

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ARTHUR RUBINI ZORZETE**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MICROFRESAMENTO NA  
LIGA DE LATÃO C230 MODIFICADO POR EXTRUSÃO DE CANAL ANGULAR**

**GUARAPUAVA**

**2023**

**ARTHUR RUBINI ZORZETE**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MICROFRESAMENTO NA  
LIGA DE LATÃO C230 MODIFICADO POR EXTRUSÃO DE CANAL ANGULAR**

**Analysis of the influence of micro milling parameters the formation of burrs in  
C230 brass alloy modified by angular channel extrusion**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientadora: Sílvia do Nascimento Rosa  
Coorientador: Carlos Eiji Hirata Ventura

**GUARAPUAVA  
2023**



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

**ARTHUR RUBINI ZORZETE**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MICROFRESAMENTO NA  
FORMAÇÃO DE REBARBAS NA LIGA DE LATÃO C230 MODIFICADO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientadora: Sílvia do Nascimento Rosa  
Coorientador: Carlos Eiji Hirata Ventura

Data de aprovação: 10/Julho/2023

---

Sílvia do Nascimento Rosa  
Doutora  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Guarapuava

---

Carlos Eiji Hirata Ventura  
Doutor  
Universidade Federal de São Carlos - Departamento de Engenharia Mecânica

---

Marcos Gonçalves Júnior  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Guarapuava

**GUARAPUAVA**

**2023**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me fortaleceu e meu deu sabedoria para que eu pudesse vivenciar essa experiência e chegar até aqui.

Também gostaria de agradecer a minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Silvia do Nascimento Rosa pelo apoio e paciência desde o primeiro momento e sempre disponível a compartilhar todo o seu vasto conhecimento.

Ao me coorientador Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura, por me recepcionar e ceder o espaço, corpos de prova e ferramentas para a realização do procedimento experimental, dando suporte e disponibilizando todo seu conhecimento.

A técnica Simone do Rocio Ferraz Sabino do laboratório do Centro de caracterização multiusuário em pesquisa e desenvolvimento de materiais da UTFPR do campus de Ponta Grossa, pelo auxílio e disponibilidade na utilização de laboratórios e equipamentos.

A técnica Adriana do Nascimento e Silva, dos laboratórios da UTFPR campus Guarapuava, pelo auxílio e disponibilidade para realização do trabalho.

Aos meus pais, Edson Zorzete e Simone Rubini e minha irmã Izabela Zorzete, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim, mesmo estando longe. Ao me avô José Guaraci Rubini (*in memoriam*), por ser meu maior incentivador.

A minha namorada, Barbara Schirlo, que foi minha grande companheira nessa jornada, me motivou, apoiou e me ajudou, principalmente nos momentos mais difíceis.

## RESUMO

Com o avanço das indústrias e sua crescente demanda por componentes em dimensões micro, os processos de microusinagem vêm se destacando na área da usinagem. Esses processos não podem ser caracterizados simplesmente como uma redução dos processos de usinagem convencional, pois a espessura de corte e o tamanho do grão do material são comparáveis ao raio de aresta de corte da ferramenta, o que resulta no efeito escala. Esse efeito descreve as alterações no comportamento de corte e nas propriedades dos materiais quando a usinagem é realizada em escala micro. Para minimizar esse efeito busca-se alternativas para modificar a estrutura do material. Dessa forma, neste trabalho foi utilizado o processo de extrusão de canal angular (ECA), com o intuito de reduzir o tamanho de grãos e analisar se tal redução interferiria na formação de rebarba no microfresamento, na rugosidade e na microdureza. Os resultados do trabalho mostraram que o ECA modificou a microestrutura do material, alongando os grãos e encruou-os, resultando no aumento da dureza. Quanto ao tamanho de rebarba, os canais com profundidade de corte 0,05 mm e avanço de 3  $\mu\text{m}/\text{dente}$  obtiveram os melhores resultados. Por outro lado, os canais obtidos com profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 0,02  $\mu\text{m}/\text{dente}$  e 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$  mostraram os melhores resultados de rugosidade. Em relação ao tamanho da rebarba, as amostras que passaram pelo processo ECA tiveram desempenho inferior ao da amostra sem processamento, mas foi possível utilizar um valor de avanço por dente maior para as amostras modificadas.

Palavras-chave: microusinagem; efeito escala; ECA; rebarba.

## ABSTRACT

Due to the advance of companies and their growing demand for micro-sized components, micro-machining processes have stood out in the machining area. These processes characterization is not only refer conventional machining process reduction, because the cutting thickness and the material grain size are compatible the cutting tool edge radius, that results in the scale effect. This effect describes changes in the cutting behavior and in the material properties when the machining is performed in micro scale. For minimize this effect it pursue for alternatives for modify the material structure. This way, in this work was utilize the angular chanel extrusion process (ECAP), in order to reduce grain size and analyze whether such reduction would interfere with burr formation in micromilling, roughness and microhardness. The results showed that ECAP modified the material microstructure, lengthening grains and work hardening them, resulting in the increase hardness. How much the burr size, the channels with 0.05 mm cutting depth and 3  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  feed got the best results. On the other hand, channels obtained with 0.05 mm cutting depth and 0.02  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  and 10  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  feed rates of showed the best roughness results. Regarding on the burr size, the samples that was processed by ECAP had inferior performance is compared the samples without ECAP, but it was possible to utilize a feed per tooth value larger for the modified samples.

Keywords: micro-machining; scale effect; ECAP; burr.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Influência do raio de aresta de corte no microfresamento.....	17
Figura 2- Ilustração do microcorte no cobre .....	19
Figura 3 - Picos de força no processo de microfresamento em uma liga de cobre .....	19
Figura 4 - Considerações para realização do microfresamento .....	21
Figura 5 - Geometrias esquemáticas de ferramentas de corte de microfresamento. ....	21
Figura 6 - Geometria da micro fresa de topo de duas ranhuras. ....	22
Figura 7 - Matriz de Extrusão de canal angular usada para processar liga de cobre (90%Cu - 1,5%Zn - 3%Pb).....	26
Figura 8 - Dois primeiros tipos de rotas para Extrusão de Canal angular .....	27
Figura 9 - Dois últimos tipos de rota para Extrusão de Canal angular .....	27
Figura 10 - Ilustração esquemática do processamento do ECA com matriz rotativa. ....	28
Figura 11 – Microestrutura do cobre puro fundido. ....	30
Figura 12 - Microestrutura localizada no meio da amostra de cobre fundido. ..	31
Figura 13 - Microestrutura de Cu forjado com grãos poliédricos uniformes e iguais de recozimento, na lente polarizada.....	31
Figura 14 - Detalhes grão Cobre forjado, na luz polarizada .....	32
Figura 15 - Diagrama de fase Cu-Zn .....	33
Figura 16 - Corpos de prova utilizados nos experimentos.....	37
Figura 17 – Suporte utilizado para fixar os corpos de prova no processo de retificação .....	38
Figura 18 - Porta ferramenta da marca BIG PLUS utilizado no microfresamento dos canais.....	38
Figura 19 - Dimensões da microfresa utilizada no estudo. ....	39
Figura 20 – Comparação entre uma fresa convencional e uma microfresa.....	40
Figura 21 - Microscópio Alicona Infinit Focus utilizado para as análises de rebarbas e rugosidade.....	42
Figura 22 – Microestrutura da liga de latão C230 na amostra 1. ....	44
Figura 23 - Microestrutura da liga de latão C230 na amostra 2.....	44
Figura 24 - Microestrutura do latão C230 na amostra3.....	45

<b>Figura 25 – Microestrutura da amostra 1 obtida no MEV.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 26 – Microestrutura da amostra 2 obtida no MEV.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 27 – Microestrutura da amostra 3 obtida no MEV.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 28 – Micro canal na amostra 1 com ap de 0,05 mm e fz de 3 <math>\mu</math>m/dente..</b>	<b>53</b>
<b>Figura 29 – Micro canal na amostra 2 com ap 0,05 mm e fz de 3 <math>\mu</math>m/dente .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 30 – Micro canal na amostra 3 com ap 0,05 mm e fz de 3 <math>\mu</math>m/dente .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 31 – Micro canais na amostra 2 com profundidade de corte de 0,05mm e avanço de 10 <math>\mu</math>m/dente. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 32 – Micro canais na amostra 3 com profundidade de corte de 0,05mm e avanço de 10 <math>\mu</math>m/dente. ....</b>	<b>55</b>



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da liga de latão C230.....	34
Tabela 2 - Têmperas dos produtos recozidos até um determinado tamanho dos grãos. ....	34
Tabela 3 - Têmperas produzidas por laminação e trefilação para cumprir requisitos normalizados. ....	35
Tabela 4 - Propriedades da chapa de latão C230 em diferentes condições de têmpera. ....	36
Tabela 5 - Pressão e RPM do porta ferramenta BIG PLUS. ....	39
Tabela 6 - Informações de parâmetros de corte e características da microfresa. ....	40
Tabela 7 - Parâmetros de corte utilizados para a amostra sem processo ECA.	40
Tabela 8 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios para todas as amostras. ....	41
Tabela 9 – Composição química da liga de latão C230 por espectrometria .....	43
Tabela 10 – Profundidade de corte medida após usinagem no início do canal	48
Tabela 11 – Profundidade de corte medida após usinagem no final do canal. .	49

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 - Comparação de ferramentas revestidas com diamante por processos diferentes e sem revestimento .....</b>	<b>24</b>
<b>Gráfico 2 - Resultado do ensaio de tração na liga Cu- 38%Zn .....</b>	<b>29</b>
<b>Gráfico 3 – Microdureza das amostras utilizadas nos ensaios de microfresamento .....</b>	<b>47</b>
<b>Gráfico 4 – Altura das rebarbas medidas no início do canal.....</b>	<b>50</b>
<b>Gráfico 5 – Altura das rebarbas medidas no meio do canal.....</b>	<b>51</b>
<b>Gráfico 6 – Altura das rebarbas medidas no final do canal.....</b>	<b>52</b>
<b>Gráfico 7 – Resultado da rugosidade média dos canais em cada condição de estudo .....</b>	<b>56</b>
<b>Gráfico 8 – Resultado do valor máximo da rugosidade parcial (Rz) dos canais em cada condição de estudo .....</b>	<b>57</b>
<b>Gráfico 9 – Rugosidade (Ra) .....</b>	<b>58</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM - American Society for Testing and Materials  
CDA - Copper Development Association  
CNC - Comando Numérico Computadorizado  
CrN - Nitreto de Cromo  
CVD - Deposição química de vapor  
DC - Diâmetro da ferramenta  
DCON - Diâmetro do corpo da ferramenta  
DEMa - Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos  
DPS - Deformação Plástica Severa  
ECA - Extrusão de Canal Angular  
FGD - Filme de diamante de grãos finos  
HB - Dureza Brinell  
HRB - Dureza Rockwell escala B  
HRC - Dureza Rockwell escala C  
HRF - Dureza Rockwell escala F  
MEF - Método de Elementos Finitos  
MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura  
MPa - Mega Pascal  
MQF - Mínima Quantidade de Fluido  
NBR - Norma brasileira  
NCD - Diamante nanocristalino  
PVD - Deposição Física de Vapor  
RPM - rotação por minuto  
TiN - Nitreto de Titânio  
TiNAl - Nitreto de Titânio de Alumínio  
TiCN - Carbonitreto de Titânio  
TRM - Taxa de Remoção de Material  
UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos  
UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
WC - Carboneto de Tungstênio  
WXL - Revestimento multicamada à base de Cromo

## LISTA DE SÍMBOLOS

ap - Profundidade de corte

b - Largura de corte

°C - Graus Celsius

Cu - Cobre

fz - Avanço

H - Têmpera produzida por deformação

h - Espessura de corte

F<sub>c</sub> - Força de corte

LF - Comprimento total da ferramenta

LH - Comprimento total da haste de corte da ferramenta

Ni - Níquel

OS - Têmpera produzida por recozimento

P - Potência de corte

Pb - Chumbo

Ra - Média aritmética da distância dn

Rz - Média aritmética de cinco valores parciais de rugosidade

Sn - Estanho

v<sub>c</sub> - Velocidade de corte

z - Número de dentes

Zn - Zinco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Microusinagem</b>	<b>16</b>
3.1.1	Microfresamento	20
<b>3.2</b>	<b>Extrusão de Canal Angular (ECA)</b>	<b>25</b>
<b>3.3</b>	<b>Ligas de latão</b>	<b>29</b>
<b>4.</b>	<b>MATERIAS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Corpos de prova</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Microfresamento</b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise dos experimentos</b>	<b>41</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Análise do material</b>	<b>43</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise da altura da rebarba</b>	<b>47</b>
<b>5.3</b>	<b>Rugosidade</b>	<b>55</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>59</b>
<b>6.1</b>	<b>ESTUDOS FUTUROS</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>61</b>
	<b>APENDICE A - DISTRIBUIÇÃO DO COBRE E ZINCO NA AMOSTRA 2.</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em decorrência da evolução dos processos de fabricação, que buscam geometrias complexas com alta precisão, surgiu também a necessidade de peças com dimensões cada vez menores, gerando oportunidades para que o processo de microfabricação se desenvolvesse. Produtos que têm dimensões micro, como engrenagem de relógio e microtransmissores utilizados na aviação, existem há anos, o que evidencia que produtos que necessitam de micro ferramentas, não são recentes (CHAE *et al.*, 2006).

O setor automobilístico tem sido outro ramo que vem utilizando peças com dimensões otimizadas para redução de peso. Além da redução de peso há esforços para minimizar a emissão de gás carbônico. Isto porque, o transporte rodoviário é responsável por 16% das emissões globais e os veículos elétricos são a tecnologia chave para descarbonizar esse setor. Nos últimos anos, houve um crescimento exponencial na venda de veículos elétricos, e se esse crescimento for sustentado, as emissões de CO<sub>2</sub> dos automóveis podem ser alinhados com o Cenário *Net Zero Emissions by 2050*. No Brasil, a participação dos veículos elétricos no setor ainda é baixa (0,4%), mas há uma tendência de aumento dessa categoria (IEA, 2022; ANFAVEA, 2023).

Apesar das ligas de alumínio e de aço possuírem alta demanda na indústria automotiva, as ligas de cobre vêm sendo amplamente utilizadas na fabricação de componentes importantes nos carros elétricos, como conectores elétricos e sistemas de distribuição de energia. Esses componentes são projetados com dimensões otimizadas, com objetivo de reduzir peso, mas garantindo também boa dissipação de calor e resistência mecânica. A presença do cobre em quantidades significativas nesses sistemas contribui para o desempenho eficiente e confiável dos veículos elétricos (TERMOMECÂNICA, 2023).

Nesse contexto, a usinagem que é um processo de fabricação que confere às peças dimensões, forma, acabamento superficial ou a combinação destes através da remoção de material (DIN 8580, 2003), e vastamente recorrido no ramo automotivo, tem sido utilizada e estudada na área de microfabricação (GOWRI *et al.*, 2007; CARDOSO, DAVIM; 2012; CLAVIJO *et al.*, 2021).

Na microusinagem o que se altera na definição é que as dimensões da ferramenta variam entre 1  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$  (CHAE *et al.*, 2006). Neste processo, a redução das dimensões das peças produzidas, impacta na redução da escala do processo, e isto gera dificuldades, pois as dimensões de corte se aproximam do tamanho de grão do material a ser microusinado (BALDO, 2013). Em adição, pode haver formação de rebarbas, que são projeções indesejáveis de material que ultrapassam os limites físicos desejados na peça, devido a deformação plástica durante o processo (ASTM, 1959). Dessa forma, as propriedades plásticas e elásticas, são relevantes para o microprocessamento, e uma das soluções para sanar tais empecilhos pode ser a utilização de materiais de grãos ultrafinos (BALDO, 2013).

Há vários processos em que se altera o tamanho de grãos dos materiais. A Extrusão de Canal Angular (ECA), se caracteriza como deformação plástica severa, é um exemplo de um desses processos (VALIEV *et al.*, 2006). O ECA tem como finalidade obter graus de deformação elevados e uma microestrutura ultrafina ou nanocristalina, e é realizado por meio de uma prensa e uma matriz, possibilitando deformações em corpos de provas metálicos sem reduzir dimensões (RADHI *et.al*, 2020).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo utilizar o processo de microfresamento em latão C230, com sua estrutura modificada pelo processo de Extrusão de Canal Angular, a fim de obter baixa produção de rebarba e melhor acabamento nos canais obtidos pelo processo. Pretende-se chegar a resultados que contribuam com a compreensão da formação da rebarba e com o tema de microusinagem.

