

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**

**VINÍCIUS CAPRA MANTO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MICROGEOMETRIA DA BROCA DE PRÉ-  
FURAÇÃO NA FORMAÇÃO DE REBARBA APÓS ALARGAMENTO**

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

**VINÍCIUS CAPRA MANTO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MICROGEOMETRIA DA BROCA DE PRÉ-FURAÇÃO NA FORMAÇÃO DE REBARBA APÓS ALARGAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso (MEC0290) apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de fabricação.

Orientador: Professor Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

**VINÍCIUS CAPRA MANTO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MICROGEOMETRIA DA BROCA DE PRÉ-FURAÇÃO NA FORMAÇÃO DE REBARBA APÓS ALARGAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso (MEC0290) apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de fabricação.

**Aprovado em 23/02/2021**

**Banca Examinadora**

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

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

Prof. Dr. Alexandre Viecelli  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais Vilson Manto e Odete Carmen Capra Manto pelo apoio incondicional, pela compreensão em momentos difíceis e por todo o incentivo durante esta jornada, não somente na execução deste trabalho, mas durante todo o curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por sempre me iluminar e conduzir meus passos durante toda a minha vida e principalmente nessa jornada.

Aos meus pais Vilson Manto e Odete Carmen Capra Manto por todo o amor, apoio e carinho que sempre tiveram, pela compreensão, palavras de conforto e coragem em todos os momentos difíceis da minha vida e pelo esforço que sempre tiveram, abdicando muitas vezes do próprio bem-estar por mim.

Ao professor Rodrigo Panosso Zeilmann, pela orientação e acompanhamento indispensável para a correta realização deste trabalho.

À toda a equipe envolvida da Eaton LTDA, por disponibilizar as ferramentas, máquinas e dispositivos necessários para a realização deste trabalho, bem como o suporte e apoio técnico durante a execução dos experimentos.

À Universidade de Caxias do Sul por disponibilizar o Laboratório de Usinagem para a realização dos ensaios.

A todos os amigos, colegas e funcionários da UCS que contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Queremos ter certezas e não dúvidas, resultados e não experiências, mas nem mesmo percebemos que as certezas só podem surgir através das dúvidas e os resultados somente através das experiências.”*

**Carl Jung**

## RESUMO

A fim de estudar o mecanismo de geração de rebarba no processo de furação, e aplicar os conhecimentos obtidos na fabricação de engrenagens que obtenham uma melhor qualidade com um processo de melhor desempenho, o presente trabalho possui como objetivo estudar a influência da alteração da microgeometria da broca, utilizada em operação de pré-furação, na geração de rebarbas após o alargamento dos mesmos. O estudo foi realizado comparando dois grupos de ferramentas. O primeiro deles passou pelo processo de polimento com esponja de cerdas abrasivas. O segundo foi utilizado em seu estado padrão de fábrica. Foi avaliada a rebarba gerada nesse processo, bem como o desgaste da ferramenta, sendo comparados os resultados apresentados com ambas microgeometrias trabalhadas. Comprovou-se que a geração de rebarbas se dá de forma semelhante para ambas as condições de ferramenta, não tendo influência o processo de polimento abrasivo. Também que o desgaste encontrado nas ferramentas não foi significativo o suficiente para ser utilizado nas comparações por ter a grandeza muito pequena. Ainda assim, foi observada a presença de mecanismos geradores de desgaste.

**Palavras chaves:** Furação, Rebarba, Microgeometria

## ABSTRACT

With the purpose of studying the burr formation mechanism on the drilling process, and applying the knowledges obtained on gears manufacturing that achieve better quality and performance on the process, the present paper aims to study the influence of the microgeometry changing of a drill, used in pre-drilling process, on burr formation after the holes enlargement. This study was realized comparing two different groups of tools. The first one went through a polishing process with abrasive bristle sponge. The second one was utilized on its factory default state. The burr formed on this process was evaluated, as the tool wear, comparing the different results obtained with both microgeometry applied. It was proved that burr formation is similar for both tool conditions, with no influence of the abrasive polishing process. Also that the tool wear found wasn't sufficient noteworthy to be used in the comparisons because it has meaningless greatness. Nevertheless, the presence of wear-generating mechanisms was observed.

**Key words:** Drilling, Burr, Microgeometry

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da influência da furação nos processos de usinagem .....	9
Figura 2 – Esquema da geometria da ferramenta de corte .....	11
Figura 3 – Partes de uma broca.....	11
Figura 4 – Geometria de uma broca helicoidal.....	12
Figura 5 – Caracterização da preparação do gume da ferramenta .....	13
Figura 6 – Forças de usinagem na broca.....	14
Figura 7 – Estágios do desgaste da ferramenta.....	16
Figura 8 – Mecanismos causadores de desgaste .....	17
Figura 9 – Definição de borda e rebarba segundo norma DIN 6784 .....	19
Figura 10 – Esforços de manufatura causados por rebarba.....	20
Figura 11 – Rebarba Poisson .....	22
Figura 12 – Rebarba Enrolada.....	22
Figura 13 – Rebarba de Corte .....	22
Figura 14 – Rebarba Repuxada.....	23
Figura 15 – Tipos de rebarba de furação .....	24
Figura 16 – Fatores que interferem na formação da rebarba .....	25
Figura 17 – Diferenças na microtopografia de ferramentas tratadas e não tratadas .....	26
Figura 18 – Engrenagem .....	30
Figura 19 – Dados da ferramenta .....	30
Figura 20 – Processo de polimento com esponja abrasiva .....	31
Figura 21 – Brocas utilizadas nos ensaios .....	33
Figura 22 – Brocas 3 e 4 no início dos testes .....	36
Figura 23 – Brocas 3 e 4 ao final dos testes .....	37
Figura 24 – Material aderido no gume das ferramentas.....	38
Figura 25 – Representação gráfica da geração de rebarbas dos grupos de brocas.....	40
Figura 26 – Representação gráfica das alturas de rebarbas do grupo polidas.....	41
Figura 27 – Representação gráfica das alturas de rebarbas do grupo padrão de fábrica.....	42
Figura 28 – Rebarbas nos furos.....	43
Figura 29 – Rebarbas encontradas.....	45
Figura 30 – Centro de usinagem Romi .....	52
Figura 31 – Estereoscópio trinocular.....	52
Figura 32 – Perfilômetro Taylor-Hobson .....	53
Figura 33 – Máquina presetter Zoller .....	53
Figura 34 – Centro de usinagem Hartford.....	53

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 – Desenvolvimentos de brocas .....	10
Tabela 1 – Influência percentual das grandezas nos esforços .....	14
Quadro 2 – Planejamento e sequência dos ensaios .....	29
Tabela 2 – Rebarbas geradas.....	39

## SIGLAS, TERMOS E ABREVIações

°C	Grau Celsius
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização)
m	Metros
min	Minutos
mm	Milímetros
NBR	Norma Brasileira
rpm	Rotações por minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros Autmotivos)
µm	Micrometro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Ângulo de folga (graus)
$\beta$	Ângulo de cunha (graus)
$\gamma$	Ângulo de saída (graus)
$\varepsilon$	Ângulo de quina (graus)
$\sigma$	Ângulo de ponta (graus)
$\psi$	Ângulo do gume transversal (graus)
$r_\varepsilon$	Raio de quina ( $\mu\text{m}$ )
$r_n$	Raio do gume ( $\mu\text{m}$ )
$d$	Diâmetro da ferramenta (mm)
$F_c$	Força de corte (N)
$F_f$	Força de avanço (N)
$F_p$	Força passiva (N)
$M_t$	Momento torsor (Nm)
$R_{\text{max}}$	Altura máxima das irregularidades da superfície ( $\mu\text{m}$ )
$R_z$	Rugosidade Máxima ( $\mu\text{m}$ )
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$V_b$	Desgaste de flanco (mm)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	7
1.2	AMBIENTE DE TRABALHO .....	8
1.3	OBJETIVOS .....	8
1.3.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>8</b>
1.3.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE A GERAÇÃO DE REBARBA NO PROCESSO DE FURAÇÃO.....</b>	<b>9</b>
2.1	PROCESSO DE FURAÇÃO.....	9
2.1.1	<b>Contexto Geral.....</b>	<b>9</b>
2.1.2	<b>Geometria da ferramenta .....</b>	<b>11</b>
2.1.3	<b>Solicitações e esforços na broca .....</b>	<b>13</b>
2.1.4	<b>Desgaste e vida da ferramenta .....</b>	<b>15</b>
2.2	FORMAÇÃO DA REBARBA .....	19
2.2.1	<b>Classificações de rebarba.....</b>	<b>20</b>
2.2.2	<b>Rebarbas no processo de furação .....</b>	<b>23</b>
2.3	PROCESSOS DE TRATAMENTO DA SUPERFÍCIE DE GUMES.....	26
2.3.1	<b>Jateamento microabrasivo .....</b>	<b>27</b>
2.3.2	<b>Escovamento e polimento .....</b>	<b>27</b>
2.3.3	<b>Escovamento com filamentos de nylon.....</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.1	MATERIAIS .....	30
3.2	FERRAMENTAS .....	30
3.2.1	<b>Processo de polimento com esponja de cerdas abrasivas .....</b>	<b>31</b>
3.3	EQUIPAMENTOS.....	32
3.4	MÉTODOS E ESTRATÉGIAS .....	32
3.4.1	<b>Estratégia de Usinagem .....</b>	<b>32</b>
3.4.2	<b>Estratégia de Análise de Resultados .....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>36</b>
4.1	DESGASTE DA FERRAMENTA.....	36
4.2	REBARBAS GERADAS.....	39
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>48</b>

<b>APÊNDICE A – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DE REBARBA.....</b>	<b>51</b>
<b>APÊNDICE B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Quando se trabalha com aço e outros metais como matéria prima, de forma geral, existem dois tipos de processo de fabricação: mecânicos, como usinagem e conformação e os metalúrgicos, como por exemplo, fundição e soldagem (DOS SANTOS, 2018) Peças e produtos fabricados a partir da usinagem estão muito inseridos no nosso dia a dia, muitas vezes mais do que se imagina. Por ser um processo que permite a confecção de peças de geometria complexas de uma maneira rápida e barata, é um processo muito importante para o cenário econômico (DE ALMEIDA et al., 2018). E esse cenário competitivo do mercado direciona as empresas a aprimorar seus processos, aumentando a qualidade de seus produtos e serviços mantendo sempre os custos em um nível apropriado (VIEIRA et al., 2017).

Os processos de usinagem podem ser divididos em três categorias, sendo elas: Processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida e processos de usinagem não convencionais (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Dentro da categoria de processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, está o de furação. Este processo é um dos mais utilizados na indústria de manufatura, (DINIZ, 2001). Podendo representar cerca 25% do tempo de usinagem dos principais processos e aproximadamente 33% do número total de operações utilizadas na indústria (TÖNSHOFF, 1994), é de grande importância e por isso requer investimentos e estudos. Para se ter uma ideia melhor da quantidade de furos que um produto pode ter, estima-se que asas de avião possam ter mais de 45.000 furos (LÓPEZ DE LACALLE et al, 2011).

A furação, como os demais processos, possui suas particularidades e suas variáveis. Com isso, as empresas buscam estudar e compreender essas para otimizar seus processos e reduzir seus gastos. Estudar a qualidade superficial, o desgaste e a preparação do gume da ferramenta, por exemplo, são alternativas para se atingir melhoras significativas em processos de fabricação. Há uma necessidade de melhora no desempenho das ferramentas para que se atinjam as exigências do mercado, fato que está levando os fabricantes de ferramentas a melhorar as ferramentas padrão. (BORDIN, 2013).

Já existem algumas técnicas para que essa melhora de ferramentas se torne possível, sendo uma delas a obtenção de variadas geometrias. Nesse contexto, está inserido o tratamento dos gumes das ferramentas (RODRIGUEZ, 2009). Uma das técnicas utilizadas na preparação do gume é o tratamento da microgeometria da ferramenta, que tem por objetivo a melhora da superfície da broca, atingindo também a mesogeometria da mesma. Usualmente, esses tratamentos se dão por conta da aplicação de polimentos, normalmente em meios

abrasivos, nas superfícies das ferramentas, trazendo benefícios e abrindo possibilidades para outras aplicações, como revestimentos que trazem benefícios e melhora na performance dessas ferramentas. (BORDIN, 2013).

Além de otimizar a qualidade da produção, os tratamentos podem ter influência em outras variáveis do processo. Uma delas, sendo de grande importância, é a rebarba. A rebarba é um dos principais inimigos da automação dos processos, sem contar no seu impacto financeiro na indústria (TONGPADUNGROD et al., 2018). Atualmente na indústria, cerca de 2/3 dos processos de rebarbação de peças é feito manualmente, sendo o 1/3 restante realizado por máquinas (SOARES FILHO, 1995). Além de influenciar diretamente a qualidade do produto, a rebarba pode trazer alguns problemas como acidentes de trabalho, decorrentes de cortes, que reduzem a capacidade de fabricação.

Deste modo, a necessidade de compreensão do mecanismo de geração de rebarba, bem como o processo de tratamento da superfície da ferramenta e a compreensão da sua influência na geração de rebarba é de grande valia para estabelecer melhorias de processo, de ferramentas e do próprio produto. Tendo em vista que ainda não se possuem muitos estudos sobre a influência da microgeometria da ferramenta sobre a geração de rebarba, há um nicho de oportunidades para obtenção de resultados positivos para as aplicações no meio industrial.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Buscando o aperfeiçoamento dos conhecimentos no processo de furação e do mecanismo de geração de rebarba, alinhados com a necessidade por parte da indústria da redução de tempos de processo e, conseqüentemente, custos na fabricação de seus produtos, é indispensável o estabelecimento de uma relação entre a geração de rebarba e a microgeometria da ferramenta.

Visto que a formação da rebarba é um problema recorrente no dia a dia fabril, o estudo das variáveis no processo de furação, juntamente com os possíveis tratamentos na preparação do gume da ferramenta podem trazer benefícios consideráveis, tais como redução do tempo de processo das peças e também redução de custo, tanto na mão de obra, quanto em desperdícios de material.

Além disso, a falta de trabalhos relacionando a geração de rebarba à preparação do gume da ferramenta, cria boas oportunidades para explorar esse campo da usinagem e do processo de fabricação.

De posse dos argumentos anteriores, esta avaliação se torna imprescindível para que possam ser apresentados melhores resultados no processo.

## 1.2 AMBIENTE DE TRABALHO

O presente estudo está sendo desenvolvido conjuntamente com a empresa Eaton LTDA, localizada em Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, desde o ano de 2005, quando adquiriu a planta da Pigozzi S/A.

Com uma área total construída de cerca de 40 mil metros quadrados, distribuídos em um total de 247 mil metros quadrados de área, a Eaton LTDA tem como principais produtos transmissões para colheitadeiras e tratores, reduções finais, componentes para transmissões, como eixos, engrenagens, coroas e pinhões. Além disso, atua no mercado de reposição com óleos, embreagens e kits para transmissões e na fabricação de algumas peças para veículos de transporte pesados, como caminhões. Possui em seu parque fabril vários processos, dentre forjaria, usinagem, tratamento térmico, retífica, linhas de montagem com bancos de testes e pintura. Os principais clientes são John Deere, CNH, AGCO e Valtra entre outros.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo do presente trabalho é avaliar a influência da microgeometria da broca na formação de rebarba.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Estudar o processo da geração de rebarba no processo de furação;
- b) Entender os processos de tratamento de gume de ferramenta e alteração de microgeometria;
- c) Alterar microgeometria das brocas a serem testadas;
- d) Realizar os experimentos com brocas padrão de fábrica e com brocas com microgeometria alterada;
- e) Mensurar e comparar a formação de rebarbas para as ferramentas padrão e com microgeometria alterada;
- f) Avaliar se houve desgaste e comparar o comportamento das ferramentas testadas;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE A GERAÇÃO DE REBARBA NO PROCESSO DE FURAÇÃO

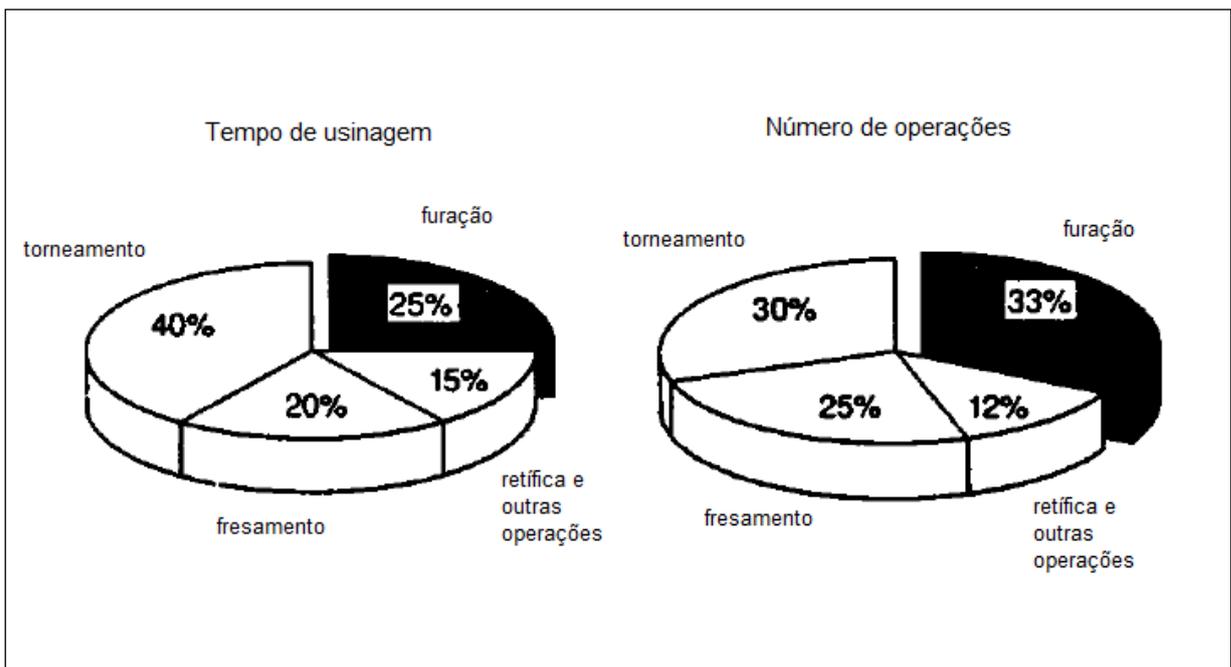
Esta sessão destina-se à explicação do processo de furação como um todo. Primeiramente será abordado um breve contexto geral do processo, apresentando generalidades e curiosidades sobre o mesmo. Posteriormente serão abordados alguns detalhes do processo, como a geometria da ferramenta, os esforços sofridos durante a usinagem, a formação da rebarba e os tratamentos dos gumes da ferramenta.

