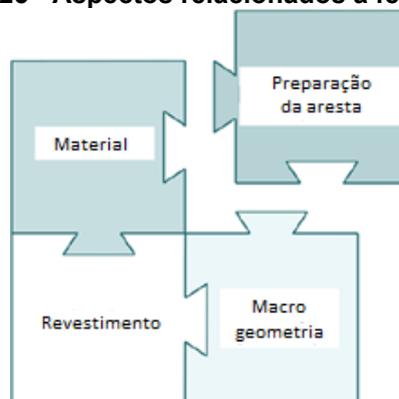
As arestas afiadas não são adequadas para muitos processos de usinagem devido a ter menor estabilidade contra as forças de corte e mecânicas em comparação com arestas com forma arredondada e ou chanfrada (REN e ALTINTAS, 2000). A preparação de aresta (Figura 24) é utilizada para a obtenção de uma geometria mais

apropriada, no projeto das ferramentas especiais é levado em consideração o tipo de usinagem para inserir a geometria mais adequada para elevar o desempenho da ferramenta (BASSETT *et al.*, 2012).



Foram feitos muitos estudos sobre as geometrias de corte de ferramentas a fim de otimizar tempo de processo, aumentar a vida, melhorar acabamento superficial da peça e diminuir a incidência de vibrações regenerativas. Os aspectos geométricos da ferramenta são divididos em quatro partes, sendo: composição do substrato (material base da ferramenta), macrogeometria da ferramenta, revestimento apropriado e preparação da aresta de corte de acordo com a Figura 25 (RODRÍGUEZ, 2009).

**Figura 25 - Aspectos relacionados a ferramenta**



**Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009)**

De acordo com TOENSHOFF e DENKENA (2013) a forma e a condição da aresta de corte são de importância crucial para as operações de usinagem. Durante o

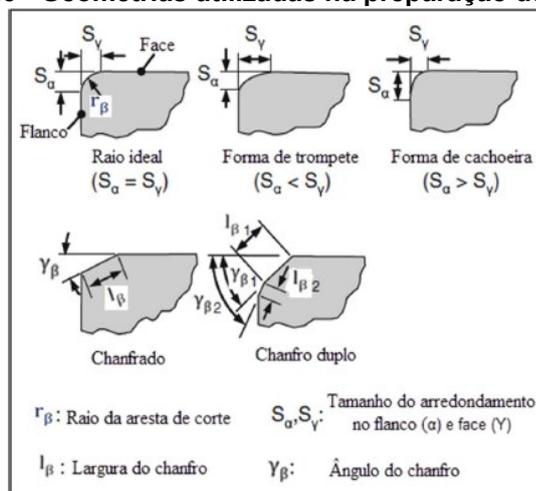
processo de corte, o impacto de altas cargas térmicas e mecânicas na aresta de corte resulta em desgaste. Além disso, a qualidade da superfície usinada é afetada pela forma da aresta de corte. As demandas da produção moderna são alta produtividade e alta confiabilidade do processo. Uma geometria adequada pode ser obtida pela preparação da aresta de corte para atender a estas demandas.

De acordo com RODRÍGUEZ (2009) a preparação da aresta vem sendo a última peça do quebra-cabeça que ainda foi pouco estudada em comparação aos demais aspectos. A geometria de arredondamento de aresta de corte (honing), precisa se tornar um processo controlado na fabricação de ferramentas para juntamente com os demais, compor uma geometria de corte eficiente.

No processo de afiação ou retificação de ferramentas originam-se falhas na aresta de corte em quase todas as ferramentas, defeitos como: microlascamento, rebarbas, rugosidade elevada, que podem comprometer a resistência mecânica e causar instabilidades durante o processo (RODRÍGUEZ, 2009). A preparação de aresta vem sendo estudada, a fim de diminuir esses microdefeitos, para aumentar a resistência e melhorar a rugosidade da superfície da aresta de corte.

Segundo RODRÍGUEZ (2009) ao preparar a aresta de corte é possível obter melhorias no desempenho da ferramenta e na qualidade da peça usinada. Com esse processo modifica-se a topografia e a microestrutura da superfície gerando um contorno mais estável na aresta. Para proteção da aresta de corte podem ser aplicadas algumas geometrias conforme Figura 26.

**Figura 26 - Geometrias utilizadas na preparação de arestas de corte**



**Fonte: Tikal; Holster (2006)**

Para TIKAL *et al.* (2009) a preparação da aresta é dividida em diferentes categorias: aresta arredondada, raio único, trompete, forma de cachoeira, aresta afiada, aresta chanfrada, aresta chanfro duplo e a última é aresta chanfrada e arredondada.

Diferentes tecnologias de fabricação podem ser aplicadas para se obter microgeometrias especiais. Arestas com raios  $r_{\beta}$  menores que  $5 \mu\text{m}$  são feitas por meio da retificação da superfície de saída. A retificação também se aplica para gerar geometrias complexas, chanfros e a remoção de uma grande quantidade de material na aresta de corte. Para obter raios  $r_{\beta}$  intermediários entre  $5 \mu\text{m}$  e  $20 \mu\text{m}$  é possível realizar o jateamento abrasivo na superfície de saída. Já o método de escovação é capaz de fazer raios  $r_{\beta}$  maiores que  $20 \mu\text{m}$ . Os processos de jateamento e escovamento demandam menor investimento. Caso haja viabilidade financeira, podem ser utilizados os métodos de acabamento magnético ou laser e assim obter raios na ordem de  $30 \mu\text{m}$  a  $50 \mu\text{m}$  (RODRÍGUEZ, 2009).

De acordo com DENKENA *et al.* (2013) preparar a aresta de corte de ferramentas, diminui a probabilidade de gerar crateras, lascamento da aresta de corte e aumento do desgaste. Para obter uma aresta de corte ideal, certos fatores devem ser levados em consideração: o material de corte, condições de corte e material da ferramenta de corte.

A preparação da aresta contribui para melhorar aspectos termomecânicos no processo de corte. Dentre eles tem-se: formação e fluxo do cavaco, integridade superficial da peça, forças de usinagem, forma da zona de deformação, distribuição da temperatura no corte, resistência da ferramenta ao desgaste, distribuição das tensões no corte e rugosidade da peça (RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA *et al.*, 2011; HOSSEINI e VAHDATI, 2012).

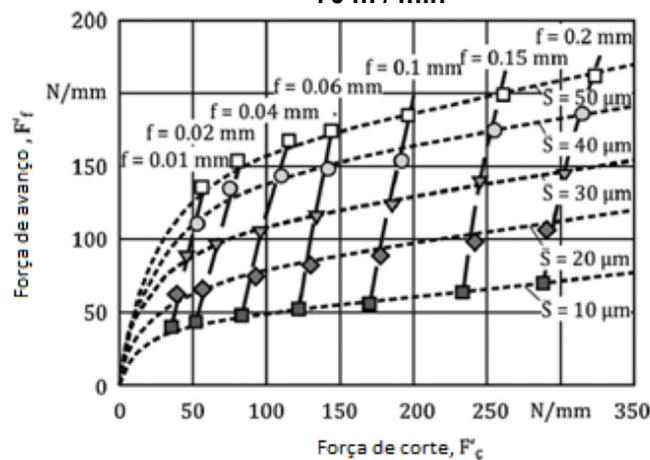
Para obter a aresta de corte, a ferramenta passa primeiramente por um processo de retificação, o que gera deformações plásticas e microdanos à aresta de corte (TÖNSHOFF e MOHLFELD, 1998).

De acordo com KOEHLER (2008), a geometria da aresta de corte influencia diretamente na força de corte e de avanço e comparando o método de preparação obtém-se que o arredondamento tem melhores resultados que o chanframento.

## 2.10 Influência da preparação de aresta nas forças de usinagem, cargas térmicas e cargas mecânicas

De acordo com WYEN e WEGENER (2010) as forças de corte e de avanço se elevam com o aumento do raio da aresta e do ângulo do chanfro. Na Figura 27 é possível verificar a relação entre as forças e o raio da aresta de corte ( $S$ ) com aproximação linear na usinagem de TiAl6V4.

**Figura 27 - Influência do raio da aresta de corte  $r_\beta$  e avanço  $f$  nas forças de corte  $F_c$  e forças de avanço  $F_f$  para torneamento TiAl6V4, padronizado para uma largura de corte de  $a_p = 1$  mm,  $v_c = 70$  m / min**



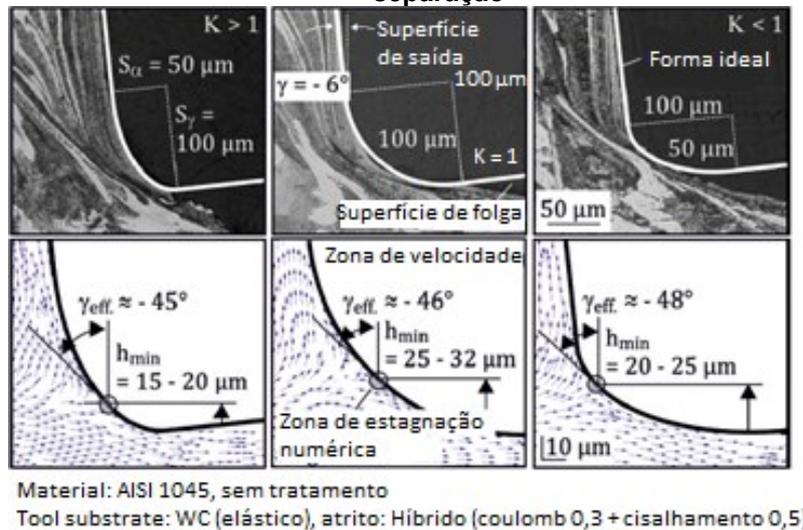
Fonte: Adaptado de Wyen e Wegener (2010)

Em seus estudos DENKENA *et al.* (2011) obtiveram resultados semelhante ao usinar um aço AISI1045, mostrando que as forças do processo são diretamente afetadas ao modificar o  $S_\alpha$  enquanto a alteração do  $S_\gamma$  é desprezível. Os mecanismos de formação do cavaco estão relacionados às forças do processo.

O uso de arredondamento da aresta (honing) aumenta a zona de cisalhamento com fluxo plástico subsuperficial em que o material a frente da aresta de corte é pressionado, severamente deformando o cavaco recém-formado e uma quantidade pequena de material pressiona a superfície usinada fazendo com que o material se dobre (SHAW e COOKSON, 2005).

Ao usar o fator de forma  $K > 1$  ( $S_\gamma$  maior que  $S_\alpha$ ) o material da peça sofre grandes deformações e usando o fator de forma  $K < 1$  pode ser diminuído esse efeito. De acordo com as simulações realizadas por DENKENA *et al.* (2011) o ponto de separação do material ocorre em um ângulo de saída negativo de  $\gamma_{eff} = -46 \pm 2^\circ$ . Em um arredondamento simétrico  $S_\alpha = S_\gamma = 100 \mu\text{m}$  com  $h_{min} = 25 - 32 \mu\text{m}$  é possível obter uma espessura mínima de cavaco, conforme Figura 28.

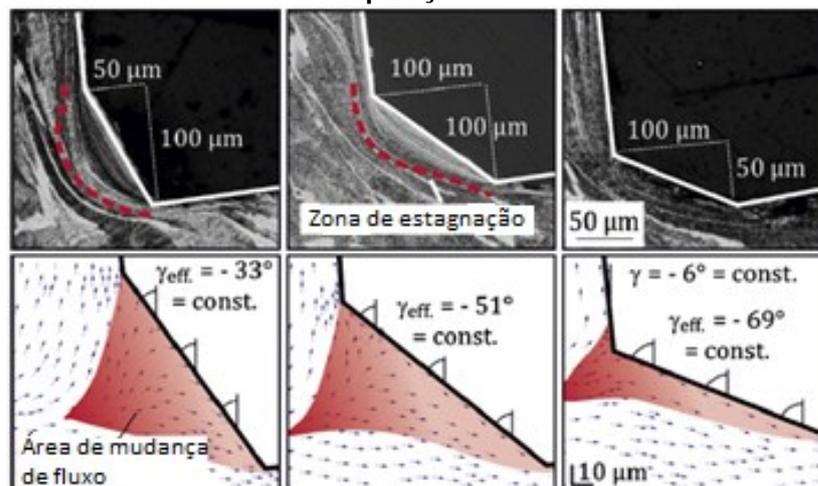
**Figura 28 - Influência de arestas de corte arredondadas no fluxo de material na zona de separação**



Fonte: Adaptado de Bassett (2014)

Para arestas chanfradas a zona de cisalhamento secundária revela uma deformação mais severa do que nas arestas arredondadas. O que resulta em uma zona de deformação maior na direção de mudança do fluxo. Isso ocorre principalmente nos chanfros assimétricos que geram deformação severa do material na zona de separação conforme Figura 29 (BASSETT, 2014).

**Figura 29 - Influência de arestas de corte chanfradas no fluxo de material na zona de separação**

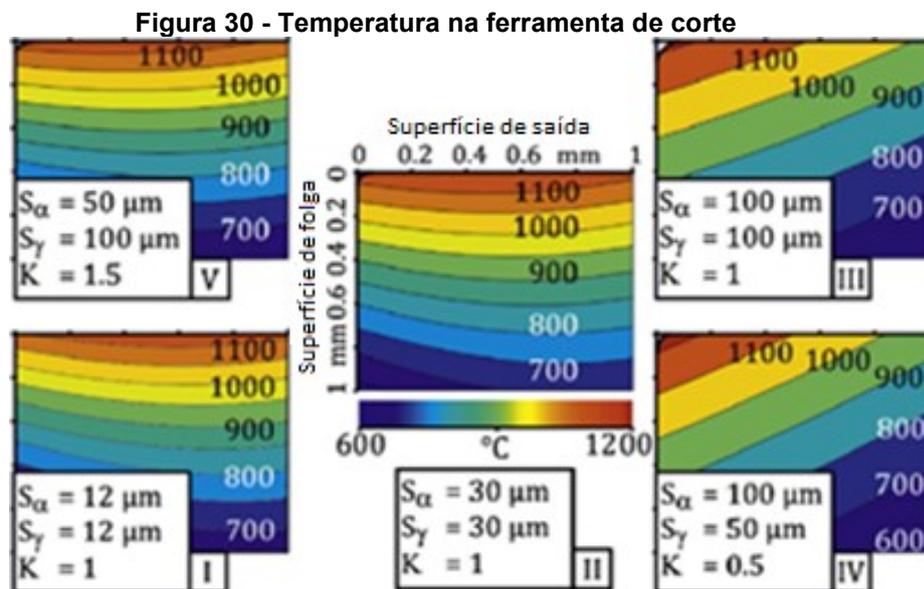


Fonte: Adaptado de Bassett (2014)

A dimensão da microgeometria da aresta de corte pode ter efeitos opostos com relação às cargas térmicas, ao aumentar a dimensão pode resultar em maiores cargas térmicas na cunha de corte, podendo ter atribuição pelo aumento do atrito e

aumento das deformações plásticas na zona de cisalhamento secundária, aumentando a temperatura na aresta de corte. Em contrapartida, ao usar arestas de corte arredondadas tem-se uma área maior para dissipar o calor gerado. Então essas oposições podem auxiliar em uma melhor definição da microgeometria de corte adequada em relação às cargas térmicas. Desse modo, a dimensão da aresta de corte deve ser ajustada considerando-se o material da peça a ser usinada, substrato da ferramenta, revestimento e parâmetros (DENKENA e BIERMANN, 2014).

Para DENKENA e BIERMANN (2014) é importante entender com mais profundidade os mecanismos ativos de desgaste e para isso, analisar as cargas térmicas na cunha da ferramenta em função do arredondamento da aresta de corte. Com o uso de um pirômetro de duas cores, realizou-se a medição da temperatura no torneamento ortogonal em AISI 1045 podendo assim analisar a influência de  $S_\alpha$  e  $S_\gamma$ . Para isso aplicaram 12 pontos na ferramenta em 3 níveis sob a superfície de saída. Os pontos foram transformados em um mapa contínuo através de um ajuste polinomial. Dessa forma foi possível analisar a temperatura na superfície de folga e na superfície de saída. Assim foi possível mostrar os resultados para as arestas de corte arredondadas simetricamente e assimetricamente, conforme Figura 30.



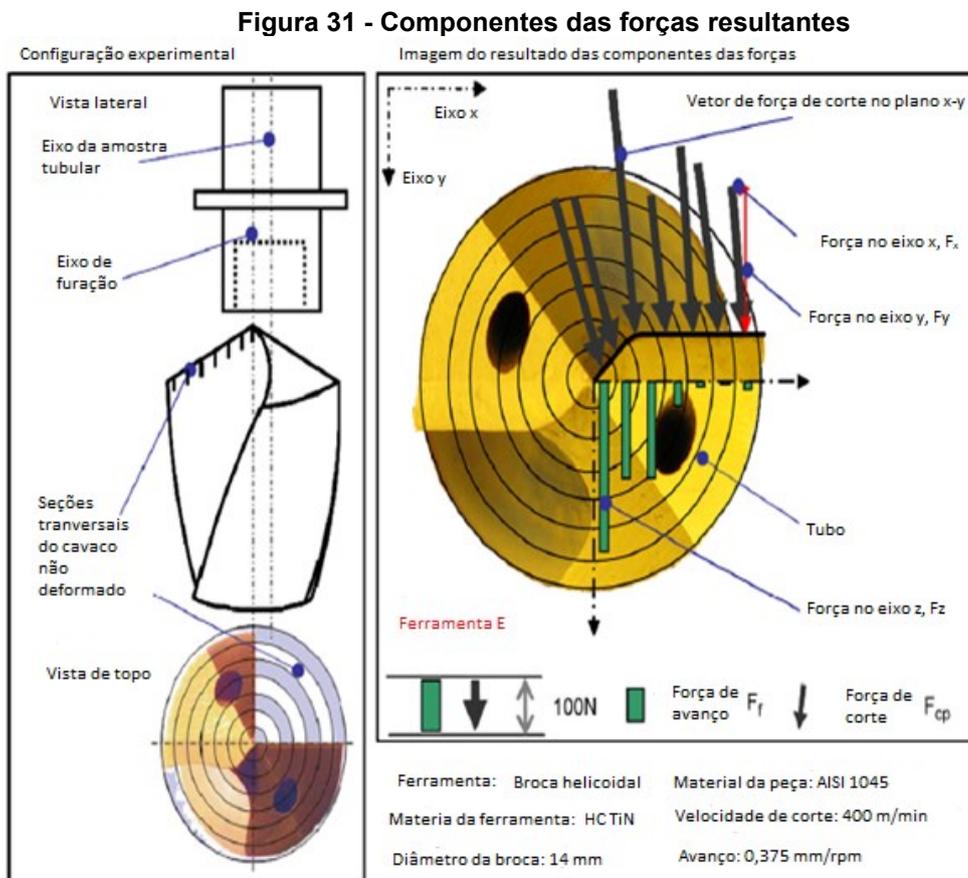
Fonte: Adaptado de Bassett (2014)

Na Figura ao lado esquerdo inferior podem ser observadas as temperaturas em uma ferramenta de corte afiada, onde a temperatura mais alta está na superfície de saída. Ao aumentar o arredondamento da aresta de corte de 12  $\mu\text{m}$  para 30  $\mu\text{m}$ , não pode ser observada alteração significativa nas cargas térmicas. Na Figura 30

pode-se verificar a grande influência de  $S_\alpha$  nas temperaturas da ferramenta. Ao aumentar o  $S_\alpha$  a temperatura máxima passa da superfície de saída para a superfície de folga (DENKENA e BIERMANN, 2014).

Assim como as cargas térmicas, as cargas mecânicas também sofrem influência do arredondamento da aresta de corte. Entretanto o arredondamento traz melhorias na estabilidade da aresta de corte porque reduz a magnitude das tensões mecânicas e as concentrações de tensões na ponta da ferramenta (DENKENA e BIERMANN, 2014).

A geometria da aresta exerce uma influência significativa no processo que pode ser analisado por uma técnica de medição específica. Podendo ser determinadas experimentalmente as forças de corte, avanço passivo conforme Figura 31. Devido à simetria das arestas de corte, as forças de corte e passivas não causam forças resultantes, podendo então ser medidos apenas o torque e a força de avanço. (BIERMANN e TERWEY, 2008).



Fonte: Adaptado de Biermann e Terwey (2008)

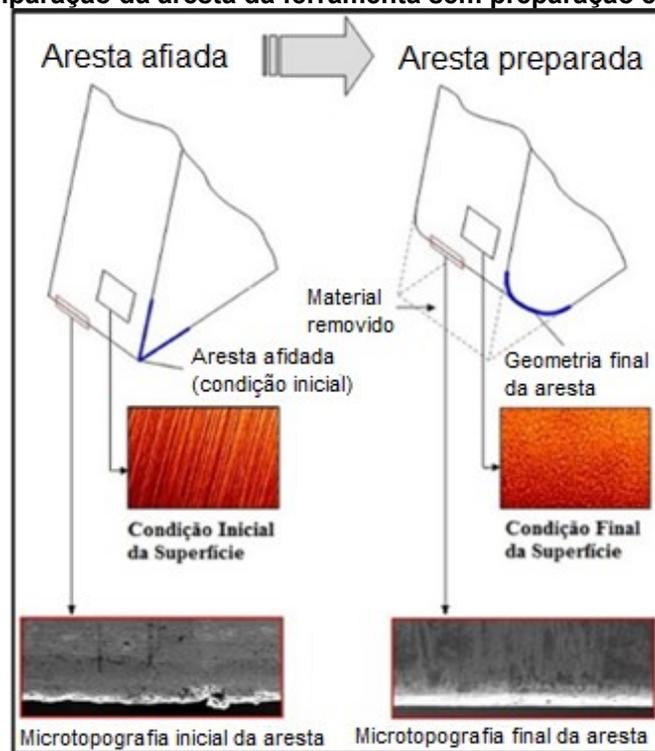
## 2.11 Influência da preparação de aresta no desgaste das ferramentas

Segundo DENKENA *et al.* (2011), a fim de aumentar a produtividade e a qualidade de usinagem nas peças, a preparação da aresta de corte vem tendo grande importância. Estudos comprovam que a vida da ferramenta pode aumentar em até 500%. A peça a ser usinada também se beneficia desta preparação com o aumento da microdureza da camada superficial.