## **2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS**

Este trabalho teve como objetivo determinar os melhores parâmetros de corte (avanço por dente e profundidade de corte) para o microfresamento da liga de latão C230 modificada por ECA, a fim de minimizar a formação de rebarbas e a rugosidade produzida no microfresamento.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Para alcançar o objetivo foram necessárias as seguintes atividades:

- medir a microdureza da liga;
- analisar a microestrutura da liga;
- realizar o microfresamento de canais com diferentes parâmetros de corte em corpos de prova obtidos por diferentes condições de ECA;
- medir o tamanho de rebarba;
- medir a rugosidade dos canais.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico elaborado a seguir, abordará importantes conceitos relacionados ao tema desenvolvido como microusinagem, microfresamento e suas características, extrusão de canal angular (ECA) e a liga de latão.

#### 3.1 Microusinagem

A indústria tem buscado cada vez mais componentes de geometrias complexas, com alta precisão, de composição química das mais diversas e com dimensões micro. Devido a essa demanda o desenvolvimento da microfabricação tem se expandido (HUO e CHENG, 2013).

A microusinagem ou micro-corte consegue obter componentes 3D em uma grande variedade de materiais de engenharia, incluindo metais, polímeros, cerâmicas e compósitos, com precisão e rugosidade de superfície desejáveis com esse processo de fabricação. Aplicações das peças obtidas no micro-corte são nas áreas em que as dimensões das peças devem estar entre 1–1000  $\mu\text{m}$ , com pelo menos duas dimensões nesta faixa (HUO e CHENG, 2013).

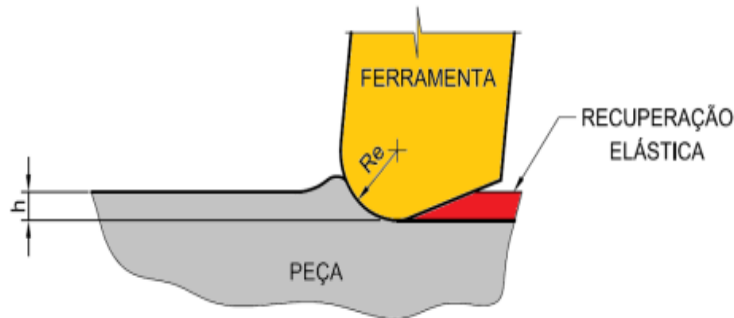
O tamanho e a geometria das micro ferramentas de corte determinam o limite do tamanho e a precisão dos micro recursos. Um exemplo disso são as ferramentas de microfresamento e microperfuração, cujo diâmetros estão na faixa de 1000  $\mu\text{m}$  até 25  $\mu\text{m}$  (HUO e CHENG, 2013). O tamanho da ferramenta também é uma característica para determinar se o processo se trata de uma microusinagem, de maneira que se as dimensões variam entre 1  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$ , o processo é considerado micro-corte (CAMARA, 2012).

A principal diferença entre a usinagem macro e micro é a espessura de corte (CHAE, 2006). Na microusinagem, quando a espessura do cavaco indeformado se torna comparável ao raio da aresta de corte das ferramentas ou ao tamanho do grão dos materiais da peça, ocorrem problemas críticos, como por exemplo efeito do raio da aresta de corte (HUO e CHENG, 2013).

As ferramentas de corte dificilmente são perfeitamente afiadas e, portanto, a aresta de corte formada na interseção das faces de saída e flanco da ferramenta nunca é uma linha reta ou curva ideal. Há sempre um pequeno raio presente na aresta

de corte. O simples fato da existência do raio da aresta de corte pode ocasionar problemas no processo (BALDO, 2013). Como se pode ver na Figura 1, a espessura do cavaco indeformado é menor que a espessura mínima de corte, que como consequência, não há formação de cavaco, ocorrendo somente uma compressão no material, gerando deformação elástica.

**Figura 1 - Influência do raio de aresta de corte no microfresamento**



Fonte: Baldo (2013)

WANG (2019) afirma que esse efeito é importante, pois a ferramenta terá atrito com a superfície da peça, sem a remoção de cavaco, causando o efeito de *ploughing*. LEE e DORNFELD (2005), definem esse efeito como a marca (riscamento) que a ferramenta deixa na superfície da peça, devido a recuperação elástica do material, consequência da espessura de cavaco indeformado ter sido menor que a espessura de cavaco mínimo para a formação de cavaco, tem como possível consequência uma menor vida útil de ferramenta e baixa qualidade no acabamento superficial.

HUO e CHENG (2013), citam que das observações de relevância feitas durante o processo de microusinagem, a força de corte se destaca. Particularmente, esse componente de força teve características mensuráveis, pois seus valores não diminuem se a espessura de corte diminuir, e dessa forma fica mais evidente a quantificação da energia específica de corte. Esta pode ser calculada através da equação (1).

$$u = \frac{P}{TRM} = \frac{F_c \times V_c}{h \times b \times V_c} = \frac{F_c}{h \times b} \quad (1)$$

Na Equação (1)  $P$  se refere à potência de corte [W];  $TRM$  à taxa de remoção de material [ $m^3/s$ ];  $F_c$  à força de corte [N];  $v_c$  à velocidade de corte [m/min];  $h$  à espessura de corte [m] e  $b$  à largura de corte [m].

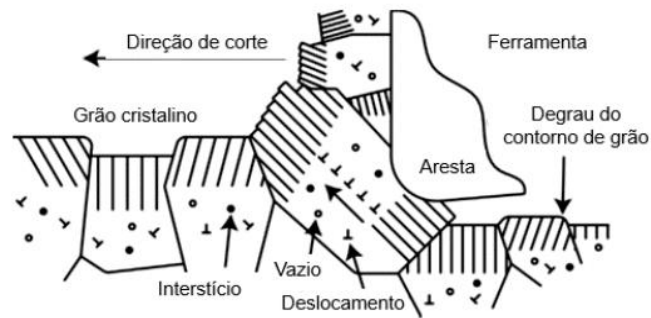
ZIBEROV (2021) relatou que um dos primeiros trabalhos sobre esse tema foi realizado por Backer em 1952. Nesse estudo os autores utilizaram profundidades de corte 5  $\mu\text{m}$  para a operação de fresamento e descobriram que a força de cisalhamento nos materiais aproximou-se do seu valor teórico. Também foi constatado que contornos de grão, defeitos nos cristais e impurezas desempenham um papel importante no processo de cisalhamento durante a deformação plástica nestas condições. O efeito escala, se refere às mudanças no comportamento e nas propriedades dos materiais e processos de fabricação que ocorrem quando se trabalha com escalas pequenas, na ordem de micrômetro, à medida que as dimensões das peças e estruturas diminuem o efeito escala pode influenciar no raio de aresta de corte, material e microestrutura. CHAE (2006), afirma que ocorre um aumento da força de corte, pois uma grande parte do material deverá estar na zona elástica, para que somente uma pequena parte da espessura de corte seja removida. Como se pode notar na equação (1), quanto maior a força de corte e quanto menor a espessura de corte, maior será a energia específica de corte.

Para altos valores de energia específica de corte, a taxa de transferência de calor e as tensões residuais tem um aumento relevante, causando problemas na integridade metalúrgica da peça. Sendo assim, busca-se minimizar os valores da energia específica de corte (SALMON, 1992).

Outro fator de relevância para o efeito escala é a microestrutura do material. LIU (2017) realizou pesquisas sobre o mecanismo de formação dos contornos de grão durante o microcorte de cobre e concluiu que:

- Movimentações internas ao grão acontecem na interface da ferramenta, de modo contínuo, até que parem em um contorno de grão. Nesse momento, se inicia a formação de sub contornos de grãos, que irão aliviar as energias. A partir dos sub contornos, ocorre a formação de subgrãos, em decorrência do efeito *ploughing*. Esses subgrãos, caso eles não tenham um plano de escorregamento igual ao inicial, acarretam na formação de degraus. Esse processo pode ser notado na Figura 2.
- Ocorrem picos de força de corte, em decorrência do contato da ferramenta com os contornos de grãos, de maneira que esses contatos ocasionam vibração na ferramenta. YUN (2011), obteve comprovação em experimentos como mostrado na Figura 3.

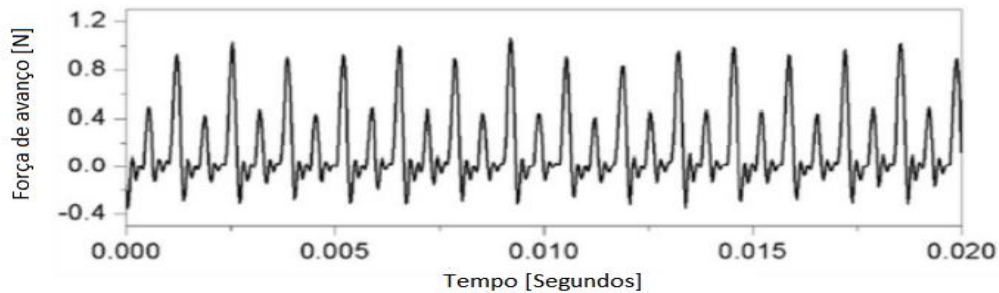
**Figura 2- Ilustração do microcorte no cobre**



**Fonte - Adaptado de LIU (2017)**

O autor observou ocorrência de picos de força de corte, no processo de fresamento com uma ferramenta de diâmetro de 500  $\mu\text{m}$  e duas arestas de corte. De acordo com a Figura 3, se pode notar os picos de força no momento em que cada aresta de corte entra em contato com o contorno de grão.

**Figura 3 - Picos de força no processo de microfresamento em uma liga de cobre**



**Fonte - Adaptado de YUN (2011).**

Os menores picos de força de avanço representam o primeiro contato entre a aresta de corte e a peça, que é menor, pois a deformação elástica do material se faz presente, resultando na formação de degraus. Estes degraus irão impactar no momento que a segunda aresta de corte atuar, pois haverá acúmulo de material que não foi removido, resultando um pico de força de corte maior, até que a ferramenta avance o suficiente para atingir uma espessura de corte mínima para a formação e remoção de cavaco. Após esse processo, o pico de força decai e o processo se inicia novamente (YUN, 2011).

### 3.1.1 Microfresamento

O processo de fresamento está entre os principais processos de fabricação e o mesmo tem sido utilizado tanto na fabricação de ferramentas de conformação quanto no produto final (CÂMARA, 2012).

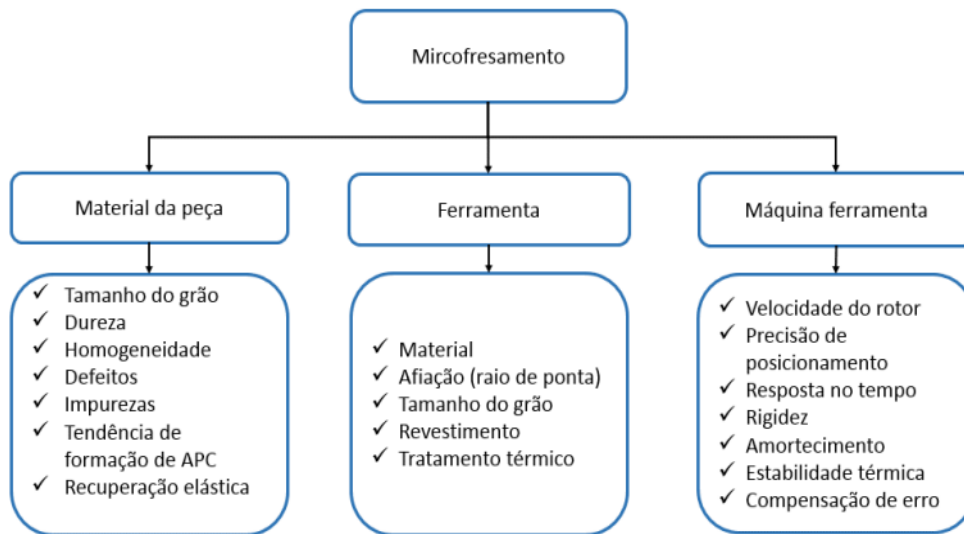
O microfresamento e o fresamento convencional possuem cinemática de corte semelhante, embora haja pontos de grande relevância e que diferenciam os processos, como por exemplo, o tamanho da ferramenta e a formação de rebarbas. No microfresamento o diâmetro é extremamente pequeno, fazendo com que a razão entre o diâmetro e comprimento seja alta, causando batimento e vibração desproporcional, resultando na quebra da ferramenta. A razão entre a dimensão da rebarba e o tamanho da peça que está sendo produzida é maior em relação ao fresamento convencional, sendo necessário um tempo e custo maior para a retirada das rebarbas. Além disso, existe uma dificuldade em se remover as rebarbas em escala micro (TAKÁCS, BALAZÁZS E GEIER, 2020).

Outro desafio do microfresamento é o controle de qualidade das peças devido a vários fatores, como a dificuldade de identificar o contato entre a ferramenta e a peça, baixas forças de corte e ferramentas fora das tolerâncias geométricas (BALDO, 2013).

CÂMARA (2012), retratou que para a realização do microfresamento é importante se atentar para as características do material da peça, da ferramenta e da máquina, observando os pontos citados na Figura 4. A análise e monitoramento da rigidez e precisão da micro fresadora e um monitoramento constante da ferramenta, são fatores que têm grande influência na qualidade da peça que está sendo microusinada (TAKÁCS, BALAZÁZS; GEIER, 2020). Porém, os materiais e a geometria da ferramenta, são os dois fatores mais importantes, que determinam o desempenho eficaz da ferramenta (HUO e CHENG, 2013).

As ferramentas de microfresamento são geometricamente semelhantes às utilizadas no fresamento convencional, mas muitas vezes apresentam um comportamento diferente em relação ao processo de corte, pois as dimensões das ferramentas, geralmente estão na mesma ordem de grandeza da dimensão do cavaco e da estrutura do material (TAKÁCS, BALAZÁZS E GEIER, 2020).

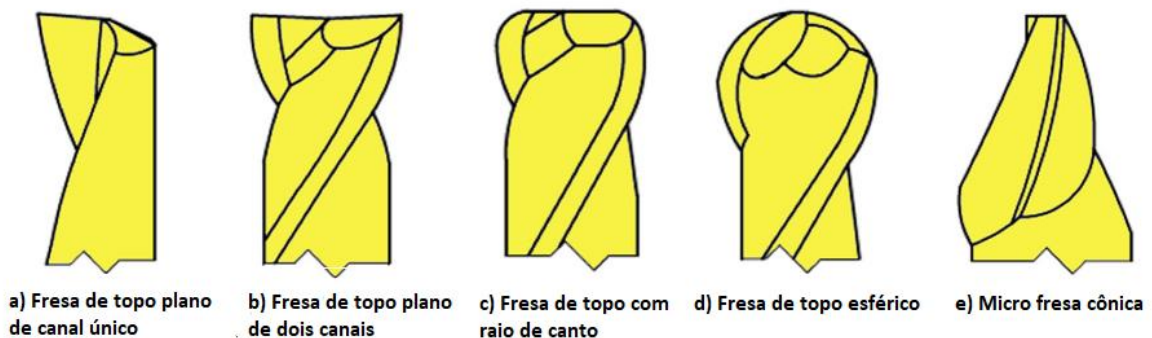
**Figura 4 - Considerações para realização do microfresamento**



**Fonte - Adaptado de Câmara (2012)**

A Figura 5 mostra algumas geometrias de microfresas, representando quantidades de canais, topos e formatos diferentes.

**Figura 5 - Geometrias esquemáticas de ferramentas de corte de microfresamento.**



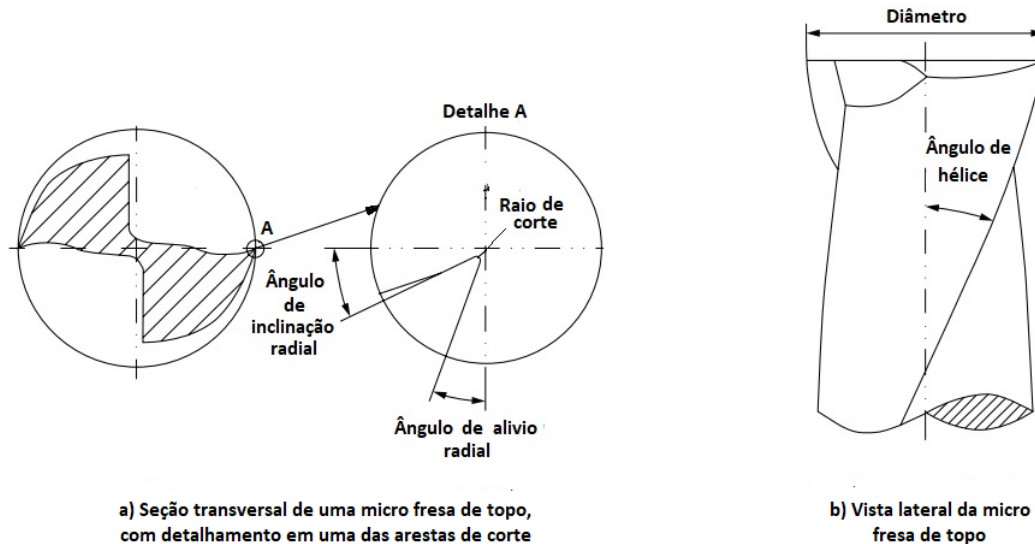
**Fonte: Takács, Balazs e Geier (2020)**

Na Figura 6 é ilustrado as principais características geométricas de uma microfresa de topo de dois canais. Vale ressaltar que, o canal de uma fresa é o espaçamento entre as arestas de corte da ferramenta, estando relacionada com o ângulo de hélice, sendo o local que ocorre a saída do cavaco.