### 2.1 PROCESSO DE FURAÇÃO

#### 2.1.1 Contexto Geral

Sendo um dos mais utilizados processos de usinagem na indústria, o processo de furação alinha-se juntamente com o processo de torneamento quando se trata de tempo de usinagem e quantidade de operações, como mostra a Figura 1. Além disso, é usual que a furação seja um dos últimos processos de usinagem de uma peça (TÖNSHOFF, 1994).

Figura 1 – Representação da influência da furação nos processos de usinagem



Fonte: Adaptado de Tönshoff, (1994)

A normal NBR 6175 define o processo de furação como sendo um processo mecânico que tem por objetivo obter um furo que normalmente é cilíndrico em uma peça. Para isso, utiliza-se uma ferramenta, a broca, usualmente multicortante. A peça ou a ferramenta rotacionam, juntamente com um movimento retilíneo da ferramenta ou da peça, coincidente ou paralelo ao eixo principal da máquina (BORDIN, 2013).

A furação é classificada como uma operação de desbaste sendo necessários, em alguns casos, operações subsequentes para se chegar no acabamento superficial ou tolerância dimensional requerida. Algumas operações típicas são torneamento interno, mandrilhamento, brochamento, entre outras (STEMMER, 1995).

Com o aumento do uso da tecnologia CNC em centros de usinagem, alguns avanços e desenvolvimentos ocorreram com materiais das brocas, tornando-as mais eficientes e retirando o atraso que o processo de furação possuía em relação aos outros dois principais processos de usinagem, fresamento e torneamento (DINIZ, 2001). O Quadro 1, abaixo, mostra alguns dos desenvolvimentos na área e suas características de aplicação.

Quadro 1 – Desenvolvimentos de brocas

Tecnologia desenvolvida	Característica de Aplicação
Broca de aço rápido revestida com nitreto de titânio	Possibilitou aumento da velocidade de corte e/ou vida da ferramenta em relação à broca de aço rápido sem revestimento
Broca inteira de metal duro	Tornou-se uma alternativa boa para furos menores de 20 mm, com máquinas que possuam rigidez, rotação e potência suficientes.
Broca com pastilhas intercambiáveis de metal duro	Inviável em diâmetros pequenos, porém boa opção em diâmetros médios, com máquina adequada.
Brocas especiais	Brocas com diâmetros muito grandes ou comprimento muito grande em relação ao diâmetro.

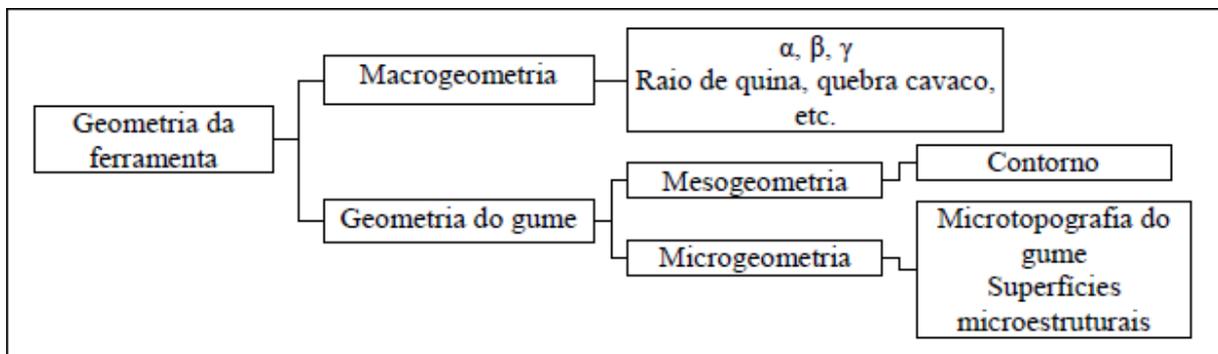
Fonte: Adaptado de Diniz, (2001).

Essas inovações vieram como opção de variedade nos processos já que as brocas helicoidais dominavam esse segmento. Ainda assim, elas são muito utilizadas nos processos de usinagem atuais. É sobre esse tipo de broca que se dará foco, já que são largamente utilizadas, sendo de grande influência em muitos processos fabris.

## 2.1.2 Geometria da ferramenta

No processo de furação, devem ser notados alguns fatores, como a relação diâmetro e a profundidade do furo, as tolerâncias e medidas pertinentes, bem como os volumes de produção (STEMMER, 1995). Outro fator com grande influência nos parâmetros de entrada e saída do processo é a geometria da ferramenta (SAMBHAV et al., 2012). Segundo Rodriguez (2009), define-se a geometria da ferramenta de corte em três partes: micro, macro e mesogeometria. A Figura 2 apresenta as divisões da geometria de uma ferramenta.

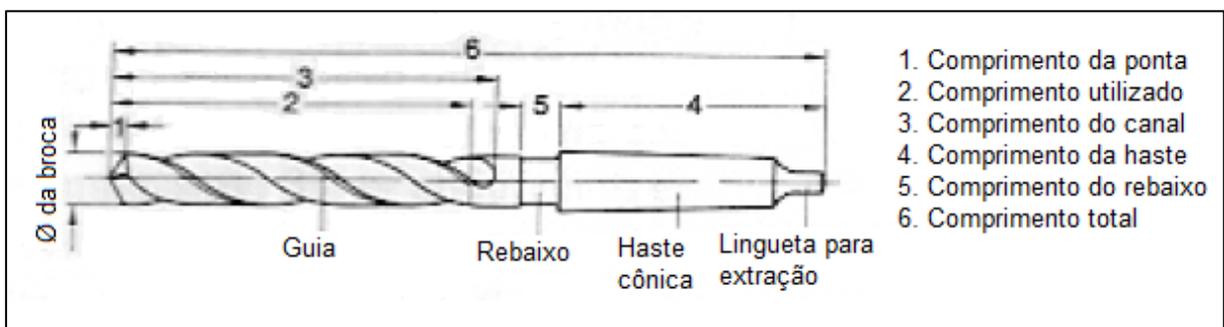
Figura 2 – Esquema da geometria da ferramenta de corte



Fonte: Bordin (2013).

A macrogeometria consiste em características geométricas que se relacionam ao escoamento do cavaco, lubrificação, além de definir ângulos de corte, raios de quina, quebra-cavacos e outras superfícies (RODRIGUEZ, 2009). De forma simplificada, a broca possui uma haste e uma parte cortante (BORDIN, 2013). A Figura 3 mostra um esquema com as partes de uma broca helicoidal.

Figura 3 – Partes de uma broca

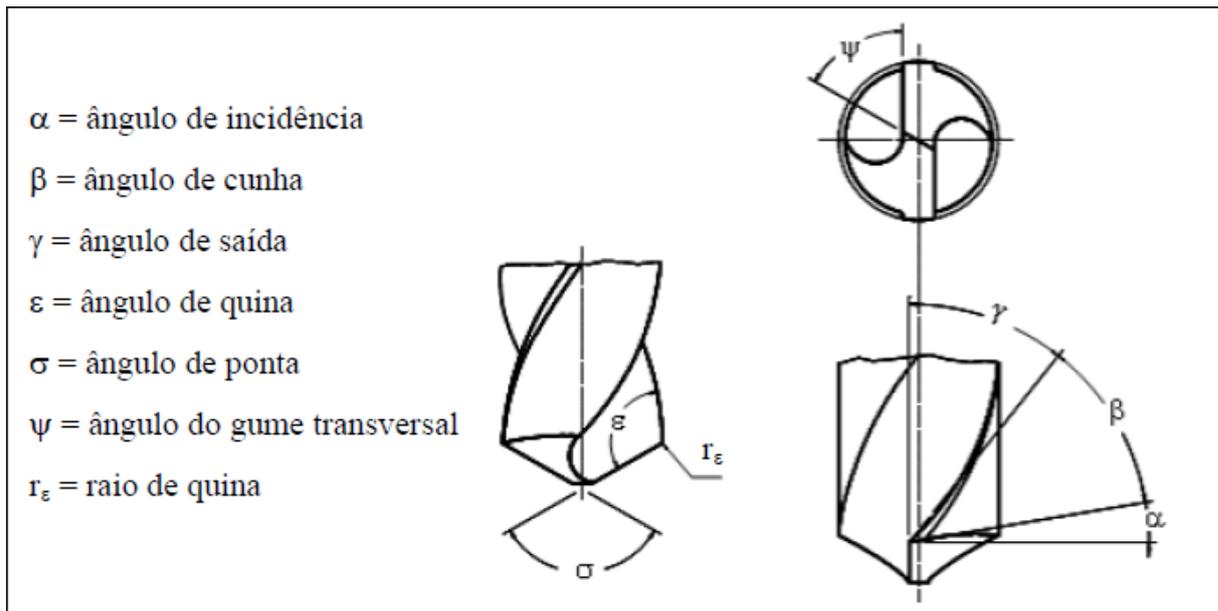


Fonte: Adaptado de Diniz (2001).

Analisando a forma construtiva de uma broca helicoidal, pode-se perceber que os gumes principais se mostram no sentido do avanço. O gume transversal incorpora-se ao

principal. Entretanto, com o ângulo de saída sendo negativo nessa região, o gume transversal deforma o material plasticamente, orientando-o no sentido do principal, sem que haja um corte definido nele (KÖNIG e KLOCKE, 1997 apud BORDIN, 2013). Na Figura 4, apresenta-se a geometria de uma broca helicoidal, explicitando-se os ângulos e raios presentes no gume da ferramenta.

Figura 4 – Geometria de uma broca helicoidal



Fonte: Adaptado de Diniz (2001).

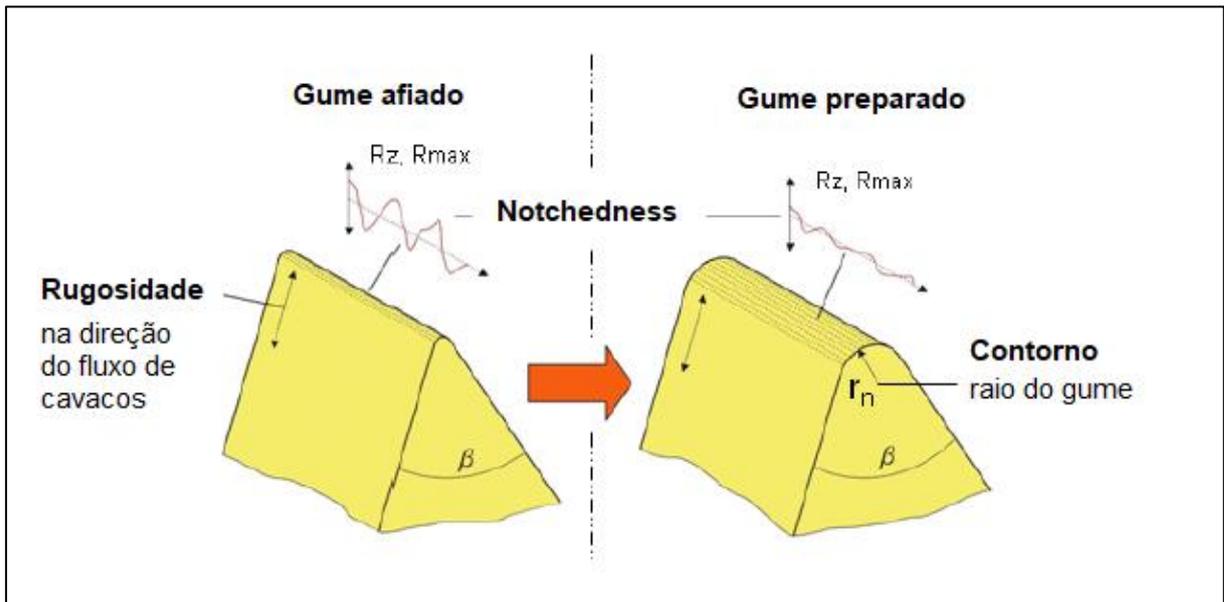
O ângulo de hélice coincide, na periferia da broca, com o ângulo de saída  $\gamma$ , apresentando o máximo valor na quina da ferramenta. Em direção ao centro da broca, esse ângulo diminui, torando-se negativo quando passa ao gume transversal (BORDIN, 2013; DINIZ, 2001).

Há uma particularidade em relação às arestas de corte das brocas helicoidais. Elas não se encontram em um ponto, tendo uma terceira aresta fazendo essa ligação. Essa terceira aresta é chamada de aresta transversal de corte (DINIZ, 2001).

A mesogeometria é representada pelos contornos que descrevem a superfície convexa da broca. Os contornos possuem geometria definida normalmente como arredondamentos no gume (RODRIGUEZ, 2009). Ela tem influência direta na formação do cavaco e na integridade das superfícies geradas (YUSSEFIAN et al., 2010 apud BORDIN, 2013).

Na Figura 5 é possível ver que o gume preparado possui um arredondamento. Esse arredondamento, no entanto, não é um arco de circunferência. O termo arredondamento é utilizado apenas para fins nominais (RODRIGUEZ, 2009).

Figura 5 – Caracterização da preparação do gume da ferramenta



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2009).

O termo em inglês *notchedness* significa entalhamento e serve basicamente para quantificar as irregularidades da microtopografia da superfície do gume. Normalmente é originada na fabricação da ferramenta (RODRIGUEZ, 2009).

### 2.1.3 Solicitações e esforços na broca

Estudar e calcular os esforços e solicitações sofridos pela ferramenta ajuda a entender e prevenir o surgimento de alguns problemas. Esses fatores influenciam diretamente em qualidade superficial, temperaturas de usinagem, desgaste da ferramenta e geração de rebarbas, por exemplo. Ter o conhecimento e entender como a broca trabalha durante o processo de furação ajuda a garantir que se tenha o resultado esperado ao final da operação.

Uma broca helicoidal, durante a furação, está submetida resumidamente a esforços de torção, derivadas da rotação, e a esforços de compressão devido ao movimento de avanço da broca (DINIZ, 2001). Além desses fatores, existem atritos entre as guias da broca e as paredes do furo, assim como do próprio cavaco com os canais da broca e também o atrito dos flancos da ferramenta sobre o fundo do furo (STEMMER, 1995). Uma informação importante que merece ressalva é a de que quando as arestas principais da broca não estão igualmente afiadas, podem causar flexão na ferramenta, pois os esforços em cada uma delas também será diferente (DINIZ, 2001).

A Tabela 1 mostra a participação percentual de cada uma das grandezas citadas. É notável a participação da aresta transversal nos valores de fora de avanço. Isso se deve a

alguns fatores como esmagamento do cavaco e encruamento do furo causados pela aresta, bem como a baixa rotação da broca e ângulo de saída negativo (DINIZ, 2001).

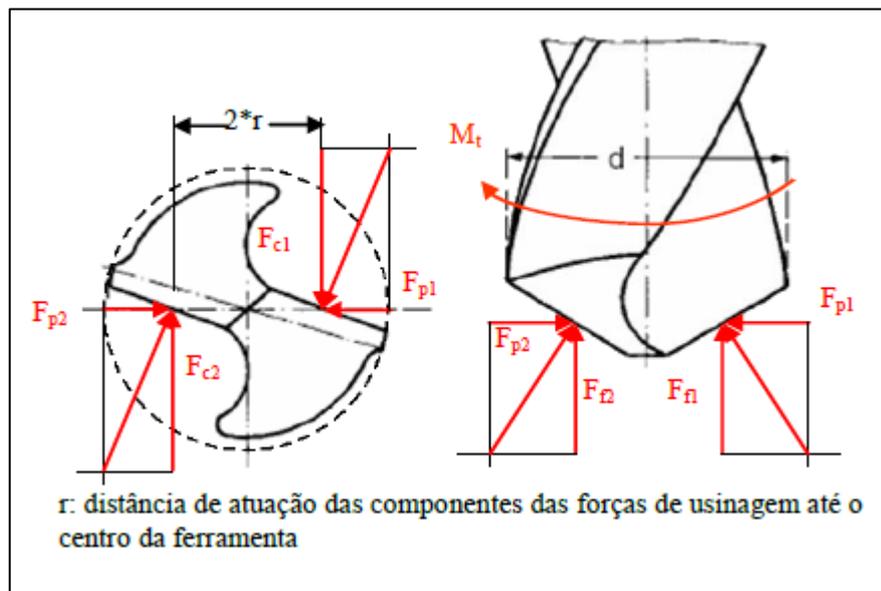
Tabela 1 – Influência percentual das grandezas nos esforços

	Arestas Principais	Aresta Transversal	Atritos
Momento Torsor	77 - 90%	3 - 10%	3 - 13%
Força de Avanço	39 - 59%	40 - 58%	2 - 5%

Fonte: Diniz (2001).

A Figura 6 mostra mais detalhadamente os esforços agindo na broca, decompostos em foras e momentos.

Figura 6 – Forças de usinagem na broca



Fonte: Bordin (2013).

