

Universidade Federal de Goiás  
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica  
Projeto Final de Curso

Vitor Renan Pires Tavares

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE  
MICROUSINAGEM

Goiânia  
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS - BIBLIOTECA CENTRAL  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS MONOGRAFIAS ELETRÔNICAS  
REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DE MONOGRAFIAS DA UFG - RIUFG**

1. Identificação do material bibliográfico monografia:  Graduação  Especialização

2. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso

Autor (a):	Vitor Renan Pires Tavares
E-mail:	vitorrtavares@hotmail.com
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
Título:	Desenvolvimento de metodologia para fabricação de ferramentas para microusinagem
Palavras-chave:	
Título em outra língua:	Development of methodology for manufacturing micro-machining tools
Palavras-chave em outra língua:	
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	23/11/2018
Graduação/Curso Especialização:	Engenharia Mecânica
Orientador (a):	Daniel Fernandes da Cunha

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO EXCLUSIVA**

O referido autor:

- a) Declara que o documento em questão é seu trabalho original, e que detém prerrogativa de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.
- b) Se o documento em questão contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à Universidade Federal de Goiás os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento em questão.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO**

Na qualidade de titular dos direitos do autor do conteúdo supracitado, autorizo a Biblioteca Central da Universidade Federal de Goiás a disponibilizar a obra, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional de Monografias da UFG (RIUFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data, sob as seguintes condições:

Permitir uso comercial de sua obra?  Sim  Não

Permitir modificações em sua obra?

Sim

Sim, contando que outros compartilhem pela mesma licença.

Não

A obra continua protegida por Direito Autoral e/ou por outras leis aplicáveis. Qualquer uso da obra que não o autorizado sob esta licença ou pela legislação autoral é proibido.

Local e data Goiânia 23 de Novembro de 2018

Vitor Renan Pires Tavares

Assinatura do Autor e/ou Detentores dos Direitos Autorais

Vitor Renan Pires Tavares

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE  
MICRO USINAGEM

Dissertação submetida ao corpo docente da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás – UFG, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Dr. Daniel Fernandes da Cunha

Goiânia

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Pires Tavares, Vitor Renan  
DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA FABRICAÇÃO DE  
FERRAMENTAS DE MICRO USINAGEM [manuscrito] / Vitor Renan  
Pires Tavares. - 2018.  
LXXXV, 85 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de  
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2018.  
Bibliografia.

Inclui tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Eletroerosão. 2. Microusinagem. 3. Microfresamento. I.  
Fernandes da Cunha, Daniel , orient. II. Título.

CDU 621.03



### ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Aos vinte e três dias do mês de Novembro do ano de 2018, foi apresentado e defendido o Projeto Final, intitulado Desenvolvimento de Metodologia para Fabricação de Ferramentas de Micro Usinagem perante a banca examinadora composta pelos membros:

1. Daniel Fernandes da Cunha, orientador e presidente;
2. Demóstenes Ferreira Filho;
3. Fillipe Albuquerque.

Após a exposição do trabalho por parte do(s) autor(es), aluno(s) do curso de Engenharia Mecânica, foram lhe(s) atribuídas as seguintes notas pelos membros da banca:

Nome do(a) Aluno(a)	Membro 1	Membro 2	Membro 3
<i>Vitor Renan Soares</i>	7,0	6,5	6,0

Nada mais havendo a registrar, eu, Daniel Fernandes da Cunha, designado secretário "ad hoc" da banca examinadora, lavrei a presente Ata do ocorrido, a qual, lida e considerada conforme, vai assinada por mim e pelos membros da banca.

Goiânia, 23 de Novembro de 2018.

*Daniel Fernandes da Cunha*  
*Demostenes Ferreira Filho*  
*Fillipe Albuquerque*

VITOR RENAN PIRES TAVARES

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE  
MICRO USINAGEM

Dissertação submetida ao corpo docente da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás – UFG, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha. – Orientador.

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – UFG

---

Prof. Dr. Demóstenes Ferreira Filho

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – UFG

---

Prof. MSc. Fillipe Albuquerque

Faculdade de Tecnologia Senai Italo Bologna

Faculdade Pitágoras

Goiânia, 23 de Novembro de 2018.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força para chegar até aqui nessa longa caminhada, me proporcionando a vida, saúde e família. Por ter me acompanhado todo os períodos de estudos durante minha vida até aqui na graduação, sendo minha base em momentos de dificuldades.