Devido à diminuição do diâmetro, a rigidez das ferramentas tende a diminuir drasticamente, o que pode facilmente causar deflexão da ferramenta, vida útil imprevisível e falhas prematuras. Como a ferramenta de microcorte é relativamente delgada, muitas das vezes o processo torna-se difícil de estimar, ocorrendo altas vibrações e a vida útil da ferramenta curta. Dessa forma, em um projeto de micro

ferramentas, a geometria ideal é essencial para manter uma boa rigidez e resistência, evitando a obstrução de cavacos e, portanto, melhorando o desempenho da ferramenta (HUO e CHENG, 2013).

**Figura 6 - Geometria da micro fresa de topo de duas ranhuras.**



**Fonte: Adaptado HUO e CHENG (2013)**

O desgaste da ferramenta é uma das limitações mais significativas do processo de microfresamento, pois é imprevisível e afeta as dimensões, a qualidade da superfície e a vida útil da ferramenta. Por isso, temas relacionados à geometria das ferramentas de fresamento e o aumento do seu desempenho requerem muito estudos (TAKÁCS, BALAZÁZS E GEIER, 2020).

LI (2008) analisou os efeitos das características estruturais na resistência das arestas de corte empregando o método dos elementos finitos e relatou que o ângulo de saída negativo, o ângulo de hélice e o ângulo de folga podem reduzir significativamente o nível máximo de tensão nos cantos da aresta de corte, quando possuem maiores valores.

Em relação aos materiais de ferramentas utilizados no microfresamento, os principais são aço rápido, metal duro, cerâmica, nitreto cúbico de boro e diamante. Os melhores materiais de ferramenta possuem alta dureza combinada com tenacidade adequada e estabilidade química em alta temperatura. Porém, a maioria dos materiais não possuem propriedades excelentes em todos os aspectos. Dentre aqueles materiais, o diamante possui algumas propriedades químicas, físicas e mecânicas

excepcionais. Sua alta dureza permite obter arestas de corte mais afiadas, uma taxa de desgaste muito menor e maior vida útil da ferramenta em comparação a outros materiais. No entanto, o alto custo, a fragilidade e a afinidade química com o ferro têm restringido suas aplicações.

Para micro ferramentas comerciais, o material mais comum e popular é o carboneto de tungstênio (WC) de grão ultrafino com ligação de cobalto devido ao custo comparativamente baixo, alta dureza, resistência e características adequadas de resistência ao desgaste. O mais importante é que o WC é adequado para usinar uma ampla variedade de materiais de engenharia, incluindo aços. O desempenho das ferramentas de carboneto de tungstênio depende em grande parte da composição e do tamanho do grão (HUO e CHENG, 2013).

Além de uma escolha adequada do material da ferramenta, a decisão desta ser revestida ou não, pode trazer bons resultados ao processo. Nas ferramentas de micro fresamento, revestimentos são frequentemente utilizados e aumentam a vida útil da ferramenta ou reduzem a força de corte e a vibração. Em contrapartida a aplicação de revestimento aumenta o raio da aresta da ferramenta de corte, que muitas vezes não é vantajoso pois aumenta o efeito escala que ocasiona características não desejáveis no processo, como a diminuição da vida útil da ferramenta (TAKÁCS, BALAZÁZS E GEIER, 2020).

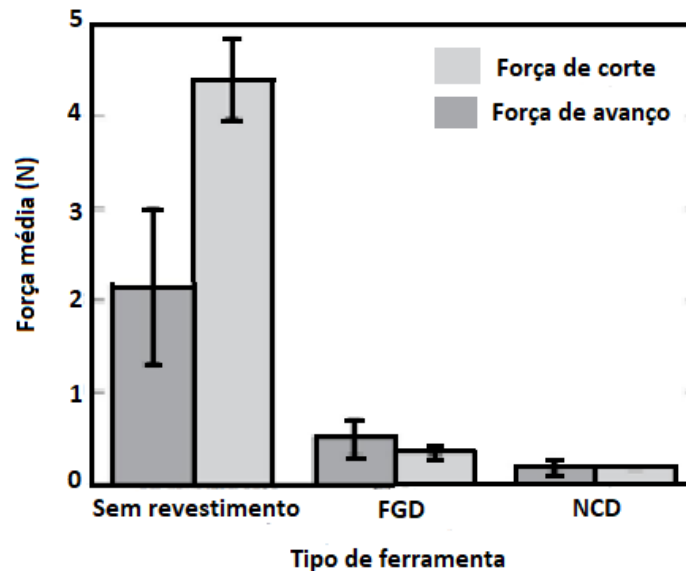
Os revestimentos mais comuns para micro ferramentas comerciais são à base de titânio e TiAlN (HUO e CHENG, 2013). ARAMACHAROEN (2008) comparou o desempenho de microfresas revestidas com TiN, TiCN, TiAlN e CrN e ferramentas de metal duro sem revestimento em aço ferramenta endurecido. O resultado do estudo mostrou que esses revestimentos de deposição física de vapor (PVD) ajudam a reduzir o lascamento da aresta de corte e o desgaste do raio da aresta, bem como o tamanho da rebarba. Além disso, também foi relatado que os revestimentos de TiN oferecem os maiores benefícios na redução do desgaste da ferramenta e na melhoria da qualidade da superfície usinada.

TORRES (2009) estudou micro fresas de topo de carboneto de tungstênio, analisando os revestimentos de diamante de grão fino (FGD) e diamante nanocristalino (NCD), obtidos pelo processo de deposição química de vapor (CVD), com a força de corte e avanço. O tamanho de grão de FGD teve dimensão entre 0,5 e 1  $\mu\text{m}$ , enquanto para NCD foi inferior a 0,1  $\mu\text{m}$ . E para analisar os esforços, o autor



utilizou fresa de topo com diâmetro de 300  $\mu\text{m}$  para usinar a liga de alumínio 6061-T1 sem fluido de corte, obtendo os resultados mostrados no Gráfico 1.

**Gráfico 1 - Comparação de ferramentas revestidas com diamante por processos diferentes e sem revestimento**



Fonte: TORRES (2009)

O revestimento resultou na melhoria na integridade da ferramenta, menor taxa de desgaste, nenhuma adesão observável e uma redução significativa nas forças de corte em comparação com o desempenho das ferramentas não revestidas. Para uma profundidade de corte de 6,25  $\mu\text{m}$ , as forças principais de corte e avanço foram reduzidas de 2,15  $\pm$  0,85 N e 4,41  $\pm$  0,44 N para 0,50  $\pm$  0,09 N e 0,35  $\pm$  0,04 N, respectivamente, ao adicionar um revestimento FGD às ferramentas WC. As forças ainda foram menores na ferramenta revestida com NCD, reduzindo para 0,18  $\pm$  0,07 N e 0,17  $\pm$  0,02 N.

Percebeu-se ainda que, as forças de corte e avanço medidas para as ferramentas revestidas são mais equilibradas, enquanto as ferramentas não revestidas exibiram uma força de avanço que é o dobro da força de corte. Esse equilíbrio de forças indicou um processo de corte mais ideal com o mínimo de riscamento (*ploughing*), rebarbas ou adesão dos cavacos aos canais. Além disso, as forças de corte mais baixas para ferramentas revestidas de diamante significam que a energia de corte específica é menor.

DE OLIVEIRA (2020), realizou um estudo sobre a rugosidade de amostras da liga de Níquel INCONEL 718, analisando canais de 15 mm de comprimento. Os

resultados mostraram que os valores de rugosidade tiveram pouca variação nos canais, e quando foi utilizado a velocidade de corte de 50,3 m/min e microfresa revestida com AlTiN, se obteve os menores resultados de rugosidade. Na análise de variância foi verificado que a velocidade de corte teve influência estatisticamente significativa na rugosidade. Além disso, a combinação entre a velocidade de corte e o número de canais microusinados também foi estatisticamente significativa.

O estudo realizado por CHEN *et al.* (2020) investigaram a formação de rebarbas e rugosidade no microfresamento de microcanais. O experimento foi conduzido utilizando uma máquina CNC de precisão de três eixos lineares, corpo de prova de cobre puro (99,9%) com dimensões de 10 mm x 10 mm x 4 mm, e fresa de topo de carboneto de tungstênio com duas arestas e 0,5 mm de diâmetro. Os resultados mostraram que as rebarbas diminuíram quando foram utilizadas 21000 r.p.m., velocidade de avanço de 60 mm/min e profundidade de corte de 80  $\mu$ m. As rebarbas foram mais evidentes no lado discordante do movimento da ferramenta, devido a compressão e fricção do material. Por outro lado, no lado em que o movimento da ferramenta coincidia com a direção do corte, o acabamento foi melhor devido ao cisalhamento.

O efeito escala, também foi considerado nesse estudo. A velocidade de avanço foi convertida para  $\mu$ m/dente e constatou-se que, quando o valor resultante era igual ao raio da aresta da ferramenta, ocorria a recuperação elástica do material, desempenhando um papel importante na deformação. Para velocidades de avanço abaixo de 60 mm/min, o material deformado era empurrado para cima pela aresta de corte, resultando na formação de rebarbas relativamente grandes. Já para velocidades acima de 60 mm/min, o avanço excedia o raio da aresta da ferramenta, tornando o processo de cisalhamento dominante, aumentando o atrito e resultando em cavacos mais espessos e com maiores dimensões.

Por fim, com os resultados dos trabalhos relatados, percebe-se que as considerações da Figura 4 são muito importantes, e que variações na ferramenta e material, levam sim à resultados diferentes no processo de microfresamento

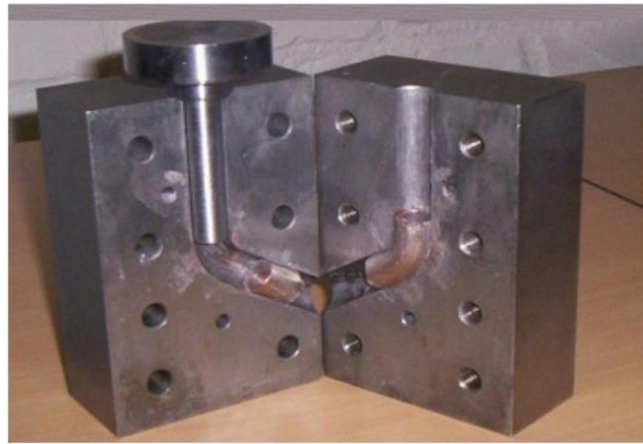
### **3.2 Extrusão de Canal Angular (ECA)**

A Extrusão de Canal Angular é um processo de deformação plástica severa (DPS) realizada por meio de uma prensa e uma matriz, que possibilita deformações

em corpos de provas metálico sem reduzir dimensões. A operação pode ser repetida várias vezes, a fim de se obter graus de deformação elevados e uma microestrutura ultrafina ou nanocristalina, e são essas características que definem o ECA como uma DPS. O processo resulta na melhoria da resistência ao escoamento, dureza, tenacidade e ductilidade (SANUSI, MAKINDE, OLIVER, 2016).

O processo para a realização do ECA consiste em inserir tarugos com seção transversal em forma quadrada ou circular em um canal formado por dois segmentos interligados sequencialmente, que formam ângulo entre si, geralmente de  $90^\circ$  a  $120^\circ$  e a deformação ocorrendo por cisalhamento simples, conforme ilustrado na Figura 7.

**Figura 7 - Matriz de Extrusão de canal angular usada para processar liga de cobre (90%Cu - 1,5%Zn - 3%Pb)**



**Fonte: Sanusi, Makinde e Oliver (2016)**

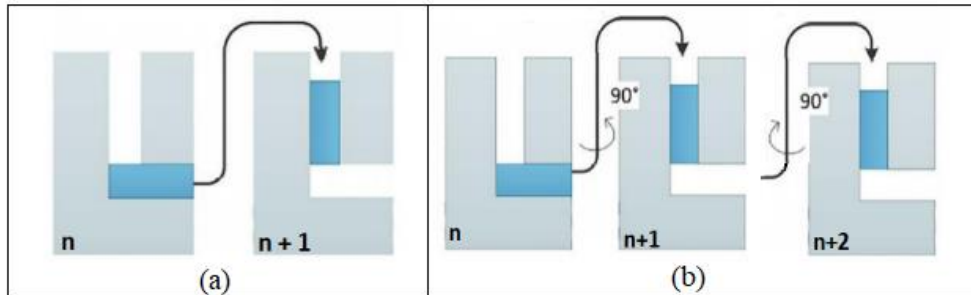
O ângulo da matriz é o principal fator que influencia no refinamento dos grãos, pois será esse ângulo que definirá a deformação em cada passe. Para o ângulo de  $90^\circ$  se obtém melhores resultados, mas como uma maior dificuldade de se fazer a operação. Em aplicações práticas é mais fácil prensar tarugos em matrizes com ângulos maiores que  $90^\circ$  para materiais muito duros ou em materiais com baixa ductilidade.

Outro fator de relevância que irá influenciar no refinamento dos grãos, será a rota de extrusão que o corpo de prova irá percorrer na matriz. Segundo SANUSI, MAKINDE e OLIVER (2016), existem quatro rotas básicas para o processo de ECA.

Na primeira rota, o corpo de prova não sofre nenhuma alteração de sentido em cada passagem. Como mostrado na Figura 8(a), na passagem  $n$ , o corpo tem um sentido que irá passar pela matriz e nas passagens seguintes ( $n+1$ ) ele não sofrerá nenhuma alteração no sentido de passagem.

Na segunda rota o corpo de prova irá ser rotacionado em seu próprio eixo em  $90^\circ$  de maneira alternada como ilustrado na Figura 8(b). Após a primeira passagem pela matriz de extrusão (passagem n), o corpo de prova irá rotacionar  $90^\circ$  em torno do seu eixo e passar novamente pelo processo de ECA. Após essa passagem, o corpo de prova irá rotacionar  $90^\circ$  no sentido contrário a passagem anterior, voltando para a posição inicial (passagem n).

**Figura 8 - Dois primeiros tipos de rotas para Extrusão de Canal angular**

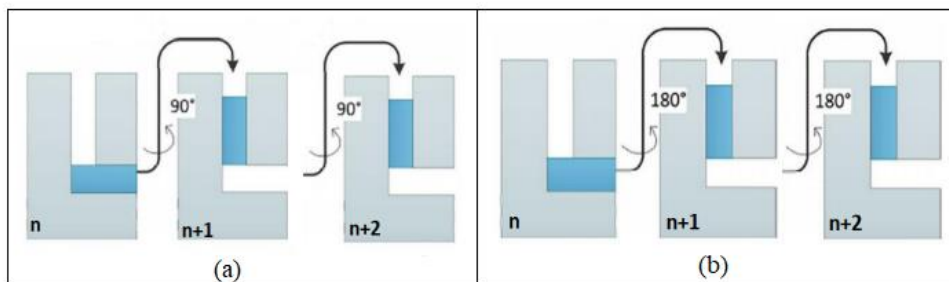


**Fonte: Radhi, Aljassani e Mohammed (2020)**

Já na terceira rota, exemplificada na Figura 9(a), o tarugo irá rotacionar  $90^\circ$ , na mesma direção, a cada passada, ou seja, após a passagem n, o corpo de prova irá rotacionar  $90^\circ$  em seu próprio eixo e será feita a passagem n+1. Após a passagem n+1, o corpo de prova irá rotacionar novamente  $90^\circ$  em torno do seu próprio eixo, no mesmo sentido de rotação da passagem anterior (já terá rotacionado  $180^\circ$  em relação à passagem n), e assim sucessivamente.

Na quarta rota o corpo de prova irá girar em  $180^\circ$  em torno do seu eixo, a cada passagem pela matriz, sendo o processo semelhante a rota, sendo diferenciado pelo ângulo de rotação do corpo de prova, como ilustrado na Figura 9(b).