Ao realizar a preparação da aresta de forma definida, a ferramenta melhora, a resistência ao desgaste e estabilidade do processo. Preparar a aresta antes do revestimento ajuda na estabilização da aresta e aumenta a vida da ferramenta (BIERMANN e TERWEY, 2008).

As ferramentas sem o polimento da aresta de corte apresentam maior irregularidade da superfície e pior acabamento do que as ferramentas polidas, conforme mostra a Figura 32 (ROMBALDI e ZEILMANN, 2011).

Figura 32 - Comparação da aresta da ferramenta sem preparação e com preparação



Fonte: Rodrigues (2009)

O primeiro estágio de usinagem em que ocorre o contato inicial da ferramenta e a peça define o desempenho posterior da ferramenta de corte. É nessa primeira etapa em que as ferramentas sem preparação costumam falhar gerando o desgaste acelerado na superfície de folga (RODRÍGUEZ, 2009).

Em processos de corte de alto desempenho é altamente exigida da ferramenta uma boa resistência ao desgaste devido a altas taxas de remoção de material e forças resultantes. Para aumentar a vida da ferramenta são aplicados revestimentos, mas além disso, a micro geometria da aresta de corte também vem ganhando importância. Ao se empregar um arredondamento definido ao longo da aresta de corte é possível ter ganhos em confiabilidade do processo pois são geradas menos lascamentos. A redução de lascamento da aresta de corte pode ser reduzida ao criar um arredondamento definido (BIERMANN e TERWEY, 2008).

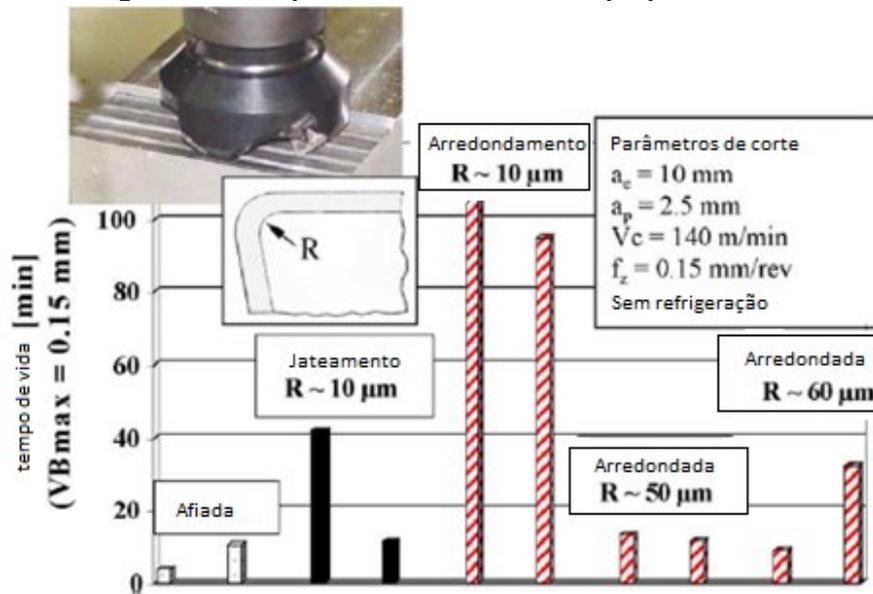
BIERMANN *et al.* (2012) compararam a preparação da aresta de corte entre quatro brocas, afiada, arredondadas com  $r_\beta = 10 \mu\text{m}$ ,  $20 \mu\text{m}$  e  $30 \mu\text{m}$  em um avanço  $f = 0,03 \text{ mm/rot}$  e  $v_c = 60 \text{ m/min}$ . As ferramentas não apresentaram grandes diferenças no comportamento de desgaste. Todavia ao passar para uma taxa de avanço de  $f = 0,05 \text{ mm/rot}$  foi possível detectar diferenças consideráveis no comportamento do desgaste de flanco. A ferramenta afiada foi utilizada até um comprimento de furação de  $L_f = 10.500 \text{ mm}$  onde apresentou grande desgaste, em contrapartida as ferramentas preparadas apresentaram menor desgaste que a afiada. Assim pôde ser confirmado a maior estabilidade com a utilização do arredondamento da aresta de corte levando a uma maior vida da ferramenta. Entre os três arredondamentos, a ferramenta com  $r_\beta = 20 \mu\text{m}$  apresentou o melhor resultado no desgaste de flanco após um comprimento de furação  $L_f = 15.000 \text{ mm}$ .

De acordo com RODRÍGUEZ (2009) o processo para preparação da aresta de corte assim como a geometria da aresta e em especial o raio da aresta afetam o comportamento de desgaste e a vida da ferramenta de corte. BYRNE *et al.* (2003) realizaram um estudo em torneamento de aço (HBN = 208) com ferramenta de metal duro em que foi analisada a influência do raio de aresta  $r_\beta$  na vida. Os resultados apresentados mostraram que a vida se tornou maior com o aumento do raio  $r_\beta$ , porém tendo um limite de dimensão do raio. Portanto, um valor de raio pode ser caracterizado para garantir a máxima vida. Dentre as estatísticas, a distribuição Weibull se mostrou a mais adequada descrevendo o fenômeno estocástico da vida da ferramenta e há uma mudança nos parâmetros de distribuição com relação ao raio de aresta. A vida da ferramenta se torna consideravelmente menor com a utilização de arestas apenas afiadas.

RECH *et al.* (2005) realizaram teste de fresamento com insertos PM-HSS com diferentes raios de aresta. O processo de obtenção dos raios foi feito por meio de

microjateamento ou por usinagem de fluxo abrasivo, e foram mostrados os resultados do efeito do raio de aresta  $r_\beta$ . No ensaio ficou comprovado que um raio na aresta de corte evita o desgaste rápido e imprevisível. Também pôde ser determinado um valor de arredondamento adequado. O experimento foi realizado em um aço tratado termicamente e revenido, sendo que as modificações do raio e a textura superficial foram os principais critérios para a resistência ao desgaste. Como resultado, verificou-se que o arredondamento com 10  $\mu\text{m}$  feito por meio de brunimento alcançou o melhor desempenho aumentando a vida em um fator de 4-5 em relação a uma ferramenta retificada conforme Figura 33 (RECH *et al.*, 2005).

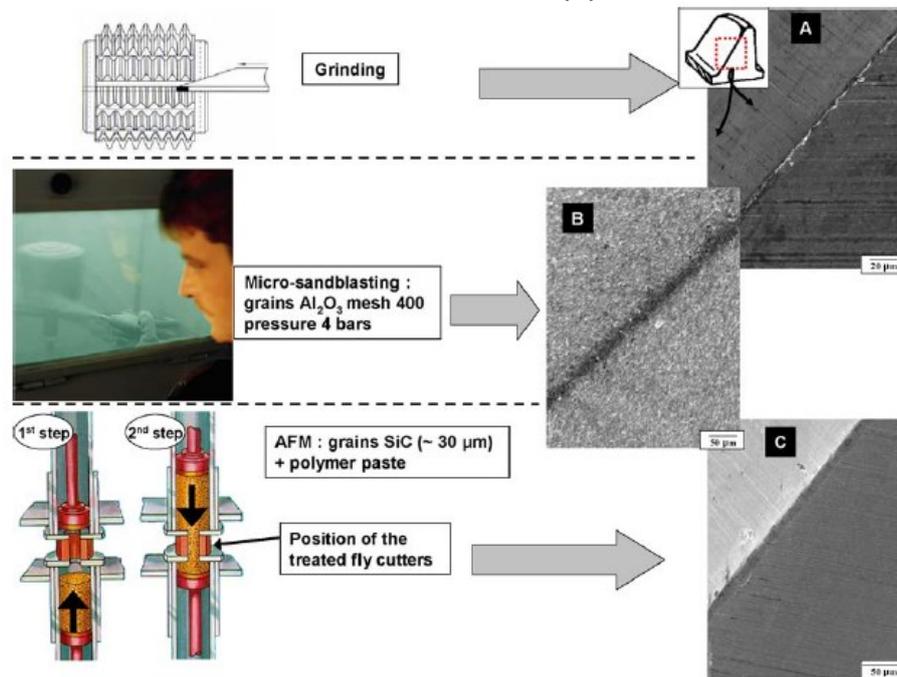
Figura 33 - Tempo de vida entre arestas preparadas



Fonte: Adaptado de Rech (2005)

RECH (2006) em outro estudo com fresas de PM-HSS em usinagem de alta velocidade a seco, pôde comprovar que raios  $r_\beta$  entre 10 e 20  $\mu\text{m}$  resultaram em maior vida da ferramenta. Em contrapartida, raios de 5  $\mu\text{m}$  e raios maiores que 30  $\mu\text{m}$  levaram a um maior desgaste da ferramenta. As ferramentas foram preparadas por meio de microjateamento ou brunimento, no qual, o método por brunimento apresentou melhorias em relação ao acabamento superficial (Figura 34). Alta rugosidade da superfície gera tensões locais nos picos maiores em relação às ferramentas com melhor acabamento superficial. A preparação da aresta permite diminuir as tensões mecânicas na ferramenta e no revestimento.

**Figura 34 - Comparação de aresta preparada por micro jateamento (B) e AFM (C) em relação a aresta retificada (A)**



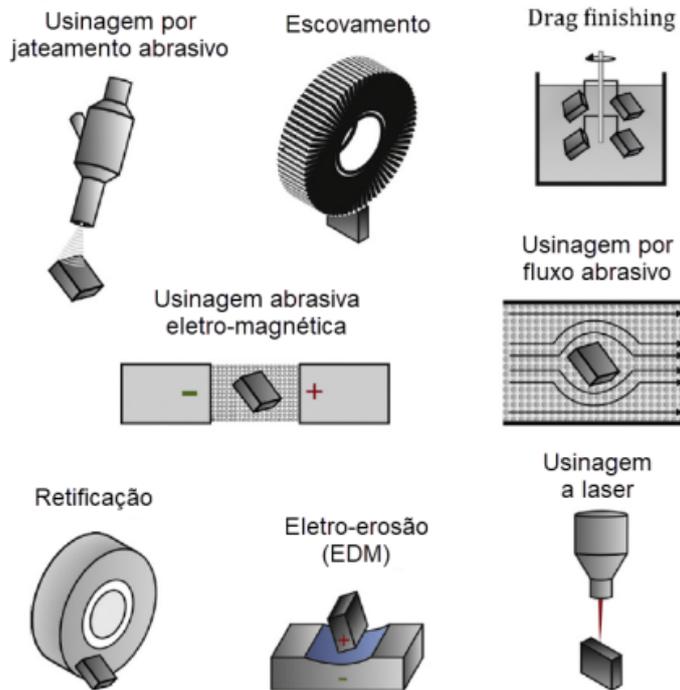
Fonte: Rech (2006)

BOUZAKIS *et al.* (2003) pesquisaram a influência da preparação da aresta no desgaste em ferramentas de metal duro revestidas em (TiNAl) pelo método de PVD (*Physical Vapour Deposition*). No fresamento com o uso de raios entre 8 e 35 µm preparadas pelo processo de brunimento e ou micro jateamento, relataram a possibilidade de aumentar a vida com a escolha de raios adequados.

## 2.12 Métodos utilizados para preparação de aresta

Para DENKENA e BIERMANN (2014) o processo de preparação da microgeometria da aresta de corte deve ser feito garantindo a repetibilidade para que haja vantagens econômicas. Algumas tecnologias podem ser usadas para a preparação da aresta de corte, todas são relativamente adequadas para atender os requisitos geométricos. Os métodos mais comuns para a preparação são: Jato abrasivo seco e úmido, escovação e *Drag Finishing*. Atualmente outros métodos estão sendo investigados como: polimento com escova, usinagem magnética abrasiva, usinagem de fluxo abrasivo, usinagem a laser, usinagem por descarga elétrica (EDM) e métodos de retificação. A Figura 35 mostra os métodos acima descritos.

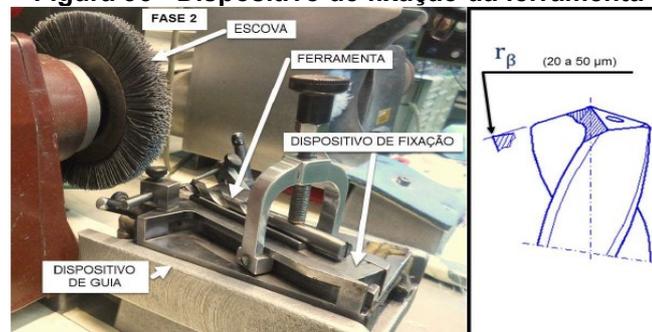
**Figura 35 - Métodos para preparação de arestas de corte**



Fonte: Adaptado de Denkena e Biermann (2014)

O processo de preparação de aresta por meio de escovação consiste em utilizar uma escova rotativa com cerdas abrasivas, que podem conter diferentes granulações de abrasivos assim como diferentes grãos abrasivos. Para o arredondamento (*honing*) em ferramentas de metal duro, são comumente utilizados grãos de diamante. O equipamento dispõe de dispositivos para fixação da ferramenta, podendo ajustá-la para o processo da preparação, alinhando adequadamente como mostra a Figura 36.

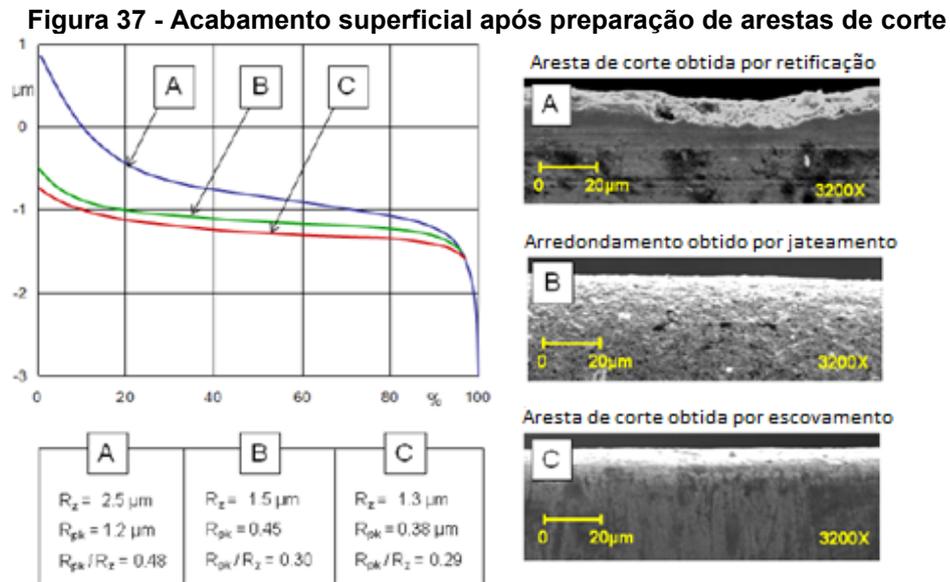
**Figura 36 - Dispositivo de fixação da ferramenta**



Fonte: Santana (2015)

RECH (2006) compara em seus ensaios os processos de preparação por microjateamento e usinagem por fluxo abrasivo, como resultado obteve que o método de usinagem por fluxo abrasivo gerou melhor acabamento da superfície da ferramenta

e maior vida. RODRÍGUEZ (2009) comparou o acabamento superficial entre ferramentas afiadas por meio de retificação, microjateamento e escovação, conforme Figura 37.



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009)

O método de escovação é realizado com a remoção do material da ferramenta por meio de cerdas sintéticas com grãos abrasivos controlando a geometria a ser preparada pelo nível de contato da aresta com a escova e pelo tempo de permanência. O micro jateamento consiste no arraste do grão abrasivo por meio da corrente de ar pressurizada, acarretando um efeito abrasivo sobre a aresta de corte, podendo também, envolver meios viscosos ou granulares (YUSSEFIAN *et al.*, 2010).

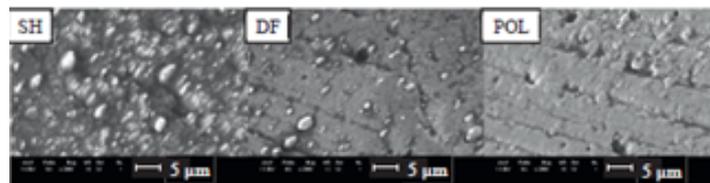
Os processos acima mencionados apresentam variabilidade significativa na geometria da aresta de corte, não apenas entre as arestas, mas também ao longo da mesma aresta. Ainda apresentam problemas no controle do processo e na mecânica da preparação da aresta (YUSSEFIAN *et al.*, 2010).

BORDIN e ZEILMANN (2014) pesquisaram a influência da preparação de aresta com três diferentes processos, aresta afiada por retificação, polida por meio de escovas abrasivas e por *Drag Finishing*. Na análise comparativa, foi constatado que o método de preparação por meio de polimento com escovas abrasivas resultou em uma aresta com melhor acabamento superficial e que esse fator contribuiu para a obtenção de melhores resultados no processo de furação do aço P20 com brocas de metal duro. Para caracterizar as ferramentas, foi utilizado um rugosímetro com faixa de 0,25 mm, em que foram verificados os pontos da superfície de saída juntamente

analisando a textura da superfície. A Figura 38 detalha os valores medidos e o acabamento.

**Figura 38 - Valores de rugosidade e textura**

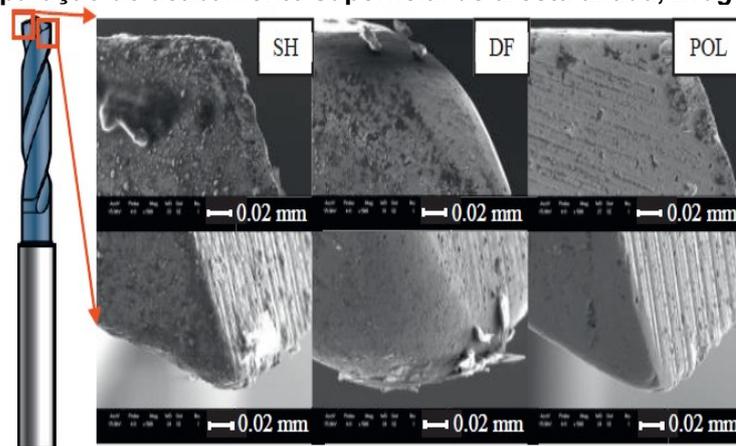
		$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]
SH	Média	0.19	1.37	1.72
	Desvio Padrão	0.06	0.40	0.50
DF	Média	0.15	1.23	1.59
	Desvio Padrão	0.04	0.18	0.26
POL	Média	0.14	0.91	1.14
	Desvio Padrão	0.04	0.22	0.29



Fonte: Bordin e Zeilmann (2014)

O detalhamento da modificação da aresta de corte realizado no MEV pode ser observado na Figura 39.

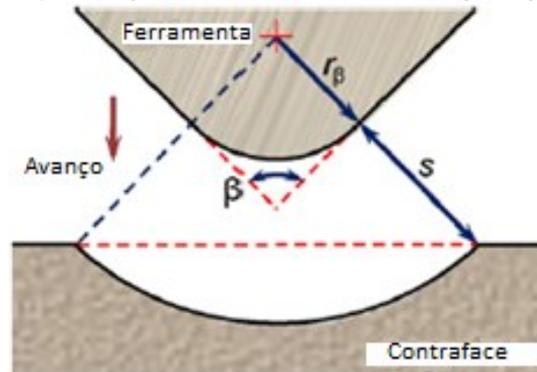
**Figura 39 - Comparação do acabamento superficial de aresta afiada, *Drag finished* e polida**



Fonte: Bordin e Zeilmann (2014)

O processo de preparação de aresta em ferramentas de metal duro com eletroerosão consiste na utilização de uma contraface de alumínio com perfil em raio com polaridade positiva em que a ferramenta e ou a contraface é movimentada e durante a aproximação inicia-se a descarga elétrica sem ter o contato entre a ferramenta e a contraface para gerar o arredondamento da aresta. O processo pode ser visualizado na Figura 40.