Aos meus pais, João e Argélia, e ao meu irmão João Ricardo, por todo o esforço que foi e é dedicado a mim desde a infância até o presente momento, se doando para me proporcionar uma educação de qualidade. Por terem sido meus primeiros professores, me ensinando os caminhos certos a serem traçados e formando meu caráter e personalidade. Sempre estiveram comigo e nunca me abandonaram.

À Caroline Matias, minha namorada, que desde quando a conheci sempre foi companheira, carinhosa e amorosa, que sempre está do meu lado e me ajudou e ajuda em tudo que preciso, em busca do meu melhor, que cuida de mim e é meu exemplo de superação.

Aos meus padrinhos, Robson e Cláudia que sempre acreditaram em mim, no meu potencial e sempre me ajudaram e me apoiaram ao longo de toda essa caminhada.

Aos meus avós, Abdon e Durce, que sempre me enalteceram como um exemplo de estudante, dedicação e torcem pelo meu sucesso.

À minha colega acadêmica Amanda Moraes que sem dúvidas nenhuma me ajudou muito neste trabalho. Desde o início me deu apoio em todas as tarefas executadas e me dando um ótimo suporte na execução das atividades.

Ao meu professor orientador Dr. Daniel Fernandes da Cunha, que soube me auxiliar em tudo, desde o início deste trabalho há um ano e meio atrás, e contribuiu em seu máximo para o desenvolvimento do mesmo, me ajudando nas tomadas de decisões e execução das tarefas

Aos técnicos do LAMAF, Fleide Alves e João Bosco, por terem me ajudado e apoiado em todas as tarefas executadas, desde a fabricação até os testes.

À toda instituição da UFG por ter proporcionado os meios e caminhos a serem traçados para chegar nesse momento.

“A persistência é o caminho do êxito”  
Charles Chaplin

## RESUMO

Este trabalho apresenta um método para fabricação de ferramentas para microfresamento a partir da reutilização de amostras de microfresas que foram utilizadas e descartadas, pelo método da usinagem não convencional de Eletroerosão. É descrito uma parte introdutória que aborda os principais assuntos relacionados bem como sua relevância que motivaram a realização de tal trabalho: A usinagem não convencional por Eletroerosão, o processo de fresamento e o processo de microfresamento. Os objetivos principais são além de reforçar a importância da reutilização/reciclagem, fomentar o desenvolvimento e pesquisas nas áreas de usinagem não convencional e microusinagem, através da fabricação de uma microfresa com reutilização de amostras descartadas e o uso destas ferramentas na pesquisa e evolução da micro usinagem, contribuindo assim para o desenvolvimento científico de ambas as partes. Apresenta também a metodologia utilizada para fabricação das ferramentas de corte pelo método da Eletroerosão, tais como os parâmetros utilizados e critérios de seleção dos mesmos. É explicitado rápido e resumidamente os passos realizados, os desafios encontrados, e os resultados obtidos. Ao final, os resultados foram considerados satisfatórios uma vez que os objetivos principais foram atingidos: Fabricação da microfresa e utilização da mesma no processo de microfresamento. A primeira etapa que é a fabricação foi concluída, e a pesquisa continua em progresso através de novos estudos para otimização dos resultados encontrados.

**Palavras chave:** Eletroerosão, fresamento, micro usinagem, micro fresa.

## ABSTRACT

This work is a task created for the production of tools for micro milling the reuse of samples of micro mills that were used and discarded by the method of non-conventional machining of Electro-erosion. The conventional milling of EDM, the milling process and the micro milling process. The main objectives are also to reuse / recycle, develop and research non-conventional machining areas and micro machining through the manufacture of a micro mill with reuse of samples and use of tools in research and research. micro-machining, thus contributing to the scientific development of both parties. It was also used a methodology for the use of cutting tools by the method of Electro-erosion, such as the parameters used and the criteria for their selection. It briefly and briefly explained the steps and results found, and the results obtained. The production of micro mill and use the same at the same microbial processing. The first step was done from a listing, and a search continues through new studies to optimize the results found.