A figura acima mostra que todos os elementos da ferramenta estão submetidos a esforços durante a furação. As forças  $F_p$ ,  $F_c$  e  $F_f$  são resultado da decomposição da força resultante na usinagem em cada uma das partes do gume. Elas agem mutuamente em direções perpendiculares entre si. Como as forças  $F_p$  atuam em ambos os gumes, em direções opostas entre si, são consideradas contrabalanço (BORDIN, 2013).

A força de avanço  $F_f$  é originada pela peça e age na ferramenta no momento da penetração da mesma no material. Sendo aplicada pela máquina, é necessário ser maior que o somatório de forças de resistência ao longo do eixo da ferramenta, para garantir a penetração da broca. A força de avanço possui três componentes, que são: fora aplicada no

gume transversal  $F_{gt}$ , força oposta a penetração  $F_a$  e a força resultante do escoamento do cavado  $F_e$  (KABARAY, 2007).

Como se sabe, a ferramenta está submetida a três forças principais: no gume principal, devido a rotação; no gume transversal, por compressão, além do atrito das guias nas paredes do furo (DINIZ, 2001 e STEMMER, 1995).

Hamade et al. (2006) diz que a força de avanço se concentra no gume transversal em cerca de 70 a 80%, pois é ali que o material é extrudado e direcionado aos gumes principais para ser extraído do furo.

Sabe-se também que a força de corte  $F_c$  age no gume da ferramenta, sendo uma resistência ao próprio corte (BORDIN, 2013). Por sua vez, essa força acaba gerando um torque que se relaciona principalmente com a ação dos gumes de cortar o material (HAMADE et al., 2006).

#### **2.1.4 Desgaste e vida da ferramenta**

A vida de uma ferramenta é definida como sendo o tempo de trabalho da mesma até que perca sua capacidade de corte, sendo estabelecidos previamente critérios para isso. Quando se atinge esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída (DINIZ, 2001).

Define-se desgaste de ferramenta como sendo a remoção de porções do material da ferramenta em decorrência de interações físicas e químicas entre a própria ferramenta e a peça (ZEILMANN et al., 2011).

Segundo Diniz (2001), existem alguns fatores que levam ao estabelecimento de um valor de fim de vida para uma ferramenta, sendo eles:

- a) O desgaste da ferramenta ser tão grande a ponto de haver receio de quebra da mesma. Em operações que não se necessita atingir determinadas tolerâncias, como de desbaste por exemplo, isso é crítico;
- b) Não ser possível obter acabamento superficial de boa qualidade e tolerâncias apertadas devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta. Esse fator é crítico em operações de acabamento;
- c) A decomposição da aresta de corte devido ao aumento da temperatura gerado pelo desgaste excessivo. Dessa forma a ferramenta perde o fio. A criticidade desse fator é maior em ferramentas de aço rápido, pois suportam temperaturas menores do que outros tipos de ferramenta;
- d) As forças de usinagem aumentarem muito em decorrência do desgaste da ferramenta, influenciando assim, no funcionamento da máquina.

Diversos são os tipos de desgaste na ferramenta, entretanto costuma-se dividir em três principais: o desgaste frontal ou de flanco, desgaste de cratera e deformação plástica da aresta de corte (FERRARESI, 1970 e DINIZ, 2001).

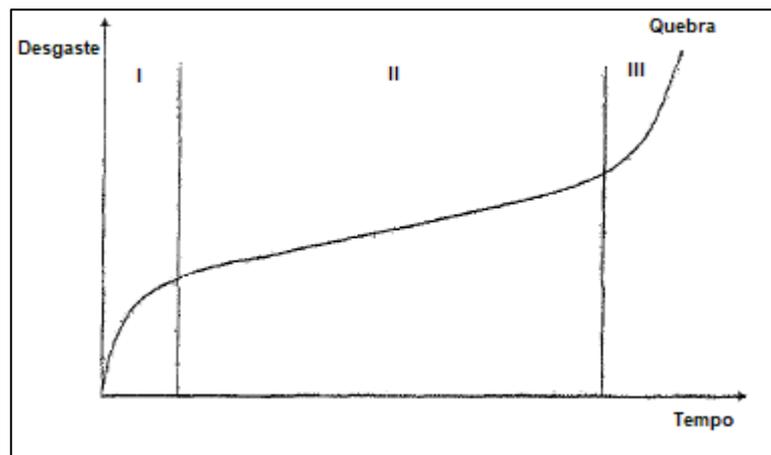
O desgaste frontal (ou de flanco) é o mais comum de todos, ocorrendo na superfície de folga da ferramenta em função do contato entre ela e a peça. Todo processo de usinagem gera esse tipo de desgaste. Normalmente é ocasionado devido ao aumento da velocidade de corte e como consequência, tem-se a queda do acabamento superficial devido a modificação da forma da aresta de corte. Pode ainda ocasionar mudanças dimensionais na peça, fazendo com que a mesma saia da faixa de tolerâncias (DINIZ, 2001).

Em se tratando do desgaste de cratera, observa-se que ocorre na superfície de saída da ferramenta. Sua principal causa é o atrito da ferramenta com o cavaco gerado no processo. O crescimento demasiado desse tipo de desgaste pode levar a quebra da ferramenta (DINIZ, 2001).

Por último, a deformação plástica da aresta de corte é causada pela junção de dois fatores: as altas temperaturas aliadas a pressão aplicada na ponta da ferramenta, que juntas geram deformação plástica na aresta de corte. A quebra da aresta de corte pode ocorrer se os níveis de deformação forem muito altos. As consequências são a deterioração do acabamento superficial e baixo controle de cavacos (DINIZ, 2001).

Graficamente, pode se analisar os estágios do desgaste da ferramenta, conforme a Figura 7 mostra:

Figura 7 – Estágios do desgaste da ferramenta



Fonte: Adaptado de Machado (2011).

Machado (2011) explica que no primeiro estágio ocorre o acelerado, porém natural e de adequação do sistema tribológico envolvido. Esse estágio acontece nos primeiros instantes do corte e possui taxa decrescente e é nele que a ferramenta se adequa ao processo.

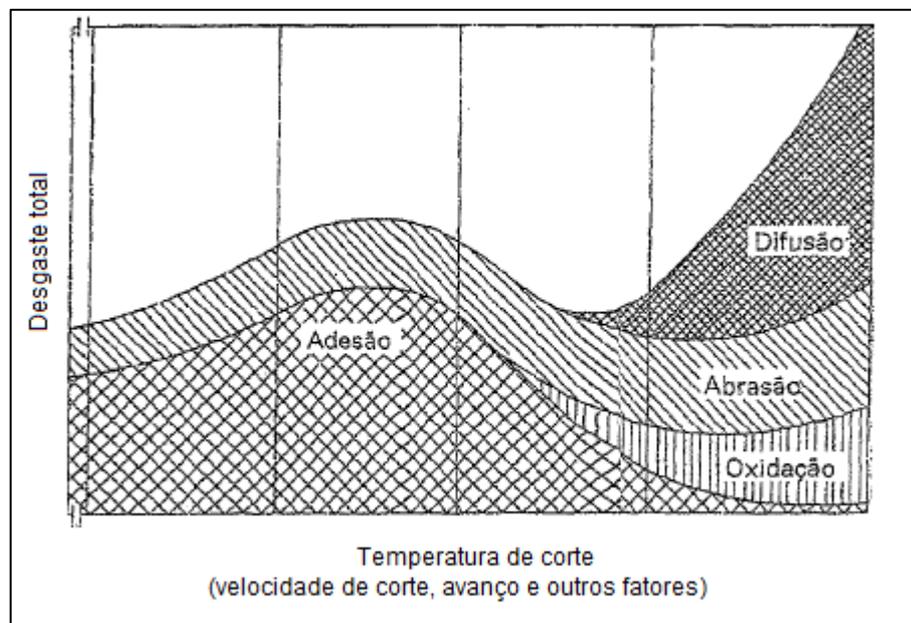
Já no segundo estágio, percebe-se que a taxa de desgaste se mantém constante ao longo do tempo. Nele, a ferramenta já está adequada ao processo do corte (MACHADO, 2011).

No terceiro e último estágio, em um curto intervalo de tempo, a taxa de desgaste começa a crescer muito. Se o corte for mantido, a ferramenta quebrará devido ao aumento das temperaturas e tensões (MACHADO, 2011).

Machado (2011) ainda acrescenta que se deve evitar o máximo adentrar no terceiro estágio, pois uma quebra de ferramenta pode trazer consequências muito indesejáveis, como por exemplo, o refugo da peça, representando custos que podem variar de acordo com o material com que se está trabalhando.

Entender o desgaste da ferramenta ajuda os responsáveis pelos processos a entender alguns fenômenos que acontecem durante a usinagem. Entretanto, é de suma importância entender as causas do desgaste da ferramenta para tentar evitá-lo ao máximo. Por isso, é relevante estudar os mecanismos causadores de desgaste. A Figura 8 mostra os principais mecanismos que causam desgaste da ferramenta e quando podem ocorrer. Os mesmos serão abordados na sequência.

Figura 8 – Mecanismos causadores de desgaste



Fonte: Adaptado de Machado (2011).

O mecanismo de adesão, também conhecido por aderência, ocorre principalmente quando se trabalha com baixas velocidades de corte, baixas cargas e temperaturas moderadas. Ele acontece através da transferência de material da ferramenta para o cavaco, na forma de partículas microscópicas. Quando as duas superfícies entram em contato, se

forma uma camada de extrato metálico entre elas, havendo a transferência desse metal da ferramenta ao cavaco. Esse mecanismo pode estar presente no fenômeno de formação da aresta postiça (MACHADO, 2011; DINIZ, 2001; FERRARESI, 1970).

A aresta postiça de corte é formada por fragmentos de material usinado que se fixam na superfície de saída da ferramenta. Ela acaba modificando o comportamento da ferramenta no corte, alterando o acabamento da superfície, a formação do cavaco, a força de corte, tendo como consequência o desgaste da ferramenta. Na sequência do processo de usinagem, o fluxo de cavaco continua passando sobre esse material aderido à superfície da ferramenta e com isso, ele vai se deformando e encruando, ganhando resistência mecânica, passando então a desempenhar a função de uma aresta de corte. A aresta postiça continua crescendo até o ponto em que acaba rompendo-se bruscamente, gerando uma perturbação. Parte dela é extraída com o cavaco e parte adere a peça que está sendo usinada. Quando se dá o rompimento, o fragmento pode levar consigo, partículas da superfície de folga da ferramenta, gerando assim, desgaste frontal considerável (DINIZ, 2001; FERRARESI, 1970).

Em se tratando de abrasão, considera-se esse fenômeno um dos principais geradores de desgaste da ferramenta. Ele se dá devido ao atrito da ferramenta com a peça, podendo ter ou não, partículas duras soltas entre as duas superfícies. Essas partículas podem ter se desprendido da peça, do cavaco ou até da própria ferramenta. Classificam-se em dois grupos: abrasão de dois corpos ou de três corpos. A abrasão de dois corpos é aquela em que as partículas se desprendem de uma das superfícies. Quando as partículas se encontram soltas entre as duas superfícies, considera-se como sendo abrasão de três corpos. Esse mecanismo de desgaste pode gerar deformação plástica e fratura frágil, com perda ou deslocamento de material por microlascamentos. (MACHADO, 2011; DINIZ, 2001).

Define-se o mecanismo de difusão pela transferência de átomos entre ferramenta e cavaco. Ela é intimamente ligada a temperatura de usinagem e ao tempo de contato entre as partes e acontece no estado sólido. Além disso, outro fator influenciador é a afinidade química entre os metais, podendo facilitar a ocorrência do processo. A ocorrência da difusão tem como resultado principal a formação de carbonetos complexos, menos resistentes e que, normalmente, são removidos por abrasão, no caso de ferramentas de metal-duro. Embora as velocidades de usinagem sejam altas e o tempo de contato entre os materiais seja baixo, há uma zona de aderência na interface ferramenta-cavaco, aliada a existência de um gradiente de velocidade na zona de fluxo do cavaco e ao fato de se assumir valor zero na interface com a ferramenta que garante tempo suficiente para que ocorra a difusão. As temperaturas altas já referidas, que giram em torno de 1.000 a 1.200 °C também contribuem, sendo suficientes para ocorrência da difusão (MACHADO, 2011; DINIZ, 2001; FERRARESI, 1970).

Por fim a oxidação se dá através da formação de óxidos, que posteriormente são arrancados, gerando o desgaste. Durante a usinagem, devido as altas temperaturas e

também à presença de água nos fluidos lubrificantes, formam-se filmes de óxidos que são porosos sobre a ferramenta. São esses óxidos que são arrancados pelo atrito da ferramenta com o material usinado. Esse tipo de desgaste se forma comumente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta, devido ao acesso de ar nessa interface (FERRARESI, 1970; DINIZ, 2001).

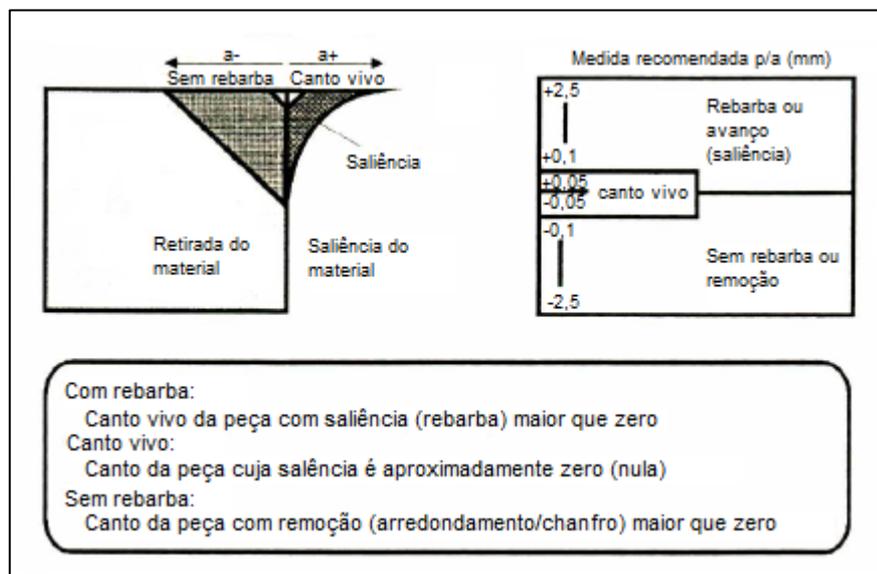
## 2.2 FORMAÇÃO DA REBARBA

Entende-se por rebarba a sobra de material usinado que fica nos cantos das peças usinadas. Existe uma gama de definições para explicá-la, pois podem ser de vários tipos e formatos diferentes, sendo formada nos diversos processos de fabricação (SOARES FILHO, 1995).

Comumente a rebarba é uma formação indesejável de um chanfro ocasionado pela fratura do material durante sua deformação, resultante do escoamento plástico na operação de corte ou cisalhamento (SUNG-LIM, 1989 apud SOARES FILHO, 1995).

A Figura 9 mostra como a norma DIN 6784 define a borda e rebarba nas peças.

Figura 9 – Definição de borda e rebarba segundo norma DIN 6784

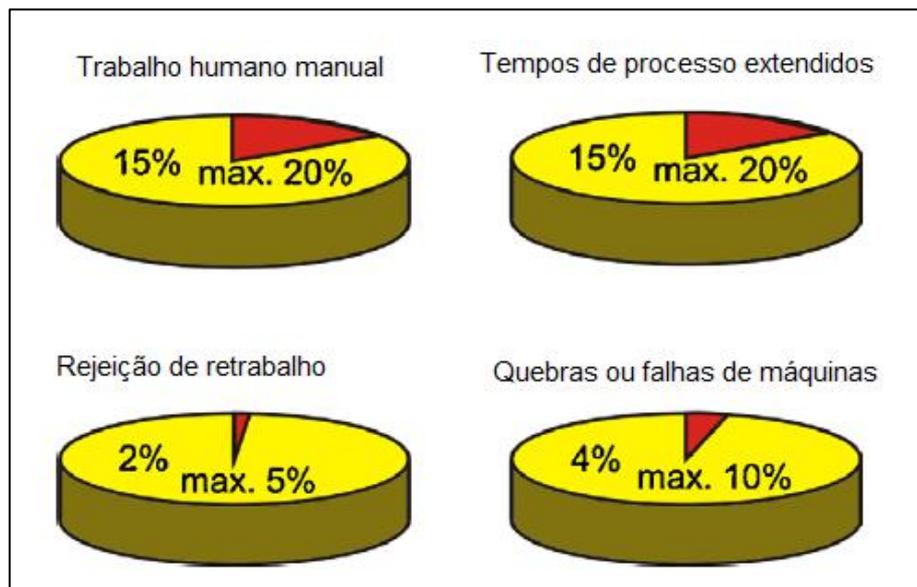


Fonte: Soares Filho (1995).

Ainda, a rebarba pode ser definida como sendo um corpo formado durante o processo de fabricação de uma peça, que se estende além da superfície dessa peça, possuindo um volume considerado pequeno se comparado com o volume da própria peça. Normalmente indesejada, porém em alguns casos inevitáveis (AURICH et al, 2009).

Percebe-se que nas várias definições de rebarba, o termo indesejável ou similares aparece com frequência. Isso porque a formação da rebarba pode ter efeitos negativos em um processo de fabricação, envolvendo retrabalho e, por consequência, gerar gastos. Bahçe e Özdemir (2019) dizem que as rebarbas podem gerar deformações nas margens das superfícies onde são formadas, impactando na montagem de conjuntos, bem como o decaimento de precisão dimensional. A Figura 10 mostra alguns impactos gerados pela rebarba em processo de fabricação.

Figura 10 – Esforços de manufatura causados por rebarba



Fonte: Adaptado de Aurich et al. (2009).