**Figura 9 - Dois últimos tipos de rota para Extrusão de Canal angular**



**Fonte: Radhi, Aljassani e Mohammed (2020)**

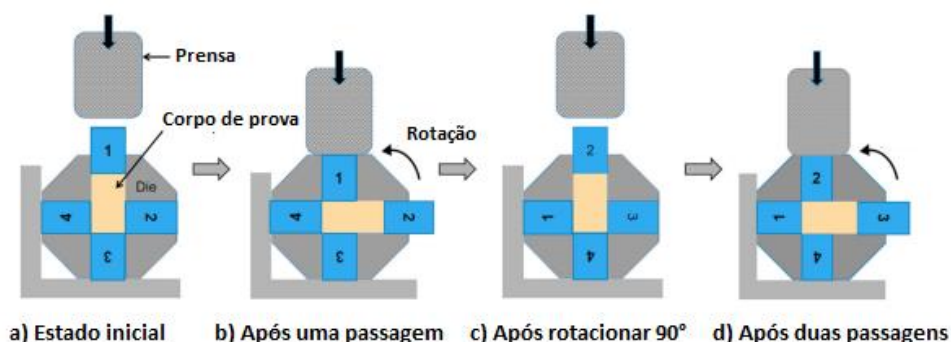
RADHI, ALJASSANI e MOHAMMED (2020), aplicaram o ECA em uma liga de latão (Cu-40%Zn), e tiveram como resultado a diminuição do tamanho de grão da liga para cerca de 1  $\mu\text{m}$ , a uma temperatura de aproximadamente 400°C. Além disso, foi alcançada uma ductilidade superplástica, com um aumento da ductilidade em 640% após 1 passagem pela matriz. De acordo com os autores, esse resultado ocorreu em decorrência da diminuição dos tamanhos dos grãos e com o aumento de núcleos, que foram produzidos com a transição de fase durante o processo.

Segundo KIM, KIM e SONG (2012), se for realizado um tratamento térmico para realização do ECA, um refinamento dos grãos e uma melhoria das propriedades mecânicas serão obtidos. Para essa comprovação, os autores utilizaram ECA com quatro passagens, a uma temperatura de 250°C durante o processo e concluíram que o tamanho dos grãos diminuíram de modo significativo. Com o aumento das passagens, o tamanho do grão passou 13  $\mu\text{m}$  na liga original tratada termicamente a 350 °C por 180 min para 300 nm após quatro passagens de ECA.

A resistência mecânica e a microdureza da liga deformada ECA foram aumentadas consideravelmente em comparação com a liga de latão inicial. Além disso, quando a liga foi tratada termicamente, pelo processo de recristalização à 350°C por 20 minutos, após o processo de ECA foi obtido um aumento no limite de escoamento sem redução no alongamento devido ao refinamento contínuo do grão.

CHEN *et al.* (2022), utilizaram uma liga de latão Cu-38%Zn, cortadas em barras com dimensão de 19,5 mm x 19,5 mm x 45 mm, que foram submetidas a um tratamento térmico de recozimento a 560 °C, por um período de 10 horas seguido de um resfriamento a ar, com objetivo de se obter uma estrutura homogênea. Após esse tratamento, foi realizado ECA, com 8 passagens, sendo feita rotação da matriz de 90°, como ilustrado na Figura 10.

**Figura 10 - Ilustração esquemática do processamento do ECA com matriz rotativa.**

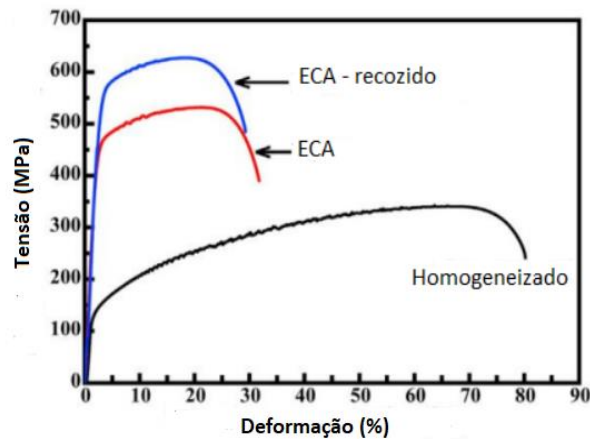


Fonte: Adaptado Chen *et al.* (2022).

O experimento dos autores consistia em fazer um comparativo entre três tipos de corpos de prova: homogeneizado sem o processo do ECA, sem o tratamento térmico com 8 passagens pela matriz e recozido e processado pelo processo ECA.

O Gráfico 2, é um gráfico de tensão de escoamento (Mpa) e deformação (%), que mostra o resultado do ensaio de tração para os corpos de prova submetidos as três condições do trabalho.

**Gráfico 2 - Resultado do ensaio de tração na liga Cu- 38%Zn**



Fonte: Fonte: Adaptado Chen *et al.* (2022).

Como se pode observar no Gráfico 2, a amostra sem o tratamento térmico (homogênea), apresentou uma resistência de 122 MPa quando a deformação próxima de zero e após o processo de extrusão de canal angular, resultou em um aumento de aproximadamente 3 vezes ao valor inicial, resultando em 466 MPa, para a deformação próxima a 5%. O corpo de prova em que foi realizado o tratamento térmico e o processo ECA a resistência máxima obtida foi de 630 MPa, com uma deformação próxima de 25%.

O processo ECA, de maneira geral, é um processo de conformação simples, usado para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, porém a fabricação da matriz (esta pode ser alterada de acordo com a necessidade e dimensão dos corpos de prova) exige processos capazes.

### 3.3 Ligas de latão

O cobre e suas ligas são amplamente utilizados devido às suas excelentes propriedades de condutividades elétricas e térmicas, resistência à corrosão, facilidade

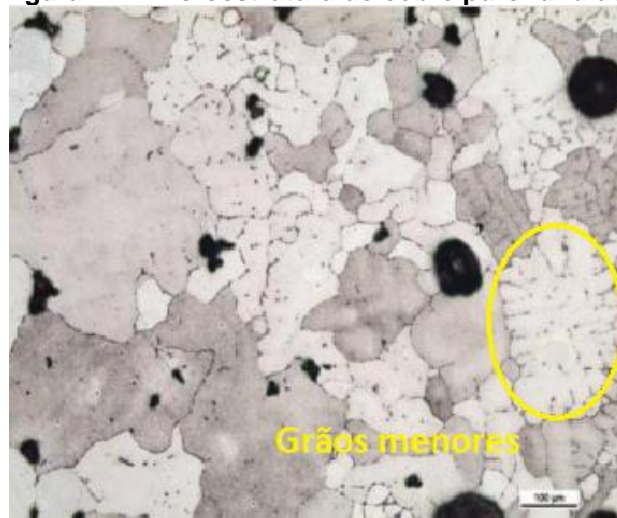
de fabricação e resistência à fadiga. Eles podem ser facilmente soldados, brasados e polidos para quase qualquer textura e brilho, chapeados, revestidos com substâncias orgânicas ou quimicamente coloridos para ampliar ainda mais a variedade de produtos disponíveis (ASM, 2013).

O cobre resiste à oxidação, no entanto, é reativo com o enxofre e seus compostos químicos e, durante essa reação, o sulfeto de cobre é gerado. Além do oxigênio (o principal contaminante), os elementos fósforo e ferro são os contaminantes significativos de cobre. Devido à reatividade do cobre, os perigos de rachaduras na superfície, porosidade e formação de cavidades internas são altos.

A fundição do cobre puro é difícil porque ocorrem grandes contrações durante a solidificação (1,5%), e é a dissolução de uma grande quantidade de gases em altas temperaturas desengatadas durante o processo de solidificação e resulta na gaseificação do metal fundido e na porosidade da fundição. Além disso, a microestrutura do cobre fundido é formada por grãos não uniformes com tamanhos muito diferentes.

Na Figura 11, pode-se observar a diferença de tamanho de grão, devido à alta taxa de resfriamento na superfície, como pode ser visto do lado direito da imagem.

**Figura 11 – Microestrutura do cobre puro fundido.**

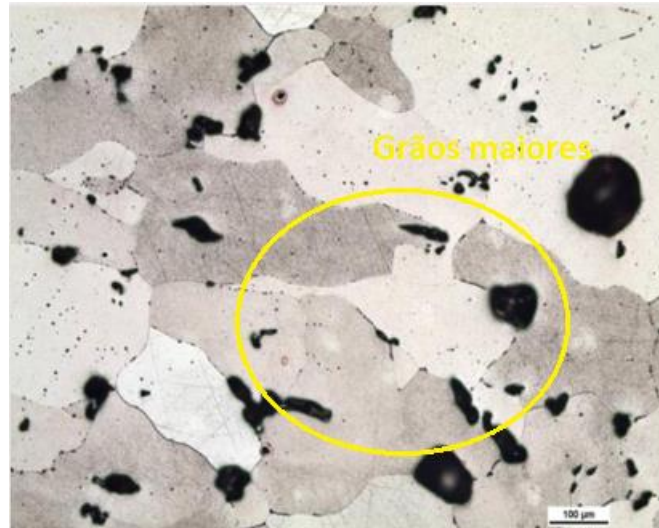


**Fonte: Radomila Konejňá e Stanislava Fintová (2006)**

Também é possível observar a porosidade, representada pelos pontos pretos. A direita da imagem representa a borda do corpo de prova, onde há diferença de tamanho de grão devido à alta taxa de resfriamento na superfície.

Na Figura 12 pode-se observar o centro da amostra, onde estão grãos de tamanhos maiores, quando comparados com a Figura 11.

**Figura 12 - Microestrutura localizada no meio da amostra de cobre fundido.**



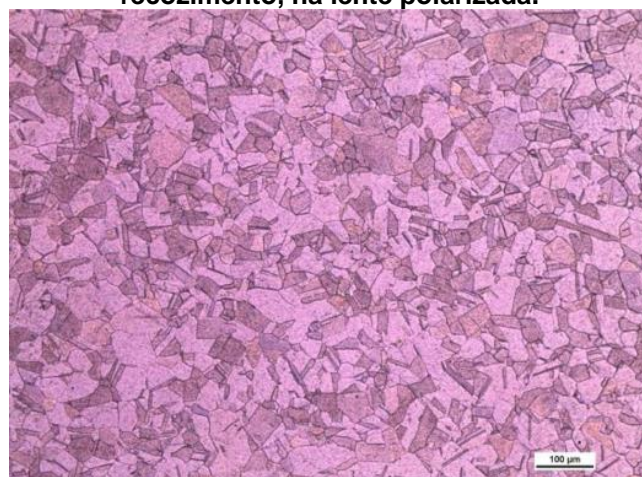
**Fonte: Konejňná e Fintová (2006)**

Esses grãos maiores são resultado de uma taxa de resfriamento relativamente baixa e não uniforme, que permitiu maior crescimento dos grãos nessa região específica.

A microestrutura de cobre forjado consiste em grãos poliédricos uniformes com tamanho de grão semelhante e é possível observar maclas (defeito cristalino que pode ocorrer durante a solidificação), deformação plástica, recristalização ou crescimento de grão, ilustrados nas Figuras 13 e 14 (KONEJŇNÁ FINTOVÁ, 2006).

As propriedades mecânicas do cobre dependem do seu estado e são definidas pela sua estrutura reticular. O cobre tem boa conformabilidade e tenacidade à temperatura ambiente e em temperatura reduzida. Aumentar a temperatura diminui constantemente as propriedades de resistência do cobre (SKOČOVSKÝ, 2006).

**Figura 13 - Microestrutura de Cu forjado com grãos poliédricos uniformes e iguais de recozimento, na lente polarizada.**

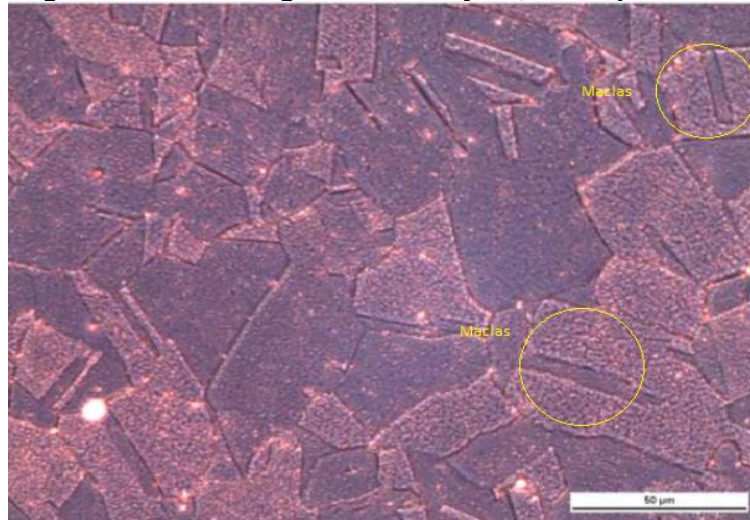


**Fonte: Konejňná e Fintová (2006)**



A cerca de 500 °C as propriedades plásticas do cobre diminuem, e devido a este comportamento, a conformação a frio ou a quente de 800 a 900 °C de cobre é adequada (SKOČOVSKÝ, 2006). No estado fundido, o cobre tem resistência de 160 MPa, e se for laminado a quente a resistência do cobre atinge 220 MPa. (KONEJNÁ FINTOVÁ, 2006)

**Figura 14 - Detalhes grão Cobre forjado, na luz polarizada**



**Fonte: Radomila Konejná e Stanislava Fintová (2006)**

Quanto à classificação da liga de cobre, esta é realizada segundo a ASTM, seguindo o mesmo sistema da *Copper Development Association* (CDA). O Quadro 1 indica as classes destas ligas:

**Quadro 1 - Classificação das ligas de cobre**

Série	Ligas
C 1XX	Cobre comercialmente puro e cobre ligado
C 2XX	Latão binário (Cu - Zn)
C 3XX	Latão com chumbo (Cu - Zn - Pb)
C 4XX	Latão com estanho (Cu - Zn - Sn)
C 5XX	Bronze (Cobre-estanho, com e sem fósforo)
C 6XX	Cobre alumínio e cobre silício
C 7XX	Cuproniquel e alpaca (Cu- Zn- Ni)

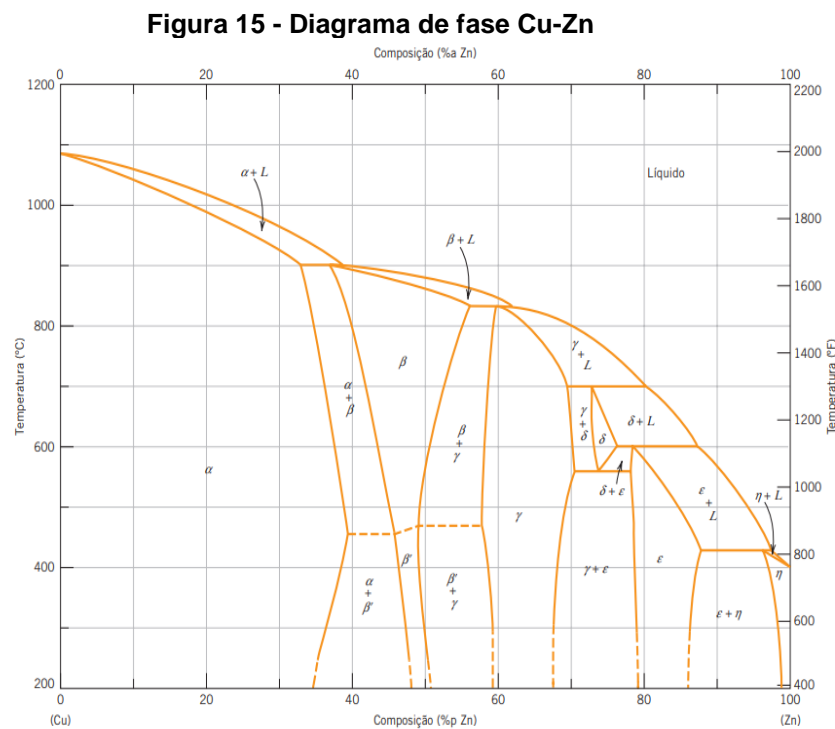
**Fonte: ASTM (2013)**

Como indicado no Quadro 1, latões binários são ligas cobre-zinco e os outros elementos presentes, possui baixos teores, de maneira que são considerados impurezas. Estas ligas apresentam boa resistência à corrosão em ambientes não tão

agressivos e boa conformabilidade, mas em contrapartida os valores da resistência mecânica e dureza são bem mais elevados se comparados aos de cobres comercialmente puros e cobres ligados.