**Keywords:** Electro-erosion, milling, micro-machining, micro-milling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos processos de Fabricação.....	15
Figura 2 – Processo de usinagem por Eletroerosão.....	20
Figura 3 – Eletrodo e peça: O formato do eletrodo define a forma usinada na peça.....	22
Figura 4 – Técnicas de aplicação do fluido dielétrico.....	23
Figura 5 – Overcut em usinagem axial.....	24
Figura 6 – GAP: Folga entre o eletrodo e a peça durante o processo.....	25
Figura 7 – Sequência de eventos durante um pulso elétrico de um ciclo da Eletroerosão .....	26
Figura 8 – Tipos de processos de fresamento .....	29
Figura 9 – Fresamento na fabricação de engrenagens.....	30
Figura 10 – Relação do raio de aresta da ferramenta nos processos de macro e micro usinagem.....	31
Figura 11 – Exemplos de micro fresas comerciais.....	33
Figura 12 – Presença de rebarbas na lateral concordante (inferior) e na lateral discordante (superior) .....	34
Figura 13 – Máquina de eletroerosão Eletro ONC 400 .....	36
Figura 14 – Parâmetros de usinagem.....	38
Figura 15 – Duração do pulso: Tempo ON.....	39
Figura 16 – Tempo de pausa.....	40
Figura 17 – Função Orbital.....	41
Figura 18 – Descarte de micro fresa utilizado na primeira tentativa.....	42
Figura 19 – Geometria desejada para a micro fresa.....	42
Figura 20 – Eletrodo de Cobre Eletrolítico.....	43
Figura 21 – Desgastes no eletrodo de Cobre Eletrolítico.....	45
Figura 22 – Retífica Cilíndrica do LAMAF – UFG.....	46
Figura 23 – Afiadora Universal do LAMAF – UFG .....	46
Figura 24 – Eletroerosão interna para a redução do diâmetro da amostra.....	47
Figura 25 – Eletrodo de bico de solda MIG.....	49
Figura 26 – Eletrodo de sucata .....	51
Figura 27 – Exemplificação das quantidades usinadas em cada grupo.....	53

Figura 28 – Análise microscópica do TESTE 1.....	55
Figura 29 – Análise microscópica da ferramenta de metal duro no TESTE 2 .....	56
Figura 30 – Análise microscópica da ferramenta de aço rápido no TESTE 3.....	56
Figura 31 – Análise microscópica do TESTE 4.....	57
Figura 32 – Análise microscópica do TESTE 5.....	58
Figura 33 – Análise microscópica da redução do diâmetro no aço rápido com eletrodo de bico de solda (TESTE 6) .....	59
Figura 34 – Análise microscópica do Teste 7.....	60
Figura 35 – Análise microscópica do Teste 8.....	61
Figura 36 – Amostras finalizadas de metal duro e aço rápido. Usinagem de 0,50 mm de cada lado.....	62
Figura 37 – Amostras finalizadas de metal duro e aço rápido. Usinagem de 0,75 mm de cada lado.....	62
Figura 38 – Amostras finalizadas de metal duro e aço rápido. Usinagem de 1,00 mm de cada lado.....	63
Figura 39 – Fresadora CNC ROMI D600 utilizada nos testes das ferramentas.....	63
Figura 40 – Canal realizado pelo fresamento com a amostra de metal duro e profundidade de corte de 0,100 mm.....	65
Figura 41 – Canais usinados para as diferentes profundidades de corte: 0,1mm, 0,08mm e 0,07mm.....	66
Figura 42 – Programação realizada na máquina de fresamento CNC para a usinagem.....	66
Figura 43 – Fratura da amostra de metal duro usinada em 0,5mm.....	67
Figura 44 – Canais usinados vistos com mais detalhes pelo microscópio para as diferentes profundidades de corte.....	68
Figura 45 – Canais usinados vistos com mais detalhes pelo microscópio para as diferentes profundidades de corte.....	69
Figura 46 – Análise da ferramenta de corte de aço rápido usinada em 0,5mm.....	70
Figura 47 – Novo formato da ferramenta de Aço rápido usinado em 0,50mm: (a) Vista superior; (b) Vista lateral.....	71
Figura 48 – Novas tentativas para a ferramenta de Aço Rápido com rebaixo de 0,50mm.....	71
Figura 49 – Micro fresa de 0,50mm após a segunda etapa de testes: (a) Vista superior; (b) Vista lateral.....	72