### 2.2.1 Classificações de rebarba

Além das várias definições, a rebarba possuem também variadas classificações que serão abordadas na sequência.

Tanto a formação da rebarba, quanto sua forma dependem diretamente do processo de fabricação e também de algumas propriedades do material usinado, como resistência a tração, limite de escoamento, alongamento e resistência ao cisalhamento. Dada a existência de variados processos, existem diversos grupos de rebarbas classificadas quanto ao processo de fabricação, sendo elas: rebarbas de processos de conformação; de processos de remoção, como eletroerosão por exemplo; rebarbas de soldagem; rebarbas de fundição e ainda rebarbas de processos de usinagem (PEREIRA, 2018; LINK, 1992 apud, SOARES FILHO, 1995).

Outra classificação possível de rebarbas é quanto ao mecanismo de formação. São divididas em quatro grupos, sendo todas de processos de usinagem: rebarba Poisson, rebarba Enrolada, rebarba Repuxada e rebarba de Corte (GILLESPIE, 1973; SOARES FILHO, 1995).

A Rebarba Poisson é assim chamada em referência ao coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), que explica a deformação lateral do material. E é isso que ocorre durante o corte. O material tende a criar saliências laterais quando em compressão até resultar na deformação plástica, gerando a rebarba (SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS, 1985 apud SOARES FILHO, 1995). Esse tipo de rebarba se forma em decorrência de alguns fatores principais: a alta pressão na superfície do flanco da ferramenta; a ocorrência do gume postiço, aumentando o tamanho do gume efetivo em relação ao original, aliada ao fato de o gume possuir um raio muito pequeno, fazendo com que o mesmo haja como se fosse um pequeno cilindro comprimido. Quando esse cilindro entra na peça, formam-se pequenas saliências nas bordas. A rebarba atingirá sua maior dimensão quando o raio for igual à espessura de usinagem e ela só se forma quando o gume se estende além da borda da peça a ser usinada (GILLESPIE, 1973; SOARES FILHO, 1995).

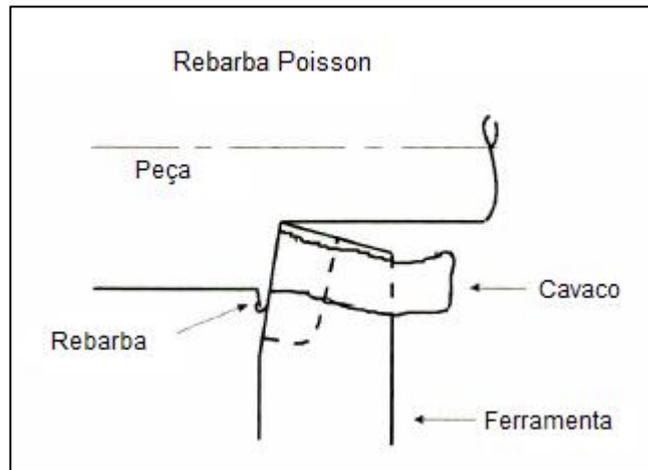
Já a Rebarba Enrolada nada mais é que um cavaco que não foi cortado, sendo empurrado e enrolado para fora da peça. Ocorre na saída da ferramenta de corte, sendo um dos mais visíveis tipos de rebarba existente, principalmente em operações em cuja força de corte atua sobre extremidade livre do cavaco ou da rebarba. Caso a deformação seja maior que a necessária para a fratura, a rebarba se romperá, restando apenas um pequeno fragmento da mesma aderido na peça (SOARES FILHO, 1995). Sung-Lim (1989) apud Soares Filho (1995) analisa esse tipo de rebarba observando usinagem de plasticina e Gillespie (1973) compara a materiais perfeitamente plásticos, propondo que essa rebarba se forme por cisalhamento e deformação plástica.

O tipo de Rebarba Repuxada é normalmente formado devido cisalhamento do material, semelhando a um rasgamento. Quando o dente da ferramenta passa, puxa o cavaco até que seja arrancado da peça. Como resultado, a porção de material que não se desprende e que ficou repuxada forma esse tipo de rebarba (GILLESPIE, 1973; SOARES FILHO, 1995).

Por último, a Rebarba de Corte é aquela formada na região que não foi cortada ainda e que une a peça à barra de aço que da origem a ela. É normalmente resultado de corte com serras ou quando a peça cai da barra, devido a gravidade, antes mesmo de a ferramenta terminar o corte. Esse tipo de rebarba também pode ser encontrado em operações de torneamento (GILLESPIE, 1973; SOARES FILHO, 1995).

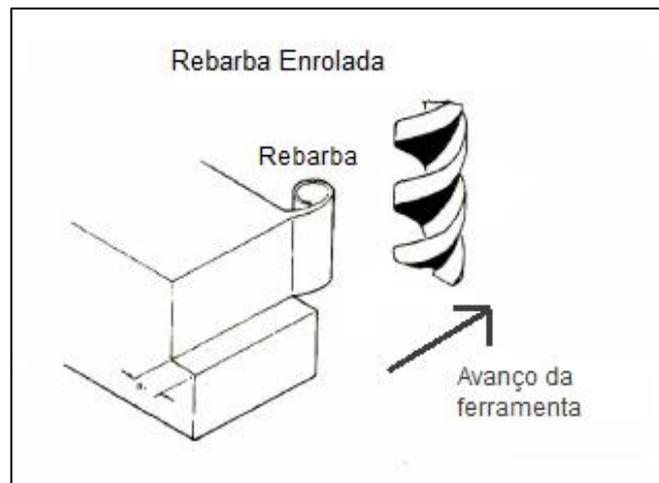
As Figuras 11, 12, 13 e 14, abaixo, mostram os quatro tipos de rebarbas citados, para se ter uma noção visual do formato das mesmas.

Figura 11 – Rebarba Poisson



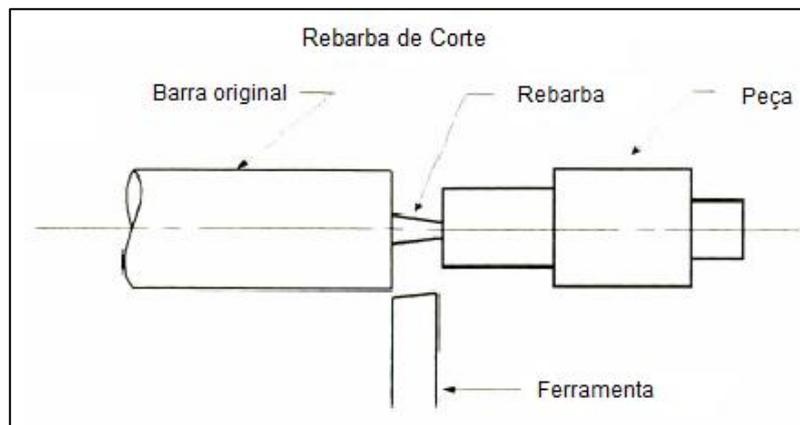
Fonte: Adaptado de Soares Filho (1995).

Figura 12 – Rebarba Enrolada



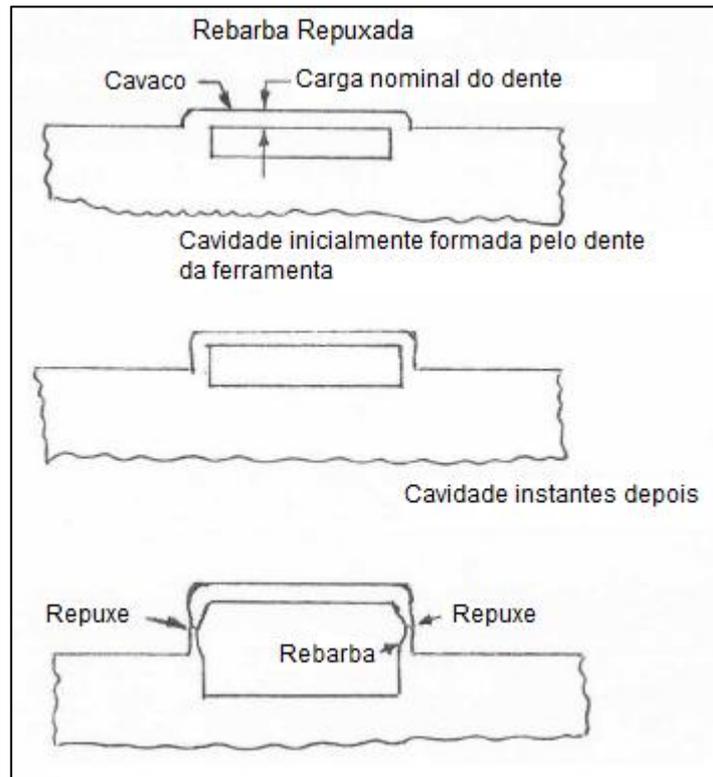
Fonte: Adaptado de Soares Filho (1995).

Figura 13 – Rebarba de Corte



Fonte: Adaptado de Soares Filho (1995).

Figura 14 – Rebarba Repuxada



Fonte: Adaptado de Gillespie (1973).

Ainda há mais uma forma de classificar rebarbas: segundo o modo e direção de formação. São quatro os tipos: rebarba escoada para frente, escoada para trás, escoada para a lateral e inclinada na direção de corte. Normalmente associa-se a entrada e a saída do estágio de corte com a orientação das rebarbas. A rebarba escoada para trás é associada à entrada e a escoada para frente à saída sendo, a entrada, o instante inicial da formação do cavaco no processo de corte. Alguns estudos mostram que a altura desses tipos de rebarba é muito pequena se comparada à profundidade da deformação plástica delas. Em se tratando das rebarbas inclinadas, essas são formadas em decorrência da flexão do material cortado, devido a força de avanço da ferramenta. Sua espessura depende diretamente da rigidez da peça e a altura da profundidade do corte. (NAKAYAMA; ARAI, 1987 apud. AURICH et al 2009; SUNG-LIM, 1989 apud. SOARES FILHO, 1995; NAKAYAMA; ARAI, 1987 apud. SOARES FILHO, 1995).

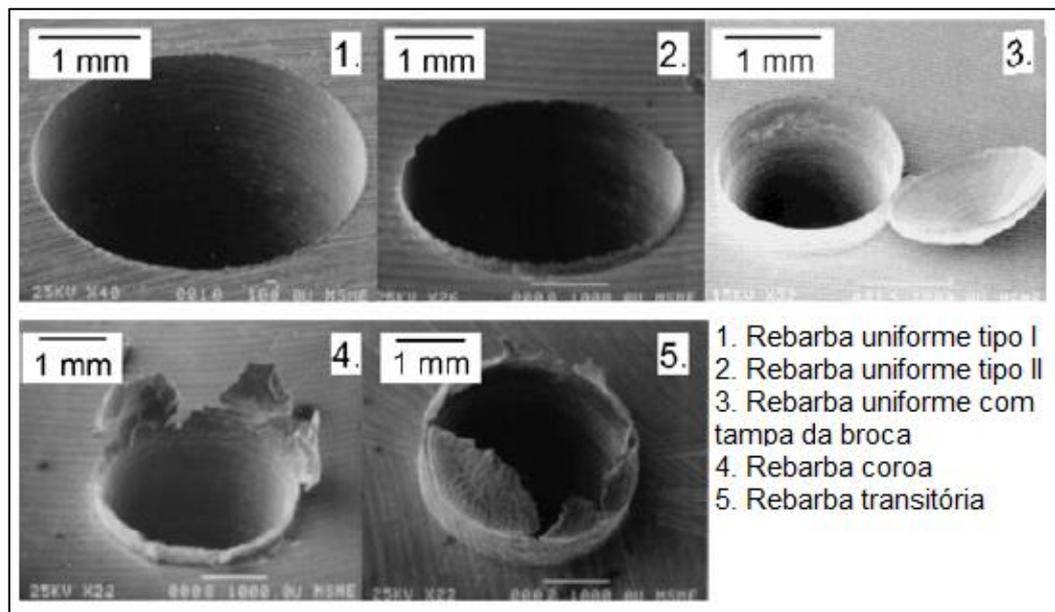
### 2.2.2 Rebarbas no processo de furação

As rebarbas formadas na entrada do furo podem ser resultantes de repuxes, uma ação de dobra seguida de cisalhamento puro ou extrusão lateral. Quando a broca é muito afiada, forma-se normalmente a rebarba do tipo Poisson, devido a fricção nas margens do furo.

(AURICH et al., 2009). Kim et al. (2001) separa as rebarbas de furação em algumas categorias, levando em conta o formato e o mecanismo de formação das mesmas. Para aços de baixa liga, são três os tipos de rebarba: uniforme (tipo I para pequenas e tipo II para grandes), transitória e tipo coroa. Para os aços inoxidáveis são dois tipos: uniforme (tipo I para pequenas e tipo II para grandes) e tipo coroa.

A Figura 15 mostra os tipos de rebarba categorizados acima.

Figura 15 – Tipos de rebarba de furação



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2001).

A formação de rebarba na furação também pode variar de acordo com o processo empregado. Há diferenças entre rebarbas em processos realizados com e sem pré-furo, por exemplo. O cavaco e as rebarbas da furação sem pré-furo, ou em cheio, são ligeiramente similares aos do processo de torneamento. O primeiro contato é realizado pelo gume transversal, que possui ângulo de saída negativo, como já foi visto. Com isso, o material é extrudado lateralmente, formando uma rebarba ascendente que posteriormente é removida pelo gume principal. Conjuntamente à penetração da broca, a rebarba é empurrada para as laterais da broca até que essa entre inteira na peça. Assim, na entrada do furo, fica uma rebarba que não é retirada pelas quinas da broca (SOARES FILHO, 1995).

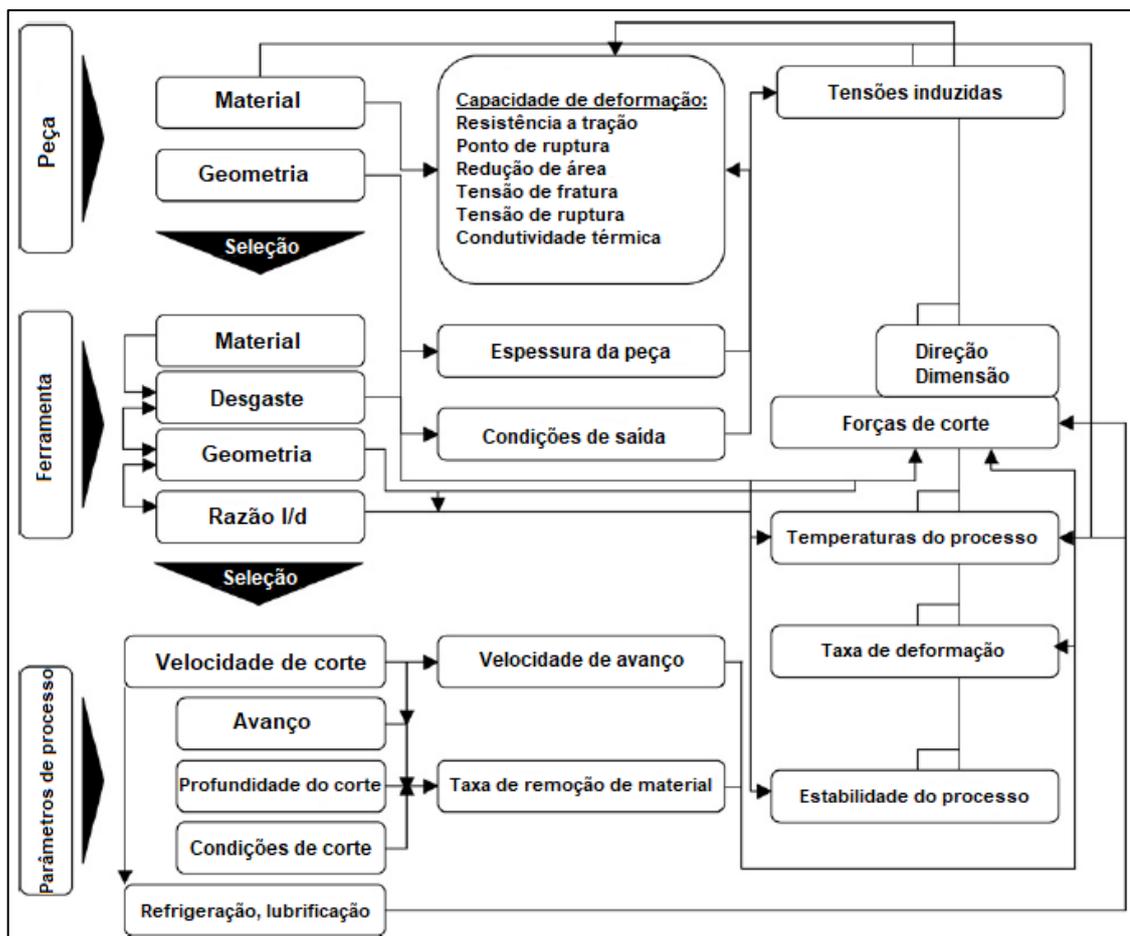
Há uma desigualdade grande entre rebarbas da entrada de furos comparadas as rebarbas da saída dos furos. Normalmente, as rebarbas geradas na saída tem dimensões maiores, sendo mais desiguais e até causando mais problemas. Na medida que a broca se aproxima da saída do furo, ocorre uma deformação plástica do material ligeiramente acima da ponta da broca. As extremidades dos gumes principais da ferramenta se encontram mais distantes da saída do furo, ocorrendo normalmente a usinagem sem deformações ou outros

fenômenos. Ao avançar, se aproximando da saída do furo, trincas começam a se formar no material. Ocorre então, a saída da ponta da broca, seguida do destacamento de uma tampa no centro do furo, já que enquanto a ponta da broca saía, o gume principal ainda cumpria sua função. Nesse momento, o material na lateral do furo é deformado, gerando uma rebarba com formato e dimensões que variam conforme as especificações do material (SOFRONAS, 1975; SOARES FILHO, 1995).