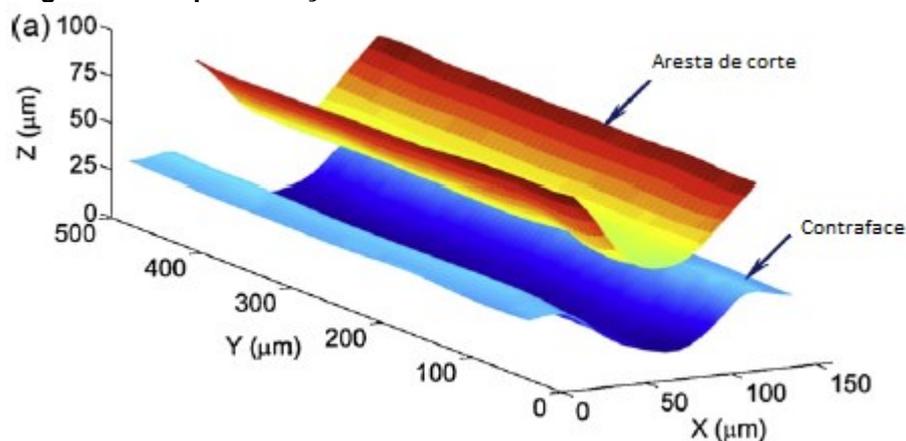
**Figura 40 - Representação do processo de eletroerosão para preparação da aresta**



Fonte: Yussefian *et al.* (2010)

Devido ao movimento relativo entre ferramenta e contraface com perfil em raio, é possível assim eliminar a necessidade de fazer o movimento rotativo da ferramenta para obter o perfil do raio entre as superfícies de saída e de incidência, o raio feito pode ser visto na Figura 41.

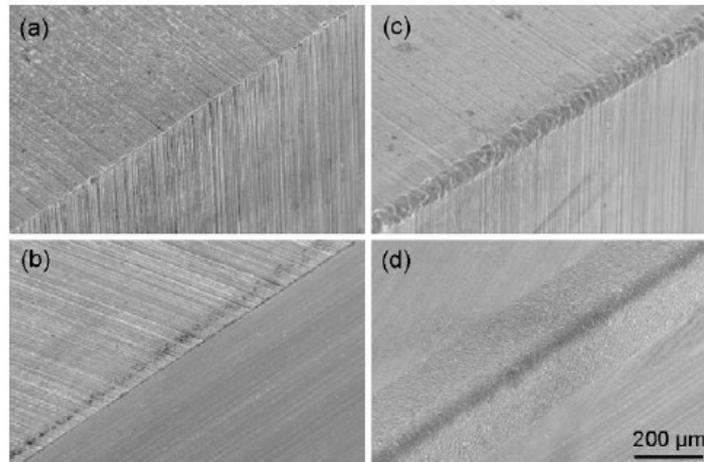
**Figura 41 - Representação da aresta de corte e contraface de alumínio**



Fonte: Yussefian *et al.* (2010)

Para YUSSEFIAN *et al.* (2010) o grande problema dos métodos abrasivos é a variabilidade da aresta, não apenas entre as arestas, mas também ao longo da mesma aresta e problemas com controle do processo. Com isso estudaram um processo de preparação de aresta por meio de descarga elétrica (EDM) em que é possível obter um maior controle do processo. Nesse estudo ele compara o arredondamento entre uma ferramenta de aço rápido e de metal duro com a aresta afiada respectivamente, conforme Figura 42.

**Figura 42 - Comparação de aresta afiada com arredondamento por EDM de ferramentas de HSS e metal duro**

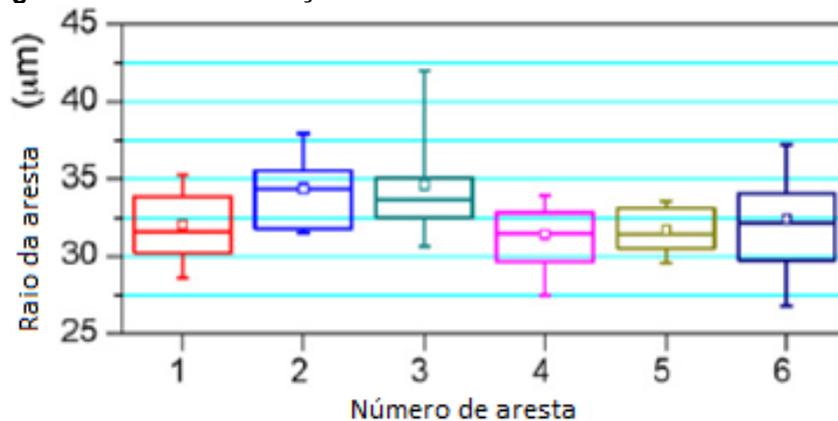


Fonte: Yussefian *et al.* (2010)

As Figuras a e b demonstram a aresta afiada e as Figuras c e d as arestas arredondadas por meio de (EDM) verificadas no (MEV). É possível analisar que a aresta preparada da ferramenta de metal duro apresenta um acabamento mais liso. Na imagem d, pode ser observado que tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga houve remoção de material, o que pode ser devido às descargas elétricas e a baixa taxa de desgaste do metal duro (YUSSEFIAN *et al.*, 2010).

Com relação à variabilidade das geometrias encontradas por outros métodos, a (EDM) apresentou taxas muito menores, caracterizando assim, que esse processo é mais confiável e com melhor possibilidade de controle na preparação de arestas, o que pode ser visto na Figura 43.

**Figura 43 - Taxa de variação do arredondamento da aresta de corte por EDM**



Fonte: Adaptado de Yussefian *et al.* (2010)

*Drag Finishing* é um processo de usinagem com geometria não definida onde as ferramentas são fixadas pela haste através de buchas e parafusos em suportes

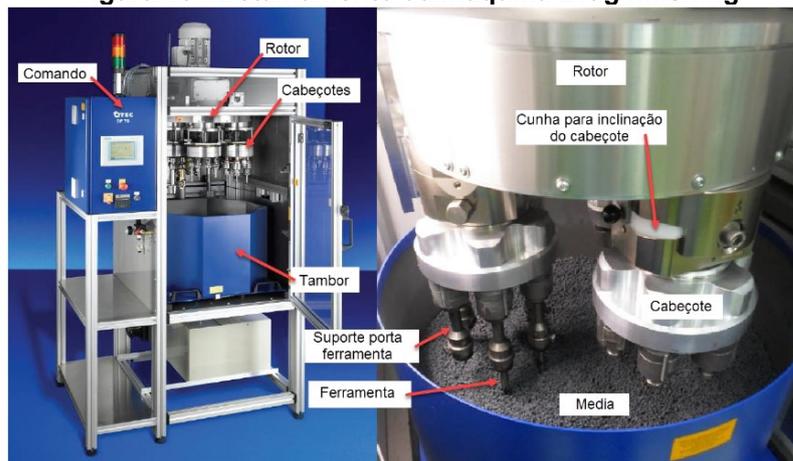
porta ferramenta que por sua vez são montados nos cabeçotes da máquina (Figura 39). A máquina possui um tambor que armazena o abrasivo conhecido por abrasivo, este por sua vez pode ser facilmente substituído por outro carregado, com abrasivo diferente. O fabricante oferece um trocador de tambor e um sistema de troca rápida para facilitar o “*setup*” de abasivo na máquina. O comando da máquina é automatizado e programável, sendo que nesses programas pode ser definido parâmetros como a rotação e sentido de rotação para o rotor e cabeçote de forma independente Figuras 44 e 45, profundidade de imersão da ferramenta, seleção do abrasivo, controle de vida do abrasivo (TIKAL *et al.*, 2009).

**Figura 44 - Fixação de ferramentas no cabeçote *Drag Finishing***



Fonte: Adaptado de Tikal *et al.* (2009)

**Figura 45 - Detalhamento da máquina *Drag finishing***

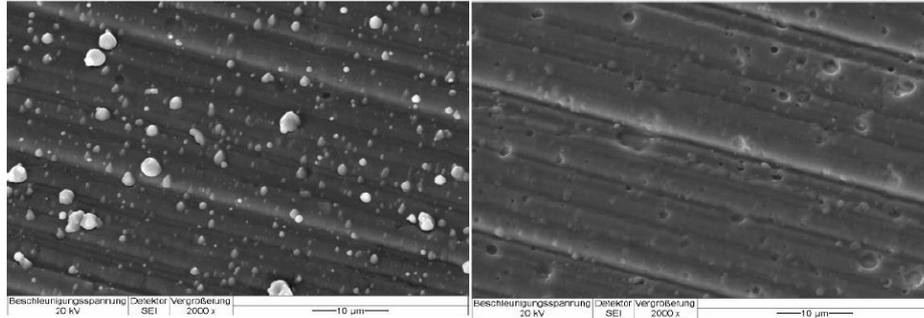


Fonte: Santana (2019)

De acordo com SANTANA (2019), esse processo de preparação da aresta garante uma boa repetibilidade da dimensão do arredondamento para ferramentas preparadas no mesmo ciclo da máquina, porém podem ocorrer diferenças caso o comprimento das ferramentas varie. Assim como outros processos abrasivos, este

depende do tempo de permanência da ferramenta no processo. A preparação por meio da *Drag Finishing* pode ainda melhorar o acabamento da superfície auxiliando na correção de defeitos oriundos do processo de revestimento, chamados de “*droplets*”, podendo ser visto na Figura 46.

**Figura 46 - Droplets na superfície (esquerda) e removidos (direita)**



**Fonte: Adaptado de Tikal et al. (2009)**

TIKAL et al. (2009) ainda fazem uma referência ao acabamento obtido no processo por *Drag Finishing* e o tempo de permanência, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1 - Tempo versus rugosidade**

Fresa de metal duro	
Tempo de processo (min)	Rugosidade Ra (µm)
0	0,8
5	0,6
10	0,4
15	0,4
20	0,3

**Fonte: Adaptado de Tikal et al. (2009)**

### 2.13 Análise de variância (ANOVA)

Uma ferramenta estatística poderosa de análise de variância (ANOVA) foi desenvolvida por R.A. Fisher e é utilizada para comparar médias entre mais de dois grupos experimentais (CALLEGARI e JACQUES, 2003), onde a hipótese nula ( $H_0$ ) é de que todos os grupos experimentais possuem médias iguais e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) é de que pelo menos um grupo apresenta média diferente dos demais grupos. O teste de hipótese pode ser representado pela Equação 3.

$$H_0: \mu_A = \mu_B = \mu_C = \dots = \mu_i \quad (3)$$

$H_1$ : Pelo menos umas das médias é significativamente diferente das demais onde:

$\mu_A$  = média do grupo A;

$\mu_B$  = média do grupo B;

$\mu_C$  = média do grupo C;

$\mu_i$  = média do grupo i;

i = número de grupos experimentais.

A fim de evitar o aumento no nível global de significância do experimento, o procedimento correto é utilizar a Análise de Variância e comprovada a hipótese de que pelo menos uma das médias dos k grupos é significativamente diferente e em seguida realizar algum teste de comparação múltipla entre as médias (CALLEGARI e JACQUES, 2003).

A ANOVA consiste em uma gama de modelos estatísticos onde a variação total entre os valores obtidos no experimento é particionada em diversos componentes identificáveis. Cada componente atribui sua variação a uma causa ou fonte de variação, onde o número de fatores ou causas de variação dependerá do delineamento a ser utilizado. Existem três modelos de ANOVA, sendo eles: Modelo com Efeitos Fixos, podendo ser de um ou dois fatores, Modelo com Efeitos Aleatórios, também podendo ser para um ou dois fatores, e Modelo com Efeitos Mistos, onde neste modelo trabalha-se apenas com dois fatores.

A ANOVA verifica a variação das médias dentro dos grupos e entre os grupos, em relação à média geral de todos os indivíduos envolvidos no experimento.

Segundo LEWIS (1995), quando a variação entre os grupos for maior que a variação dentro dos grupos, existe diferença estatística significativa entre as médias dos grupos envolvidos no experimento.

O cálculo para identificar esta diferença é chamado de razão F de variância, em homenagem a Fisher. Este resultado F é comparado com um valor Tabelado de referência, utilizado para rejeitar ou não a hipótese de igualdade das médias dos grupos pesquisados (LEWIS, 1995).

Quando se rejeita a hipótese nula de igualdade de médias entre os grupos, a ANOVA não identifica em quais grupos existe a diferença. Para isto, é necessário utilizar um teste de comparação múltipla entre as médias (BUSSAB, 1988).

Para esta finalidade existem alguns testes estatísticos, entre eles, os testes de Tukey (dados balanceados); Teste de Tukey-kramer (dados não balanceados); Teste de Dunnet; Teste de Scheffe, Teste de Fisher e Teste de Bonferroni (RODRIGUES, 2016).

#### **2.14 Oportunidade de pesquisa**

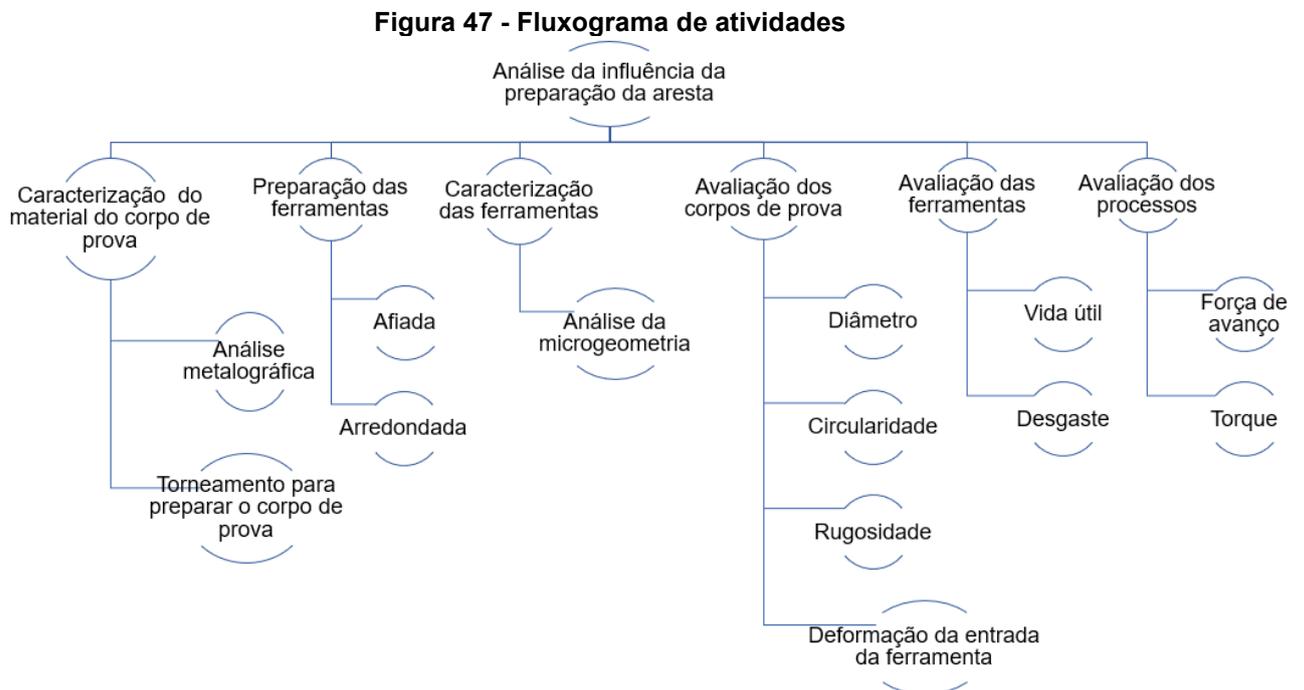
Com base em informações obtidas junto a empresa fabricante de ferramentas especiais e parceira no trabalho, observou-se um grande interesse na usinagem com a utilização de brocas com insertos intercambiáveis para usinagem de ferro fundido cinzento. Esse material é muito utilizado por seus clientes na fabricação de cabeçotes de motores a combustão para a linha de caminhões e máquinas pesadas, conexões hidráulicas de alta pressão, manifolds, tampas e êmbolos. Ao realizar a revisão bibliográfica, observou-se as potenciais vantagens associadas ao uso de ferramentas com arredodamento da aresta de corte. Contudo, apesar de sua importância não foram realizados estudos sobre a influência da preparação da aresta na furação com brocas helicoidais com insertos intercambiáveis em FC300.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar este estudo foi efetuada uma revisão sistemática através da literatura atual e em publicações em artigos científicos que tratam do tema que é o objeto de estudo deste projeto de dissertação. Fomentando assim uma base sólida para fundamentação teórica da proposta deste estudo.

Foram elaborados experimentos controlados comparando a variação da microgeometria de corte em afiada, arredondada em 15, 30 e 50  $\mu\text{m}$ , mantendo os parâmetros de velocidade de corte e velocidade de avanço padrões para todas as geometrias analisadas. Para os testes práticos, visando maior confiabilidade nos resultados obtidos, foram usadas máquinas comandadas numericamente (CNC), por estas apresentarem maior robustez, segurança e exatidão nos valores encontrados.

A metodologia usada foi baseada em desenvolvimento experimental de ensaios. O fluxograma das atividades abordadas neste trabalho, associados ao corpo-de-prova, ferramenta e processo é apresentado a seguir na Figura 47.



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.1 Material usinado

O material usinado foi o ferro fundido cinzento FC300. Este é amplamente empregado em componentes automotivos. Com base em informações obtidas junto a empresa fabricante de ferramentas especiais e parceira no trabalho, observou-se um grande interesse na usinagem com a utilização de brocas com insertos intercambiáveis para usinagem deste material.

A Tabela 2 mostra a sua composição.

**Tabela 2 - Composição química (%) FC 300**

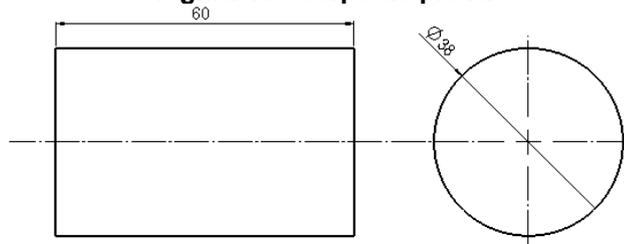
Composição química							
Elementos	C*	Si	Mn	S	P máx	Cr máx	CU
FC 300	3,37-3,50	2,52-2,66	0,25-0,33	0,06-0,09	0,04-0,09	0,03-0,04	0,15-0,19

Fonte: Aços GBS (2023)

### 3.2 Corpos-de-prova

Os corpos de prova foram utilizados no formato circular para facilitar a fixação e a troca de peças no dispositivo preparado para os ensaios e apresentavam dimensões conforme descrito na Figura 48.

**Figura 48 - corpo de prova**



Fonte: Autoria própria (2023)

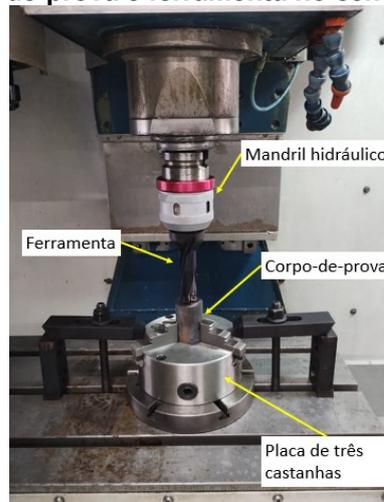
Os critérios utilizados para observar a influência da proteção da aresta de corte na integridade superficial e na qualidade dos furos obtidos nos corpos-de-prova foram:

- Diâmetro;
- Circularidade;
- Rugosidade.

### 3.3 Máquina-ferramenta

Os ensaios foram realizados em centro de usinagem CNC modelo Discovery D560 com potência total instalada de 20 kVA e rotação máxima de 7500 rpm do fabricante ROMI do laboratório de usinagem do SENAI CIC. A Figura 49 representa a fixação do corpo-de-prova em placa de três castanhas e a ferramenta em mandril hidráulico.

**Figura 49 – Fixação do corpo-de-prova e ferramenta no centro de usinagem Discovery 560**

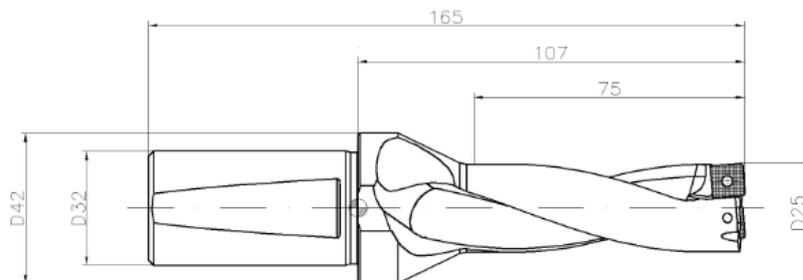


Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.4 Ferramenta de furação com inserto intercambiável

Devido à ferramenta possuir as características adequadas para usinagem em furação em cheio, foi utilizado um suporte helicoidal modelo DR025-075-32-09 do fabricante Iscar (Figura 50).

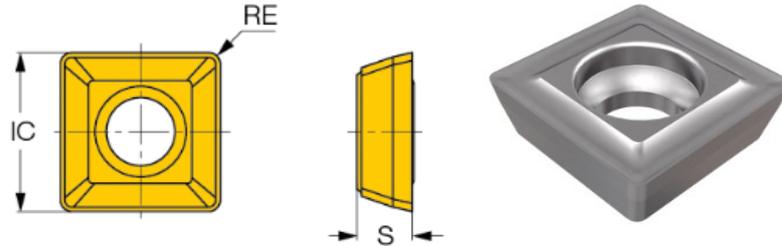
**Figura 50 - Suporte helicoidal modelo DR025-075-32-09**



Fonte: Fabricante Iscar (2023)

Foram utilizados insertos do modelo SOMT 09T306-DT IC908 com tolerância de fabricação em  $\pm 0,05$  mm para o dimensional das arestas e  $\pm 0,10$  mm para a espessura, segundo o fabricante Iscar, conforme Figura 51.