Como o zinco possui reticulado cristalino hexagonal compacto, ao contrário do cobre, que possui reticulado cristalino cúbico de face centrada, a solubilidade do zinco no cobre é limitada. Porém, como a diferença entre os diâmetros dos átomos de cobre e de zinco é de cerca de 4 %, existe uma solubilidade próxima a 35 % na temperatura de 20 °C e máxima de 38 % a uma temperatura de 456 °C. Essas diferenças de diâmetros facilitam o aumento da dureza, mas reduzem a solubilidade. Portanto, o aumento da dureza por solução sólida é evidenciado quando essa diferença de diâmetros é pequena, de maneira que se houver grande diferença, irá favorecer outros métodos de aumento de dureza (BARBOSA, 2013).

A Figura 15 mostra as fases da liga Cu-Zn e indica seis soluções sólidas diferentes, duas terminais ( $\alpha$  e  $\eta$ ) e quatro intermediárias ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  e  $\epsilon$ ). Algumas linhas de fronteiras entre fases próximas à parte inferior estão tracejadas com objetivo de indicar que suas posições não foram determinadas com exatidão. Isso ocorre pois, as baixas temperaturas de difusão são lentas, sendo necessário um tempo longo para alcançar o equilíbrio (CALLISTER, 2016).



**Fonte: Callister. e Rethwisch (2016)**

A liga de latão C230 composta por 84 a 86% de cobre e 14% a 16% de zinco, é um exemplo de latão binário. Esse tipo de latão, é chamado comercialmente como latão vermelho e é utilizado em tubulação para condensadores e trocadores de calor, tubulação de encanamentos e núcleos de radiadores (ASTM, 2013). Algumas de suas propriedades estão indicadas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Propriedades da liga de latão C230**

Liga Cu-Zn	Composição %	Limite de resistência a tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongament o (%)	Dureza Brinell (HB)	Limite de resistência à fadiga (MPa)
C230	85Cu - 15Zn	310 - 600	100 - 420	50 - 4	60 - 135	105 - 170

**Fonte: Adaptado de MATEO (2006)**

As ligas denominadas de latão vermelho são ligas de cobre, contendo de 15% à 20% de zinco como principal elemento de liga e até 5% de Sn e 8% de Pb como elementos de liga adicionais (MATEO, 2006).

As ligas de latão, quando submetidas à têmpera, recebem duas siglas adicionadas à série, OS e H. De acordo com a NBR6363, a sigla OS quer dizer que a têmpera foi produzida por um recozimento, a fim de se obter tamanhos de grãos específicos. A Tabela 2 mostra a relação entre a nomenclatura e o tamanho dos grãos, que se pode obter com o tratamento de recozimento para as ligas de cobre.

**Tabela 2 - Têmperas dos produtos recozidos até um determinado tamanho dos grãos.**

Código	Tamanho médio nominal dos grãos em mm
OS005	0,005
OS010	0,010
OS035	0,035
OS070	0,070
OS100	0,100
OS200	0,200

**Fonte: NBR 6363 (1982)**

Percebe-se que o número após a sigla OS corresponde ao tamanho médio que o grão pode ter após o processo.

A sigla H é a definição de têmpera produzida por deformação a frio controlada e os números subsequentes a essas siglas determinam o tamanho dos grãos. A Tabela 3 mostra a determinação de dureza para as ligas de cobre, quando submetidas ao tratamento de tempera.

**Tabela 3 - Têmperas produzidas por laminação e trefilação para cumprir requisitos normalizados.**

Código	Denominação
H00	1/8 duro
H01	1/4 duro
H02	1/2 duro
H03	3/4 duro
H04	Duro
H06	Extra duro
H08	Mole
H10	Extra mole
H12	Mola especial
H13	Ultra mole
H14	Super mole

**Fonte: Adaptado da NBR 6363 (1982)**

A Tabela 4 mostra os resultados das propriedades de chapas de 1 mm de espessura em liga de latão C230, submetidas a condições diferentes de têmperas. Comparando os dados desta tabela, verifica-se que quanto maior a dureza, maior são os valores da resistência à tração, resistência ao escoamento e a tensão de cisalhamento. Em contrapartida, o material fica menos maleável, conforme a dureza aumenta, ou seja, a porcentagem do alongamento diminuiu à medida que o valor da dureza aumenta.

**Tabela 4 - Propriedades da chapa de latão C230 em diferentes condições de têmpera.**

Têmpera	Resistência à tração		Resistência ao escoamento		Alongamento (%)	Dureza	Tensão de cisalhamento	
	MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi
OS070	270	39	69	10	48	56 HRF	215	31
OS050	275	40	83	12	47	59 HRF	215	31
OS035	285	41	97	14	46	63 HRF	215	31
OS025	295	43	110	16	44	66 HRF	220	32
OS015	310	45	125	18	42	71 HRF	230	33
H01	345	50	270	39	25	55 HRB	240	35
H02	395	57	340	49	12	65 HRB	255	37
H04	485	70	395	57	5	77 HRB	290	42
H06	540	78	420	61	4	83 HRB	305	44
H08	580	84	435	63	3	86 HRB	315	46

**Fonte: Adaptado da ASTM (2013)**

Como era esperado, há uma correspondência da dureza com os números que precedem as siglas OS e H. Para a sigla OS, quanto menor o número, menor é o tamanho de grão e maior será a dureza. Para a sigla H, quanto maior o número, maior também será a dureza.

## 4. MATERIAS E MÉTODOS

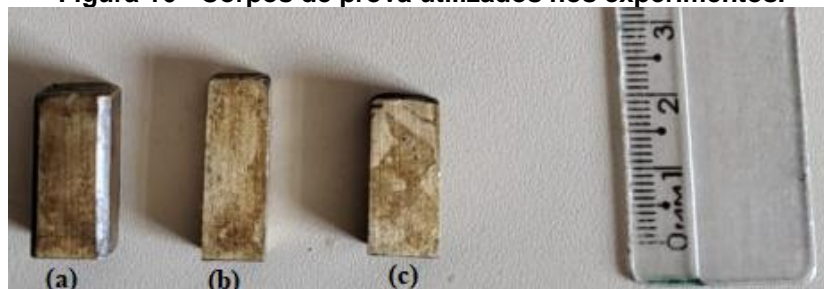
Nesse tópico será descrito os materiais, equipamentos e descrição de todos os processos feitos para a realização do trabalho.

### 4.1 Corpos de prova

Neste trabalho foram utilizados corpos de prova de latão C230 cedidos pelo DEMa – Departamento de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. Dois corpos de prova obtidos pelo processo de Extrusão de Canal Angular foram comparados com corpo de prova sem o processo de ECA.

A Figura 16 mostra as dimensões dos corpos de prova utilizados. Os corpos de prova da Figura 16 (a), (b) e (c) passaram por nenhuma (amostra 1), quatro (amostra 2) e seis passagens (amostra 3) no ECA, respectivamente.

**Figura 16 - Corpos de prova utilizados nos experimentos.**



Fonte: Autoria Própria (2022)

A Extrusão em Canal Angular (ECA) foi realizada em uma máquina de ensaios universais hidráulica da marca KRATOS no laboratório do DEMa, utilizando matrizes de conformação de seção retangular construída em aço H13 temperado e revestido superficialmente com nitreto de titânio. O revestimento tem como objetivo de diminuir o coeficiente de atrito entre os componentes móveis do sistema. As dimensões do canal da matriz são de 7 mm x 25 mm e ângulo  $\Phi$  de 120 °. A punção possui as mesmas características da matriz e dimensões de 6,9 mm x 24,9 mm.

Os corpos de prova foram retificados e o rebolo utilizado no processo foi da marca ICDER, composto de óxido de alumínio branco AA, granulometria 60 mesh, com dureza K e liga V2. A retificadora plana convencional utilizada, da marca EuroStec e modelo KGS150, equipada com morsa magnética, está localizada no Laboratório de Usinagem da UTFPR, do Campus Guarapuava.

Para a retificação, foi utilizado suportes de aço carbono com rebaixo (ilustrados na Figura 17), juntamente com uma cola, pois o latão é um material não magnético.

**Figura 17 – Suporte utilizado para fixar os corpos de prova no processo de retificação**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

A cola foi feita com uma composição de 50% de peso de breu, 25% de parafina e 25% de cera de abelha. Para aplicação da cola, a mesma tinha que ser aquecida, até ser fundida.

#### **4.2 Microfresamento**

Para a realização do microfresamento foi utilizado o centro de usinagem ROMI D600 localizado no NuLEEn- UFSCar. No centro de usinagem foi instalado uma turbina da BIG Daishowa BT40-RBX5-4S-151H (ilustrada na Figura 18), que ao ser acionada pelo sistema de ar comprimido produziu uma pressão de aproximadamente 0,45 MPa, gerando uma rotação de 45000 r.p.m.

**Figura 18 - Porta ferramenta da marca BIG PLUS utilizado no microfresamento dos canais.**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

O ar comprimido fornecido à turbina, permite que se chegue a altos valores de rotação por minutos necessários para o processo, como indicado na Tabela 5.

**Tabela 5 - Pressão e RPM do porta ferramenta BIG PLUS.**

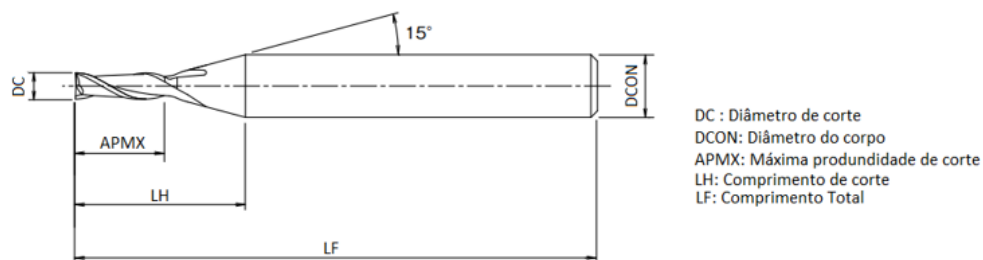
Pressão (MPa)	0,3	0,4	0,5	0,6
RPM	38000	43000	47000	50000

**Fonte: BIG DAISHOWA (2019)**

No processo de microfresamento, a peça foi fixada na morsa, de modo que a superfície a ser usinada ficasse paralelo com à superfície da morsa. Para o zeramento das ferramentas foi utilizado um papel que era inserido na superfície da peça e a ferramenta deveria tocar, sutilmente, para não haver quebra da aresta de corte. A cada usinagem de canal as arestas de corte das ferramentas eram analisadas, mas foram desprezadas durante os ensaios.

Para se manter um padrão, as microfresas eram inseridas em 25 mm para dentro da porta ferramenta, também com objetivo de se manter o zeramento inicial. Além disso, as ferramentas eram trocadas para cada parâmetro. No total foram utilizadas 13 microfresas. A ferramenta utilizada foi uma microfresa da marca OSG, mostrada na Figura 19, com diâmetro 0,5 mm e duas arestas de cortes, revestida com WXL um revestimento multicamada a base de cromo, com alta dureza e melhor lubrificação.

**Figura 19 - Dimensões da microfresa utilizada no estudo.**



**Fonte: OSG Corporation (2021)**

A Tabela 6 mostra as características da microfresa utilizada no experimento e os parâmetros de corte indicados pela empresa.



**Tabela 6 - Informações de parâmetros de corte e características da microfresa.**

Número de série	DC (mm)	Ap máximo (mm)	LF (mm)	LH (mm)	DCON (mm)	n	vf (mm/min)
3182405	0,5	1,5	45	7,6	4	50000	200

Fonte: OSG Corporation (2021)

A Figura 20 mostra a comparação de uma fresa convencional de  $\varnothing 10$  mm e a microfresa utilizada no experimento com  $\varnothing 0,5$  mm.

**Figura 20 – Comparação entre uma fresa convencional e uma microfresa.**

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o trabalho foram usinados canais com comprimento de 5 mm e realizada réplicas, com uma rotação de 45000 rpm, que foi o maior valor obtido na máquina CNC no momento do experimento, para verificar a influência do avanço por dente (fz) e da profundidade de usinagem (ap) no acabamento superficial do canal e na formação de rebarbas. Os parâmetros preliminares utilizados nos experimentos estão mostrados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Parâmetros de corte utilizados para a amostra 1.**

ap (mm)	0,05			0,3		
fz ( $\mu\text{m}/\text{dente}$ )	0,2	3	10	0,2	3	10

Fonte: Autoria própria (2023).

Após a realização dos primeiros 6 canais na amostra 1, foi verificado que as ferramentas quebravam quando se utilizava a profundidade de corte 0,3 mm e avanço de 3  $\mu\text{m}/\text{dente}$  e 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ . Com isso, esses parâmetros foram desconsiderados para a réplica desta amostra e para os demais corpos de prova, foram utilizados os parâmetros mostrados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios para todas as amostras.**

ap (mm)	0,05			0,3
fz ( $\mu\text{m}/\text{dente}$ )	0,2	3	10	0,2

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Com isso, se manteve os valores de ap escolhidos previamente e para o maior ap, foi utilizado somente o avanço de 0,2  $\mu\text{m}/\text{dente}$ .

### 4.3 Análise dos experimentos

Para a análise da rebarba e rugosidade foi utilizado o microscópio Alicona Infinit Focus SL (Figura 21) com uma lente de 10x que permitiu aumento total de 100 vezes. A altura da rebarba foi medida a partir da superfície do corpo de prova considerando o início, meio e final do canal, medidas no lado concordante e discordante do corte. A rugosidade foi medida no comprimento total do canal, de modo que os parâmetros utilizados para as análises foram rugosidade média (Ra) e altura média dos cinco valores da rugosidade parcial (Rz), utilizando a NBR 8404 como referência. Os parâmetros Ra e Rz foram escolhidos pois são os valores comumente indicados para caracterizar as tolerâncias microgeométricas atingidas nos processos de fabricação.

Para a medição de microdureza dos corpos de prova foi utilizado um microdurômetro da marca SHIMADZU, modelo HMV-20G da UTFPR de Ponta Grossa, do Laboratório de Caracterização de Materiais. A medição da microdureza foi realizada em 10 pontos na superfície do material, com uma carga de 300 gf por 15 segundos, com 300  $\mu\text{m}$  de distância entre as indentações. O Critério de Chavenet foi utilizado para desconsiderar valores espúrios.

**Figura 21 - Microscópio Alicona Infinit Focus utilizado para as análises de rebarbas e rugosidade.**



**Fonte: A autoria própria (2023)**

O ataque químico utilizado como reagente para revelar a microestrutura foi composto de 100 ml de H<sub>2</sub>O, 25 ml de HCl e 8 g de Cloreto férrico. O ataque foi feito por meio de fricção, com cotonete, por 15 segundos.

Para a análise de composição química foi utilizado o espectrômetro de emissão ótica da marca SHIMADZU, modelo PDA-7000, do Laboratório de Materiais da UTFPR - Ponta Grossa. Para a realização do procedimento, devido as dimensões do material, o corpo de prova teve que ser cortado e forjado, para obter a dimensão ideal para realização da espectrometria, pois a amostra deve impedir que o gás vindo da parte inferior da máquina saia, servindo como vedação para ocorrer o experimento.

A microestrutura da liga de cobre foi analisada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca Tescan, Modelo Vega3, com metalizador (Marca Quorum, Modelo SC7620), com sistema detector de Espectroscopia por Energia Dispersiva - EDS (Oxford, x-Act) para microanálises químicas com identificação e mapeamento dos elementos químicos presentes.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no microfresamento da liga de latão em três condições diferentes, variando dois parâmetros de corte, a profundidade de corte em dois níveis e o avanço por dente em três níveis, serão analisados e discutidos neste capítulo. Os resultados foram divididos em três tópicos na seguinte sequência: análise do material, da rugosidade e das rebarbas formadas nos microcanais.

### 5.1 Análise do material

A composição química da liga foi obtida no MEV e no espectrômetro. Pela espectroscopia por energia dispersiva a liga apresentou 84,7% de cobre e 15,3% de zinco (as medidas obtidas estão no Apêndice B). A composição obtida no espectrômetro de emissão ótica está apresentada da Tabela 9.

**Tabela 9 – Composição química (em porcentagem) da liga de latão C230 por espectrometria**

Cu	Zn	Sn	Si	Fe
89,26	10,62	0,043	0,031	0,016

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Percebe-se que houve diferença de composição, quando se utilizou metodologias diferentes para obter a composição. Pela norma ASTM B36 a quantidade de cobre varia de 84% a 86% e para empresas especializadas em comercializar esse material, na maioria dos casos a porcentagem de cobre é 88% (Roche Industry, 2021).

As microestruturas reveladas das amostras 1, 2 e 3, obtidas através da microscopia ótica podem ser visualizadas respectivamente, nas Figuras 22, 23 e 24.