Já a furação com pré-furo pode ter algumas outras variáveis. São três as opções: a rebarba gerada na pré-furação pode não ser retirada ao final da operação, gerando assim uma rebarba de dimensões maiores que no processo sem pré-furo.; a rebarba obtida na pré-furação é retirada, entretanto com os esforços menores, resta uma pequena rebarba ou, também devido aos menores esforços e a menor área de corte, as quinas da broca não influenciam, deixando uma rebarba similar ao da furação em cheio (LINK, 1992 apud SOARES FILHO, 1995).

Abaixo, a Figura 16 mostra todos os fatores que interferem na geração de uma rebarba.

Figura 16 – Fatores que interferem na formação da rebarba



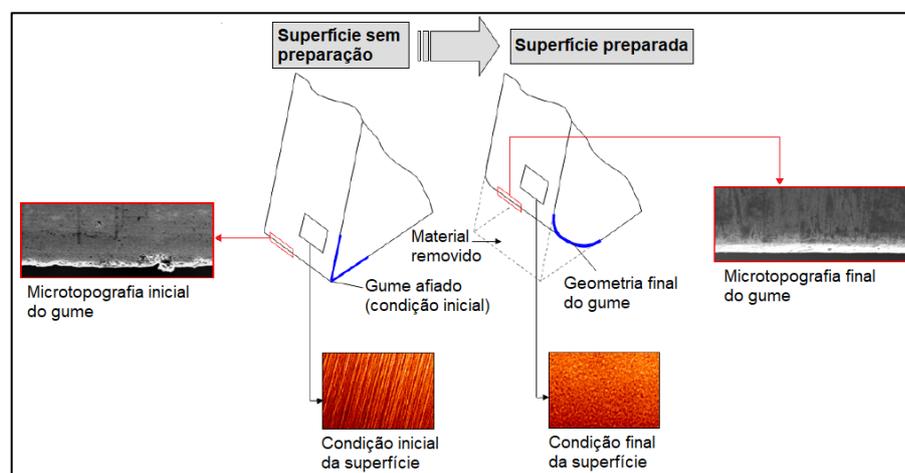
A Figura 16 deixa claro que existe uma infinidade de fatores que podem impactar na formação da rebarba em um processo de usinagem. Por isso, constantemente se buscam alternativas para se evitar, reduzir ou retirar a rebarba na fabricação. Gillespie (1979) modela simplificada o processo de rebarbação de uma peça, acrescentando ainda que esse modelo é muito simplista, pois não leva em conta muitos fatores que serão abordados abaixo.

Rebarbas podem variar de peça para peça, de superfície para superfície e sua localização e tamanho define o processo que deve ser utilizado para a sua retirada da peça. Quanto maior for a rebarba, mais agressivo é o processo para a retirada e mais impactos causa à própria peça, com retirada de pequenos fragmentos de material dela, na casa de 7 a 25  $\mu\text{m}$  (GILLESPIE, 1979).

### 2.3 PROCESSOS DE TRATAMENTO DA SUPERFÍCIE DE GUMES

Uma alternativa possível para melhorar os processos de corte são os tratamentos de gumes das ferramentas. Esses processos visam modificar a micro topografia e gerar uma geometria no gume, alterando alguns aspectos da ferramenta, como rugosidade na face de corte. Esse tipo de tratamento traz alguns resultados positivos no produto final do processo de usinagem, como redução de defeitos, melhora no desempenho e confiabilidade da ferramenta, bem como a própria qualidade das peças após a usinagem. A estabilidade do corte também melhora com o tratamento do gume, além de haver uma redução nos lascamentos da ferramenta, devido ao arredondamento criado. Isso pode impactar no aumento da vida da ferramenta e preparar sua superfície para que receba revestimentos, algo muito comum e que traz bastante qualidade ao processo (RODRIGUEZ, 2009; BIERMANN e TERWEY, 2008; BOUZAKIS et al., 2009).

Figura 17 – Diferenças na microtopografia de ferramentas tratadas e não tratadas



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2009).

Biermann e Terwey (2008) afirmam ainda que, em comparação com as ferramentas que recebem preparo no gume, as ferramentas que não recebem nenhum tipo de tratamento, com elevadas forças dos processos, tendem a ter mais deformações plásticas. Essas podem ser consideradas como falhas iniciais no processo, levando a outras consequências. Rodriguez (2009) ilustra, na Figura 17, a diferença de microtopografia de uma ferramenta preparada para uma não preparada.

Os tratamentos dos gumes das ferramentas ganharam muito espaço na indústria de ferramentas nos últimos anos, principalmente com a finalidade de aplicação de revestimentos nas ferramentas. Entretanto, outras vantagens são observadas, além do preparo para receber revestimentos. Dentre elas está o processo conhecido como texturização da superfície, que permite a criação de microgeometrias na superfície da ferramenta (HUANG et al., 2012).

Há uma relação de variados processos que podem ser aplicados para a obtenção de geometrias em ferramentas. Com a modificação das superfícies e remoção de material, se consegue chegar a geometria desejada, atingindo também a topografia ideal. Deve-se, contudo, levar uma série de fatores em conta para decidir qual a geometria mais adequada a ser escolhida. Necessita-se fazer uma análise das condições iniciais do gume da ferramenta, bem como a aplicação, levantando dados de processo, parâmetros de processo, material da peça, revestimento da ferramenta, entre outros aspectos de microssinagem (RODRIGUEZ, 2009). Abaixo serão abordados três dos principais processos de tratamento de gumes de ferramentas.

### **2.3.1 Jateamento microabrasivo**

O processo de jateamento microabrasivo se utiliza de partículas microabrasivas e ar comprimido, aliados ao fenômeno da erosão para preparar o gume da ferramenta. Essa é fixa em uma mesa, que se move em duas direções, controlada numericamente. O bocal por onde sai o jato é posicionado logo acima da ferramenta, sendo possível controlar tanto a distância do bocal para a ferramenta, bem como sua inclinação em relação ao plano da mesa. O jato abrasivo é então liberado por uma válvula, atingindo a superfície da ferramenta. Vale ressaltar que há um posicionamento simétrico a ser respeitado para garantir que se obtenha a mesma geometria em ambos os lados da ferramenta (RODRIGUEZ, 2009).

### **2.3.2 Escovamento e polimento**

Esse processo se utiliza de uma escova de filamentos feitos de fibras naturais, com o auxílio de pasta de polimento que contém partículas de diamante. A ferramenta é fixada em

uma mesa, com movimento lateral. Logo acima da ferramenta, alinhada com o gume a ser preparado, é fixada a escova em uma coluna com ajuste de altura, permitindo que se regule a penetração dos filamentos da fibra, que normalmente são de 25 mm de comprimento, no gume da ferramenta. Essa escova é conectada a um motor, para que rotacione, entre 150 e 600 rpm. Nesse processo, também há o alinhamento simétrico, com a finalidade de se obter simetria na geometria final da superfície de corte, além da alternância da direção de rotação da escova.

### **2.3.3 Escovamento com filamentos de nylon**

Uma escova de filamentos de nylon e partículas abrasivas como óxido de alumínio, carboneto de silício, nitreto de boro e diamante, é fixada horizontalmente em um motor, para garantir sua rotação. A ferramenta é fixa em uma mesa que se move em duas direções, para controle da penetração dos filamentos da escova na superfície a ser preparada. Há a alternância do sentido de rotação durante o processo, bem como a simetria, similarmente aos outros processos citados, garantindo igualdade de geometria do gume.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem por finalidade apresentar o processo de polimento com esponja abrasiva, os materiais e equipamentos utilizados para a realização do experimento, bem como a ferramenta de análise estatística. O experimento foi conduzido em conjunto com a empresa Eaton LTDA e o Grupo de Usinagem da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

A ideia principal dos experimentos foi a aplicação do processo de polimento com esponja de cerdas abrasivas em três brocas, partindo do gume destas e seguindo o canal das mesmas para comparar avaliar as diferenças em relação ao desgaste dessas ferramentas e o impacto na altura das rebarbas geradas por essas brocas ao final do processo de furação. Vale lembrar que as brocas são utilizadas para realizar o pré-furo, que posteriormente é alargado por uma fresa de topo. A avaliação dessas diferenças se deu com base na comparação dos resultados obtidos com a utilização das brocas polidas em relação as brocas padrão de fábrica, atualmente utilizadas no processo fabril.

Elencaram-se parâmetros de maior utilização da empresa Eaton LTDA para a realização das furações. Após a definição destes parâmetros, foi aplicado o polimento abrasivo em três das seis brocas utilizadas nos experimentos, a fim de se obter dois grupos de ferramentas em condições diferentes para comparar os resultados. Após a preparação das ferramentas, foram realizadas as furações em um lote de uma peça de produção corrente da empresa. A usinagem das peças foi realizada adequando-se ao cronograma de produção da manufatura, bem como ao tamanho do lote de peças, otimizando os ensaios para a coleta de dados e sua posterior análise, sem haver influência ou impacto na produção da empresa. Simultaneamente a usinagem, foi sendo realizado o acompanhamento do desgaste das brocas e as medições de rebarbas geradas no processo. As especificações de materiais e ferramentas utilizados, bem como os equipamentos e métodos de análise estatística são descritos ao longo deste capítulo. O Quadro 2 mostra o planejamento de produção e da sequência dos ensaios.

Quadro 2 – Planejamento e sequência dos ensaios

Broca	Condição da Ferramenta	Período de Usinagem
1	Polida	27/11/2020 e 30/11/2020 – 2 turnos por dia
2	Polida	27/11/2020 e 30/11/2020 – 2 turnos por dia
3	Polida	01/12/2020 e 02/12/2020 – 2 turnos por dia
4	Padrão	01/12/2020 e 02/12/2020 – 2 turnos por dia
5	Padrão	03/12/2020 e 04/12/2020 – 2 turnos por dia
6	Padrão	03/12/2020 e 04/12/2020 – 2 turnos por dia

Fonte: O autor, (2020).

### 3.1 MATERIAIS

Conforme necessidades da empresa e para tornar possível a análise e comparação proposta por este trabalho, foi utilizada uma engrenagem de produção da empresa Eaton LTDA, tornando possível analisar os resultados e os impactos diretamente na produção da fábrica. A Figura 18 mostra a engrenagem utilizada na realização dos experimentos. A peça em questão é produzida a partir do aço SAE 4140 H laminado, de bitola 69,85 mm que passa pelo processo de forjamento antes de chegar a usinagem.

Figura 18 – Engrenagem

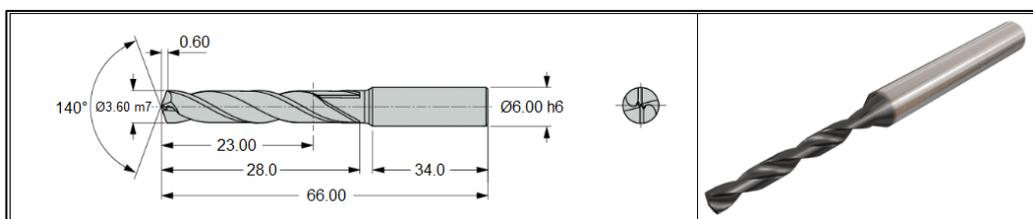


Fonte: O autor, (2020).

### 3.2 FERRAMENTAS

Para os ensaios propostos pelo presente trabalho, foi utilizada a broca de modelo SCD 036-023-060 AP5 IC908. Fabricada em metal duro, possui revestimento de AlCrN. Três ferramentas passaram pelo processo de polimento com esponja de cerdas abrasivas, a fim alterar a microgeometria. Outras três brocas foram usadas em sua condição padrão de fábrica. Abaixo seguem as especificações do modelo de broca utilizada nos ensaios, apresentadas na Figura 19.

Figura 19 – Dados da ferramenta



Fonte: Adaptado de ISCAR, (2020).

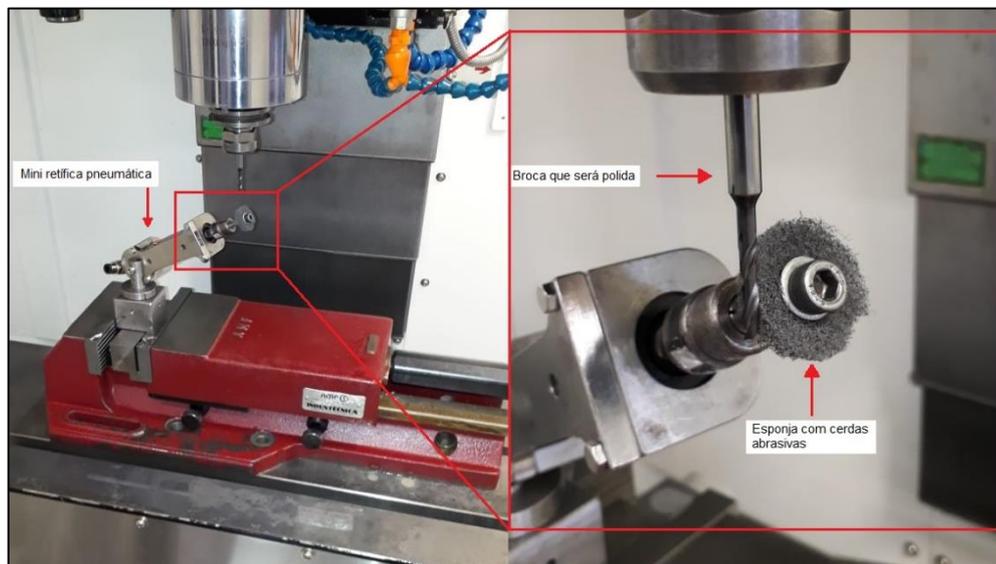
### 3.2.1 Processo de polimento com esponja de cerdas abrasivas

Esse processo foi realizado nas dependências da Universidade de Caxias do Sul, com o uso de uma mídia abrasiva, acoplada a uma mini retífica manual pneumática, de marca Campbell Hausfeld, que opera a 4 bar de pressão, com rotação de 10.000 rpm.

A ferramenta foi fixada no centro de usinagem CNC de marca Hartford, modelo LG-500 que se localiza no laboratório de usinagem da Universidade de Caxias do Sul e retífica foi fixada na mesa do mesmo através de um dispositivo acoplado a morsa, sendo posicionada de forma com que a escova abrasiva fique orientada de acordo com os canais da broca. Através de um programa CNC, a ferramenta faz um movimento vertical combinado com rotação, permitindo que o polimento seja aplicado ao logo do canal da mesma, além do gume, com a finalidade de prepará-lo. O processo dura 45 segundos, nos quais são realizados 4 passes em cada canal da ferramenta.

Esse tipo de polimento é muito similar ao processo de escovamento com filamentos de nylon, pois quando há o desgaste da esponja, filamentos abrasivos novos são revelados, mantendo assim, uma abrasividade constante. A Figura 20 abaixo mostra o processo de polimento com esponja abrasiva.

Figura 20 – Processo de polimento com esponja abrasiva



Fonte: O autor, (2020).

A principal alteração que esse polimento causa nas ferramentas encontra-se no arredondamento do gume de corte, assim como a preparação também da superfície de saída do cavaco, abordados no capítulo 2 do presente trabalho. Essas são as principais diferenças entre os dois grupos de ferramentas utilizados nos experimentos.

### 3.3 EQUIPAMENTOS

A máquina utilizada nos ensaios foi um Centro de Usinagem Vertical Romi, modelo Discovery 760, que se encontra nas instalações da Eaton LTDA, na área de usinagem. Devido ao limite de rotação do centro de usinagem ser 7.000 rpm, como parâmetros é utilizada uma velocidade de corte igual a 75 m/min, com um avanço por gume de 0,030 mm.

A textura bidimensional das brocas após o polimento foi observada através de um Estereoscópio Trinocular (Microscópio Ótico) de marca Entex, modelo TNE-10B que se encontra nas dependências da Universidade de Caxias do Sul. As imagens são obtidas através do software ScopePhoto, disponível no equipamento para que seja possível observar as ferramentas.

Após os testes de usinagem, a geração da rebarba foi medida em um perfilômetro da marca Taylor-Hobson, modelo Form Talysurf Series 2, localizado no laboratório da área de qualidade da Eaton.

O desgaste da ferramenta foi medido na máquina presetter de marca Zoller, modelo Smile 420 Pilot 3.0, disponível na área da gestão de ferramental da Eaton. A Figura 24 mostra a máquina referida.