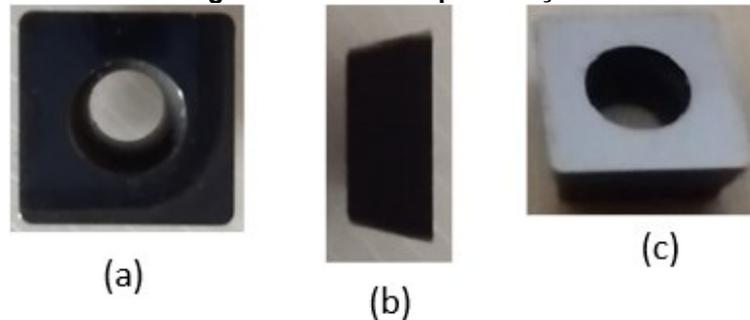
**Figura 51 – Insertos do modelo SOMT 09T306-DT do fabricante Iscar**



**Fonte: Ferramentas Iscar (2023)**

Os insertos passaram por alterações na macrogeometria e microgeometria de corte para poder realizar o procedimento de preparação da aresta, a mudança ocorreu com a decapagem (retirada do revestimento) e foi necessário retirar a geometria da saída de cavaco, conforme Figura 52 (a), (b) e (c).

**Figura 52 - Inseto após afiação**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

O processo preparou o par de insertos no escovamento com pasta diamantada, o qual foi realizado em máquina automática. Neste sistema a escova realizava o giro horário e a mesa o anti-horário invertendo os giros em cada passada até obter a geometria adequada.

Para os ensaios foram utilizados 8 insertos, sendo que em cada ensaio foi utilizado um par no suporte de furação helicoidal com as geometrias descritas na Tabela 3.

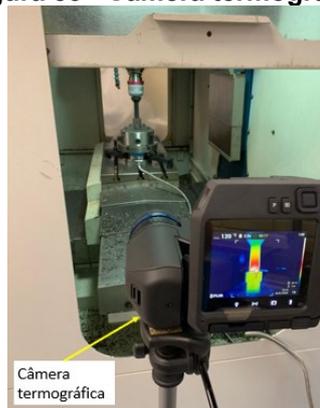
**Tabela 3 - Valores de referência para o arredondamento da aresta de corte**

afiada ( $\mu\text{m}$ )	Arredondada ( $\mu\text{m}$ )	Arredondada ( $\mu\text{m}$ )	Arredondada ( $\mu\text{m}$ )
0	15	30	50

Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.5 Equipamento para medição de temperatura

Devido à cinemática do processo representar uma limitação para medição da temperatura no inserto, foi realizada a medição das temperaturas do cavaco durante o processo de usinagem com o número de 5 amostras para cada aresta no início de vida útil das ferramentas. Para isso foi utilizada uma câmera termográfica modelo Flir T530, do fabricante Teledyne FLIR (Figura 53). Dessa forma foi possível analisar de forma indireta a influência da preparação de aresta no aumento de temperatura do processo.

**Figura 53 - Câmera termográfica**

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 4 apresenta as especificações técnicas sobre a câmera termográfica.

**Tabela 4 - Especificações técnicas da câmera termográfica**

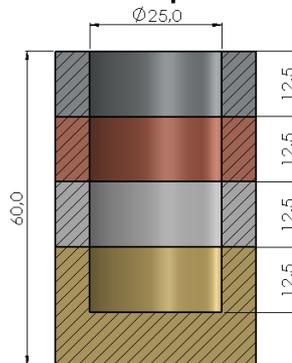
<b>Resolução de IV</b>	320x240 (76.800 pixels)
<b>Sensibilidade Térmica/NETD</b>	<40 mK, 24° a +30 °C (+86 °F)
<b>Precisão</b>	$\pm 2$ °C ( $\pm 3,6$ °F) ou $\pm 2\%$ da leitura
<b>Câmera Digital</b>	5 megapixels, com lâmpada de LED para foto/vídeo integrada
<b>Display</b>	Tela LCD sensível ao toque, 4 polegadas, 640 x480 pixels com rotação automática
<b>Mídia de Armazenamento</b>	Cartão SD removível

Fonte: Teledyne FLIR

No procedimento de avaliação da temperatura do cavaco, foi estabelecida a separação do comprimento de usinagem em quatro partes para cada amostra usinada

obtendo a média das temperaturas mais altas registradas em cada intervalo medido, realizando análise através do *software* (Flir Thermal Studio), conforme a Figura 54.

**Figura 54 – Peça com a divisão para medição de temperatura**



Fonte: Autoria própria (2023)

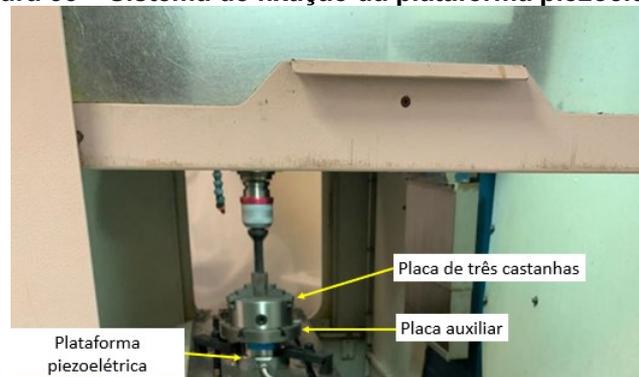
### 3.6 Equipamento para aquisição de força e torque

Foram medidas as forças de avanço e torque do processo de furação do ferro fundido FC300 na condição de fornecimento com o número de 5 amostras para cada aresta no início de vida útil das ferramentas.

Força de avanço ( $F_z$ ) e torque ( $M_z$ ) foram medidos por um conjunto composto de plataforma piezoelétrica Kistler tipo 9272, junto com o *software* NI Signal Express da National Instruments e um microcomputador.

A fim de coletar as forças de avanço e torque no processo de usinagem, foi usada uma placa auxiliar com uma placa de três castanhas fixando o corpo de prova sobre a plataforma piezoelétrica que por sua vez foi fixada na mesa do centro de usinagem (Figura 55).

**Figura 55 – Sistema de fixação da plataforma piezoelétrica**

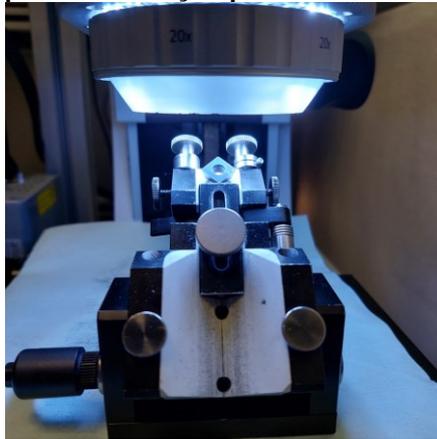


Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.7 Equipamentos de aquisição de imagem e análise

Para a caracterização das microgeometrias de corte foi usada uma máquina de medição por coordenadas  $\mu$ CMM do fabricante Alicona, modelo “Infinite focus SL” com programa de medição “IF-Edge Master”. Dessa forma, foi possível obter uma caracterização mais completa com parâmetros como: raio da microgeometria ( $r$ ), ângulo de incidência ( $\alpha$ ), ângulo de cunha ( $\beta$ ), ângulo de saída ( $\gamma$ ) e raio de cunha ( $r_\beta$ ) ângulo de cunha  $\beta$ , rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_p$  e  $R_v$ , também sendo possível analisar a dispersão da geometria teórica com a real. De acordo com a revisão bibliográfica, esse tipo de máquina apresenta superioridade na caracterização em comparação ao MEV. As ferramentas foram numeradas antes da medição para manter o controle das geometrias. Para a medição da aresta de corte foi tomada como referência a região central da aresta de corte em todas as amostras sendo o comprimento medido de 1 mm e para os raios de quina foi analisada a aresta completa. A Figura 56 apresenta a máquina utilizada.

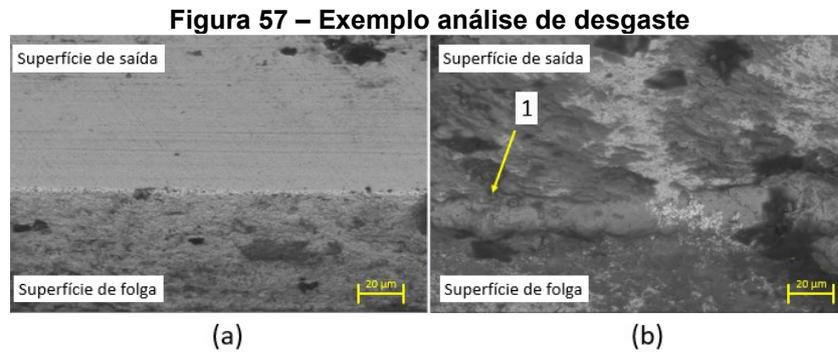
**Figura 56 - Máquina de medição por coordenadas  $\mu$ CMM Alicona**



**Fonte: Departamento de processos da multinacional (2023)**

A análise das avarias após o processo de furação foram executadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com sistema EDS (Espectroscopia de energia dispersiva), utilizando o aparelho modelo Evo MA15, realizadas no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR – Curitiba – PR, Brasil. Composto por câmera de vídeo e lentes capazes de capturar e ampliar imagens associado a um software de medição durante paradas estratégicas do ensaio, foi empregado na avaliação dos desgastes das ferramentas em que a Figura 57 (a) representa a aresta antes da usinagem e a (b) após a usinagem. Também foi utilizado

o microscópio eletrônico de varredura, modelo VEJA 3 do fabricante Tescan do Centro de Caracterização de Materiais da PUC-PR para caracterização do desgaste VB das ferramentas após os ensaios.

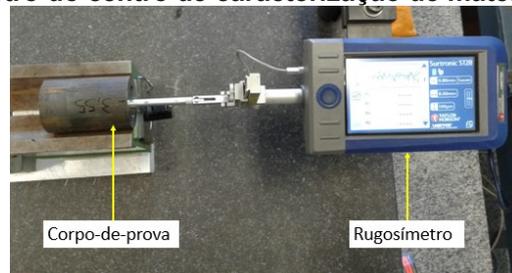


**Fonte: Autoria própria (2023)**

### 3.8 Equipamento para medição de rugosidade

Para a realização da medição de rugosidade foi usado um rugosímetro modelo S128 do fabricante Surtronic do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR (Figura 58).

**Figura 58 – Rugosímetro do centro de caracterização de materiais (CMCM) da UTFPR**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

As medições de rugosidade ocorreram em todos os corpos de prova utilizados nos ensaios, a fixação foi feita com o apoio da peça em uma base prismática e a localização da ponta de medição ao centro do comprimento do furo.

### 3.9 Equipamento para avaliação de diâmetro e circularidade

Para a realização da medição dos diâmetros e das circularidades foi utilizado uma máquina de medições por coordenadas CNC do fabricante DEA modelo SCIROCCO do laboratório de metrologia da PUC-PR (Figura 59).

**Figura 59 – Máquina de medições por coordenadas CNC do laboratório de metrologia da PUC-PR**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

A fixação do corpo de prova foi feita por meio de uma placa de três castanhas fixada por laxes na base na máquina. Após a programação da máquina, as medições ocorreram de forma automática.

Para as medições dos diâmetros e circularidades foi realizada a programação para a máquina medir a 5, 10 e 40 mm de profundidade com a localização de 12 pontos para cada medição em todos os corpos de prova utilizados nos ensaios das três arestas de corte.

### **3.10 Análises estatísticas ANOVA e teste tukey**

A fim de analisar os resultados obtidos, foi realizada análise estatística (ANOVA) de fator único para encontrar os resultados que obtiverem maiores desvios com relação as suas médias.

A análise para o torque, força de avanço e temperatura do cavaco foi realizada utilizando as médias dos valores obtidos nos ensaios de usinagem dos cinco primeiros corpos de prova e da primeira aresta de corte dos pares de inserto.

Para a realização da análise dos ensaios de rugosidade, diâmetro, circularidade e desgaste VB, foi calculada a média dos valores obtidos pelas medições para cada aresta utilizada nas usinagens.

Após realizar a análise de variância, é necessário aplicar o teste Tukey para encontrar quais grupos apresentaram os desvios e assim obter uma análise mais refinada. Para isso, foram usados o *software* Jamovi com a análise de dados.

### 3.11 Parâmetros de usinagem

Os parâmetros de usinagem empregados são os indicados por fabricantes de ferramentas de metal duro classe K sem revestimento e estão representados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Parâmetros de usinagem**

<b>Velocidade de corte (m/min)</b>	<b>Avanço (mm/volta)</b>	<b>Incremento de corte (mm)</b>
120	0,20	50

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Foi realizada uma pesquisa junto ao fabricante de ferramentas, desta forma foi realizado a escolha dos parâmetros a fim de obter resultados mais confiáveis, levando em consideração a remoção do revestimento. No processo não foi utilizado refrigeração para poder ser feita a medição das temperaturas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa etapa serão apresentados os resultados referentes à caracterização das ferramentas afiadas e com a preparação de aresta (honing), corpos-de-prova, avaliação dimensional e avaliação de desgastes das ferramentas. Também são apresentados os resultados de força de avanço e torque no processo de furação.

### 4.1 Caracterização das ferramentas de corte

Considerando que cada inserto possui quatro arestas e quatro raios de quina, os valores L1, L2, L3 e L4 são referentes às arestas de corte afiadas e com o arredondamento e os valores V1, V2, V3 e V4 são referentes aos raios de quina afiados e com o arredondamento. As ferramentas foram numeradas antes da medição para manter o controle das geometrias em que a Tabela 6 mostra os valores encontrados para o inserto afiado número 1. Os valores encontrados demonstram a boa repetibilidade.

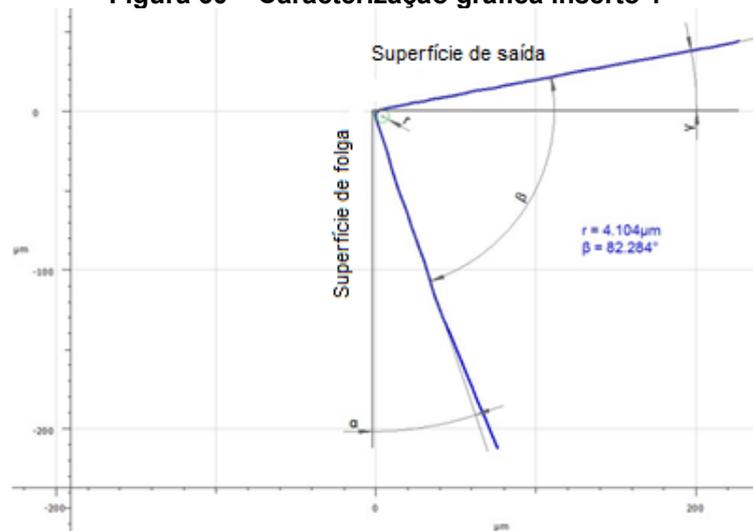
**Tabela 6 – Caracterização do inserto 1**

Variáveis	Insertos com aresta afiada							
	Inserto 1							
	L1	L2	L3	L4	V1	V2	V3	V4
$r_{\beta}$ ( $\mu\text{m}$ )	4,104	4,378	4,551	4,252	4,264	6,834	3,930	3,841
$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	18,492	20,168	20,851	20,695	19,717	20,582	20,407	19,632
$\beta$ ( $^{\circ}$ )	82,284	80,400	80,517	80,065	80,254	79,861	80,143	80,782
$\gamma$ ( $^{\circ}$ )	-10,776	-10,569	-11,368	-10,760	-9,971	-10,443	-10,551	-10,414
$s_{\alpha}$ ( $\mu\text{m}$ )	5,032	6,200	7,767	6,182	5,733	9,492	7,730	6,993
$s_{\gamma}$ ( $\mu\text{m}$ )	5,936	5,432	5,561	7,188	5,703	7,979	4,737	4,491
K	1,180	0,876	0,716	1,163	0,995	0,841	0,613	0,642
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,528	0,348	0,266	0,248	0,531	0,788	0,402	0,609
Rq ( $\mu\text{m}$ )	0,820	0,454	0,332	0,317	0,730	1,008	0,509	0,929
Rz ( $\mu\text{m}$ )	2,456	2,019	1,447	1,469	2,708	4,253	2,212	2,746

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Além de realizar a medição foi gerado imagens do perfil da aresta de corte de forma gráfica, como representado na Figura 60, podendo dessa forma se analisar com mais clareza a geometria real do inserto 1.

**Figura 60 – Caracterização gráfica inserto 1**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

A Tabela 7 apresenta valores encontrados na caracterização do inserto 2 afiado, podendo ser observado que os valores para todas as arestas de corte se mantiveram muito próximos.

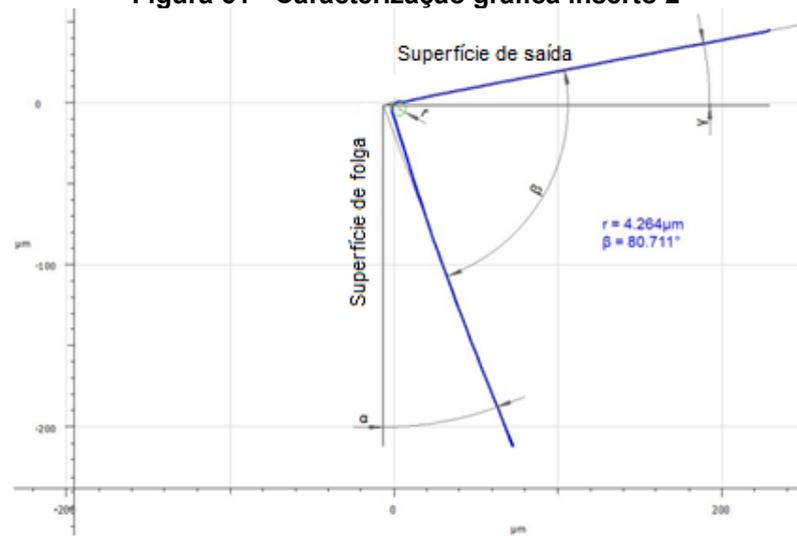
**Tabela 7 – Caracterização do inserto 2**

Insertos com aresta afiada								
Variáveis	Inserto 2							
	L1	L2	L3	L4	V1	V2	V3	V4
$r_B$ ( $\mu\text{m}$ )	4,264	4,262	4,548	4,062	4,071	4,029	4,175	4,221
$\alpha$ ( $^\circ$ )	20,341	22,006	21,424	20,345	19,539	20,887	20,732	20,290
$\beta$ ( $^\circ$ )	80,711	78,644	79,253	80,371	81,325	79,554	80,642	80,172
$\gamma$ ( $^\circ$ )	-11,051	-10,650	-10,677	-10,715	-10,864	-10,442	-11,374	-10,461
$s_a$ ( $\mu\text{m}$ )	9,698	6,438	15,217	8,392	6,762	10,135	8,945	8,744
$s_y$ ( $\mu\text{m}$ )	4,848	4,852	5,030	5,637	4,361	4,548	4,777	4,827
K	0,504	0,754	0,331	0,672	0,645	0,449	0,534	0,552
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,335	0,300	0,277	0,334	0,444	0,416	0,453	0,458
Rq ( $\mu\text{m}$ )	0,426	0,381	0,356	0,435	0,575	0,538	0,589	0,606
Rz ( $\mu\text{m}$ )	2,079	1,616	1,461	1,834	2,304	1,963	2,700	2,490

**Fonte: Autoria própria (2023)**

A Figura 61 demonstra a caracterização gráfica da aresta de corte do inserto 2.

**Figura 61 - Caracterização gráfica inserto 2**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Nas avaliações de perfil das ferramentas com arestas de corte afiadas foi observado a existência de um pequeno valor de arredondamento nas arestas ( $\leq 7 \mu\text{m}$ ). Uma explicação para este evento pode ser a presença de irregularidades na aresta de corte que podem ter sido ocasionados devido ao arraste do rebolo no momento da afiação.

Imagens gráficas foram geradas para auxiliar na compreensão do perfil, o método de medição por nuvem de pontos da Alicona é capaz de criar malhas e definir o perfil mensurado em imagens de ótima qualidade e representatividade para os insertos afiados, como nas Figuras 62 e 63.

**Figura 62 - Perfil gerado pela Alicona da aresta de corte afiada**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

**Figura 63 - Perfil gerado pela Alicona do raio de quina afiada**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

O ângulo de saída ( $\gamma$ ) que foi gerado pela Alicona em todas as medições é referente à microgeometria, que devido à pressão exercida pelo processo de escovamento da superfície plana para gerar o arredondamento. Além disso, havia o fato dos insertos na mesa da máquina não estarem totalmente fixos, permitindo pequenas movimentações, apresentando uma angulação logo após à aresta de corte. Por ser uma região muito pequena ocasiona mínima influência no processo de usinagem.

Considerando o fator de simetria  $K$ , foi possível observar que para os insertos apenas afiados, obteve-se valores mais próximos da simetria em comparação com os arredondados.