Pela Figura 22 percebe-se que os grãos da amostra 1 são maiores que aqueles das amostras 2 (Figura 23) e 3 (Figura 24). Quando se compara as figuras, observa-se que na amostra 1 não há orientação dos grãos, ao passo que nas amostras em que o processo foi aplicado, além do alongamento dos grãos estes ficarão no mesmo sentido da extrusão.

**Figura 22 – Microestrutura da liga de latão C230 na amostra 1.**



**Fonte: Aatoria própria (2023)**

Pelas Figuras 23 e 24 pode-se notar que os grãos estão alinhados verticalmente à borda inferior das figuras.

**Figura 23 - Microestrutura da liga de latão C230 na amostra 2.**



**Fonte: Aatoria própria (2023).**

Outro fato a ser notado, é o resultado da diminuição dos grãos. As marcas mais escuras, representam o zinco, que conforme se aumenta o número de passagens pelo ECA, essas marcas diminuíram, comprovando a diminuição dos grãos. No Apêndice A pode ser visto o resultado de um EDS, que mostra a distribuição do zinco pela amostra.

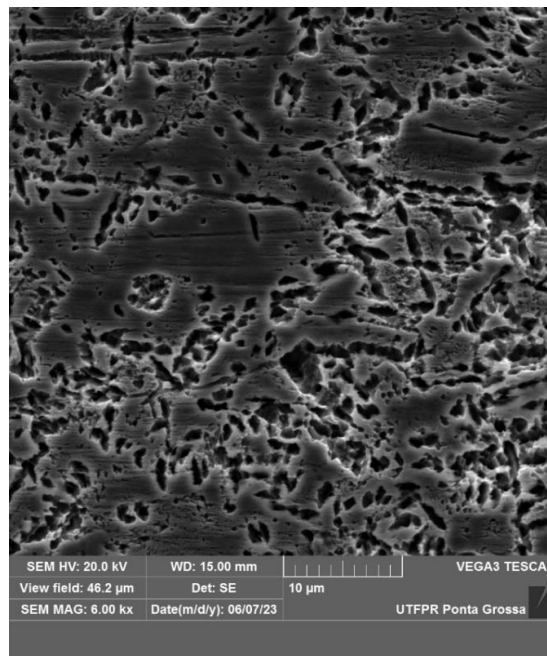
**Figura 24 - Microestrutura do latão C230 na amostra3.**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

As Figuras 25, 26 e 27 mostram as imagens da microestrutura da liga obtidas no microscópio eletrônico de varredura. Nessas imagens é possível verificar que com o processo ECA os grãos foram alongados.

**Figura 25 – Microestrutura da amostra 1 obtida no MEV**



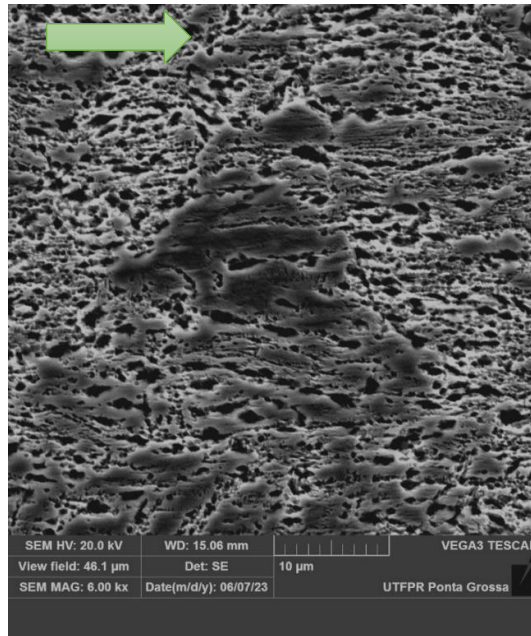
**Fonte: Autoria Própria (2023).**

Também é possível confirmar o que os grãos se alongam no sentido em que ocorre a a extrusão das amostras. Se comparar a Figura 25, com as Figuras 26 e 27

nota-se que há uma tendência de orientação dos grãos, no sentido das setas inseridas nas figuras. Por outro lado, não se observa essa tendência na Figura 25.

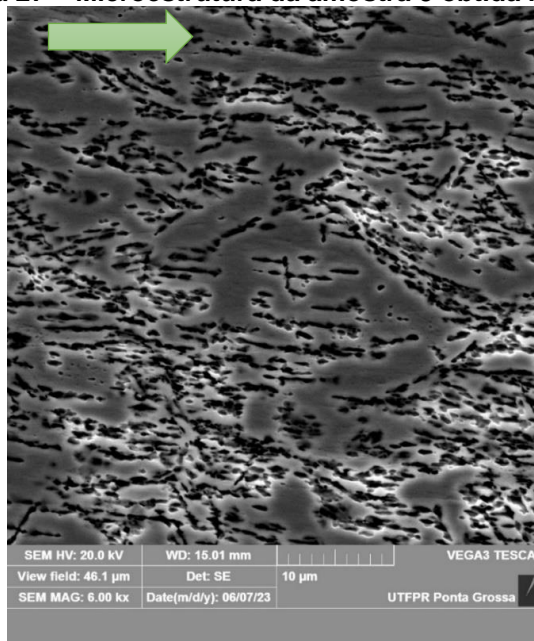
A partir dessas figuras, pode-se concluir que, as 4 e 6 passadas das amostras no processo de extrusão com canal angular, diminuiu e alongou os grãos.

**Figura 26 – Microestrutura da amostra 2 obtida no MEV**



**Fonte: Autoria Própria (2023)**

**Figura 27 – Microestrutura da amostra 3 obtida no MEV**

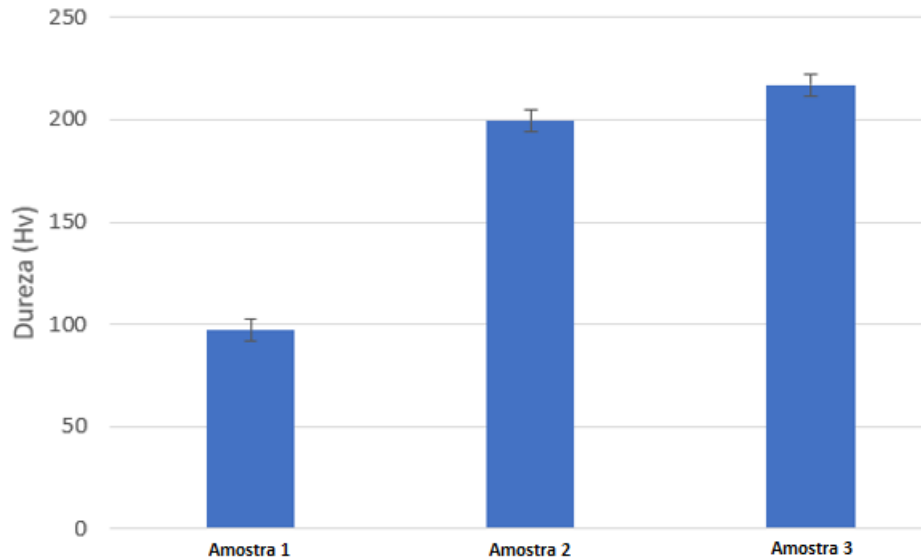


**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Com os equipamentos disponíveis nos laboratórios utilizados somente foi possível observar a alteração dos tamanhos dos grãos, não sendo exequível a realização das medidas.

O resultado da microdureza das amostras está mostrado no Gráfico 3, em que as amostras sem processo ECA e com 4 e 6 passadas no processo ECA, foram denominadas respectivamente, amostra 1, amostra 2 e amostra 3.

**Gráfico 3 – Microdureza das amostras utilizadas nos ensaios de microfresamento**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Nota-se que o ECA influenciou na dureza do material, pois esta aumenta com o aumento das quantidades de passagens pelo processo. Em comparação com a amostra 1, a microdureza da amostra 2 teve um aumento de 105,25%. Já na amostra 3, a microdureza teve um aumento de 123,38% em comparação com a amostra 1. Com isso, pode-se concluir que o processo de ECA além de diminuir e alongar os grãos das amostras da liga de latão, proporcionou aumento da dureza, o que se pode entender que houve também o encruamento dos grãos.

## 5.2 Análise da altura da rebarba

Para essa análise é importante frisar que a forma de zeramento da ferramenta utilizada no trabalho, não garantiu o mesmo valor de profundidade e este valor variou entre os microcanais. Vale ressaltar também que, a ordem dos experimentos foi aleatória e a ferramenta era trocada a cada nova condição de parâmetro utilizada. Dessa forma, foi medida a profundidade de corte no início e no fim dos microcanais, através das imagens obtidas no Alicona, para verificar a variação da profundidade. As



Tabelas 10 e 11 mostram os resultados obtidos. A ausência de valores na tabela, se refere aos canais em que houve acúmulo de cavaco no fundo e na lateral, se tornando inviável a medição.

**Tabela 10 – Profundidade de corte medida após usinagem no início do canal**

Amostras	fz	ap	ap medido no 1º teste	ap medido na réplica	Diferença no 1º teste	Diferença na réplica
Sem tratamento	0,2	0,05	0,01	0,07	0,04	0,02
	3	0,05	0,04	0,07	0,006	0,02
	10	0,05	0,08	*	0,03	*
	0,2	0,3	0,29	*	0,005	*
4 passes de ECA	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05	0,002
	3	0,05	0,09	0,08	0,038	0,03
	10	0,05	0,09	0,07	0,038	0,02
	0,2	0,30	0,33	0,08	0,03	0,22
6 passes de ECA	0,2	0,05	0,22	0,17	0,17	0,12
	3	0,05	0,22	0,23	0,17	0,18
	10	0,05	0,15	0,21	0,10	0,16
	0,2	0,30	0,16	0,45	0,13	0,15

\* não medido por excesso de cavaco

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Como é possível notar, a profundidade de corte real variou em cada usinagem de canal. Os procedimentos adotados (todas ferramentas com 25 mm comprimento fixado no mandril e superfícies retificadas) e a forma de zeramento não foram suficientes para manter a profundidade de corte.

Pela Tabela 10, observa-se que a condição que teve maior variação de profundidade de corte no início do canal, foi na réplica da amostra 3, avanço 3 µm/dente e ap de 0,05 mm, obtendo valor 363,7% maior que o esperando.

A Tabela 11 indicada os valores de profundidade de corte medidos no final do canal. Os resultados mostram que a condição que teve maior variação no final do canal, foi na réplica da amostra 3, avanço 3 µm/dente e ap de 0,05 mm, obtendo um valor 169,42% maior que o esperando.

**Tabela 11 – Profundidade de corte medida após usinagem no final do canal.**

Amostra	Fz	Ap esperado	Ap real	Ap real réplica	Diferença	Diferença réplica
Sem tratamento	0,2	0,05	0,03	0,10	0,01	0,05
	3	0,05	0,07	0,12	0,01	0,07
	10	0,05	0,02	*	0,03	*
	0,2	0,3	0,3	0,35	0,002	0,05
4 passes de ECA	0,2	0,05	0,13	0,09	0,08	0,04
	3	0,05	0,13	0,11	0,07	0,06
	10	0,05	0,12	0,10	0,07	0,05
	0,2	0,3	0,28	0,31	0,02	0,01
6 passes de ECA	0,2	0,05	0,13	0,13	0,08	0,07
	3	0,05	0,12	0,13	0,07	0,08
	10	0,05	0,06	0,11	0,01	0,06
	0,2	0,3	0,36	0,27	0,06	0,03

\* não medido por excesso de acúmulo de cavaco

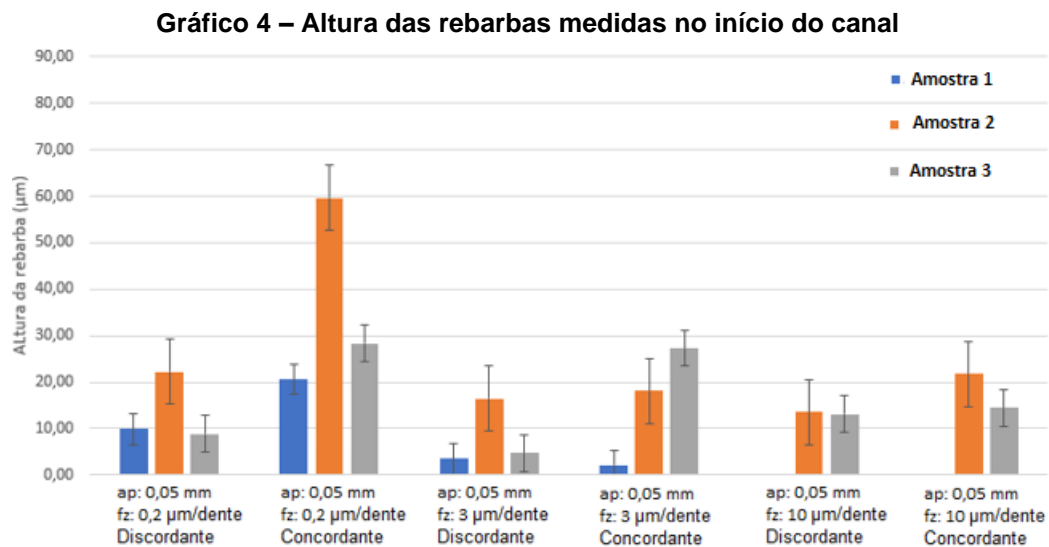
**Fonte: Autoria própria (2023)**

SOUZA (2023) realizou o zeramento da ferramenta em duas etapas, utilizando um microscópio USV com ampliação de 500x. Na primeira parte, a ferramenta era aproximada o máximo possível da peça, sem nenhum movimento de rotação, de modo que esse posicionamento era acompanhado pelo microscópio. Na segunda parte, a ferramenta era posicionada na altura da primeira etapa, acionada a rotação e a ferramenta aproximava da peça, percorrendo aproximadamente 2 mm, com ausência de contato visualmente. O processo era repetido, adicionando 1  $\mu\text{m}$  no eixo de aproximação, até que a ferramenta tocasse na peça. Esse toque era garantido pela presença de um pequeno risco, e assim o zeramento era realizado, garantindo um erro de aproximadamente a resolução da máquina. Como o zeramento da ferramenta não foi com o microscópio e sim visual, esperava-se que esse comportamento de profundidade iria acontecer.

Uma outra possibilidade para os canais que possuem profundidade de corte menor do que as esperadas, pode ser em relação à uma possível recuperação elástica do material, resultando na alteração da profundidade de corte. A ocorrência de alguma flexão na ferramenta durante o microfresamento também pode ser outro fator. OLIVEIRA et. al (2015) constatou em seu experimento de microfresamento em aço ABNT 1045 trefilado, que os microcanais sofreram recuperação elástica de 17,8%,

pois as ferramentas não sofreram desgaste e a peça e as ferramentas não foram removidas dos sistemas de fixação entre o microfresamento dos canais. Para o referenciamento foi utilizado uma fresa com erro dimensional em relação à profundidade de corte esperada de  $0,4\ \mu\text{m}$ , e a ferramenta não teve flexão e, portanto, não teve influência no experimento.

A altura da rebarba nos micros canais foi medida no início, meio e fim do comprimento do canal. Os resultados obtidos podem ser vistos nos Gráficos 4, 5 e 6.



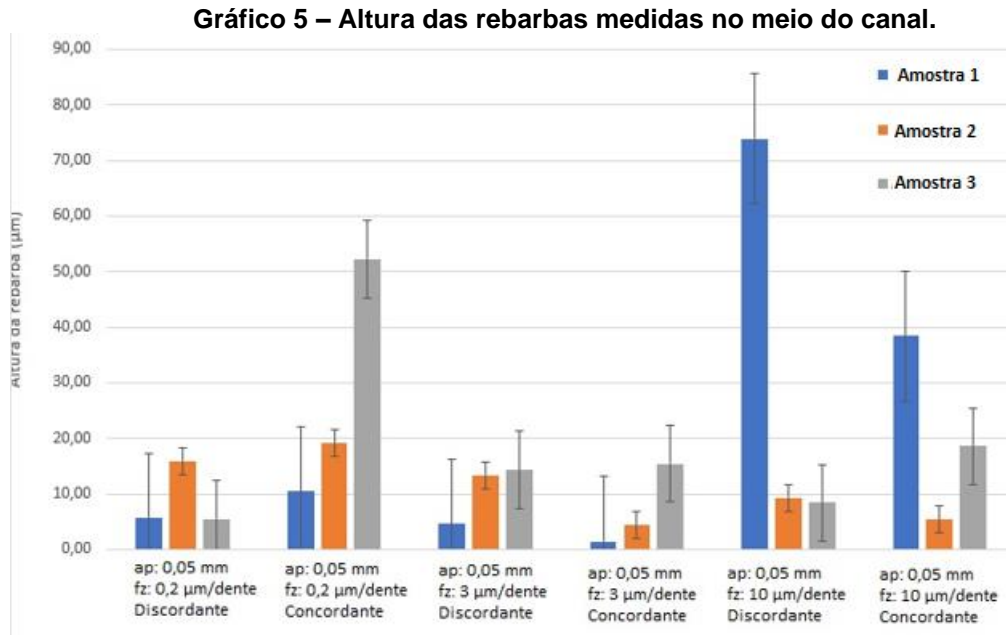
**Fonte: Autoria própria (2023)**

O gráfico 4 apresenta os resultados da altura de rebarba no início do canal, e percebe-se que os melhores resultados obtidos foram para a amostra 1, exceto pela última condição do experimento. Nas condições de profundidade de corte  $0,05\ \text{mm}$  e avanço por dente de  $0,2\ \mu\text{m}$ , a formação de rebarba do lado concordante é maior do que em relação ao lado discordante.