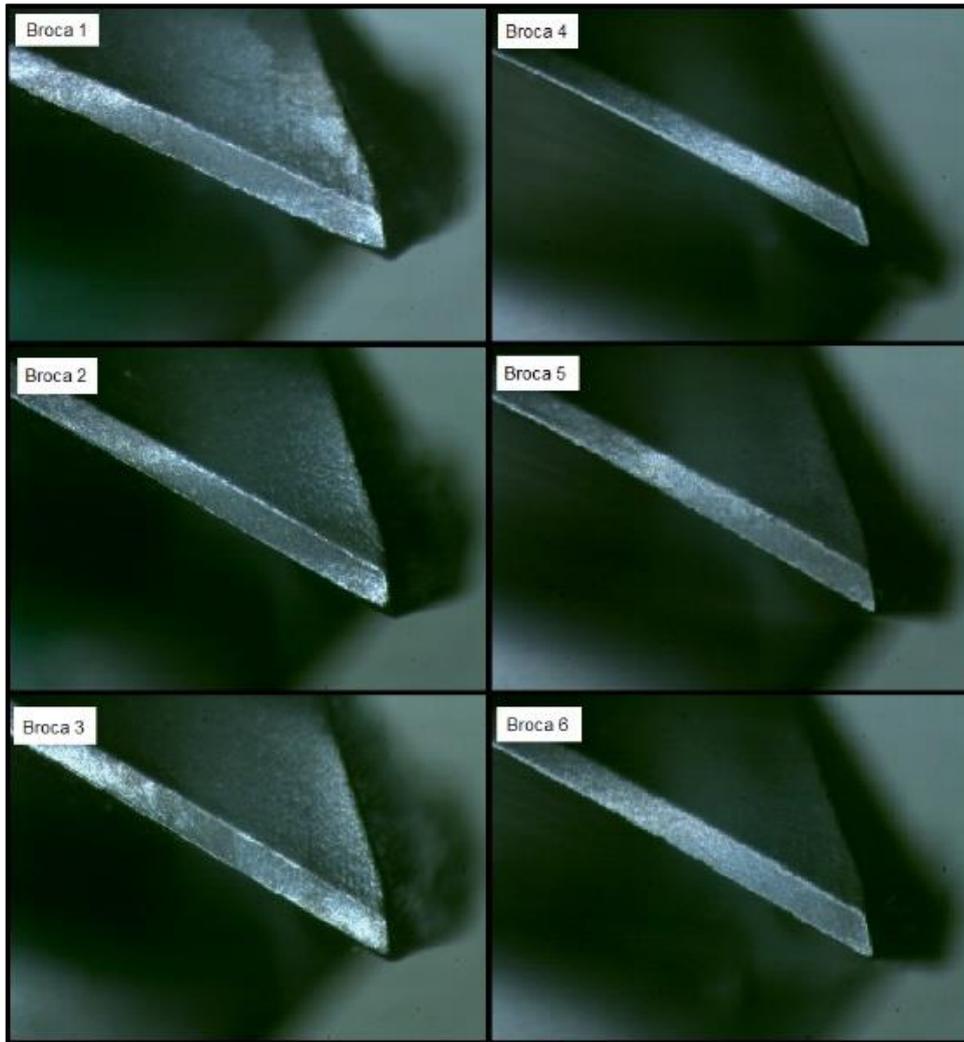
As imagens de todos os equipamentos citados acima além das máquinas utilizadas na aplicação do polimento nas brocas podem ser visualizadas no Apêndice B deste trabalho, representadas pelas Figuras 30 a 34.

### 3.4 MÉTODOS E ESTRATÉGIAS

#### 3.4.1 Estratégia de Usinagem

O experimento começou com a aplicação do processo de polimento com esponja de cerdas abrasivas em três das seis brocas disponíveis, processo este, realizado nas dependências da UCS, no Laboratório de Usinagem. Vale ressaltar que todas as brocas utilizadas no experimento foram compradas pela Eaton LTDA, sendo ao final dos ensaios, devolvidas à área de gestão de ferramental para serem utilizadas posteriormente. A Figura 21 mostra todas as brocas, sendo que as brocas 1, 2 e 3 passaram pelo processo de polimento (perceptível pelo leve arredondamento do gume da ferramenta) e as brocas 4, 5 e 6 que permaneceram em seu estado padrão. Após a aplicação do polimento, as brocas foram levadas à empresa para que se desse início nos processos de usinagem e medições que serão explicados a seguir.

Figura 21 – Brocas utilizadas nos ensaios



Fonte: O autor, (2020).

Um ponto importante a se ressaltar é que as brocas em questão fazem um pré-furo de diâmetro 3,6 mm posteriormente alargado por uma fresa de topo de diâmetro 4 mm. Esse sistema com a fresa foi implementado recentemente como melhoria de processo a fim de reduzir as rebarbas geradas no processo, já que as mesmas são removidas por uma lixadeira em uma operação posterior a furação, no centro de usinagem. Ainda assim é necessária uma operação manual de rebarbação com uma retífica pneumática e uma lixadeira, resultando em problemas ergonômicos aos operadores.

O processo de furação se dá da seguinte forma: a engrenagem é fixada verticalmente no centro de usinagem; a broca então, realiza os 24 furos localizados entre os dentes da peça, um a um; posteriormente, a fresa de topo alarga cada um dos furos para que se atinja o diâmetro final necessário. As rebarbas medidas se encontram na saída dos furos, na parte interna da peça.

A estratégia de execução montada para os ensaios foi planejada conjuntamente com as áreas de manufatura, centro de ferramentas, qualidade e engenharia de fabricação da empresa, buscando o mínimo impacto na rotina de produção. A manufatura informou suas necessidades e então foi montado o plano de trabalho, levando em conta informações de processo, alinhadas à disponibilidade da área da qualidade para a realização das medições das rebarbas geradas e da área de gestão de ferramental para o acompanhamento do desgaste da ferramenta. Foram utilizados 6 dias de produção ao todo, sendo a cada dois dias utilizado um par de brocas e uma fresa de topo nova, para garantir que todas as brocas começassem os experimentos nas mesmas condições.

Para o monitoramento dos experimentos, definiu-se medir a rebarba de um dos 24 furos de cada peça, aleatoriamente. Essa foi uma alternativa a ideia inicial de se medir o último furo das peças para não haver impactos na produção, pois seriam necessárias alterações de programa de máquina. Foram medidas, para cada broca, os desgastes e a rebarba de cada primeira peça fabricada com as ferramentas e, posteriormente, as medições foram sendo repetidas a cada 5 unidades produzidas. As peças foram sendo segregadas sem passar pela operação de rebarbação com a lixadeira para garantir a correta medição do impacto do preparo do gume da ferramenta no processo de rebarbação com a fresa de topo. Além disso, a cada segregação de peça, as brocas foram sendo alternadas com o respectivo par, garantindo a medição do desgaste das mesmas.

Inicialmente foram definidos também critérios de fim de teste (desgaste de flanco máximo  $V_{b \text{ máx}} = 0,2$  mm e rebarba gerada de 0,050 mm) que não foram considerados devido a adequação dos experimentos ao cronograma e planejamento de produção da empresa. Portanto, cada broca usinou 70 peças ao todo, totalizando 1.680 furos por ferramenta. A única exceção foi a broca de número 6 que quebrou durante os experimentos. Esta usinou 55 peças antes da falha. A provável causa da quebra foi uma falha operacional, ocorrida no segundo turno do último dia de ensaios.

### **3.4.2 Estratégia de Análise de Resultados**

O desgaste das ferramentas foi medido com o auxílio da máquina presseter Zoller, modelo Smile 420 Pilot 3.0. Por questões de segurança da informação, alguns acessos são bloqueados pelo time de Tecnologia da Informação da Eaton LTDA, não sendo possível salvar as imagens em pen drives ou enviá-las por meios eletrônicos. A alternativa foi capturar imagens da tela da máquina, garantindo a visualização correta do desgaste da ferramenta e anotando valores encontrados. A técnica para obtenção desses dados é muito similar a utilizada na UCS, sendo traçada uma linha na superfície do gume e outra ao final do desgaste

identificado visualmente. Posteriormente é medida a distância entre essas retas para obter o valor de desgaste.

As rebarbas nos furos foram medidas com o auxílio do perfilômetro Taylor-Hobson, modelo Form Talysurf Series 2. As medições foram realizadas na saída dos furos, na parte interna da engrenagem ilustrada na Figura 18. Todas as medidas foram realizadas da mesma forma, sendo posicionada a peça verticalmente na mesa da máquina orientada perpendicularmente ao movimento do perfilômetro. É muito comum a realização desse tipo de medição seguindo este formato, pois as rebarbas normalmente apresentam um comportamento uniforme ao longo de toda a superfície de saída do furo. Entretanto, é importante ressaltar que, caso seja necessária a avaliação aprofundada do perfil das rebarbas, é necessário realizar medições de altura das mesmas ao longo de toda a circunferência do furo. Há a possibilidade de haver variações, porém para o presente trabalho, a realização das medições seguindo a mesma orientação gera dados suficientes para a análise proposta.

Também vale ressaltar que por questões de segurança da informação, não foi possível obter todos os relatórios de medição dos ensaios, sendo apenas uma unidade gerada para exemplificar a técnica de medição, observado no Apêndice A. Foi medida a altura da rebarba da saída dos furos analisando a distância do perfil da superfície interna da peça até o topo da rebarba.

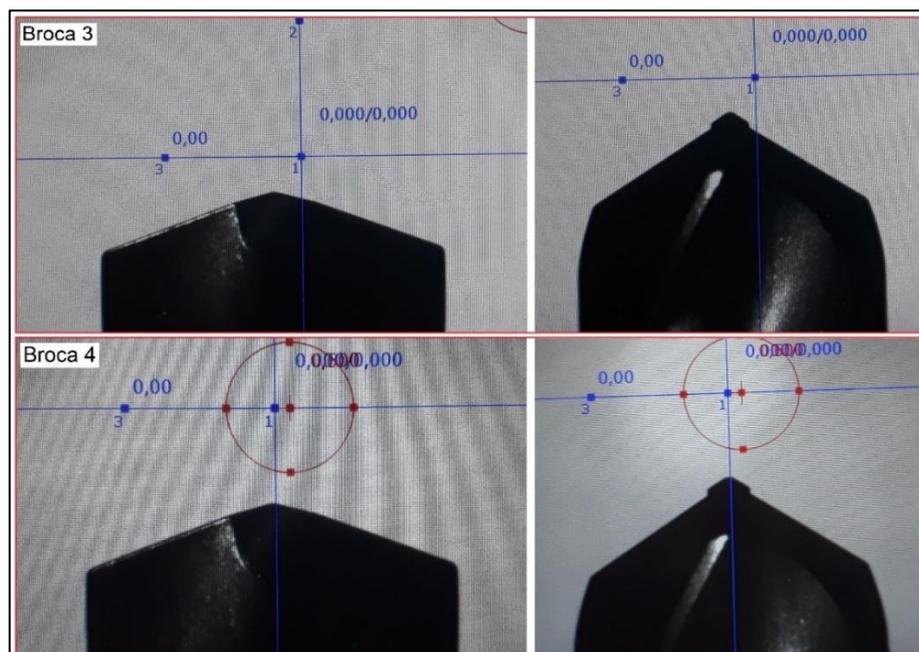
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem a finalidade de apresentar os resultados e discussões referentes ao efeito do polimento abrasivo aplicado no desgaste das brocas e na geração de rebarba no processo da furação. Os resultados são apresentados em forma de comparação entre os valores obtidos nas ferramentas com polimento abrasivo e padrão de fábrica, para que sejam evidenciadas diferenças ou mesmo igualdades de comportamento após a aplicação do tratamento superficial. Os dados obtidos foram avaliados e compilados para a confecção de gráficos, tabelas e imagens que descrevem e representam o comportamento das ferramentas durante a usinagem, do ponto de vista do desgaste bem como as rebarbas geradas no processo da furação.

### 4.1 DESGASTE DA FERRAMENTA

Durante a execução dos ensaios experimentais foi avaliado que seriam realizadas medições de desgaste das brocas a cada cinco peças produzidas, conforme descrito no capítulo anterior. Foi observada presença de alguns mecanismos causadores de desgaste e não desgaste significativo. Devido ao fato de serem desgastes muito pequenos, na grandeza do raio das ferramentas, seus valores não foram utilizados para comparações. Abaixo, a Figura 22 e a Figura 23 mostram as imagens das brocas 3 e 4, respectivamente, no início e final dos experimentos.

Figura 22 – Brocas 3 e 4 no início dos testes

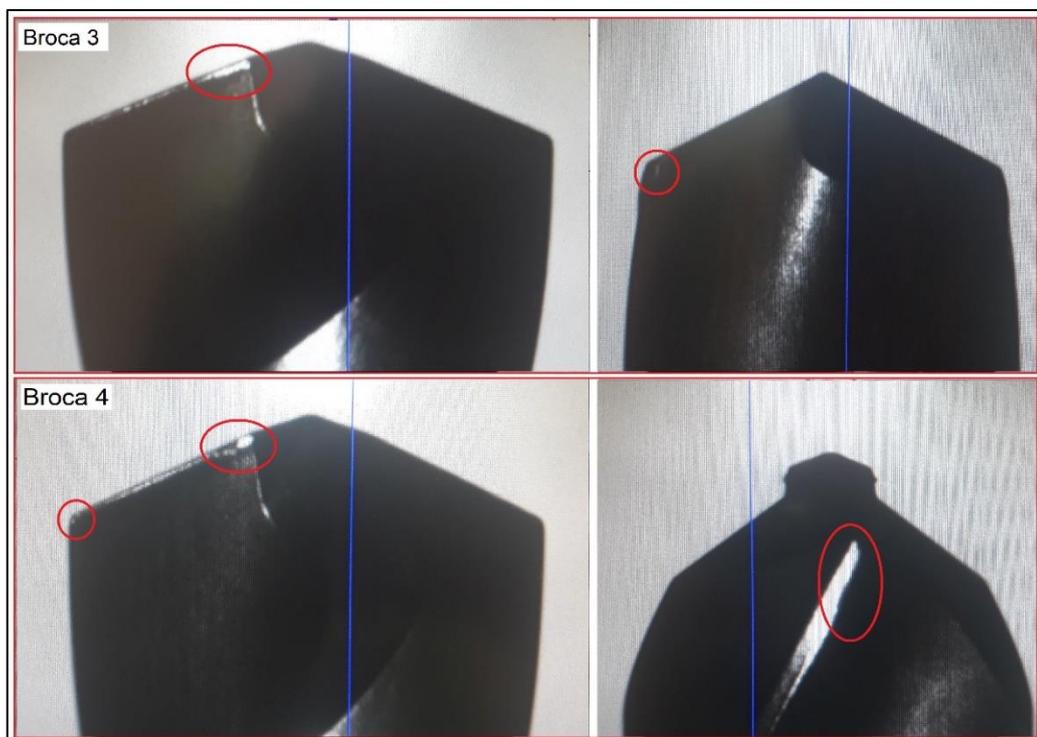


Fonte: O autor, (2020).

A broca de número 3 passou pelo processo de polimento abrasivo e a broca de número 4 foi utilizada em seu estado padrão de fábrica. Vale lembrar que por conta de segurança da informação da empresa, não foi possível obter imagens diretas da máquina, por essa ter alguns acessos bloqueados.

Na Figura 23, comparando as ferramentas, observa-se que há a existência de adesão em ambas as brocas, destacado em vermelho na imagem. Além disso, observa-se a presença inicial de uma abrasão na guia da broca 4, mais aparente se comparado com a broca de número 3, também destacado.

Figura 23 – Brocas 3 e 4 ao final dos testes



Fonte: O autor, (2020).

A adesão se dá quando duas superfícies metálicas são colocadas em contato, formando entre elas um extrato metálico de resistência elevada que, quando ocorrer a separação dessas superfícies, há um rompimento na superfície de um dos metais e não na superfície de contato entre os dois metais. Desse modo, partículas de um dos metais migram para a superfície do outro (MACHADO, 2011; DINIZ, 2001; FERRARESI, 1970). Partículas da ferramenta se aderiram ao cavaco. Pode-se observar na Figura 27 que nas regiões do gume da ferramenta, destacadas em vermelho, ocorreu a adesão.

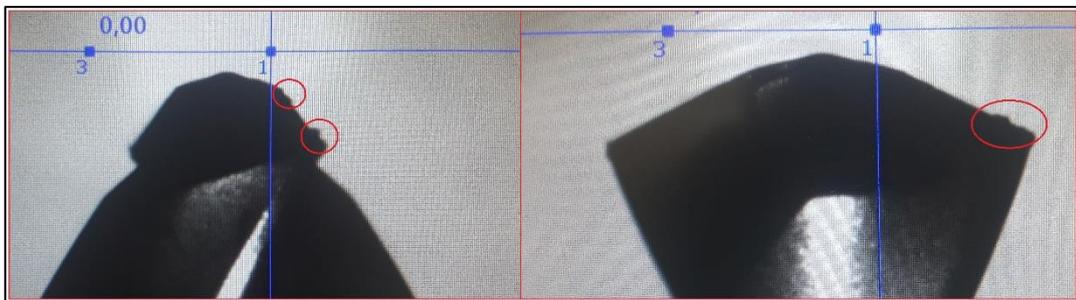
Observa-se ainda uma maior presença de adesão localizada próxima ao gume transversal das brocas. Esse comportamento pode estar relacionado às características de formação de cavaco do processo de furação. Como há velocidades diferentes ao longo do

gume da ferramenta, esforços podem ter sido concentrados nessa região, ocasionando esse comportamento (ZEILMANN et al., 2011).

Além disso, sabe-se que as velocidades no processo de furação variam conforme o raio da ferramenta. Quanto mais próximo do gume transversal da mesma, menor é a velocidade e quanto mais próximo da quina da mesma, maior será a velocidade. E isso é um dos principais fatores que incentivam o aparecimento de adesão em ferramentas, pois ela normalmente se dá em velocidades mais baixas. O desgaste de flanco é o principal tipo de desgaste causado pela abrasão (MACHADO, 2011; DINIZ, 2001).

Durante a execução dos ensaios, foi observada a presença de material aderido ao gume das ferramentas, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Material aderido no gume das ferramentas



Fonte: O autor, (2020).

Como já foi visto, a adesão é um mecanismo que ocorre em baixas velocidades. Entretanto, quando há material aderido na superfície de saída da ferramenta, o fluxo de material, neste caso, de cavaco, se torna irregular e isso é um fator importantíssimo pois pode influenciar a ocorrência de adesão também em velocidades de corte mais altas e também incentivar a aparição de outros mecanismos causadores de desgaste (MACHADO, 2011).

Ainda analisando a Figura 23, percebe-se que há a ocorrência de abrasão na guia das ferramentas. Esse mecanismo de desgaste é bem observado na imagem da broca de número 4. A presença desse mecanismo nas guias da ferramenta é um comportamento esperado, uma vez que durante a furação, a ferramenta é submetida a três principais forças: no gume principal, causada pela rotação; no gume transversal, causada por compressão e o atrito das guias nas paredes do furo (DINIZ, 2011; STEMMER, 1995).