A rugosidade da aresta de corte ( $R_a$ ) apresentou maiores variações e valores para os insertos afiados, podendo ser explicado pelas microirregularidades geradas no processo de retificação.

Os insertos foram preparados em pares por valor de arredondamento para garantir o máximo de uniformidade nas arestas de corte.

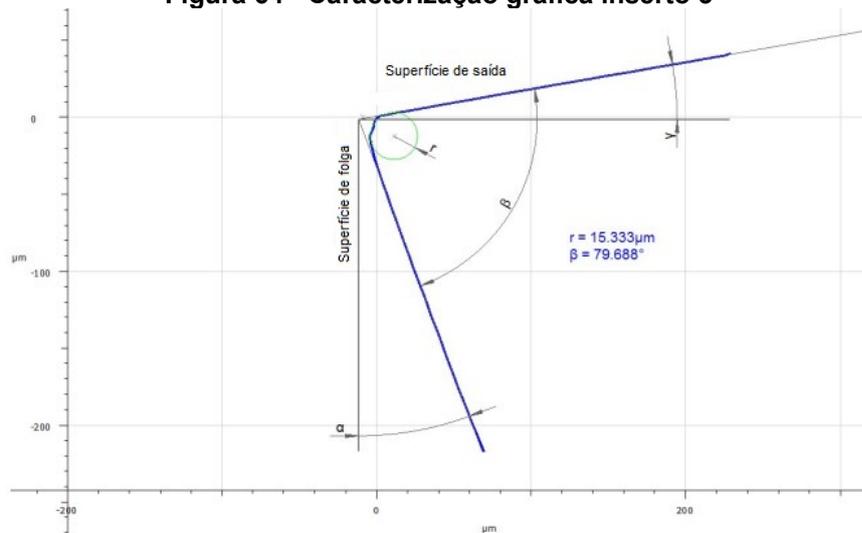
A Tabela 8, revela os valores para o inserto arredondado número 3 com ( $r_\beta = 15 \mu\text{m}$ ), podendo ser notada pequena variação do valor nominal que é explicado pelo tempo em que o inserto permanece em processo de escovação. Nota-se uma pequena variação para cada geometria, uma vez que os insertos ficam soltos em um dispositivo de fixação, podendo ocorrer pequenos deslocamentos.

**Tabela 8 - Caracterização do inserto 3**

Insertos com aresta arredondada 15 $\mu\text{m}$								
Variáveis	Inserto 3							
	L1	L2	L3	L4	V1	V2	V3	V4
$r_{\beta}$ ( $\mu\text{m}$ )	15,333	16,882	17,117	15,708	18,103	18,096	18,558	16,828
$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	20,281	20,915	20,118	21,192	21,463	20,809	21,630	20,578
$\beta$ ( $^{\circ}$ )	79,688	79,680	80,583	79,771	79,689	80,297	79,807	80,100
$\gamma$ ( $^{\circ}$ )	-9,969	-10,595	-10,700	-10,963	-11,152	-11,106	-11,438	-10,678
$s_{\alpha}$ ( $\mu\text{m}$ )	29,220	30,220	29,472	27,459	29,120	36,963	32,388	25,627
$s_{\gamma}$ ( $\mu\text{m}$ )	15,628	16,508	16,697	16,218	25,090	24,141	24,987	22,414
K	0,535	0,546	0,567	0,591	0,862	0,653	0,772	0,875
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,298	0,216	0,254	0,231	0,276	0,390	0,364	0,482
Rq ( $\mu\text{m}$ )	0,394	0,274	0,322	0,291	0,367	0,548	0,529	0,878
Rz ( $\mu\text{m}$ )	1,704	1,333	1,435	1,400	1,399	1,932	1,726	2,118

Fonte: Autoria própria (2023)

Assim como em outros resultados, a Figura 64 apresenta de forma gráfica a geometria final da aresta de corte do inserto 3, pode-se observar uma ligeira irregularidade na geometria gerada.

**Figura 64 - Caracterização gráfica inserto 3**

Fonte: Autoria própria (2023)

O raio de 15  $\mu\text{m}$  não ficou adequado devido a uma limitação do processo de escovação, apresentando microdefeitos no arredondamento desejado.

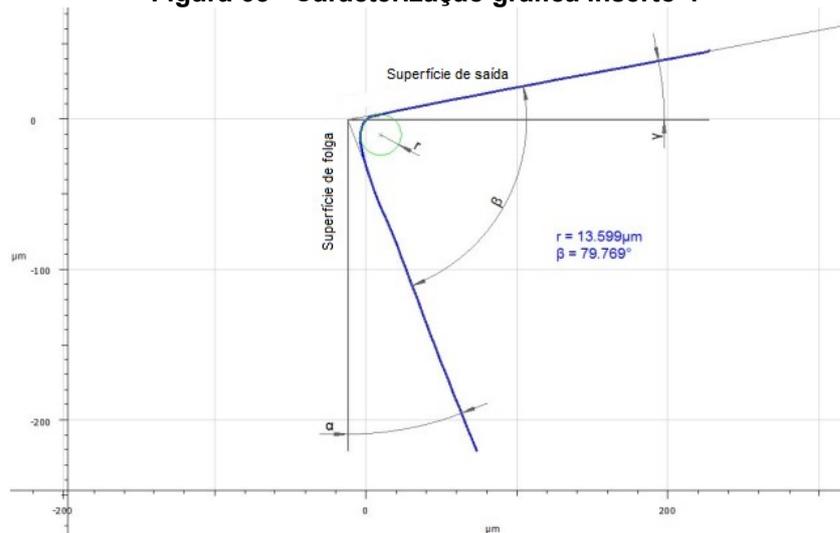
A Tabela 9, revela os valores para o inserto arredondado número 4 com ( $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ ).

**Tabela 9 - Caracterização do inserto 4**

Variáveis	Insertos com aresta arredondada 15 $\mu\text{m}$							
	Inserto 4							
	L1	L2	L3	L4	V1	V2	V3	V4
$r_{\beta}$ ( $\mu\text{m}$ )	13,599	16,059	16,339	16,626	17,727	19,042	17,994	18,179
$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	21,048	21,824	21,815	20,406	22,817	22,683	20,799	20,652
$\beta$ ( $^{\circ}$ )	79,769	78,967	78,899	80,316	80,071	78,634	80,751	80,765
$\gamma$ ( $^{\circ}$ )	-10,817	-10,791	-10,714	-10,725	-12,888	-11,317	-11,550	-11,417
$s_a$ ( $\mu\text{m}$ )	28,888	28,498	34,700	30,125	29,754	34,866	32,003	27,188
$s_y$ ( $\mu\text{m}$ )	16,163	17,036	16,582	16,673	23,660	25,738	22,990	24,447
K	0,559	0,598	0,478	0,553	0,795	0,738	0,718	0,899
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,219	0,231	0,241	0,276	0,464	0,467	0,534	0,598
Rq ( $\mu\text{m}$ )	0,284	0,286	0,301	0,353	0,652	0,658	0,880	1,071
Rz ( $\mu\text{m}$ )	1,426	1,303	1,382	1,819	1,956	1,952	2,493	2,008

Fonte: Autoria própria (2023)

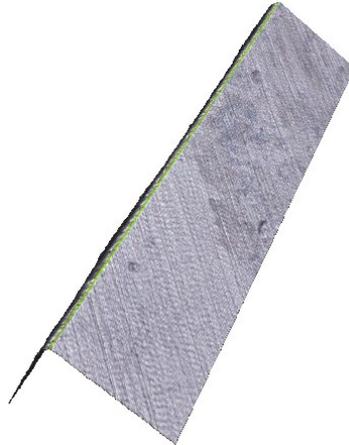
A Figura 65 apresenta raio de quina em forma gráfica do inserto 4, pode-se observar uma ligeira irregularidade na geometria gerada.

**Figura 65 - Caracterização gráfica inserto 4**

Fonte: Autoria própria (2023)

Assim como para os insertos afiados foi gerado imagens gráficas para os insertos com raios de 15  $\mu\text{m}$ , o que pode ser observado nas Figuras 66 e 67.

**Figura 66 - Perfil gerado pela Alicona da aresta de corte arredondada 15  $\mu\text{m}$**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

**Figura 67 - Perfil gerado pela Alicona do raio de quina arredondado 15  $\mu\text{m}$**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Considerando o fator de simetria  $K$  para os insertos arredondados com ( $r_\beta = 15 \mu\text{m}$ ), obteve-se valores mais assimétricos em comparação com os afiados. Sendo as dimensões de ( $S_\alpha$ ) maiores que a de ( $S_V$ ).

A rugosidade da aresta de corte ( $R_a$ ) apresentou menores variações e valores em comparação com os insertos afiados, podendo ser explicado pelo fato do uso da escovação, porém ainda tendo valores e variações maiores que o esperado.

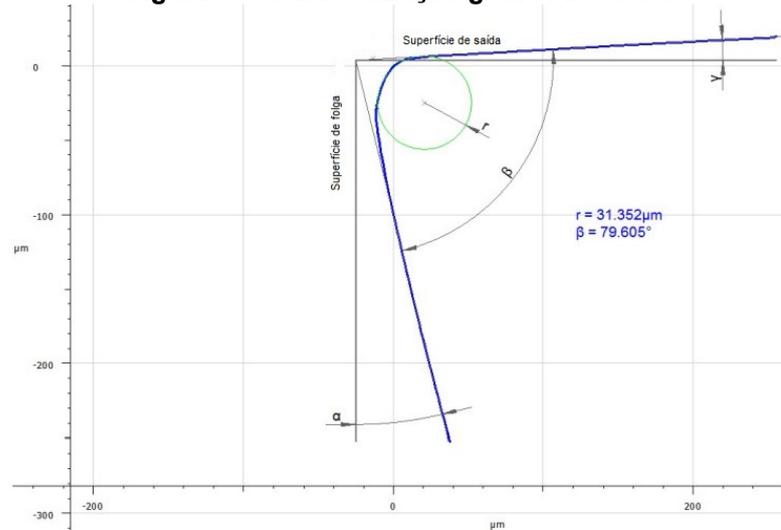
A Tabela 10, revela os valores para o inserto arredondado número 5 com ( $r_\beta = 30 \mu\text{m}$ ), podendo ser notada pequena variação do valor nominal que é explicado pelo tempo em que o inserto permanece em processo de escovação, também há uma pequena variação para cada geometria, isso se deve ao processo em que os insertos ficam soltos em um dispositivo de fixação, podendo haver pequenos deslocamentos gerando essa variação em que foi observada em todos os insertos preparados.

**Tabela 10 - Caracterização do inserto 5**

Insertos com aresta arredondada 30 $\mu\text{m}$								
Variáveis	Inserto 5							
	L1	L2	L3	L4	V1	V2	V3	V4
$r_f$ ( $\mu\text{m}$ )	31,352	30,264	29,495	28,098	34,298	32,484	34,791	32,514
$\alpha$ ( $^\circ$ )	13,584	14,636	12,972	10,609	14,437	14,107	12,813	12,718
$\beta$ ( $^\circ$ )	79,605	79,806	79,825	82,130	79,404	80,030	80,314	79,950
$\gamma$ ( $^\circ$ )	-3,189	-4,442	-2,796	-2,739	-3,841	-4,137	-3,127	-2,669
$s_a$ ( $\mu\text{m}$ )	61,540	55,143	55,401	51,139	63,705	55,785	59,295	63,150
$s_y$ ( $\mu\text{m}$ )	36,724	34,212	34,290	31,995	39,376	35,789	37,446	38,117
K	0,597	0,620	0,619	0,626	0,618	0,642	0,632	0,604
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,165	0,170	0,176	0,150	0,281	0,386	0,268	0,347
Rq ( $\mu\text{m}$ )	0,203	0,220	0,220	0,187	0,348	0,534	0,345	0,481
Rz ( $\mu\text{m}$ )	0,917	1,041	1,010	0,864	1,300	1,419	1,614	1,870

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 68 apresenta graficamente o arredondamento da aresta de corte do inserto 5.

**Figura 68 - Caracterização gráfica inserto 5**

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 11 apresenta os valores obtidos para o inserto número 6, os resultados foram semelhantes ao seu par inserto número 5 com as mesmas variações.

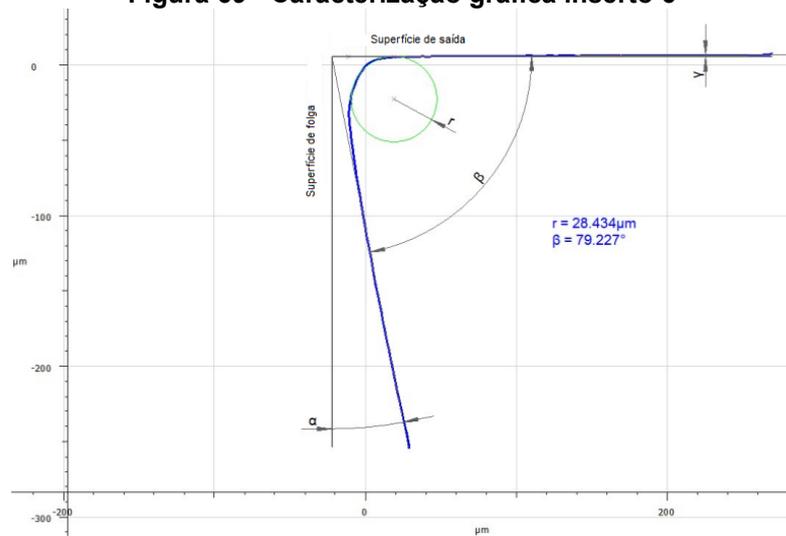
Tabela 11 - Caracterização do inserto 6

Insertos com aresta arredondada 30 $\mu\text{m}$								
Variáveis	Inserto 6							
	L1	L2	L3	L4	V1	V2	V3	V4
$r_B$ ( $\mu\text{m}$ )	28,434	31,802	28,376	30,896	33,810	36,054	32,158	34,477
$\alpha$ ( $^\circ$ )	11,020	14,731	12,865	11,758	9,109	16,274	10,968	12,209
$\beta$ ( $^\circ$ )	79,227	79,292	79,757	79,739	79,647	79,243	78,954	79,567
$\gamma$ ( $^\circ$ )	-0,247	-4,024	-2,263	-1,497	1,243	-5,517	0,078	-1,776
$s_a$ ( $\mu\text{m}$ )	57,855	60,754	53,890	58,024	58,280	61,912	55,982	54,959
$s_y$ ( $\mu\text{m}$ )	33,798	36,579	33,632	35,493	36,898	39,587	35,632	37,281
K	0,584	0,602	0,624	0,612	0,633	0,639	0,636	0,678
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,175	0,143	0,179	0,178	0,316	0,281	0,336	0,330
Rq ( $\mu\text{m}$ )	0,219	0,177	0,217	0,224	0,434	0,358	0,433	0,447
Rz ( $\mu\text{m}$ )	1,017	0,803	0,869	1,003	1,567	1,630	1,764	1,965

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 69 traz a representação gráfica da aresta de corte do inserto 6.

Figura 69 - Caracterização gráfica inserto 6



Fonte: Autoria própria (2023)

As Figuras 70 e 71 Apresentam a geometria gerada do inserto na aresta de corte e no raio de quina respectivamente dos insertos 5 e 6.

**Figura 70 - Perfil gerado pela Alicona da aresta de corte arredondada 30  $\mu\text{m}$**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

**Figura 71 - Perfil gerado pela Alicona do raio de quina arredondado 30  $\mu\text{m}$**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Considerando o fator de simetria  $K$  para os insertos arredondados com ( $r_\beta = 30 \mu\text{m}$ ), foram obtidos valores mais assimétricos. Sendo as dimensões de ( $s_\alpha$ ) maiores que a de ( $S_\gamma$ ). O que explica essa diferença do ( $s_\alpha$ ) ser maior, é a posição que foi feita a escovação.

A rugosidade da aresta de corte ( $R_a$ ) apresentou valores mais uniformes e menores em comparação com os insertos com ( $r_\beta = 15 \mu\text{m}$ ), podendo ser explicado pelo tempo de exposição do inserto no processo de escovação. Em conformidade com DENKENA et al. (2013), a aresta de corte não apresentou crateras e ou lascamentos.

A Tabela 12 representa os valores encontrados para o inserto número 7 com arredondamento ( $r_\beta = 50 \mu\text{m}$ ), pode-se verificar uma boa uniformidade em toda a geometria com os mesmos desvios para o ( $r_\beta = 30 \mu\text{m}$ ) dos insertos 5 e 6.

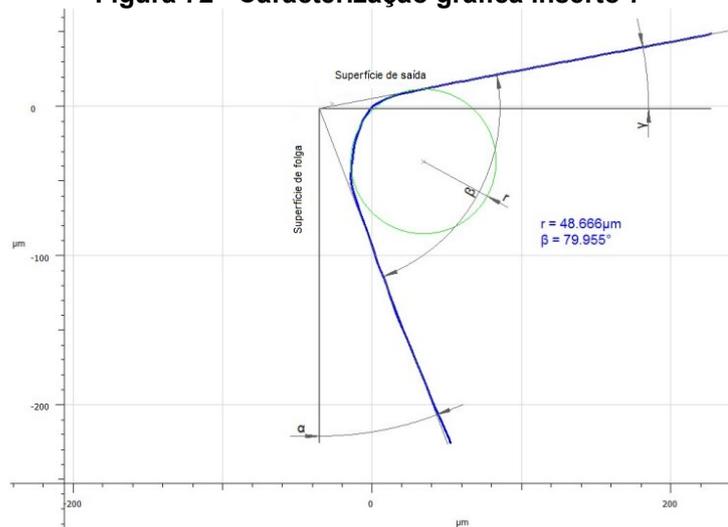
Tabela 12 - Caracterização do inserto 7

Insertos com aresta arredondada 50 $\mu\text{m}$								
Variáveis	Inserto 7							
	L1	L2	L3	L4	V1	V2	V3	V4
$r_\beta$ ( $\mu\text{m}$ )	48,666	51,072	47,428	54,543	52,457	52,931	51,382	53,764
$\alpha$ ( $^\circ$ )	20,840	20,775	20,150	20,007	21,005	20,378	20,958	22,334
$\beta$ ( $^\circ$ )	79,955	79,931	80,473	80,998	79,447	80,200	79,696	79,704
$\gamma$ ( $^\circ$ )	-10,795	-10,706	-10,623	-11,005	-10,452	-10,578	-10,655	-12,038
$s_\alpha$ ( $\mu\text{m}$ )	77,546	79,238	76,654	77,947	85,819	85,405	92,614	87,463
$s_\gamma$ ( $\mu\text{m}$ )	53,539	56,073	52,556	57,966	58,606	57,634	60,768	59,788
K	0,690	0,707	0,686	0,744	0,683	0,675	0,656	0,684
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,195	0,134	0,188	0,178	0,327	0,294	0,391	0,276
Rq ( $\mu\text{m}$ )	0,242	0,168	0,228	0,217	0,455	0,383	0,543	0,371
Rz ( $\mu\text{m}$ )	1,147	0,792	0,943	0,950	1,861	1,457	1,941	1,526

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 72 demonstra a geometria da aresta de corte do inserto 7.

Figura 72 - Caracterização gráfica inserto 7



Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 13 apresenta os valores obtidos para o inserto número 8 com arredondamento ( $r_\beta = 50 \mu\text{m}$ ) em que os valores variaram na mesma ordem que os anteriores.

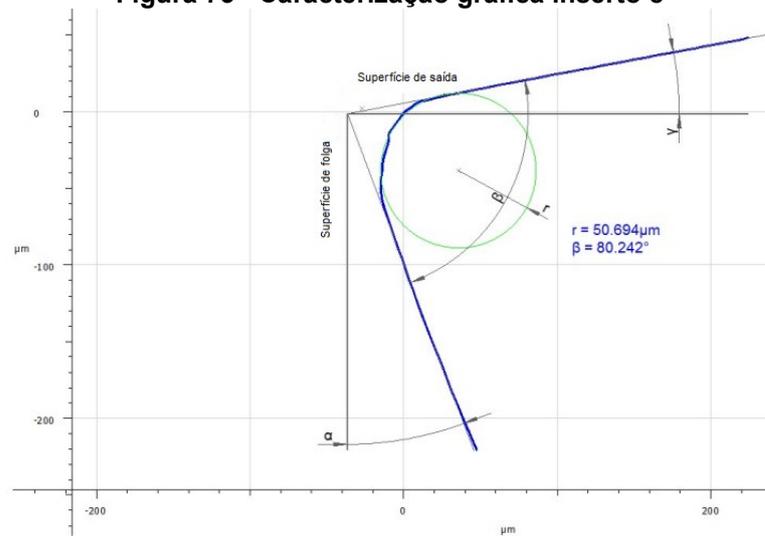
Tabela 13 - Caracterização do inserto 8

Insertos com aresta arredondada 50 $\mu\text{m}$								
Variáveis	Inserto 8							
	L1	L2	L3	L4	V1	V2	V3	V4
$r_{\beta}$ ( $\mu\text{m}$ )	50,694	48,602	49,748	45,603	52,391	56,793	51,371	55,437
$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	20,491	21,606	21,575	20,150	21,595	21,730	21,444	21,099
$\beta$ ( $^{\circ}$ )	80,242	79,144	79,238	80,506	79,767	79,308	79,162	79,160
$\gamma$ ( $^{\circ}$ )	-10,733	-10,750	-10,813	-10,656	-11,362	-11,039	-10,606	-10,259
$s_{\alpha}$ ( $\mu\text{m}$ )	81,528	79,107	76,463	71,671	80,532	86,000	79,992	84,105
$s_{\gamma}$ ( $\mu\text{m}$ )	55,657	54,418	54,859	49,629	57,261	61,640	56,731	60,627
K	0,683	0,688	0,717	0,692	0,711	0,717	0,709	0,721
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,157	0,162	0,174	0,142	0,298	0,273	0,274	0,289
Rq ( $\mu\text{m}$ )	0,198	0,205	0,219	0,176	0,385	0,358	0,378	0,401
Rz ( $\mu\text{m}$ )	0,909	0,934	1,019	0,841	1,615	1,477	1,778	1,650

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 73 demonstra graficamente o perfil da aresta de corte do inserto 8.