Já para a condição de profundidade de corte  $0,05\ \text{mm}$  e  $fz$  de  $3\ \mu\text{m}$ , se obteve baixa formação de rebarba na amostra 1, tanto no lado concordante que resultou em uma altura de rebarba de  $3,5\ \mu\text{m}$ , quanto no lado discordante que obteve  $2,08\ \mu\text{m}$ . Para a amostra 2, a altura de rebarba se assemelhou nos dois lados do corte. Para a amostra 3, a altura da rebarba no lado discordante foi menor em comparação ao lado concordante.

Para a última condição analisada, a amostra 1 não teve a altura de rebarba medida, pois houve acúmulo de cavaco, não sendo possível buscar os pontos de referência para realizar a medição. A amostra 2, o lado concordante apresentou maior

altura de rebarba em comparação ao lado discordante. Para a amostra 3, os valores da altura de rebarba no lado concordante e discordante ficaram próximos, chegando em valores de 14,45  $\mu\text{m}$  e 13,05  $\mu\text{m}$ , respectivamente.



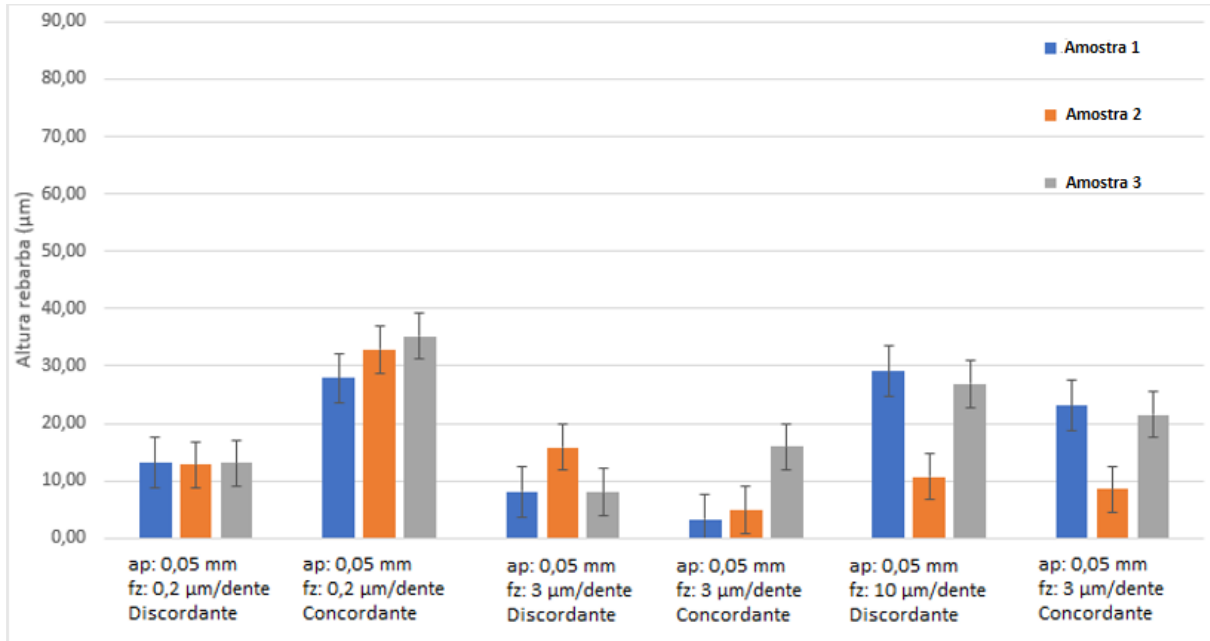
**Fonte: Autoria própria (2023)**

O Gráfico 5 mostra os resultados das alturas de rebarbas obtidas no meio do canal. Para o maior avanço (10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ ), os melhores resultados são das amostras que passaram pelo processo de ECA. Para os parâmetros de profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 0,2  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , no lado discordante as amostras 1 e 2 obtiveram resultados semelhantes, com a amostra 2 obtendo valores superiores.

Nas condições de profundidade de corte 0,05 mm e avanço de 3  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , a amostra 1 obteve altura de rebarba de 4,56  $\mu\text{m}$  no lado discordante e 1,46  $\mu\text{m}$  no lado concordante. A amostra 2, obteve uma altura de rebarba maior no lado discordante, onde obteve 13,41  $\mu\text{m}$ . No lado concordante já obteve resultado de 4,39  $\mu\text{m}$ . A amostra 3, obteve melhores resultados no lado discordante, resultando em 14,32  $\mu\text{m}$  e para o lado concordante de 15,42  $\mu\text{m}$ .

Já para as condições com avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , a amostra que teve os melhores resultados foi a que teve 4 passes no ECA, resultando em 9,27  $\mu\text{m}$  de altura de rebarba no lado discordante e 5,42  $\mu\text{m}$  no lado concordante. A amostra 3 obteve altura de rebarba de 8,36  $\mu\text{m}$  no lado discordante e 18,54 no lado concordante.

Gráfico 6 – Altura das rebarbas medidas no final do canal



Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 6 demonstra os resultados da altura de rebarba obtidas no final de cada canal. Nas condições de corte com profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 0,2 µm/dente, todas as amostras obtiveram resultados semelhantes no lado discordante. A amostra 1 obteve 13,06 µm, na amostra 2 obteve 12,86 µm e a amostra 3 resultou em 13,07 µm. No lado concordante, a amostra 1, obteve os melhores resultados, obtendo 27,86 µm. A amostra 2, obteve 32,86 µm e a amostra 3, 35,25 µm. Considerando o desvio padrão, os resultados foram semelhantes.

Nas condições de corte com avanço de 3 µm/dente, a amostra 1, obteve 8,13 µm no lado discordante e 3,35 µm no lado concordante. Já na amostra 2, no lado discordante se obteve altura de rebarba de 15,83 µm e no lado concordante 4,91 µm. Para a amostra 3, no lado discordante se obteve 8,05 µm e no lado concordante 15,91 µm.

Na condição de avanço de 10 µm/dente, o melhor resultado é da amostra 2, que obteve 10,73 µm de altura de rebarba no lado discordante e 8,54 µm no lado concordante. A amostra 1, obteve 29,10 µm no lado discordante e 23,07 µm no lado concordante. Já na amostra 3, obteve altura de rebarba de 26,9 µm no lado discordante e 21,58 µm no lado concordante.

O estudo realizado por CHEN (2020) analisou o comportamento das rebarbas durante o processo de microfresamento de cobre puro. O autor concluiu que quanto maior a profundidade de corte, maior a formação de rebarba, tanto para movimentos

concordantes quanto para discordantes. Já no caso do avanço, foi observado que o crescimento das rebarbas foi menor em velocidades intermediárias. Para valores muito baixos de avanço ocorre o efeito *ploughing* do material, enquanto valores muito altos facilitam a formação de cavaco maiores e mais espessos, o que faz aumentar a formação de rebarba.

Com isso, percebe-se equivalência com o estudo de CHEN, pois para os menores valores de profundidade de corte, geralmente se obteve menor altura de rebarba. Com relação ao avanço, o melhor resultado, foi para o avanço de  $3 \mu\text{m}/\text{dente}$ , que é o valor intermediário proposto.

As Figuras 28, 29 e 30 mostram as imagens dos canais nas melhores condições obtidas. A Figura 28 ilustra a amostra 1.

**Figura 28 – Micro canal na amostra 1 com ap de 0,05 mm e fz de  $3 \mu\text{m}/\text{dente}$**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Vale ressaltar que essa condição teve ap real de 0,04399 mm e 0,07415 mm na réplica, no início do canal da amostra 1. Dentre as amostras, a que obteve melhor resultado foi a que não teve nenhuma passagem pelo processo de extrusão angular. Esta condição obteve as menores alturas de rebarbas no comprimento total do micro canal e com pouca variação de altura de rebarba para o lado concordante e discordante do corte, quando os parâmetros de corte com profundidade de corte 0,05 mm e avanço de  $0,2 \mu\text{m}/\text{dente}$  e  $3 \mu\text{m}/\text{dente}$  foram utilizados.

Na amostra 2 o ap real foi de 0,08817 mm e 0,0857 mm na réplica, e o micro canal obtido pode ser observado na Figura 29.

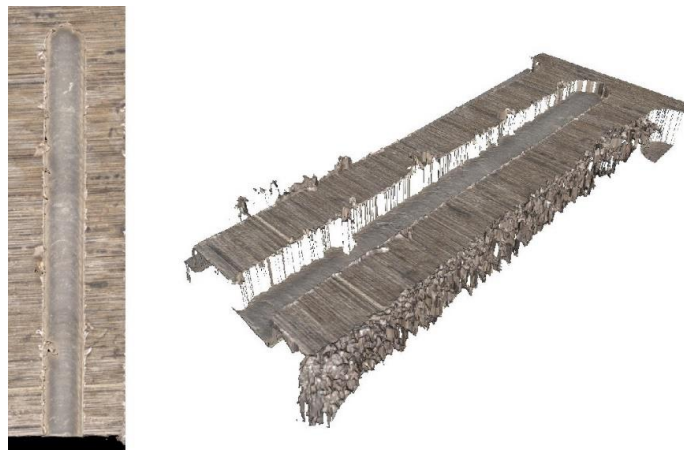
**Figura 29 – Micro canal na amostra 2 com ap 0,05 mm e fz de 3  $\mu$ m/dente**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

A Figura 30 refere-se à amostra 3, que obteve ap real de 0,02247 mm e 0,23185 mm na réplica.

**Figura 30 – Micro canal na amostra 3 com ap 0,05 mm e fz de 3  $\mu$ m/dente**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Percebe-se que a amostra 1 gerou um canal mais homogêneo, se comparado com as outras amostras. Nas amostras modificadas com ECA, na amostra 2, percebe-se que em alguns pontos do canal, a fresa tende a alargar o canal. Na amostra 3, a parede do canal é diferente das demais, e a imagem tem um aspecto de que houve adesão de material na parede do canal.

As Figuras 31 e 32 mostram imagens dos canais nas condições que utilizou maior avanço, condição esta que as amostras que passaram pelo processo de Extrusão de Canal Angular, tiveram resultados satisfatórios.

**Figura 31 – Micro canais na amostra 2 com profundidade de corte de 0,05mm e avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ .**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Figura 32 – Micro canais na amostra 3 com profundidade de corte de 0,05mm e avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ .**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Com isso, as melhores condições são com profundidade de corte 0,05 mm e avanço de 3  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , que obteve ótimos resultados para todas as amostras. O processo de ECA, foi vantajoso para se obter bons resultados nas amostras que passaram pelo processo, com avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ .

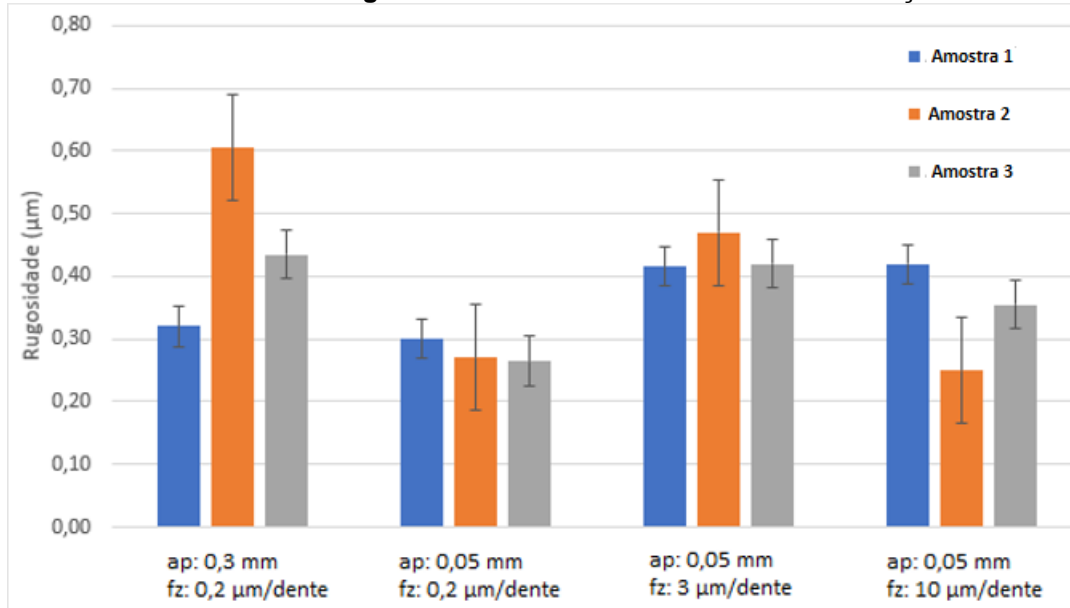
### **5.3 Rugosidade**

O Gráfico 7 mostra o resultado da média de rugosidade média (Ra) dos canais obtidos. É possível observar que os parâmetros de corte influenciaram na rugosidade dos canais. Para as condições de profundidade de corte 0,3 mm e avanço de 0,2  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , a amostra 1, obteve resultados melhores quando comparadas as outras



duas amostras. Já para quando as condições são profundidade de corte 0,05 mm e avanço de 0,2  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , considerando o desvio padrão, as rugosidades entre as amostras se assemelham, semelhança que ocorre quando o avanço é de 3  $\mu\text{m}/\text{dente}$  e profundidade de corte de 0,05 mm. Para as condições de profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , a amostra 2 no ECA, obteve os melhores resultados, quando comparada com as outras amostras.

**Gráfico 7 – Resultado da rugosidade média dos canais em cada condição de estudo**

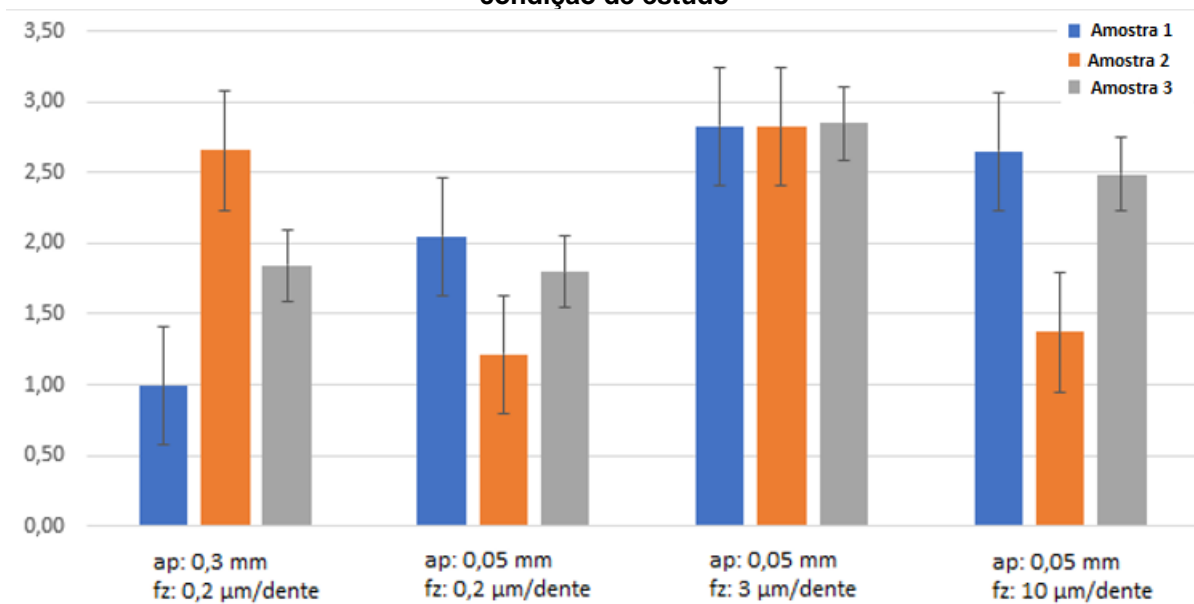


Fonte: Autoria própria (2023).