Esse tipo de fenômeno se origina devido ao aumento de resistência ao deslizamento causado pela forma de contato da ferramenta com o material. Além disso, depende diretamente das durezas da ferramenta e material, bem como a distribuição de microimpurezas duras no material e seus estados de encruamento (FERRARESI, 1970)

Diniz (2001) e Machado (2011) acrescentam ainda que a abrasão ocorre devido a presença de partículas com dureza mais elevada, advindas do material, do cavaco ou até da

própria ferramenta. Essas partículas podem estar soltas entre as superfícies em contato, sendo este tipo classificado como abrasão de três corpos. Se as partículas duras se desprenderem de uma das superfícies em contato, é classificada como abrasão de dois corpos. As principais consequências desse mecanismo de desgaste são deformações plásticas e fraturas frágeis, havendo perda ou deslocamento de material por microlascamentos.

#### 4.2 REBARBAS GERADAS

Para avaliar se mudança da microgeometria da broca teve efeito na geração de rebarbas após o alargamento dos furos foram realizadas medições a cada cinco peças produzidas, sendo essas segregadas antes de passar pela operação de lixamento em centro de usinagem, mencionada no capítulo anterior.

A Tabela 2 mostra os valores de altura das rebarbas encontrados para cada broca a cada peça produzida e sua evolução durante os experimentos. Posteriormente, a Figura 25 mostra a representação gráfica dos valores médios de rebarba para que se possa comparar o comportamento das ferramentas comparando o grupo de brocas polidas com o grupo de brocas padrão de fábrica.

Tabela 2 – Rebarbas geradas

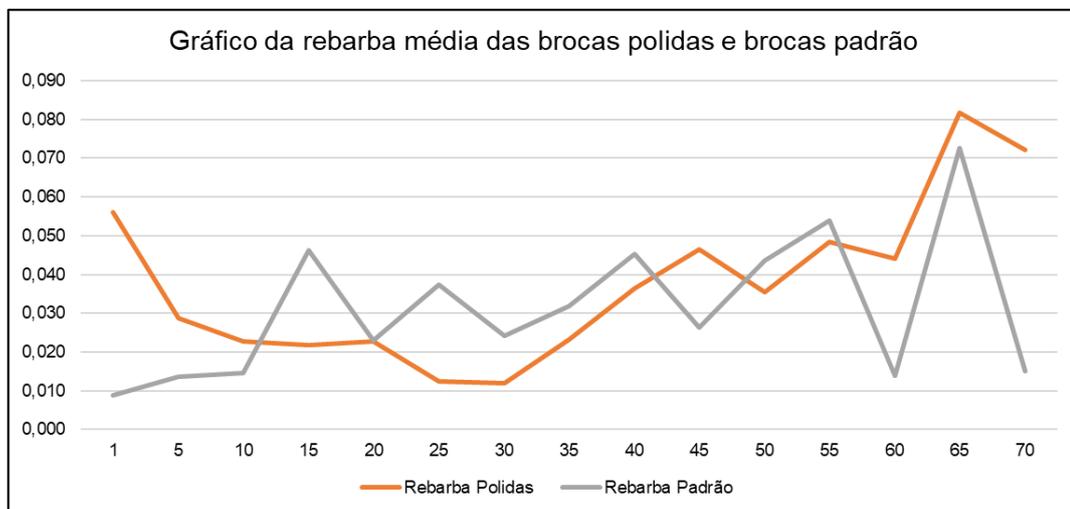
Peça produzida	Altura das rebarbas (mm)					
	Broca 1	Broca 2	Broca 3	Broca 4	Broca 5	Broca 6
1	0,139	0,0131	0,0161	0,00694	0,0149	0,00436
5	0,0118	0,0182	0,0560	0,0208	0,0113	0,0088
10	0,0235	0,0283	0,0165	0,0191	0,0133	0,0115
15	0,0150	0,0414	0,00911	0,100	0,0270	0,0120
20	0,0216	0,0132	0,0337	0,0225	0,0335	0,0133
25	0,00796	0,0109	0,0184	0,0938	0,00307	0,0149
30	0,0152	0,0158	0,0052	0,0140	0,0324	0,0258
35	0,0247	0,0284	0,0164	0,0203	0,0358	0,0394
40	0,0616	0,0307	0,0171	0,0262	0,0364	0,0731
45	0,0457	0,0708	0,0231	0,0361	0,0293	0,0137
50	0,0397	0,0577	0,0088	0,0195	0,0125	0,0985
55	0,0599	0,0786	0,0067	0,0415	0,0503	0,0697
60	0,0391	0,0759	0,0174	0,00361	0,0241	
65	0,0868	0,128	0,0304	0,0303	0,115	
70	0,0955	0,0803	0,0407	0,00892	0,0211	

Fonte: O autor, (2020).

Os valores de altura das rebarbas apresentados acima foram gerados através da medição dessas rebarbas no perfilômetro seguindo a metodologia citada na seção 3.4.2 deste trabalho. A coluna da esquerda da tabela informa de qual peça produzida foi extraído o valor. As demais colunas a direita apresentam o valor da altura da rebarba medida, para cada broca utilizada. Conforme citado anteriormente, foi sendo feito um rodízio de ferramentas, sendo estas trocadas a cada 5 engrenagens produzidas para que fosse possível acompanhar o desgaste após um intervalo de 120 furos. Alinhando-se a isso, a ideia inicial era medir a rebarba do último furo da última dessas 5 peças, porém houve a necessidade de adequação dessa metodologia para não gerar impactos na produção. Dessa forma foi realizada a medição de um dos 24 furos das peças aleatoriamente. Ainda assim, foi possível manter um intervalo aproximado de 100 furos a cada medida extraída, mantendo um satisfatório acompanhamento dos dados. Vale ressaltar que, para garantir as mesmas condições de usinagem para todas as ferramentas, cada par de brocas começou a usinar as peças com uma fresa de topo nova, sendo esta trocada apenas quando houve troca do par de brocas.

A Figura 25 mostra graficamente o comportamento médio das alturas das rebarbas geradas nos experimentos.

Figura 25 – Representação gráfica da geração de rebarbas dos grupos de brocas



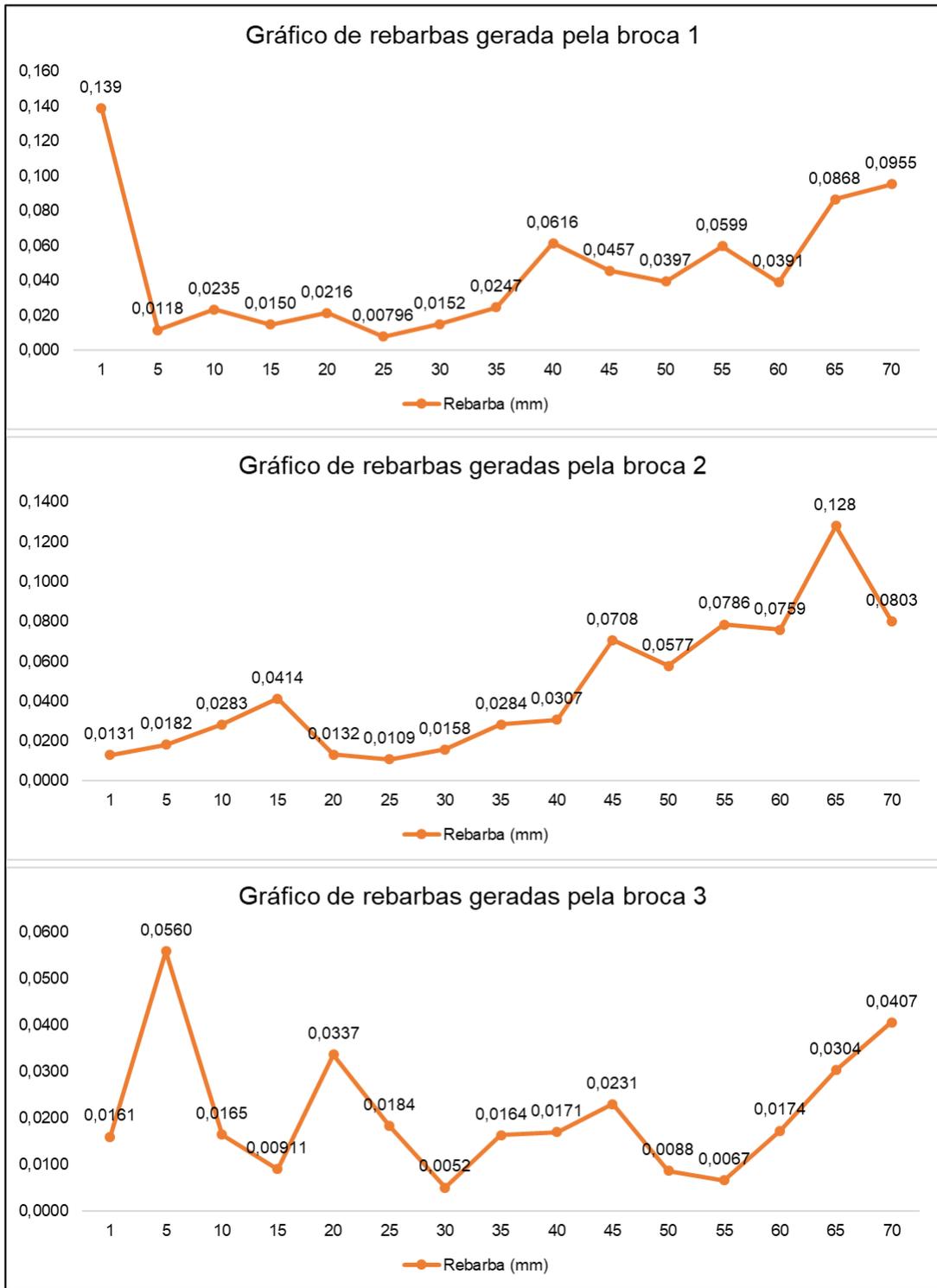
Fonte: O autor, (2020).

Nota-se ao analisar a Figura 25 que o comportamento é oscilatório para ambos os grupos de ferramenta, sendo que o grupo de brocas polidas possui uma variação maior de seus resultados. Os valores para esse grupo são menores do início até a metade do ensaio, se equiparando e terminando os ensaios com valores maiores do que o grupo de brocas padrão de fábrica, que se manteve mais constante, se considerarmos os valores médios. Ainda assim, ambos os grupos de brocas apresentam oscilações nos valores obtidos, não

sendo possível observar uma linearidade ou aumento nos valores que caracterize uma curva de comportamento da geração de rebarba.

As Figura 26 mostra os gráficos das alturas das rebarbas geradas por cada broca do grupo de ferramentas polidas.

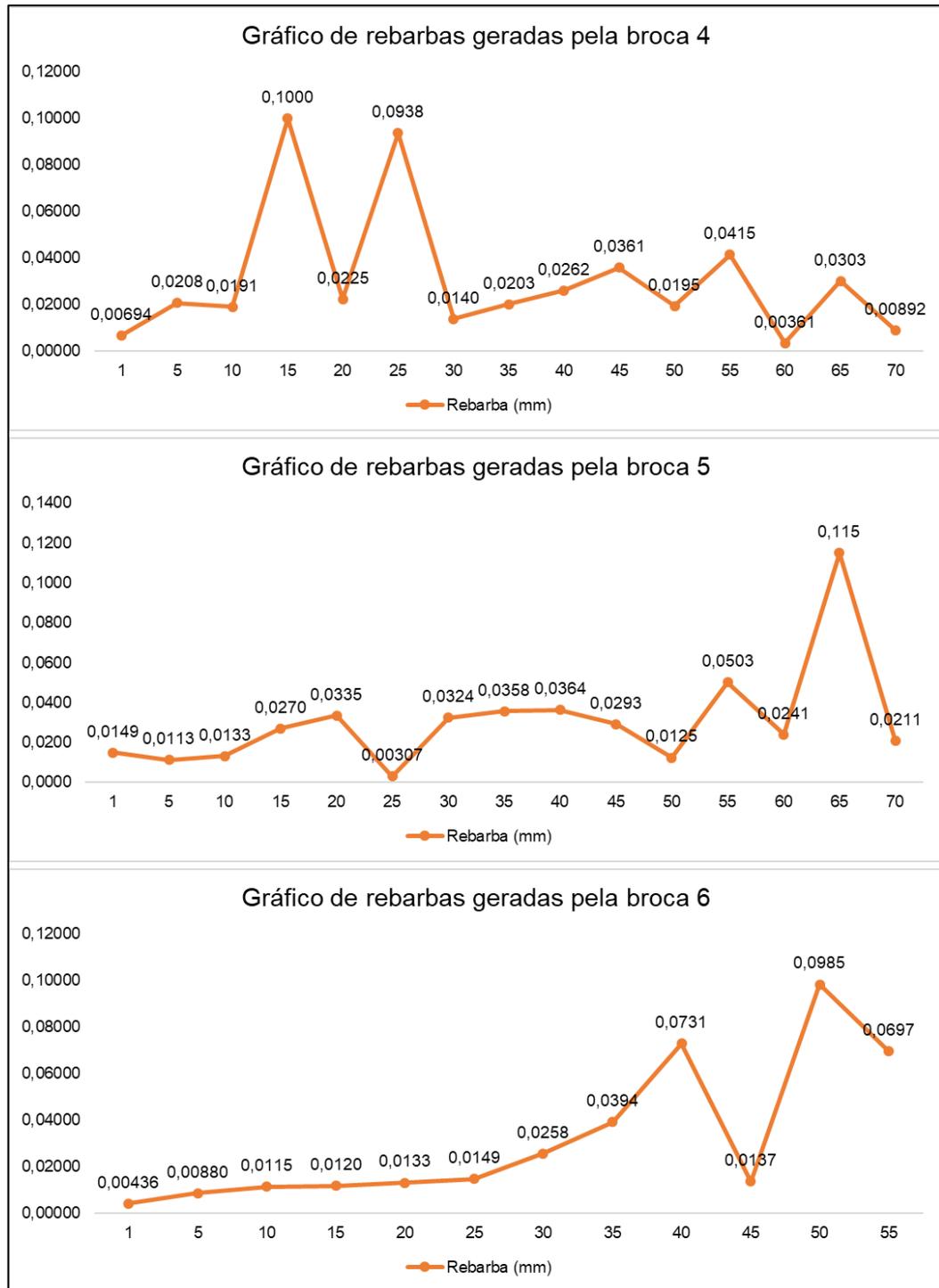
Figura 26 – Representação gráfica das alturas de rebarbas do grupo polidas



Fonte: O autor, (2020).

A Figura 27 mostra os gráficos das alturas das rebarbas geradas por cada broca do grupo de ferramentas padrão de fábrica.

Figura 27 – Representação gráfica das alturas de rebarbas do grupo padrão de fábrica



Fonte: O autor, (2020).

Analisando as Figuras 26 e 27, é possível realizar uma comparação mais detalhada em relação ao comportamento das ferramentas. Reforça-se a oscilação nos valores

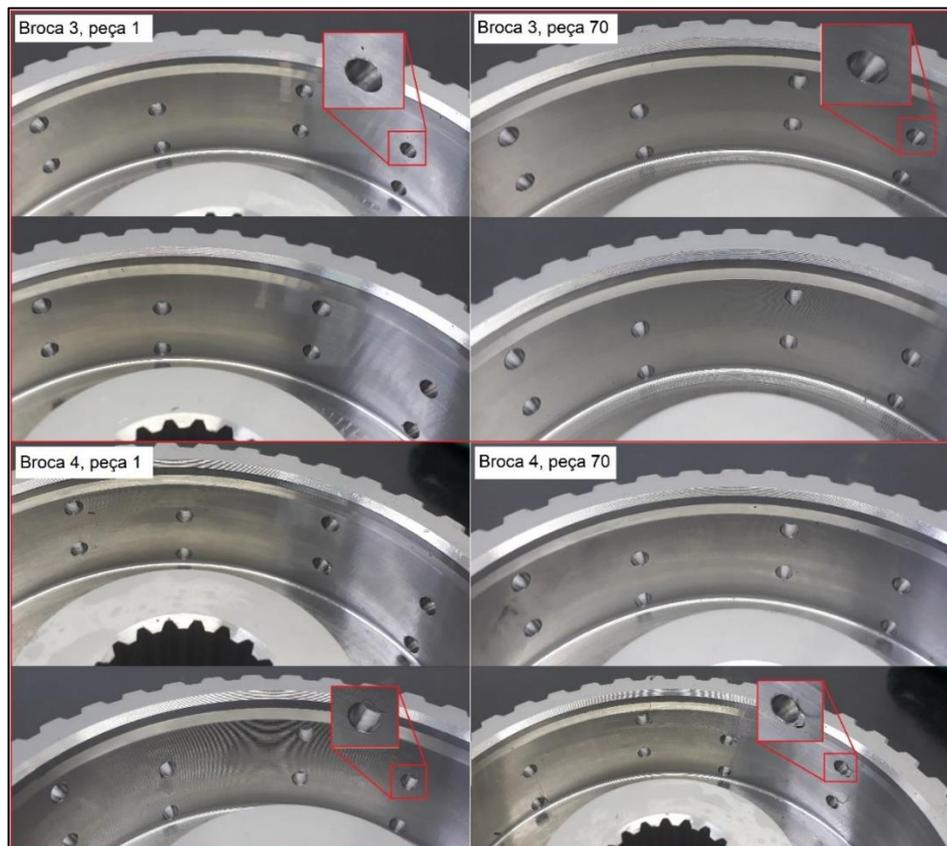
encontrados durante o processo. Percebe-se que existem ferramentas do mesmo grupo que possuem valores de rebarbas maiores no início do processo em relação ao final, e vice-versa. E esse comportamento é observado em ambos os grupos. Contudo, nota-se que em sua maioria, há a tendência de aumento nos valores de rebarba ao decorrer dos ensaios.