Figura 73 - Caracterização gráfica inserto 8



Fonte: Autoria própria (2023)

As Figuras 74 e 75 trazem a malha gerada, representando as arestas de corte dos insertos 7 e 8.

**Figura 74 - Perfil gerado pela Alicona da aresta de corte arredondada 50  $\mu\text{m}$**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

**Figura 75 - Perfil gerado pela Alicona do raio de quina arredondado 50  $\mu\text{m}$**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

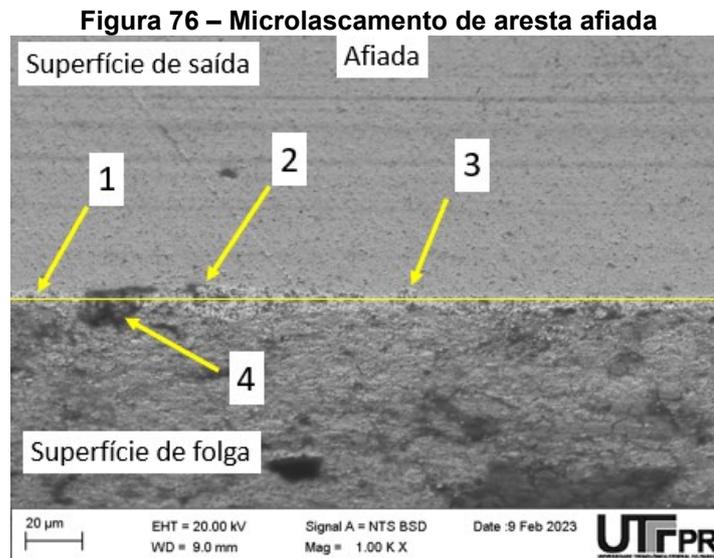
Considerando o fator de simetria  $K$  para os insertos arredondados com ( $r_\beta = 50 \mu\text{m}$ ), foram obtidos valores mais assimétricos, porém ainda melhores que os de ( $r_\beta = 15 \mu\text{m}$ ) e ( $r_\beta = 30 \mu\text{m}$ ). Sendo as dimensões de ( $s_\alpha$ ) maiores que a de ( $S_V$ ).

A rugosidade da aresta de corte ( $R_a$ ) apresentou valores mais uniformes e melhores em comparação com os insertos com ( $r_\beta = 15 \mu\text{m}$ ) e ( $r_\beta = 30 \mu\text{m}$ ), podendo ser explicado pelo maior tempo de exposição do inserto no processo de escovação.

A caracterização das ferramentas com aresta de corte arredonda intencionalmente, seguiu o mesmo critério das ferramentas afiadas sem alteração da geometria da aresta de corte. Foi possível observar que houve variação no valor de arredondamento da aresta de corte e conseqüentemente uma melhora na qualidade superficial da aresta (rugosidade  $R_a$ ). Para este caso, existe uma nova possibilidade que está relacionado ao tempo em que a ferramenta ficou em contato com a escova

e pasta diamantada no processo de escovamento. Para compreender o impacto do tempo de permanência da ferramenta em contato com a escova, seria necessário mapear a taxa de remoção de material em função do tempo, porém não é objetivo deste trabalho.

A Figura 76 nas regiões 1, 2 e 3 demonstram as descontinuidades da aresta afiada. O surgimento deste tipo de falha pode ser devido às solicitações mecânicas no processo de afiação que ultrapassam a resistência mecânica do material da ferramenta naquele ponto, causando as irregularidades nas arestas de corte. Também foi possível verificar através da análise EDS a presença de micropartículas do revestimento representado na região 4. YUSSEFIAN *et al.* (2010) apresentaram algo semelhante no processo de preparação da aresta por meio da EDM.



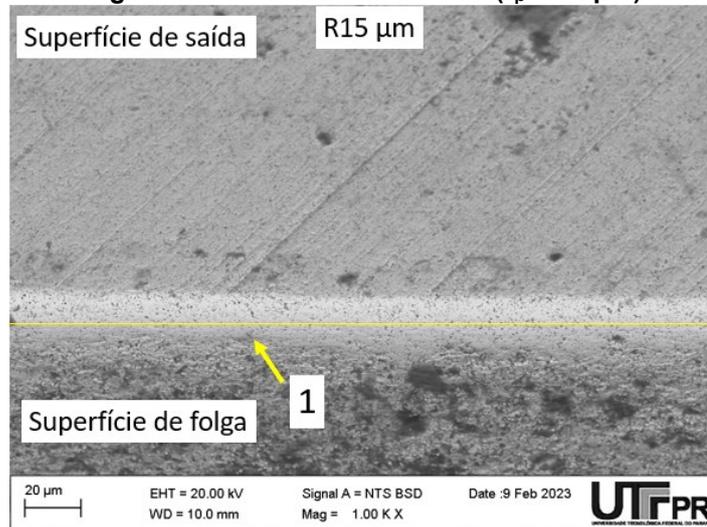
**Fonte: Autoria própria (2023)**

Resultados semelhantes foram apresentados por CHEUNG *et al.* (2008), porém as falhas nas ferramentas são maiores em quantidade também em dimensão. A justificativa para as irregularidades da aresta de corte apresentados serem maiores, pode estar relacionado ao processo de afiação, como por exemplo, o tipo de rebolo selecionado (tamanho do grão), velocidade de corte e avanço. KARPUSCHEWSKI *et al.* (2009) também relataram problemas de lascamento da aresta de corte ocorrido no processo de afiação.

A Figura 77 mostra o resultado da preparação de aresta por escovamento com ( $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ ). Pode ser verificada uma melhora na continuidade da aresta com

mínima falha conforme apresentado na região 1. A aresta de corte apresenta uma textura homogênea e sem irregularidades ou microquebras.

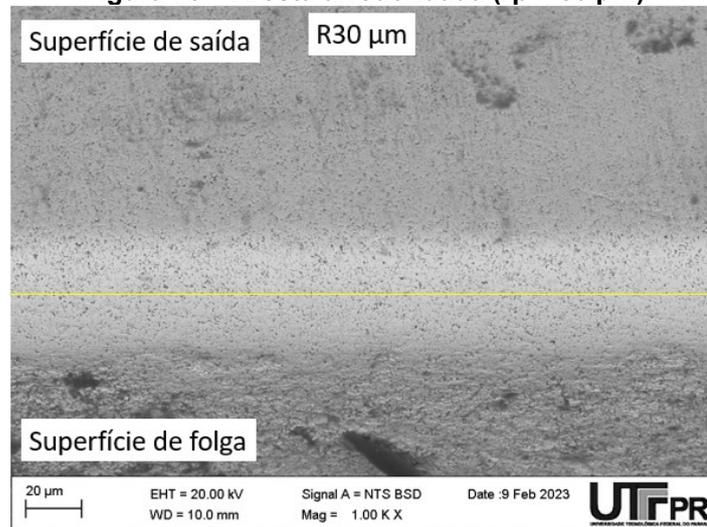
**Figura 77 – Aresta arredondada ( $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ )**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

A aresta de corte com ( $r_{\beta} = 30 \mu\text{m}$ ) não apresentou falhas, tendo uma textura mais homogênea e aleatória oriunda do processo de escovação como na Figura 78.

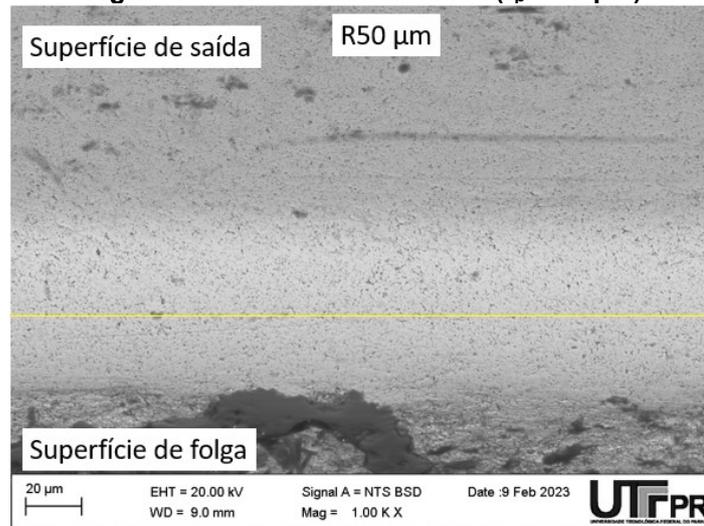
**Figura 78 – Aresta arredondada ( $r_{\beta} = 30 \mu\text{m}$ )**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Por fim a Figura 79 apresenta a aresta de corte arredondada com ( $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ ), nesta aresta é possível verificar que a textura é ainda mais uniforme assim como a rugosidade se mantém mais estável.

**Figura 79 – Aresta arredondada ( $r_B = 50 \mu\text{m}$ )**



**Fonte: A autoria própria (2023)**

## 4.2 Avaliação do processo de usinagem

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes à avaliação do processo de usinagem.

### 4.2.1 Avaliação da força de avanço

O Gráfico 1 mostra os resultados de força de avanço para os insertos com arestas afiadas e arredondadas. O resultado da medição de força de avanço revelou que a ferramenta com aresta de corte afiada obteve o menor esforço médio global, em torno de 418 N abaixo do valor medido para o inserto com 50  $\mu\text{m}$ . O resultado está em concordância com WYEN e WEGENER (2010) que relataram que o arredondamento da aresta de corte gerou aumento nas forças de avanço. Os resultados para aresta arredondada indicaram valores maiores seguindo com o aumento do arredondamento. De acordo com a análise de variância executada, verificou-se que há diferença significativa entre as médias, tendo a tendência que o aumento do raio gere aumento nas forças de avanço.

**Gráfico 1 – Análise de força de avanço das arestas**

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com a ANOVA da Tabela 14, foi possível observar diferença entre as médias com a análise dos valores de dispersão (F) e (F crítico), tendo sido o F maior. Sendo assim gerou diferenças significativas entre as médias.

**Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) de força de avanço**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	586840	3	195613,3	38,4687	1,523E-07	3,238872
Dentro dos grupos	81360	16	5085			
Total	668200	19				

Fonte: Autoria própria (2023)

Para compreender quais grupos ficaram fora das médias, foi executado o teste estatístico Tukey, conforme apresentado na Tabela 15.

**Tabela 15 – Teste Tukey de força de avanço**

	A	B	C	D
A		0,996	0,001239	4,33E-07
B	0,3136		0,001936	6,01E-07
C	6,648	6,334		0,001619
D	13,11	12,79	6,46	

Fonte: Autoria própria (2023)

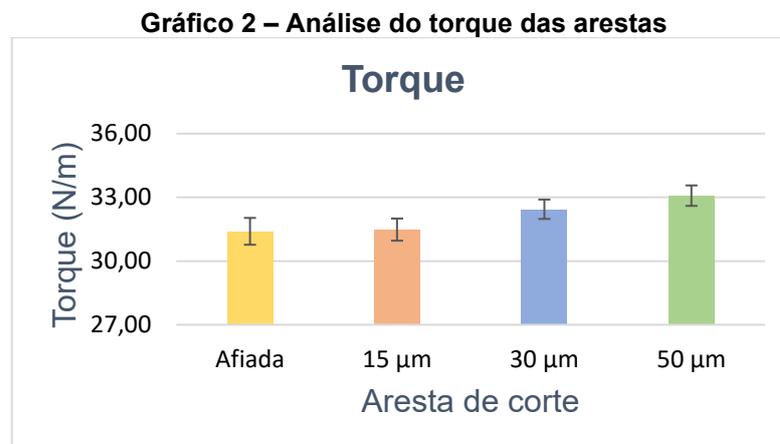
O teste demonstrou que o grupo D ( $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ ) apresentou valores médios maiores que os grupos A (Afiada), B ( $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ ) e C ( $r_{\beta} = 30 \mu\text{m}$ ), demonstrando que o emprego do maior raio incorreu em maior força de avanço.

Estes resultados estão em acordo com BIERMANN *et al.* (2012) que relataram sobre o aumento da força de avanço com o emprego do arredondamento na aresta

de corte, em que, todas as ferramentas arredondadas tiveram forças de avanço mais altas em relação às afiadas.

#### 4.2.2 Avaliação do torque

O Gráfico 2 mostra os resultados da medição do torque necessário para obtenção de uma furação em cheio no ferro fundido FC300, utilizando-se das ferramentas com aresta afiada e arredondada. O resultado revelou que a preparação da aresta de corte influencia o torque em um processo de furação, para as condições estabelecidas para este ensaio. As diferenças observadas são pequenas, porém há uma variação condizente em que ao aumentar o arredondamento tem-se um aumento no torque. Com o aumento do arredondamento houve o aumento de  $S_{\alpha}$ . Isto está em concordância com DENKENA et al. (2011) que obtiveram resultados semelhante ao usinar um aço AISI1045, mostrando que as forças do processo são diretamente afetadas ao modificar o  $S_{\alpha}$  enquanto a alteração do  $S_{\gamma}$  é desprezível.



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Executou-se a análise de variância, verificando-se que há diferença significativa entre as médias, tendo a tendência que o aumento do raio gere aumento no torque. A Tabela 16 representa os valores do ANOVA.

**Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) do torque**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,752	3	3,250667	11,69305	0,000263	3,238872

Dentro dos grupos	4,448	16	0,278			
Total	14,2	19				

Fonte: Autoria própria (2023)

Como o valor da média de variância F foi maior que o valor F crítico, aplicou-se o teste Tukey para encontrar quais grupos estavam fora da média padrão, conforme a Tabela 17.

**Tabela 17 – Teste Tukey do torque**

	A	B	C	D
A		0,9949	0,03028	0,000632
B	0,3393		0,04832	0,001019
C	4,411	4,071		0,2592
D	7,125	6,786	2,714	

Fonte: Autoria própria (2023)

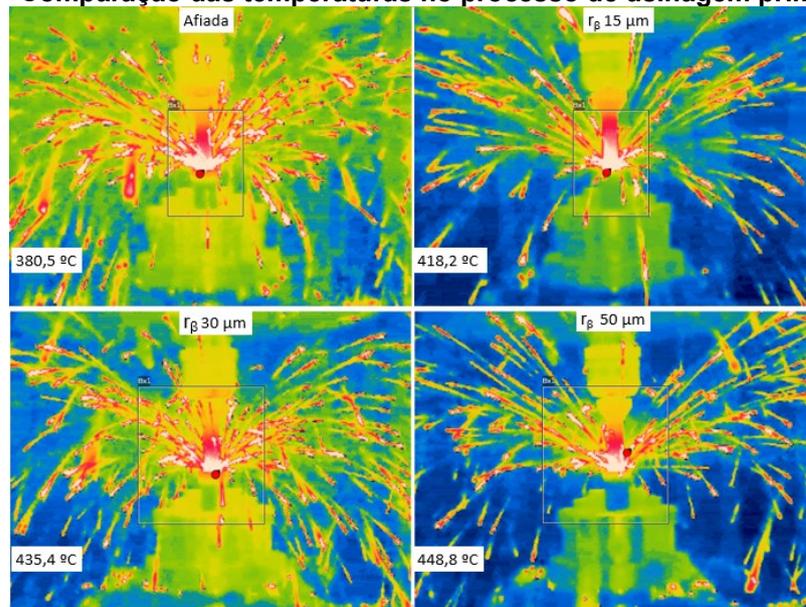
Os valores dos grupos C ( $r_{\beta} = 30 \mu\text{m}$ ) e D ( $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ ) apresentaram dispersões maiores que as médias entre os grupos, dessa forma constatou-se que com o aumento do arredondamento á aumento considerável do torque no processo, sendo que os valores são estatisticamente diferentes dos grupos A (Afiada) e B ( $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ ).

CHEUNG *et al.* (2008) observaram que o torque não varia em função da geometria da aresta de corte para um mesmo material avaliado. Esta constatação não está em concordância com o presente trabalho.

#### 4.2.3 Avaliação da temperatura do cavaco

Nesta análise foi considerada a medição da temperatura do cavaco em função das características da câmara termográfica empregada. A Figura 80 mostra exemplos das medições para a primeira amostra para posterior cálculo da média dos maiores valores de temperatura encontradas no primeiro quarto de medição do comprimento da peça.

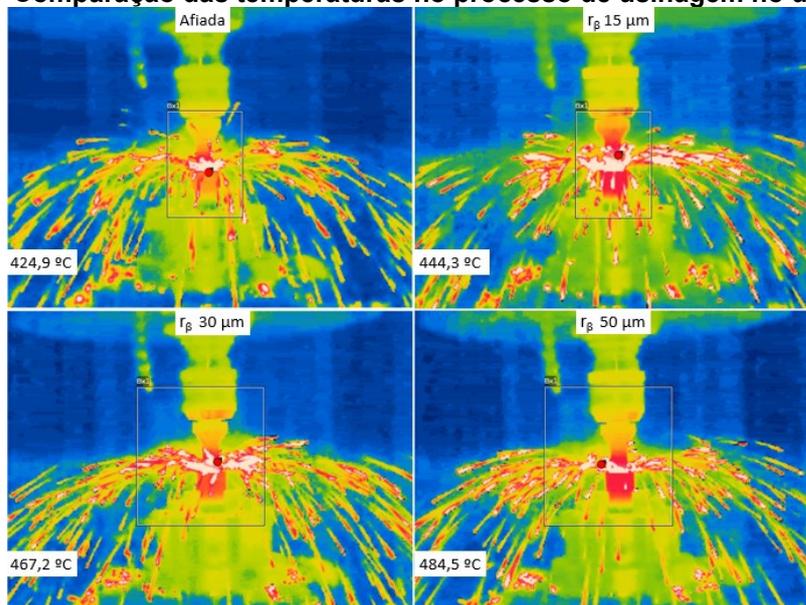
**Figura 80 – Comparação das temperaturas no processo de usinagem primeiro quarto**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

De forma similar ao realizado no primeiro quarto, o procedimento foi repetido para o segundo, terceiro e quarto intervalo de medição (Figura 81).

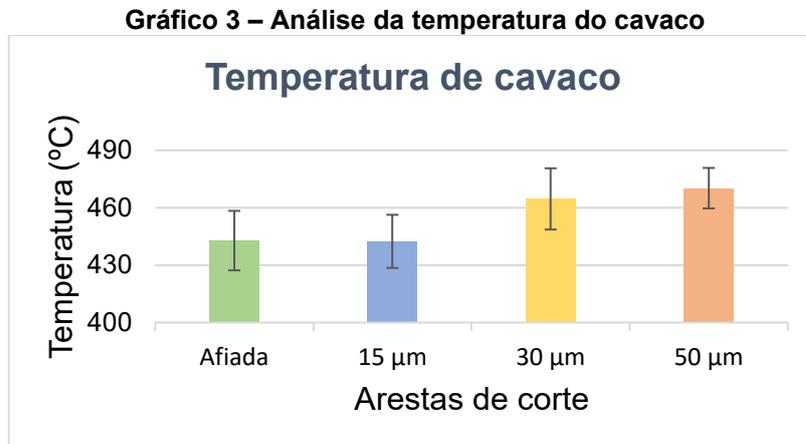
**Figura 81 – Comparação das temperaturas no processo de usinagem no último quarto**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

O Gráfico 3 mostra os resultados para os insertos afiados e arredondados. Os valores de temperatura obtidos com insertos afiado e com arredondamento de 15 μm foram semelhantes, devido à mínima variação de geometria. Ao passo que os valores de temperaturas para arredondamento 30 e 50 μm foram mais elevados. Isso se deve

ao aumento da área de contato da aresta com o material e está condizente com o aumento da força de avanço e do torque.



Fonte: Autoria própria (2023)

Para compreender as dispersões entre as médias, foi aplicado o teste ANOVA que comprovou haver diferenças significativas nas médias para os raios, conforme Tabela 18.

**Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) da temperatura do cavaco**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3149,34	3	1049,78	5,23212	0,01044	3,2388715
Dentro dos grupos	3210,26	16	200,641			
Total	6359,6	19				

Fonte: Autoria própria (2023)

Devido aos valores encontrados, foi necessário executar o teste Tukey para identificar a diferença entre os grupos (Tabela 19).