Para a amostra 1, os melhores parâmetros são para profundidade de corte de 0,3 mm e 0,05 mm e avanço de 0,2  $\mu\text{m}/\text{dente}$ . Já para a amostra 2, os melhores parâmetros são profundidade de corte de 0,05mm e avanço de 0,2  $\mu\text{m}/\text{dente}$  e 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ . Para a amostra 3, considerando o desvio padrão, os valores ficaram próximos em todos os parâmetros, de modo que o menor valor obtido foi de 0,27  $\mu\text{m}$  e o maior de 0,44  $\mu\text{m}$ .

O Gráfico 8 mostra os valores médios do valor máximo da rugosidade parcial ( $R_z$ ). Nota-se que para as condições de profundidade de corte de 0,3 mm e avanço de 0,2  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , o melhor resultado da rugosidade parcial é da amostra 1. Mas considerando o desvio padrão, o maior valor da amostra 1, se aproxima do menor valor da amostra 3.

**Gráfico 8 – Resultado do valor máximo da rugosidade parcial (Rz) dos canais em cada condição de estudo**



Fonte: Autoria Própria (2023).

Para a condição de profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 0,2 µm/dente, se obtém valores próximos, sendo que o maior valor das amostras com 4 passes de ECA, se aproxima dos menores valores obtidos nas amostras sem ECA e com 6 passes do ECA. Os resultados que se obtém nas condições de profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 3 µm/dente, são semelhantes entre as amostras, e considerando o desvio padrão, pode-se dizer que os resultados são muito próximos.

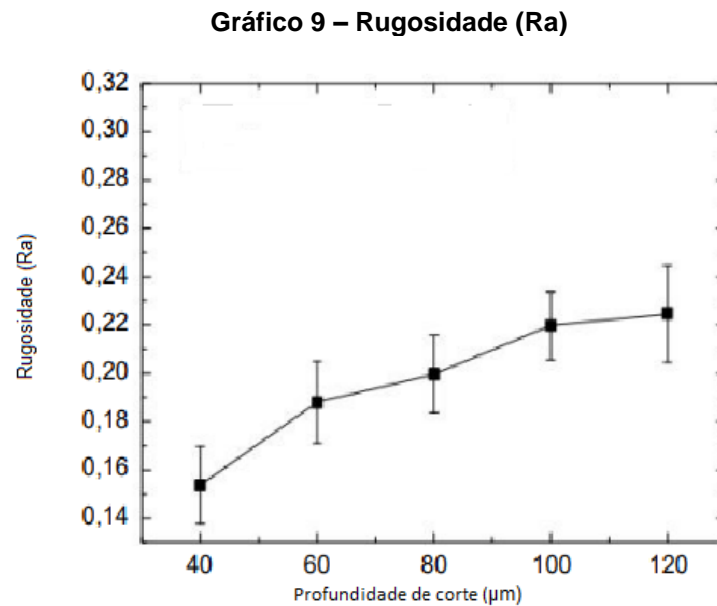
Na última condição de corte, com profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 10 µm/dente, a amostra 2 apresenta os menores valores de rugosidade parcial. As amostras 1 e 3, obtiveram resultados mais elevados, e considerando o desvio padrão, tiveram resultados semelhantes. Em comparação aos avanços, pode-se notar que para a amostra 3, não houve influência na altura média de rugosidade para avanços iguais e profundidades de corte diferentes.

CHEN *et al.* (2020), realizaram experimentos em cobre puro, e chegou à conclusão de que quanto menor a profundidade de corte, menor será a rugosidade média (Ra), alinhados com alta rotação (r.p.m.) e um avanço moderado, com valor próximo ao raio da ferramenta, como pode ser visto no Gráfico 9. Os valores de rotação utilizados foram de 9000 r.p.m, 12000 r.p.m, 15000 r.p.m, 18000 r.p.m e 21000 r.p.m. Já os avanços foram de 1 µm/dente e 5 µm/dente.

Tais conclusões são corroboradas com os resultados obtidos nesse trabalho, em que a menor rugosidade foi nos menores parâmetros de corte utilizados. A dureza

do material não teve influência notória, pois o corpo de prova com valor de dureza intermediário apresentou o melhor resultado.

Com isso o melhor resultado geral é para a amostra 2, que em duas condições de corte diferentes, com profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 0,02  $\mu\text{m}/\text{dente}$  e 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , obteve resultados semelhantes para Ra e Rz.



**Fonte: Adaptado de Chen et. al (2020)**

Portanto, o melhor resultado com relação a todos os experimentos realizados, foi para a amostra 2, mas que se chegou em resultados estatisticamente iguais ao da amostra 1.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com as condições de corpo de prova, ferramenta, máquina e parâmetros de corte, o estudo chegou nas seguintes conclusões:

- a microdureza do material aumenta conforme se aumenta o número de passagens pelo processo de Extrusão de Canal Angular devido ao encruamento dos grãos alongados.
- o processo ECA permitiu o refino e alongamento dos grãos.
- a profundidade de corte no início e no fim do canal não se manteve constante e a amostra 3 apresentou as maiores diferenças.
- a amostra 1, nas condições de corte com profundidade de corte 0,05 mm e avanço de 3  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , obteve o menor tamanho de rebarba.
- as condições de corte com profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 0,02  $\mu\text{m}/\text{dente}$  e 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , obtiveram os menores resultados Ra e Rz.
- o processo de ECA teve influência somente na amostra 2.

Portanto, temos que os menores valores médios de altura de rebarba ocorreram na amostra 1, mas a amostra 2 teve resultados semelhantes, mas possui uma dureza maior quando comparada com a amostra 1. O processo de ECA, fez com que o material aumentasse a dureza e permitiu que se tivesse resultados melhores na altura de rebarba para o maior valor de avanço utilizado no trabalho. Com relação a rugosidade a amostra 1 teve resultados estatisticamente próximo em todos os parâmetros, mas o melhor valores de rugosidade média foi para a amostras 2, com ap de 0,05 mm e avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ .

### 6.1 ESTUDOS FUTUROS

Os resultados do trabalho geraram outros questionamentos e anseios, voltados à microestrutura da liga e à forma de zeramento da microfresa, e algumas sugestões e recomendações de trabalhos futuros serão enumeradas:

- analisar a influência do ECA no valor da força de corte do microfresamento de latão C230;
- estudar formas de zeramento para o microfresamento sem que a ferramenta toque a peça;

- analisar se o sentido de corte na direção do alongamento dos grãos produzidos pelo ECA tem influência no tamanho das rebarbas;
- analisar se outros processos de modificação de microestrutura, que resultem na redução de grãos, podem ter influência na dimensão da rebarbas.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6363**. Têmpera do cobre e das suas ligas. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.
- ANFAVEA. **Carta da ANFAVEA**. maio de 2023. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/edicoes-em-pdf/>. Acesso em: 21/05/2023
- ARAI, R. **Estudo teórico-experimental do efeito da flexão da ferramenta no processo de microfresamento**. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008
- ARAMCHAROEM, A., MATIVENGA, P.T., YANG, S. The Effect of AlCrTiN Coatings on Product Quality in Micro-Milling of 45 HRC Hardened H13 Die Steel. **Proceedings of the 35th International MATADOR Conference**, p. 203–206, 2007
- ASM METALS HANDBOOK , Vol.2 - **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, p.763 - 772 , p.885- 890, p.1015- 1020, p.2378.
- ASTM. **American Society of Tool and Manufacturing Engineers**, 1959.
- ASTM B36/B36M-13. **American Society of Tool and Manufacturing Engineers**. 2018
- BALDO, D. **Estudo do microfresamento da liga de Titânio Ti–6Al–4V utilizando análise de sinais de Força e Emissão Acústica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2013.
- BALÁZS, B. Z; GEIER, N.; TAKÁCS, M.; DAVIM, J. P. A review on micro-milling: recent advances and future trends. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** v. 112, p. 655–684 . dez. 2020.
- BARBOSA, Wellington Antonio. **Estudo do comportamento anticorrosivo das ligas Ni-W-Cu e Ni-Mo-Cu obtidas pelo processo de eletrodeposição sobre aço ASTM A 516 Gr 60**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande 2013.
- BIG DAISHOWA, **Catálogo de porta ferramentas BIG PLUS**. 2019.
- CALLISTER, W. D. J., RETHWISCH, D. G. **Ciências e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. 3ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CÂMARA, M. A, RUBIO. Campos J. C, ABRÃO, A. M, DAVIM, J.P. State of the art on micromilling of materials, a Review. **The Journal of materials & technology** , v. 28, p. 673-685, ago. 2012.
- CARDOSO, P., DAVIM, J.P. A brief review on micromachining of materials 8 P. Cardoso and J.P. Davim ---Review advanced materials sciencie, v. 30, p. 98-102, fev. 2012.
- CARPINETTI, L. C. R., FILHO, E. V. G., PORTO, A. J. V., JASINEVICIUS, R. G. **Rugosidade superficial: Conceitos e princípios**. Escola de Engenharia de São

Carlos. Departamento de Engenharia Mecânica. Seção de Publicações da EESC-USP. 1996.

CHAE, J, PARL, S.S , FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. V. 46, P. 313-332, mar. 2006.

CHENG, K; HUO, D. **Microcutting**: fundamentals and applications. Wiley 2013.

CHEN, J., *et al.* Enhancement of strength-ductility synergy in ultrafine-grained Cu-Zn alloy prepared by ECAP and subsequent annealing. **Journal of Materials Research and Technology**. v.17, p. 433 – 440, Abr. 2022

CHEN, L., DENG, D., PI, G., HUANG, X., ZHOU, W. Burr formation and surface roughness characteristics in micro-milling of microchannels. **The international Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 111, p. 1277-1290, out. 2020.

CLAVIJO, B. M, ZARATE, G. O., SELA, A., ARRIETA, I. M., FEDORETS, A., ARRAZOLA, P. J., CHUVILIN, A. In-SEM micro-machining reveals the origins os the size effect in the cutting energy. **Scientific Reports**. v. 11, p. 2088. Jan. 2021.

DE OLIVEIRA, D. **Efeito Escala e Integridade Superficial no Microfresamento da Liga de Níquel Inconel 718**. 2020. 154 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V. **DIN 8560**: Manufacturing Process – Terms and Definitions. Germany, 2003.

DOS SANTOS, A., G., DA CUNHA, D., F., DA SILVA, M., B., JACKSON, M., J., ZIBEROV, M. Avaliação da influência do fluido de corte na formação de rebarbas no microfresamento de INCONEL 718 e aço inoxidável duplex UNS S32205. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, N° 6, jun. 2021.

FURUKAWA, Y., MORONUKI, N. Effect of material properties on ultra precise cutting processes. **CIRP Annals**, v.37, p.113–116. 1988

IEA. **Electric Vehicles**. Set.2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>.

KIM, H. S., KIM, W.Y., SONG, J.K.H. Effect of post-heat-treatment in ECAP processed Cu–40%Zn **brass**. v. 536, p. S200–S203, set. 2012

KONEŇNÁ e FINTOVÁ. **Copper and Copper Alloys**: Casting, classification and Characteristic Microstructures, Cap.1. 2012

LEE, K., DORNFELD, DA. Micro-burr formation and minimization through process control. **Precision Engineering**, v. 29, p. 246–252, abr. 2005.

LI, H, *et al.* Modelling and experimental analysis of the effects of tool wear, minimum chip thickness and micro tool geometry on the surface roughness in micro-end-milling. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v.18, n.2, 2008

LIU, Y., *et al*/ Micromilling simulation for the hard-to-cut material. *Procedia Engineering*. v.174, p.693-699, 2017

MATESO, V. **Análise de solidificação para o projeto de molde e as relações com as propriedades mecânicas na fundição da liga de latão 60/40**. Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2006.

Metal Rolling, BRASS CUZN15. **Brass Cu Zn 15 also called Similor**. Disponível em: [Cuzn15 Brass - C23000 - CW502L - Copper and zinc alloy \(metal-rolling-services.com\)](http://Cuzn15 Brass - C23000 - CW502L - Copper and zinc alloy (metal-rolling-services.com)). Acesso em: 23 jun. 2023

MIAN, A.J., DRIVER, N., MATIVENGA, P.T. Identification of factors that dominate size effect in micro-machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, p. 383–394. maio, 2011

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo, 1994.

OLIVEIRA, F. B. de, RODRIGUES, A. R., MOREIRA, S. R. da S. Formação de rebarba e energia específica de corte no microfresamento. **8º Congresso brasileiro de Engenharia de Fabricação**. 2015.

OSG Corporation. **Catálogo de microfresa WXL/WXS**, v.5.

RADHI, H. N, ALJASSANI, A. M. H, MOHAMMED, M. T. Effect of ECAP on microstructure, mechanical and tribological Properties os aluminum ans brass alloys: A review. **Materials Today: Proceedings**, v.26, p. 2302-2307, mar. 2020.

Roche Industry. RED BRASS VS YELLOW BRASS: WHAT ARE THE DIFFERENCES?. Disponível em: [Red brass vs yellow brass: What are the Differences? Complete Comparison \(rocheindustry.com\)](http://Red brass vs yellow brass: What are the Differences? Complete Comparison (rocheindustry.com)). Acesso em: 28 jun.2023

SALMON, S. C. **Fundamentals of grinding. Modern grinding process technology**. EUA: McGraw-Hill, 1992. p. 89-10

SANUSI, K.O., MAKINDE, O.D., OLIVER, G.J. Equal channel angular pressing technique for the formation of ultrafine grained structures. **South African journal science**, v.108, p. 1-7, out. 2012.

S.GOWRI,S. P. *et, al*. Micromachining: technology for the future - **International Journal of Materials and Structural Integrity**, v. 1, p.161-179, jul. 2007.

SIMONEAU,A. N. G., ELBESTAWI, M.A. Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel. **Internatinal Journal of Machine Tools Manufacture**, v. 46, p. 46:467–481, abr. 2006.

SOUZA, Arthur Viera de. **Avaliação de parâmetros de corte no microfresamento da liga Inconel 718**. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023

SPRINGER, P., RUBERT, J.B.,SORDI, V. L., FERRANTE, M. DESENVOLVIMENTO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE DO DESEMPENHO REAL DE UMA MATRIZ PARA EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR. **Tecnologia em metalurgia, materias e mineração**. v. 10, p.120-127, jan. 2013.



TAKÁCS, M.; VERÖ, B.; MÉSZÁROS, I. Micromilling of metallic materials, **Journal of Materials Processing Technology**. v. 138, n. 1-3, p. 1–4, jul. 2003.

TEIXEIRA, A. **Avaliação do processamento por extrusão em canal angular na consolidação de pó de alumínio puro e com adição de nanotubos de carbono**. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

TERMOMECAÂNICA. Eletrificação veicular: A influência do cobre e alumínio para o avanço do mercado de carros elétricos. Disponível em: <https://www.termomecanica.com.br/noticias-interna?eletrifica-o-veicular-a-influ-ncia-do-cobre-e-do-alum-nio-para-o-avan-o-do-mercado-de-carros-el-tricos>. Acesso em: 15 mai. 2023.

TORRES, C.D., HEANEY, P.J., SUMANT, A.V., HAMILTON, M.A., CARPICK, R.W., PFEFFERKORN, F.E. Analyzing the Performance of Diamond-Coated Micro End Mills. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** v. 49, p. 599–612. jul. 2009.

VALIEV, R., Z., LANGDON, T., G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. **Progress in materials science**, v. 51, p. 881-981, set. 2006.

WANG, K., ZHANG, Q., ZHANG, J. (2019) Evaluation of scale effect of micro electrical discharge machining system. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 38, p. 174–178, fev.2019.

XICHUN, L., WENLONG, C., JINING, S. **Editorial for the Special Issue on Micro-Machining: Challenges and Opportunities**. *Micromachines*. v. 9, p. 564, out. 2018

YUN, H.T.; HEO, S.; LEE, M.K.; MIN, B. Ploughing detection in micromilling processes using the cutting force signal. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, 377–382. 2011.

ZIBEROV, M., CUNHA, D. F., SILVA, M. B, HUNG, W. N. P., JACKSON, M. J. **Principais aspectos do processo de microusinagem**. Disponível em: [https://www.arandanet.com.br/revista/mm/artigo\\_tecnico/18-Principais-aspectos-do-processo-de-microusinagem](https://www.arandanet.com.br/revista/mm/artigo_tecnico/18-Principais-aspectos-do-processo-de-microusinagem). Acesso em: 28 set. 2022.

**APENDICE A - Distribuição do cobre e zinco na amostra 2.**

Electron Image 1