Uma possível justificativa para o comportamento oscilante das rebarbas geradas nos ensaios vem de uma característica do processo de furação com pré-furo. Soares Filho (1995) afirma que existem três possibilidades de comportamento de geração de rebarba neste tipo de processo:

- a) A rebarba do pré-furo ser totalmente eliminada na furação final, restando apenas a rebarba menor, originada pela segunda ferramenta;
- b) A rebarba do pré-furo ser eliminada na segunda furação, porém tendo sua altura correspondente a da furação em cheio;
- c) A rebarba do pré-furo não ser eliminada na furação final, sendo a primeira rebarba gerada dobrada, fazendo com que fique aderida à rebarba do furo final. Esse tipo de rebarba normalmente tem uma altura maior.

Para efeitos de comparação das rebarbas, a Figura 28 mostra as primeiras e últimas peças produzidas pelas brocas 3 e 4, respectivamente.

Figura 28 – Rebarbas nos furos



Analisando os dados obtidos e apresentados acima, é possível correlacionar os valores medidos com as três possibilidades elencadas acima. Percebe-se que existem valores de rebarba muito pequenos, numa faixa de até 10  $\mu\text{m}$ , caracterizando a primeira situação, na qual a rebarba do pré-furo é totalmente eliminada, restando apenas a rebarba do segundo furo que é menor. Há também rebarbas com valores intermediários, variando de 10  $\mu\text{m}$  até aproximadamente 50  $\mu\text{m}$ , caracterizando a segunda situação em que as rebarbas do pré-furo são eliminadas, porém as rebarbas restantes obtêm uma altura maior. E por fim rebarbas com valores mais altos, chegando até a passar de 0,1 mm, caracterizando a última das três possibilidades, na qual as rebarbas não são eliminadas, ficando aderidas uma na outra e possuindo uma maior altura. De modo geral, observa-se uma maior presença de rebarbas intermediárias durante todo o processo. É importante ressaltar que não há literatura que explique especificamente essas faixas de valores. A correlação acima foi feita com base nos resultados obtidos, para o processo específico abordado neste trabalho, dentro das condições específicas do mesmo.

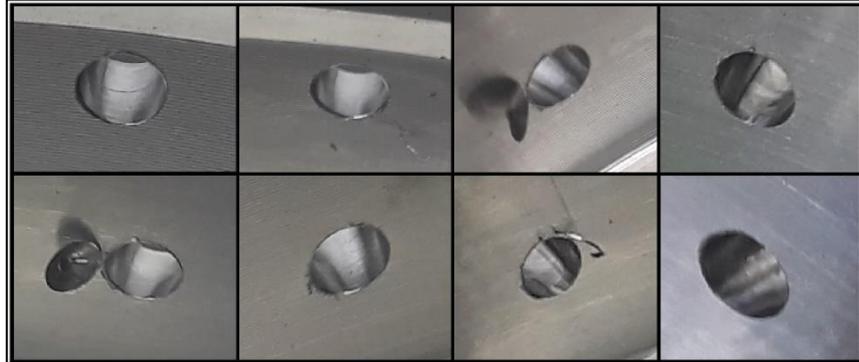
Analisando a Figura 28, é possível perceber que a maior parte das rebarbas é uniforme, similares aos padrões apresentados na Figura 15 deste trabalho. Existem ainda rebarbas do tipo Poisson. Aurich et al (2009) explica que a afiação das ferramentas é um importante ponto para a formação desse tipo de rebarba. Aliado a isso, Soares Filho (1995) diz que muitos fatores ligados a geometria da ferramenta, como o grau de afiação por exemplo, contribuem para o tamanho das rebarbas geradas, ou seja, brocas mais desgastadas geram rebarbas maiores.

Como foi visto anteriormente e mostrado na Figura 24, ocorreu adesão de uma quantidade significativa de material no gume das ferramentas durante os ensaios, afetando assim seu grau de afiação, já que a superfície de corte ficou irregular. Isso também pode ter sido um fator influenciador na geração de rebarbas com alturas maiores.

Os gráficos apresentados nas Figuras 25, 26 e 27 acima, mostra ainda que ao final dos ensaios, há uma leve tendência de aumento nos valores das rebarbas geradas. Uma soma de fatores pode explicar esse comportamento: o desgaste da fresa de topo que é utilizada para alargar o furo aliado ao aumento da presença dos mecanismos geradores de desgaste nas brocas podem ter influência na altura das rebarbas encontradas.

Ainda analisando a Figura 28 há alguns casos de rebarbas que não foram totalmente removidas pela ferramenta fresa de topo, comportamento esse justificado anteriormente neste capítulo, já que a operação envolve pré-furação e para este tipo de processo, há diferentes possibilidades de comportamento de rebarbas. A Figura 29 mostra a variedade de tipos de rebarbas encontradas durante os ensaios. Lembrando que em sua maioria, as rebarbas encontradas são uniformes.

Figura 29 – Rebarbas encontradas



Fonte: O autor, (2020).

Percebe-se em uma mesma peça a presença de variados tipos de rebarbas. Isso justifica o comportamento oscilatório dos gráficos, sendo possível encontrar rebarbas maiores no início dos ensaios, assim como rebarbas menores no final.

Pode-se observar que a preparação do gume da ferramenta não tem um resultado significativo quanto a questão de geração de rebarba. Ainda, a operação de rebarbação com a fresa de topo também não resulta em uma mudança significativa com a variação da microgeometria da ferramenta do pré-furo.

## 5 CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho, observou-se o comportamento do desgaste e da geração de rebarbas com brocas que passaram pelo processo de polimento abrasivo, sendo comparado com brocas que não passaram por este processo. O estudo teve foco na avaliação da influência da alteração da microgeometria da broca em ambos os parâmetros de desgaste e rebarba, analisada através dos aspectos apresentados a seguir.

A aferição de valores de desgaste demonstrou que não houve significativo desgaste nas brocas a ponto de serem considerados para fins de comparação entre os grupos de ferramentas. Entretanto, observou-se a aparição de mecanismos geradores de desgaste nas ferramentas. A aparição desses mecanismos se deu de forma esperada, de acordo com os conhecimentos e com a literatura. A alteração da microgeometria da ferramenta não apresentou significativa mudança na geração desses mecanismos.

Para as rebarbas, procurou-se avaliar se a alteração da microgeometria das ferramentas traria alguma diferença nos valores de rebarbas ao final do processo de furação com pré-furo. As brocas foram utilizadas na pré-furação e os resultados avaliados após a utilização da fresa de topo. Analisando os dados, foi possível constatar uma oscilação dos valores de rebarba gerada, comportamento esperado em processo de furação com pré-furo. Essa oscilação se deu em ambos os grupos de ferramentas, não tendo uma diferença significativa. Também foi possível observar que há uma tendência de aumento dos valores de altura de rebarbas conforme se deu o surgimento dos mecanismos causadores de desgaste nas ferramentas, comportamento este esperado, já que há mudanças nas forças de corte e no grau de afiação das brocas. Conclui-se que a fresa de topo que foi inserida no processo de fabricação, mantém-se ineficiente para a rebarbação, mesmo com a preparação do gume da ferramenta, ou seja, esta alteração não teve influência na geração de rebarbas nos furos.

Em posse desses resultados, conclui-se que não há influência na geração das rebarbas em pré-furos, já que os resultados obtidos, embora de acordo com o esperado e evidenciado na literatura, não apresentam valores menores para o tamanho dessas rebarbas. O comportamento de brocas que passam pelo processo de polimento abrasivo é muito similar às ferramentas padrão de fábrica.

## 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os estudos desta pesquisa foram direcionados ao processo de polimento abrasivo em brocas de metal duro utilizadas na usinagem de aço SAE 4140 H, que como já citado, utilizado na fabricação de engrenagens para aplicação agrícola. Tendo em vista as conclusões apresentadas e para dar continuidade ao estudo, é possível sugerir tópicos a serem abordados em trabalhos futuros e/ou complementares, visando a melhora de resultados obtidos no processo de preparação de gumes de brocas, sendo eles:

- a) A repetição deste estudo utilizando diferentes parâmetros para o processo de furação;
- b) Realizar a mesma análise utilizando materiais e ferramentas diferentes, com a ampliação dos ensaios, buscando resultados ao final da vida das ferramentas;
- c) Integrar a análise o desgaste da ferramenta utilizada para a rebarbação dos furos (fresa de topo);
- d) Por fim, fazer o uso de métodos variados de preparação do gume das brocas;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DE ALMEIDA, D, T.; DE SOUZA, J. H. C.; STIEGEMEIER, R; DE OLIVEIRA, A, P, L.; DOS SANTOS, A. C. Desgaste de broca helicoidal de metal duro na furação de aço ferramenta VF800 AT. **Revista Ferramental**, MAR/ABR 2018, p14-17, 2018.

AURICH, J. C.; DORNFELD, D; ARRAZOLA, P. J.; FRANKE, V.; LEITZ, L; MIN, S. Burrs – Analysis, control and removal. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, n. 58, 519-542, 2009.

BAHÇE, e., ÖZDEMİR, B. Investigation of the burr formation during the drilling of free-form surfaces in al 7075 alloy. **Journal of Materials Research and Technology**, n.8, p. 4198-4208, 2019.

BIERMANN, D.; TERWEY, I. Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes, **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, n. 1, 76-80, 2008.

BORDIN, F. M. **Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul, Brazil. P 19, 2013. Disponível em:< <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/799>>. Acessado em 16 de março de 2020.

BOUZAKIS, K.-D.; GERARDIS, S.; KATIRTZOGLU, G.; MAKRIMALLAKIS, S.; BOUZAKIS, A.; CREMER, R.; FUSS, H.-G. Application in milling of coated tools with rounded cutting edges after the film deposition. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, n. 58, 61-64, 2009.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais** 3. ed. São Paulo, Artliver Editora, 2001.

DOS SANTOS, C. L. C., **Estudo comparativo entre o processo de alargamento e a operação de furação convencional em aço SAE 4140**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Guarapuava, Brazil, 2018.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais**. 3 v. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1970.

GILLESPIE, L. K. Deburring precision miniature parts. **Precision Engineering**, v 1, p. 189-198, 1979.

GILLESPIE, L. K. **Formation and properties of machining burr**. Dissertação (Mestrado) – Utah State University, 1973.

HAMADE, R.F.; SEIF, C.Y.; ISMAIL, F. Extracting cutting force coefficients from drilling experiments. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n. 46, p. 387–396, 2006.

HUANG, W.; JIANG, L.; ZHOU, C.; WANG, X. The lubricant retaining effect of micro-dimples on the sliding surface of PDMS. **Tribology International**, n. 52, p. 87-93, 2012.

ISCAR. **Iscar eCatalog**. Disponível em <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=6154820&fnum=4009&mapp=DR&app=77&GFSTYP=M&isoD=1>>. Acessado em 11 de junho de 2020.

KARABAY, S. Performance testing of a constructed drilling dynamometer by deriving empirical equations for drill torque and thrust on SAE 1020 steel. **Materials and Design**, n. 28, 1780-1793, 2007.

KIM J, MIN S, DORNFELD, D. Optimization and Control of Drilling Burr Formation of AISI 304L and AISI 4118 Based on Drilling Burr Control Charts. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n. 41, p 923–936, 2001.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia de Fabricação**. Tradução de Dr. Eng. Walter Lindolfo Weingaertner. V.3, 1997.

LÓPEZ DE LACALLE, L.N.; FERNÁNDEZ, A.; OLVERA, D.; LAMIKIZ, A.; OLVERA, D.; RODRÍGUEZ, C. ELIAS, A. **Monitoring deep twist drilling for a rapid manufacturing of light high-strength parts**. Mechanical Systems and Signal Processing, n. 25, 2745-2752, 2011.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. rev. São Paulo. Editora Blucher, 2011.

PEREIRA, N. B. **Análise da formação de rebarba e rugosidade na furação da liga de alumínio 6063 T5 com broca helicoidal de aço rápido**. Trabalho de conclusão de curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, Brazil, 2018.

RODRIGUEZ, C.J.C. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing**. Tese de Doutorado, Universidade de Kassel, Alemanha. 205 p., 2009.

SAMBHAV, K.; TANDON, P.; DHANDE, S.G. Geometric modeling and validation of twist drills with a generic point profile. **Applied Mathematical Modeling**, n. 36, p. 2384–2403, 2012.

SOARES FILHO, M. **Estudo da formação de rebarbas no processo de furação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Brazil, p. 2, 1995.

SOFRONAS, A. **The formation and control of drilling burr**. Detroit: Dec. 1975. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - University of Detroit, 1975.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de rosquear, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. 2. ed. Florianópolis, Editora da UFSC, 1995.

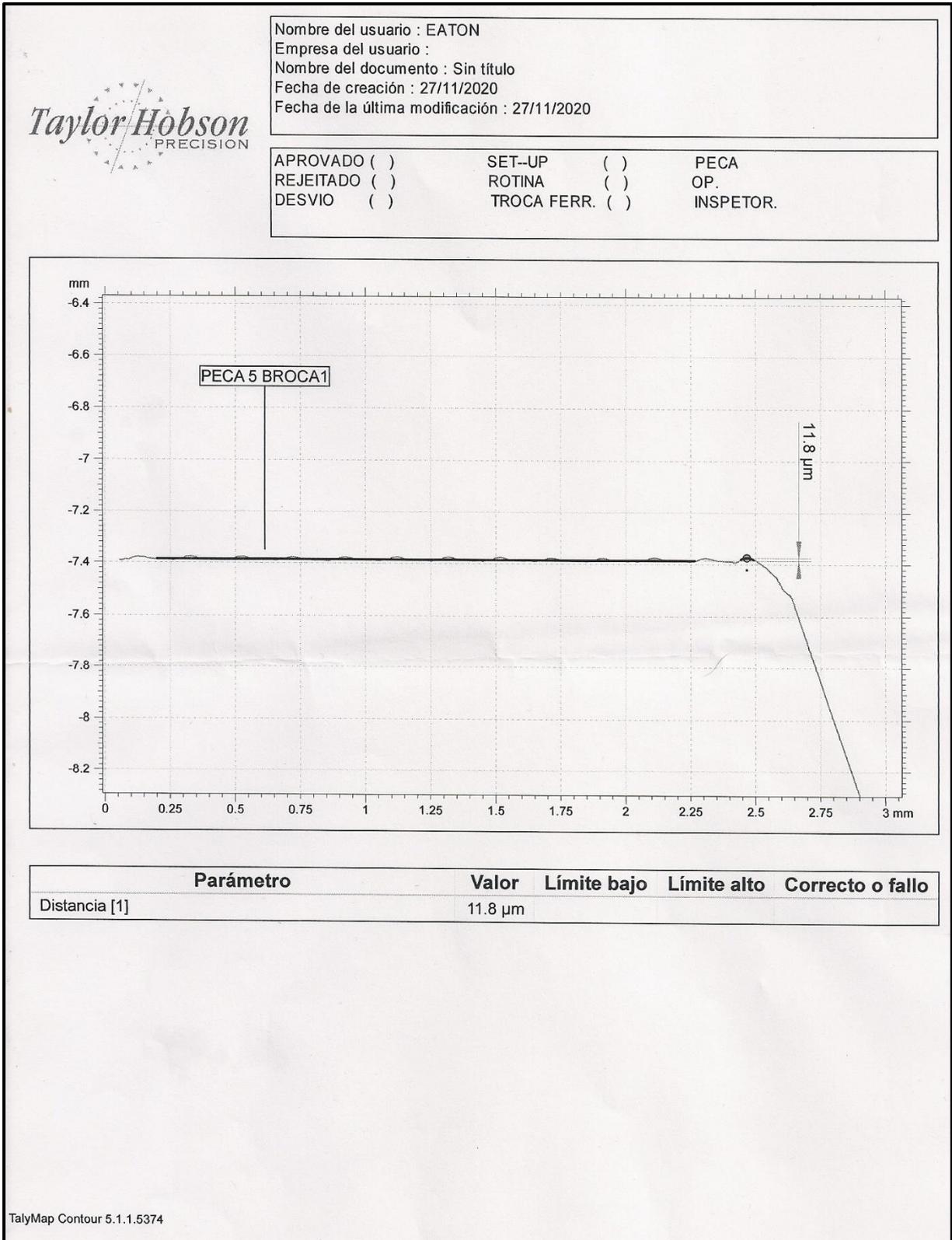
TONGPADUNGROD, P.; SAISUNEE, L.; SURANGSEE, D.; CHANTARAPORN, P. Comparative burr Heights formed on S50C and SS400 steel in drilling process. **Materials today: Proceedings**, n.5, p. 9424-9430, 2018.

TÖNSHOFF, H.K.; KÖNIG, W. **Machining of holes, developments in drilling technology**. Annals of the CIRP, V.43, 1994.

VIEIRA, J. T.; DE OLIVEIRA, J. A.; ARRUDA, É. M.; BRANDÃO, L. C. Influência da afiação de brocas HSS nos erros micro e macro geométricos no processo de furação da liga de alumínio 7075. **9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Joinville, Brasil, 2017.

ZEILMANN, R. P.; NICOLA, G. L.; VIDOR, M.; BORDIN, F. M.; VACARO, T. Análise do desgaste em ferramentas de metal-duro na furação do aço AISI P20. **6º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação**. Caxias do Sul, Brazil, 2011.

## APÊNDICE A – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DE REBARBA



## APÊNDICE B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os equipamentos e máquinas utilizados nos experimentos e análises são observados nas Figuras 30 a 34.

Figura 30 – Centro de usinagem Romi



Fonte: O autor, (2020).

Figura 31 – Estereoscópio trinocular



Fonte: O autor, (2020).

Figura 32 – Perfilômetro Taylor-Hobson



Fonte: O autor, (2020).

Figura 33 – Máquina presetter Zoller



Fonte: O autor, (2020).

Figura 34 – Centro de usinagem Hartford



Fonte: O autor, (2020).