**Tabela 19 – Teste Tukey da temperatura do cavaco**

	A	B	C	D
A		1	0,1117	0,03428
B	0,06867		0,1024	0,03116
C	3,433	3,501		0,9214
D	4,321	4,39	0,8888	

Fonte: Autoria própria (2023)

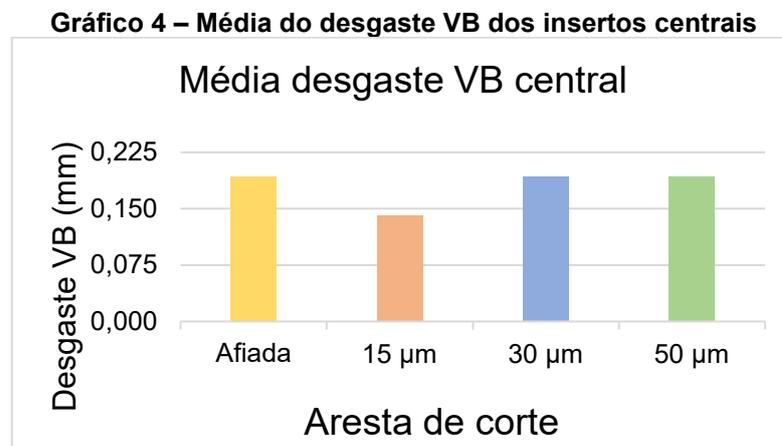
Dessa forma, foi possível verificar que os insertos com ( $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ ) apresentaram valores maiores de temperatura em comparação com os insertos afiado e com arredondamentos de 15 e 30  $\mu\text{m}$ .

Os resultados foram em acordo com DENKENA e BIERMANN (2014) que analisaram aumento nas cargas térmicas na aresta de corte reportaram que com o aumento do arredondamento tem-se o aumento do ( $S_{\alpha}$ ) que passa a gerar maior temperatura na superfície de folga.

### 4.3 Avaliação dos insertos

Neste item são apresentadas as análises de desgaste para cada tipo de geometria da aresta de corte das ferramentas.

Os insertos foram agrupados por suas posições na ferramenta, sendo insertos posicionados ao centro e posicionados na periferia. Desta forma foi obtida a média do desgaste para cada par com o emprego do MEV considerando a largura média da marca de desgaste de flanco (VB). O Gráfico 4 apresenta os valores médios obtidos para as três arestas utilizadas do inserto central.



Fonte: Autoria própria (2023)

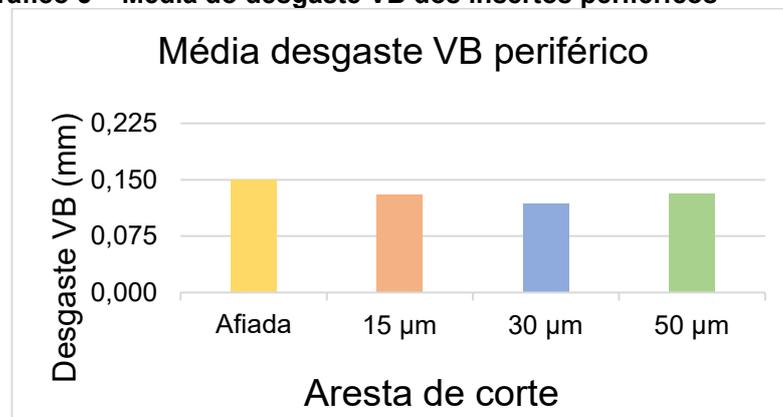
Foi executada a ANOVA para os valores obtidos, a qual indicou não haver desvios significativos das médias, (Tabela 20).

**Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA) do desgaste VB**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,004119	3	0,001373	0,15984	0,918064	6,591382
Dentro dos grupos	0,034362	4	0,008591			
Total	0,038481	7				

Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 5 representa os valores de desgaste referentes aos insertos posicionados na periferia da ferramenta que apresentaram velocidade de corte mais alta e próximo do recomendado.

**Gráfico 5 – Média do desgaste VB dos insertos periféricos**

Fonte: Autoria própria (2023)

Assim como para os insertos centrais, foi realizada a ANOVA para os valores obtidos conforme a Tabela 21. Também não houve diferença significativa entre os valores de desgaste para os insertos periféricos.

**Tabela 21 – Análise de variância (ANOVA) do desgaste VB**

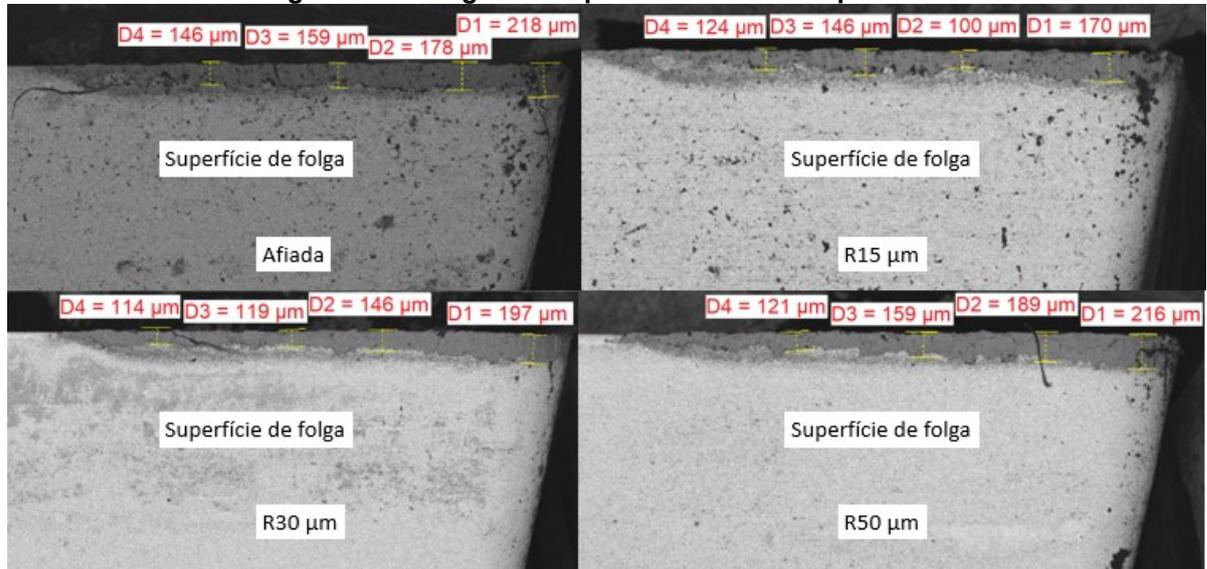
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001054	3	0,000351	0,240344	0,864457	6,591382
Dentro dos grupos	0,005849	4	0,001462			
Total	0,006904	7				

Fonte: Autoria própria (2023)

O desgaste VB apresentou valores semelhantes para as diferentes microgeometrias como representado na Figura 82. Porém como não foi realizado os ensaios até o fim de vida, não foi possível determinar com clareza qual seria o arredondamento mais adequado. Foi considerando que as arestas com maior

quantidade de material aderido teriam grandes possibilidades de sofrerem lascamentos da aresta com o processo de arrancamento do material aderido.

**Figura 82 – Desgaste VB para os insertos da periferia.**

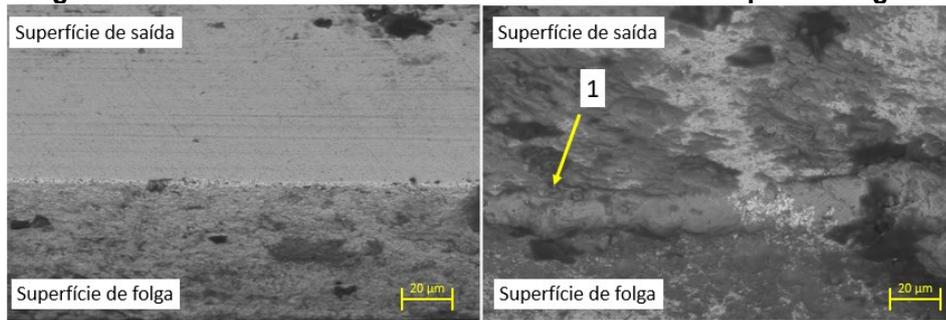


**Fonte: Autoria própria (2023)**

Esperava-se encontrar menores valores de desgaste para as ferramentas arredondadas, pois o calor gerado no processo é mais bem dissipado nessas ferramentas em função da maior área de contato. As arestas arredondadas têm alta estabilidade na aresta de corte devido ao fato de as arestas de corte arredondadas reduzirem a magnitude das solicitações mecânicas concentradas na ponta da ferramenta. DENKENA *et al.* 2014 verificaram que nas arestas arredondadas o gradiente das solicitações ao longo da aresta de corte é mais suave comparado com arestas afiadas.

Os insertos foram avaliados no MEV antes e após o processo de usinagem a fim de compreender o tipo de desgaste gerado e poder comparar as diferentes preparações de aresta. As Figuras 83, 84, 85 e 86 representam os insertos posicionados ao centro da ferramenta.

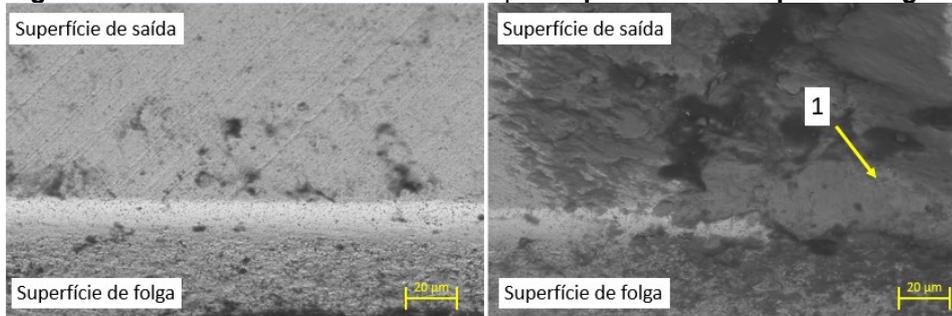
**Figura 83 – Análise da aresta de corte afiada e aresta 1 após usinagem.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

O ponto 1 destaca uma grande quantidade de material aderido na aresta do inserto afiado ao fim da quinta peça usinada.

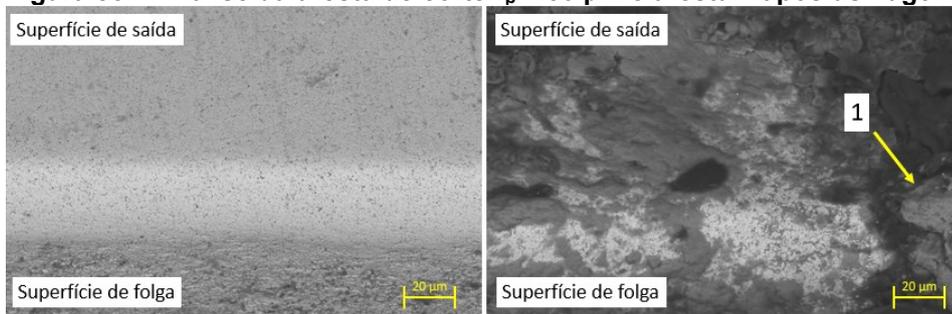
**Figura 84 – Análise da aresta de corte  $r_\beta = 15 \mu\text{m}$  e aresta 1 após usinagem.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

O ponto 1 representa o material da peça aderido na aresta do inserto com  $r_\beta = 15 \mu\text{m}$  ao fim da quinta peça usinada, sendo possível observar uma menor quantidade de material aderido na aresta de corte em relação ao inserto afiado.

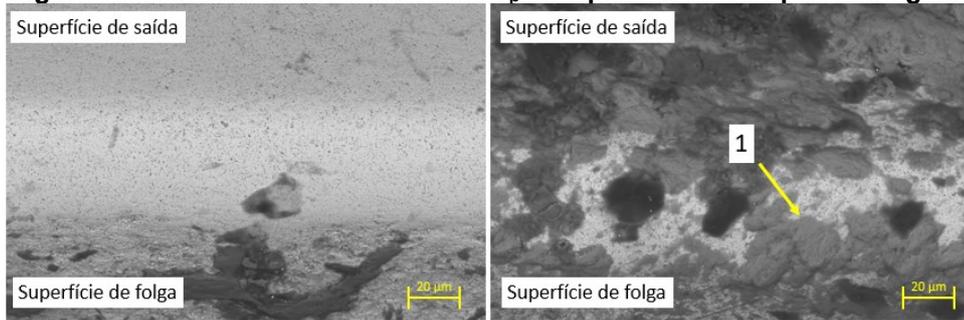
**Figura 85 – Análise da aresta de corte  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$  e aresta 1 após usinagem.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

O ponto 1 ilustra o material aderido na aresta do inserto com  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$  ao fim da quinta peça usinada, é possível observar uma quantidade menor de material aderido na aresta de corte em relação ao inserto afiado e ao inserto com  $r_\beta = 15 \mu\text{m}$ .

**Figura 86 – Análise da aresta de corte  $r_\beta = 50 \mu\text{m}$  e aresta 1 após usinagem.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

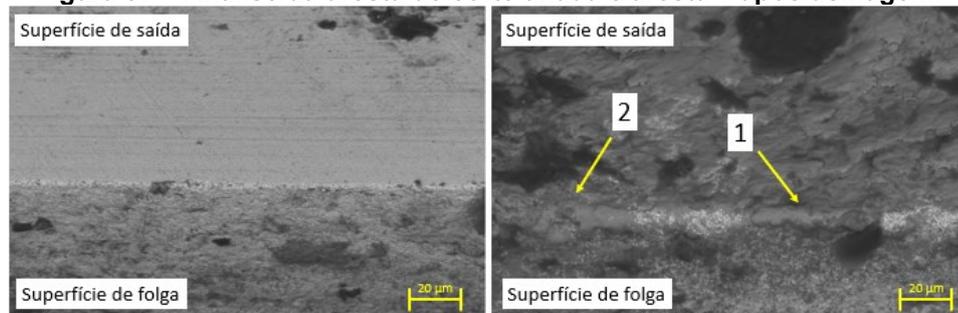
O ponto 1 representa o material de adesão na aresta do inserto com  $r_\beta = 50 \mu\text{m}$  ao fim da quinta peça usinada, apresentando menor quantidade de material aderido na aresta de corte em relação ao inserto afiado, com  $r_\beta = 15 \mu\text{m}$  e  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$ .

O fato do raio aumentar na preparação de aresta e resultar em menor quantidade de material aderido está em conformidade com o descrito por (DENKENA *et al.*, 2014). Ocorreu adesão de material em todos os insertos, isso pode ser devido ao material da peça conter grafita livre em sua microestrutura, sendo um material macio e abrasivo. Durante a usinagem, a grafita pode se desprender do material e aderir ao inserto, gerando aumento da temperatura na zona de corte ocasionando a adesão do material na superfície do inserto. Por se tratar do inserto posicionado na região central da ferramenta a velocidade de corte é sempre baixa desta forma uma solução seria aumentar o avanço por aresta.

Foi possível verificar que com o aumento do arredondamento da aresta ocorreu menor incidência de adesão de material da peça na aresta do inserto.

As Figuras 87, 88, 89 e 90 representam os insertos posicionados na periferia da ferramenta.

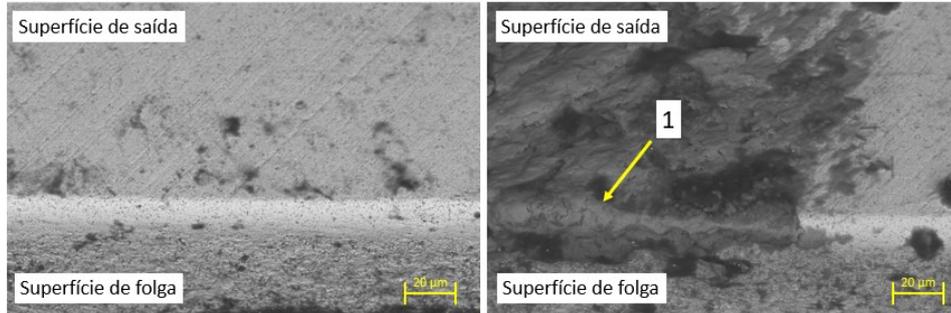
**Figura 87 – Análise da aresta de corte afiada e aresta 1 após usinagem.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Os pontos 1 e 2 representam o material aderido na aresta do inserto afiado que se apresenta em menores quantidades ao se comparar com o correspondente inserto central.

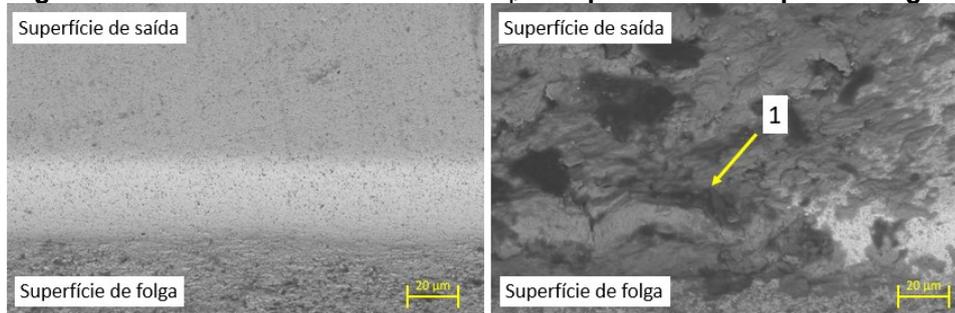
**Figura 88 – Análise da aresta de corte  $r_\beta = 15 \mu\text{m}$  e aresta 1 após usinagem.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

O ponto 1 representa o material aderido na aresta do inserto  $r_\beta = 15 \mu\text{m}$  que também está em menor quantidade quando comparados ao inserto central.

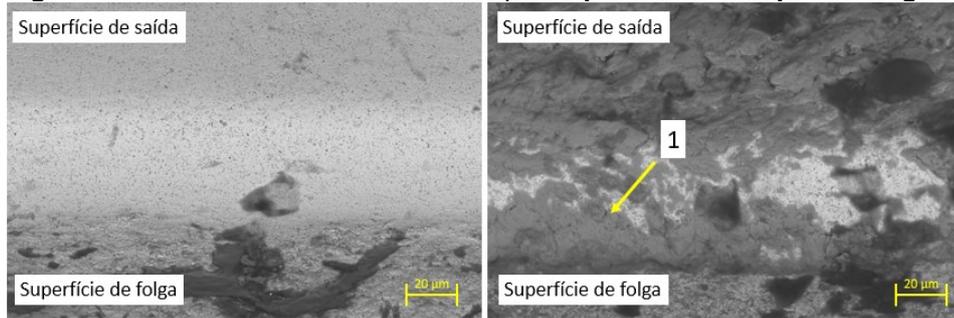
**Figura 89 – Análise da aresta de corte  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$  e aresta 1 após usinagem.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

O ponto 1 representa o material aderido na aresta do inserto  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$  que se apresenta em menor quantidade ao comparar com o inserto central. Para o  $r_\beta = 50 \mu\text{m}$  também apresenta resultados semelhantes ao  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$ , esse fato é explicado por se ter o inserto posicionado mais próximo da aresta da ferramenta o que mantém a velocidade de corte mais próxima do calculado para o diâmetro da ferramenta.

**Figura 90 – Análise da aresta de corte  $r_b = 50 \mu\text{m}$  e aresta 1 após usinagem.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Ocorreu adesão de material em todos os insertos, assim como nos anteriores posicionados ao centro. Entretanto, foi possível verificar que com o aumento do arredondamento da aresta ocorreu menor incidência de adesão de material da peça na aresta do inserto analogamente aos posicionados ao centro da ferramenta.

#### **4.4 Avaliação dos corpos de prova**

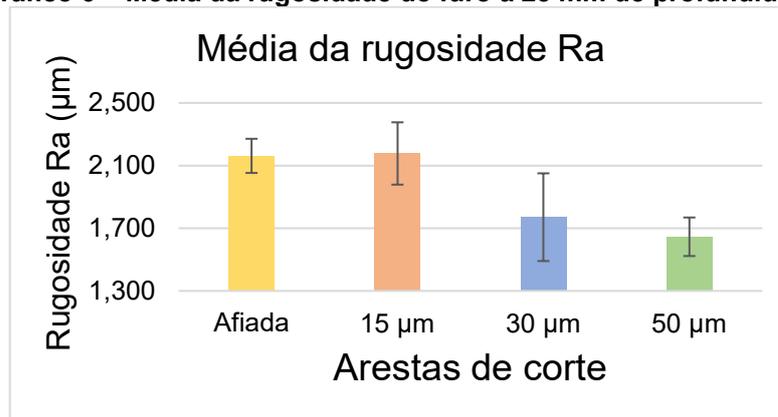
Neste tópico são apresentados os resultados das avaliações realizadas nos corpos-de-prova, tais como: rugosidade, diâmetro do furo obtido e circularidade.

##### **4.4.1 Avaliação da rugosidade dos furos**

O Gráfico 6 mostra a média das rugosidades ( $R_a$ ) dos furos obtidos com a aresta afiada e arredondada na profundidade de 25 mm. Nos resultados do inserto com aresta afiada observa-se valor médio de  $2,16 \mu\text{m}$ .

Nos resultados das ferramentas com aresta arredondada, o inserto com raio  $50 \mu\text{m}$  apresentou o menor valor médio para os três ensaios seguido pelo arredondamento de  $30 \mu\text{m}$ . Importante ressaltar que em nenhum dos ensaios foram obtidos valores de rugosidade ( $R_a$ ) acima de  $2,20 \mu\text{m}$ . O inserto arredondado  $15 \mu\text{m}$  demonstrou o maior valor médio de rugosidade com  $2,18 \mu\text{m}$ .

Gráfico 6 – Média da rugosidade do furo a 25 mm de profundidade



Fonte: Autoria própria (2023)

A fim de compreender os resultados obtidos e analisar com mais clareza, foi realizada a ANOVA para as médias das rugosidades. Os valores estão representados na Tabela 22.

Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA) do desgaste VB

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,320819	3	1,10694	29,11972	1,77134E-11	2,769431
Dentro dos grupos	2,128751	56	0,038013			
<b>Total</b>	<b>5,44957</b>	<b>59</b>				

Fonte: Autoria própria (2023)

Com a dispersão das médias sendo superior ao valor padrão, foi executado o teste Tukey para definir quais grupos se distinguiam como mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 – Teste Tukey da rugosidade Ra

	A	B	C	D
A		0,9965	5,60E-06	7,57E-09
B	0,302		2,55E-06	3,37E-09
C	7,787	8,089		0,3043
D	10,27	10,57	2,486	

Fonte: Autoria própria (2023)

Os grupos C ( $r_{\beta} = 30 \mu\text{m}$ ) e D ( $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ ) apresentaram valores médios estatisticamente diferentes dos grupos A (Afiada) e B ( $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ ).

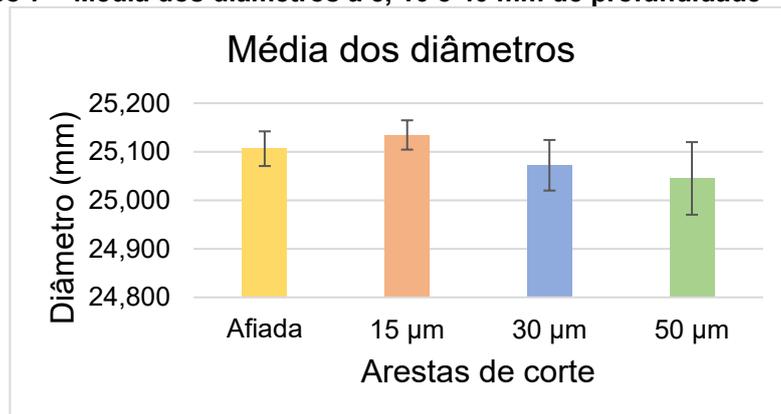
O presente trabalho expôs valores de rugosidade menores para as arestas arredondadas em relação à afiada, assim como, o aumento do raio resultou em valores de rugosidade mais baixos. O inserto posicionado na periferia da ferramenta é responsável por gerar o alisamento da parede do furo, com o aumento do raio este

inserto apresentou um menor índice de falhas ao longo da usinagem, dessa forma manteve valores de rugosidade mais estáveis. Estes resultados estão em concordância com os apresentados por BORDIN *et al.* (2014) que analisaram o processo de furação a seco do aço SAE 1045.

#### 4.4.2 Avaliação do diâmetro dos furos

Na avaliação de diâmetro foi utilizado o valor médio das medições, como pode ser observado no Gráfico 7, sendo que as médias dos diâmetros foram superiores ao diâmetro da ferramenta, como foi mostrado na Figura 50. Os resultados mostram uma variação média de 90  $\mu\text{m}$  dos diâmetros obtidos. Essa variação aconteceu devido à tolerância de  $\pm 0,05$  mm para as arestas e  $\pm 0,10$  mm para a espessura na fabricação dos insertos.

**Gráfico 7 – Média dos diâmetros a 5, 10 e 40 mm de profundidade**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Para análise dos resultados foi executado a ANOVA verificando as variações das médias dos valores representados na Tabela 24.

**Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA) do diâmetro**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,068906	3	0,022969	8,74631	7,51635E-05	2,7694309
Dentro dos grupos	0,147062	56	0,002626			
Total	0,215968	59				

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Devido aos resultados do ANOVA, foi possível verificar que houve diferenças significativas nos desvios das médias. Para identificar quais seriam, foi realizado o teste Tukey e o valores encontrados estão representados na Tabela 25.

**Tabela 25 – Teste Tukey do diâmetro**

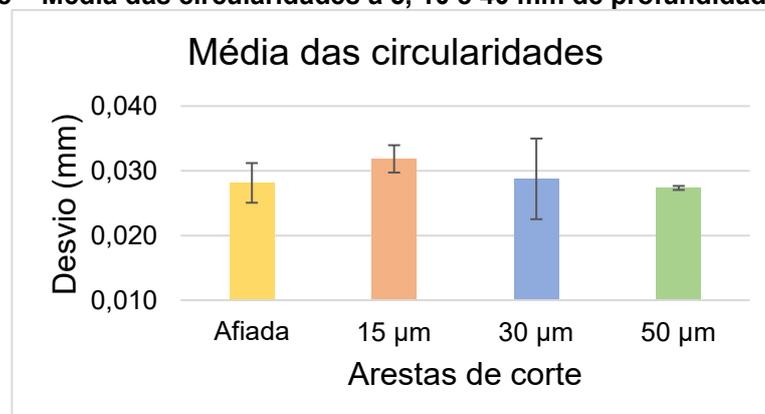
	A	B	C	D
A		0,4384	0,2766	0,009604
B	2,136		0,008243	7,50E-05
C	2,569	4,704		0,4702
D	4,629	6,764	2,06	

Fonte: Autoria própria (2023)

O grupo D ( $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ ) apresentou diferenças em relação aos grupos A (Afiado) e B ( $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ ), sendo que para o grupo D ( $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ ) foram identificadas maiores variações com relação ao grupo C ( $r_{\beta} = 30 \mu\text{m}$ ). Isso pode ter ocorrido devido ao aumento dos valores de força e torque gerado pelo aumento da dimensão do arredondamento da aresta de corte como mostrado nos resultados. CHEUNG *et al.* (2008) concluíram que ferramentas com arestas arredondadas com raios de arredondamento acima de  $32 \mu\text{m}$ , tendem a fazer furo com diâmetro obtido menor que o diâmetro da ferramenta em um processo de furação do aço Böhler M238 com broca  $\varnothing 6 \text{ mm}$  (HSS). Em concordância com Cheung *et al.* (2008) o presente trabalho demonstrou valores de diâmetros menores com o aumento do arredondamento das arestas acima de  $30 \mu\text{m}$ . Em discordância com BIERMANN *et al.* (2012), não foi observado ganho no aspecto dimensional dos furos obtidos na comparação das ferramentas arredondadas e afiadas.

#### 4.4.3 Avaliação da circularidade dos furos

Os resultados das medições de circularidade são apresentados no Gráfico 8.

**Gráfico 8 – Média das circularidades a 5, 10 e 40 mm de profundidade**

Fonte: Autoria própria (2023)

As ferramentas com arredondamento de ( $r_{\beta} = 50 \mu\text{m}$ ) apresentaram o os menores valores de circularidade em comparação as demais ferramentas. O que pode explicar esse fato é a adesão de material na aresta da ferramenta, sendo que os valores de arredondamentos maiores tiveram menores índices de adesão como apresentado nos resultados do desgaste dos insertos. As ferramentas com ( $r_{\beta} = 15 \mu\text{m}$ ) revelaram maiores resultados na circularidade. Em discordância com BIERMANN *et al.* (2012) que estudaram a influência da preparação da aresta em um processo de furação profunda, não foi observado um ganho dimensional com relação a circularidade dos furos obtidos quando se compara ferramentas com aresta de corte arredondadas e afiadas.

Para verificar os resultados obtidos foi aplicado a análise de variância (ANOVA), a qual comprovou que a alteração nas arestas de corte não traz influências significativas nas circularidades dos furos obtidos conforme Tabela 26.

**Tabela 26 – Análise de variância (ANOVA) das circularidades**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000174	3	5,80198E-05	1,022403	0,389701	2,769431
Dentro dos grupos	0,003178	56	5,67484E-05			
Total	0,003352	59				

**Fonte: Autoria própria (2023)**

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do presente trabalho com base nos resultados obtidos e sugestões para novos estudos relacionados à preparação da aresta de corte de ferramentas.

### 5.1 Conclusões

Considerando a análise realizada sobre a influência da preparação de aresta de corte no processo de furação com broca de insertos intercambiáveis no ferro fundido cinzento FC300, e seguindo a metodologia apresentada assim como os resultados expostos, é possível concluir que:

- As microgeometrias das arestas de corte influenciam na força de avanço, sendo que ferramentas afiadas exigem menor esforço de penetração. Para as ferramentas com arestas arredondadas a força de penetração aumenta com o aumento do raio.
- As microgeometrias das arestas de corte influenciam no torque necessário para obtenção do furo, sendo que as ferramentas com raios maiores exigem maiores torques para o processo.
- As imagens térmicas foram de grande importância para representar que com o aumento do arredondamento há um aumento nos valores médios das temperaturas no processo de usinagem. Portanto a termografia pode ser um método muito importante para avaliar o processo de furação de brocas com insertos intercambiáveis.
- A menor quantidade de adesão de material na aresta de corte ocorreu nas ferramentas com aresta arredondada, quanto maior o arredondamento, menor foi a adesão.
- As microgeometrias das arestas de corte influenciam na qualidade da superfície do furo obtido, resultando em menores rugosidades os arredondamentos igual ou superior a  $r_{\beta} = 30 \mu\text{m}$ .
- As ferramentas com arredondamentos maiores apresentaram diâmetros mais próximos ao nominal.
- O emprego de arredondamento na aresta de corte não influenciou na circularidade dos furos.

- Com base em todos os aspectos avaliados no presente trabalho, foi possível identificar que a microgeometria mais adequada para a usinagem de furação com brocas com insertos intercambiáveis para o material FC300 é a com arredondamento de  $r_\beta = 50 \mu\text{m}$ .

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como tópicos para trabalhos futuros, são identificadas algumas possibilidades.

- Analisar a influência do arredondamento da aresta de corte na vida da ferramenta.
- Analisar o efeito da preparação da aresta de corte em outros tipos de ferramentas, tais como: fresas inteiriças, machos, alargadores, fresas de roscamento e brochas.
- Analisar o efeito do arredondamento da aresta de corte envolvendo outros meios de preparação como o processo “*Drag-finishing*” (arraste das ferramentas em meio abrasivo) e EDM.
- Analisar os efeitos da preparação de aresta no processo de revestimento de insertos.

## REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, P. **New developments in the theory of the metal-cutting process: part I.** The ploughing process in metal cutting. 1960.
- ALTINTAS, Y. et al. **Chatter Supression Techniques in Metal Cutting.** CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175:2015** Usinagem – Processos mecânicos. Rio de Janeiro, 2015.
- BASSETT, E.; KÖHLER, J.; **DENKENA, B.** **On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts.** CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 5, n. 2, p. 108–126, 2012.
- BENIWAL, G., & SAXENA, K. K. **Effect of niobium addition in grey cast iron: A short review.** Materials Today: Proceedings, 2020.
- BIERMANN, D.; TERWEY, I. **Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes.** CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 1, n. 2, p. 76–80, 2008.
- BIERMANN, D.; WOLF, M.; ASSMUTH, R. **Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills.** Procedia CIRP, v. 1, n. 1, p. 172–177, 2012.
- BORDIN, F. M.; ZEILMANN, R. P. **Effect of the cutting edge preparation on the surface integrity after dry drilling.** Procedia CIRP, v. 13, p. 103–107, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.018>>. .
- BONIFÁCIO, M. E. R. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração,** Tese – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 1993.
- BORTOLANZA, J. F. **Previsão de vibração do tipo chatter no fresamento de placas finas.** Dissertação – Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Joinvile, 2016.
- BOUZAKIS, K. D.; MICHAILIDIS, N.; VIDAKIS, N.; EFSTATHIOU, K.; LEYENDECKER, T.; ERKENS, G.; WENKE, R.; FUSS, H. G. **Optimization of the cutting edge radius of PVD coated inserts in milling considering film fatigue failure mechanisms.** Surface and Coatings Technology 133-134:501-507, 2000.
- BOUZAKIS, K. D.; MIRISIDIS, I.; HADJIYIANNIS, S.; et al. **Improved coating properties and optimized substrate data, essential conditions for high performance cutting tools.** Tribology in Industry, v. 25, n. 1–2, p. 3–19, 2003.

BUSSAB, W. O. **Análise de Variância e Regressão: Uma introdução**. São Paulo: Atual, 1988.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKENA, B. **Advancing cutting technology**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 52, n. 2, p. 483–507, 2003.

CALLERI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre, 2003.

CALLISTER, W. D. (2002). **Ciência e engenharia de materiais**. Uma introdução, 5, 189-250.

CHEUNG, F. Y.; ZHOU, Z. F.; GEDDAM, A.; LI, K. Y. Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 208, n. 1–3, p. 196–204, 2008.

COHEN, P. H.; VOIGT, R. C. e MARWANGA, R. O. **Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of ductile irons**. In: AFS Casting Congress, 2000, Pittsburg. American Foundrymen's Society.

DENKENA, B.; BIERMANN, D. **Cutting edge geometries**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 63, n. 2, p. 631–653, 2014. CIRP. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>>. .

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; MENGESHA, M. S. **Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process: Part 1. Investigation of material flow, process forces, and cutting temperature**. Production Engineering, v. 6, n. 4–5, p. 329–338, 2012.

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. **Customized cutting edge preparation by means of grinding**. Precision Engineering, v. 37, n. 3, p. 590–598, 2013. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.01.004>>. .

DENKENA, B.; LUCAS, A.; BASSETT, E. **Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 60, n. 1, p. 73–76, 2011.

DINIZ, Anselmo E.; MARCONDES, Francisco C.; COPPINI, Nivaldo L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8a ed., São Paulo: Artliber Editora Ltda., 270 p, 2013.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, Ed. Artliber, 9. Edição, São Paulo, 2014.

ELZENHEIMER, J. **Noch viel ungenutztes Potenzial beim Bohren**. Werkstatt und Betrieb 136:55-57, 2003.

FANG, Z., & Obikawa, T. **Influence of cutting fluid flow on tool wear in highpressure coolant turning using a novel internally cooled insert**. Journal of Manufacturing Processes, 2020.

FANG, N.; WU, Q. **The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 45:1178-1187, 2005.

FRIEMUTH, T. **Herstellung spanender Werkzeuge.** 1. Auflage. Düsseldorf: VDI Verlag, 2002.

FULEMOVÁ, J.; ŘEHORŤ, J. **Influence of form factor of the cutting edge on tool life during finishing milling.** Procedia Engineering, v. 100, n. January, p. 682–688, 2015.

GUESSER, W. L. (2019). **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.** Editora Blucher.

GILLESPIE, L. K. **Deburring and edge finishing handbook.** Society of Manufacturing Engineers / American Society of Mechanical Engineers, Dearborn, Michigan / New York, 1999.

GONÇALVES, Vinícius Sell. **Desenvolvimento de uma metodologia numérica para a predição dos três primeiros modos de vibração de um motor elétrico fixo em base rígida.** 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

HEYNS, P. S., **Tool condition monitoring using vibration measurements – a review.** Insight – Non Destructive Testing and Condition Monitoring. Vol. 49, p. 447-450, 2007.

HOSSEINI, S. V.; VAHDATI, M. **Modeling the effect of tool edge radius on contact zone in nanomachining.** Computational Materials Science, v. 65, p. 29–36, 2012. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.06.037>>. .

HUEBNER, KENNETH H. et al. **The finite element method.** 4.ed. New York: J. Wiley, 2001.

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, Transactions of the ASME, v. 130, n. 5, p. 0510011–0510017, 2008.

LEWIS, D. G. **Análise de Variância.** São Paulo: Harbra, 1995.

MACHADO, A. R. et al. **Usinagem dos metais.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2009. 371 p.

MASSIRER JUNIOR, E.; LUIZ GUESSER, W. **Avaliação Da Usinabilidade Do Ferro Fundido Vermicular Através De Ensaios De Furação.** 6 th BRAZILIAN CONFERENCE ON MANUFACTURING ENGINEERING, 2011.

MASUKO, M. **Fundamental research on metal cutting (1st Report), a new analysis of cutting forces.** Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng, v. 19, p. 32-39, 1953.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. Mankato: Prentice Hall, 1999.

ÖZEL, T. **Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel**. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 47:820-840, 2005.

PARSIAN, A.; MAGNEVALL, M.; BENO, T.; EYNIAN, M. **New production technologies in aerospace industry** - 5th machining innovations conference (MIC 2014) A mechanistic approach to model cutting forces in drilling with indexable inserts. *Procedia CIRP*, v. 24, n. C, p. 74–79, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.138>>. .

PEREIRA, A. A.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L. **The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron FC25**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 179, n. 1–3, p. 165–171, 2006.

PIESKE, A.; Chaves Filho, L. M.; Gruhl, A. (1971) **As variáveis metalúrgicas e o controle da estrutura de ferros fundidos cinzados**. *Metalurgia ABM*, v.31, n.215.

POLLI, M.L., **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte**, Florianópolis, fevereiro 2005.

PRENGEL, H. G.; SANTHANAM, A. T. **State of art in hard coating for carbide cutting tools**. In: *Surface and coating technology* 102:183-190, 1998.

RANGANATH, S.; CAMPBELL, Albert B.; GORKIEWICZ, Daniel W. **A model to calibrate and predict forces in machining with honed cutting tools in inserts**. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 47:820-840, 2007.

RECH, J. **Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing**. *Wear*, v. 261, n. 5–6, p. 505–512, 2006.

RECH, J.; YEN, Y. C.; SCHAFF, M. J.; et al. **Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts**. *Wear*, v. 259, n. 7–12, p. 1168–1176, 2005.

REILLY, G. A.; MCCORMACK, B. A. O.; TAYLOR, D. **Cutting sharpness measurement: A critical review**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 153–154, n. 1–3, p. 261–267, 2004.

REN, H.; ALTINTAS, Y. **Mechanics of machining with chamfered tools**. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, v. 122, n. 4, p. 650–659, 2000.

REIS, Alexandre Martins. **Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, raio de ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiça de corte**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. 2000.

RODRIGUES, A. **Análise estatística na avaliação de teste de degradação acelerada de conjuntos cerâmicos em fachadas.** 2016.

RODRÍGUEZ, C. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing.** 2009.

SANTANA, M. I. D. E. **Influência Da Preparação Das Arestas De Corte De Brocas Helicoidais No Processo De Furação.** UTFPR, p. 148, 2015.

SANTANA, M. I. D. E. **Influência da microgeometria e polimento de brocas canhão na furação do aço DIN 18crni8.** PROJETO DE TESE. , 2019.

SHAW, M. C.; COOKSON, J. O. **Metal cutting principles (Vol. 2).** 2005.

SINGHAL, P., & SAXENA, K. K. **Effect of silicon addition on microstructure and mechanical properties of grey cast Iron: An overview.** Materials Today: Proceedings, 2020.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I.** 5 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte 2.** 4. ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 314 p, 2008.

TIKAL, F.; HOLSTEN, S. **Neue Anforderungen erfordern neue Werkzeuge.** VDI Z, v. 148, n. 3, p. 44, 2006.

TIKAL, F. **Vollhartmetallbohrer und -fräser: Qualität und Leistungsfähigkeit moderner Schneidstoffe.** Moderne Industrie, Landsberg (1993).

TIKAL, F.; BIENEMANN, R.; HECKMANN, L. **Schneidkantenpreparations Ziele, Verfahren und Messmethoden.** Berichte aus Industrie und Forschung, Kassel: Kassel University Press, 2009.

TÖENSHOFF, H. K.; DENKENA, B. **Basics of cutting and abrasive processes.** 2013.

TONSHOFF, H. K.; MOHLFELD, A. **SURFACE TREATMENT OF CUTTING TOOL SUBSTRATES.** , v. 38, p. 469–476, 1998.

TÖNSHOFF, H. K. **Spanen.** 2 edition, Berlin: Springer editor, 2004.

UPADHYAY, S., & Saxena, K. K. **Effect of Cu and Mo addition on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: An overview.** Materials Today: Proceedings, 2020.

VAŠKO, A. **Evaluation of shape of graphite particles in cast irons by a shape factor.** Materials Today: Proceedings, 3(4), 1199-1204, 2016.

WERNER, A. **Prozeßauslegung und Prozeßsicherheit beim Einsatz von schlanken Schafffräsern**. Aachen, 1992. 147 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – RWTH Aachen, 1992.

WICK, C. **Tool and manufacturing engineers handbook: a reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians**. 4th ed. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1988.

WYEN, C. F.; KNAPP, W.; WEGENER, K. **A new method for the characterisation of rounded cutting edges**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 59, n. 9–12, p. 899–914, 2012.

WYEN, C. F.; WEGENER, K. **Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 59, n. 1, p. 93–96, 2010. CIRP. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.056>>. .

WYEN, C. F.; **Rounded cutting edges and their influence in machining titanium**. 2011. Tese de Doutorado. ETH Zurich.

WYEN, C. F.; KNAPP, W.; WEGENER, K. **A new method for the characterisation of rounded cutting edges**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 59, n. 9–12, p. 899–914, 2012.

XAVIER, Fábio Antônio et al. **Estudo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de nitreto de silício aplicadas no torneamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

YUSSEFIAN, N. Z.; KOSHY, P.; BUCHHOLZ, S.; KLOCKE, F. **Electro-erosion edge honing of cutting tools**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 59, n. 1, p. 215–218, 2010. CIRP. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.009>>.