Figura 50 – Canal usinado com a amostra de Metal Duro com rebaixo de 0,75mm.....	73
Figura 51 – Micro fresa com rebaixo de 0,75mm após o teste onde ocorreu a quebra da ferramenta: (a) Peça quebrado; (b) Região de quebra na amostra.....	74
Figura 52 – Canais fabricados com a amostra de Aço Rápido usinada em 0,75mm.....	74
Figura 53 – Micro fresa de 0,75mm em Aço rápido após os testes: (a) Vista superior; (b) Vista lateral.....	75
Figura 54 – Micro fresa de 1,00mm após a tentativa de teste e quebra: (a) Peça quebrado; (b) Região de quebra na amostra.....	75
Figura 55 – Canais usinados com a amostra de Aço Rápido usinada em 1,00mm.....	76
Figura 56 – Micro fresa de 1,00mm em Aço rápido após os testes:(a) Vista superior; (b) Vista lateral.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições econômicas de usinagem para um eletrodo de Cobre usinando uma peça de Metal Duro.....	21
Tabela 2 – Dados técnicos da máquina de eletroerosão Eletro ONC 400.....	37
Tabela 3 – Parâmetros para eletrodo de cobre eletrolítico.....	39
Tabela 4 – Parâmetros utilizados na primeira tentativa.....	43
Tabela 5 – Parâmetros utilizados nas etapas de desbaste de diâmetro.....	48
Tabela 6 – Parâmetros utilizados nos TESTES 7 e 8.....	51
Tabela 7 – Parâmetros utilizados no TESTE 9.....	52

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 Justificativa.....	18
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
2.1 Eletroerosão.....	20
2.1.1 Princípio de Funcionamento.....	21
2.1.2 Fluido Dielétrico .....	22
2.1.3 Eletrodo .....	23
2.1.4 GAP .....	24
2.1.5 Parâmetros do Processo.....	25
2.1.6 A Física da Eletroerosão.....	26
2.2 Fresamento .....	28
2.2.1 Micro fresamento.....	30
2.2.1.1 Efeito do raio de aresta da ferramenta.....	31
2.2.1.2 O Efeito Escala.....	32
2.2.1.3 Formação de cavaco.....	32
2.2.1.4 Formação de rebarba.....	33
2.3 Metal Duro.....	34
2.4 Aço Rápido.....	35
<b>3. METODOLOGIA PRÁTICA.....</b>	<b>36</b>
3.1 Máquina de Eletroerosão.....	36
3.1.1 Parâmetros da Máquina.....	37
3.1.2 A Função Orbital.....	40
3.2 Usinagem por Eletroerosão do Metal Duro e do Aço Rápido .....	41
3.2.1 TESTE 1.....	43
3.2.2 TESTES 2 e 3.....	44
3.2.3 TESTE 4.....	47
3.2.4 TESTE 5.....	48
3.2.5 TESTE 6.....	50
3.2.6 TESTE 7 e 8 .....	50

3.2.7 TESTE 9.....	52
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
4.1 Resultados: TESTE 1.....	54
4.2 Resultados: TESTES 2 e 3.....	55
4.3 Resultados: TESTE 4.....	57
4.4 Resultados: TESTE 5.....	57
4.5 Resultados: TESTE 6.....	58
4.6 Resultados: TESTE 7 e 8 .....	60
4.7 Resultados: TESTE 9.....	61
4.8 Micro fresamento com amostra de Metal Duro usinada em 0,5mm.....	64
4.9 Micro fresamento com amostra de Aço rápido usinada em 0,5mm.....	68
4.10 Micro fresamento com amostra de Metal Duro usinada em 0,75mm.....	72
4.11 Micro fresamento com amostra de Aço rápido usinada em 0,75mm.....	74
4.12 Micro fresamento com amostra de Metal Duro usinada em 1,00mm.....	75
4.13 Micro fresamento com amostra de Aço rápido usinada em 1,00mm.....	76
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
5.1 Melhor parâmetro de fabricação da ferramenta.....	78
5.2 Acabamento.....	78
5.3 Desempenho durante a usinagem.....	78
5.4 Canais fabricados.....	79
<b>6. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>

## 1. Introdução

A usinagem se enquadra entre um dos principais processos de fabricação existentes na indústria metal mecânica, tais como: Fundição, conformação mecânica, soldagem, metalurgia do pó, entre outros, cada qual com suas variantes e peculiaridades. Todos estes processos envolvem a transformação de matérias primas em produtos acabados que terá alguma finalidade de emprego.

Desta forma, os mais diversos bens de consumo são produzidos, desde um simples parafuso até uma aeronave comercial de grande porte (aproximadamente seis milhões de peças), passando pelo automóvel (cerca de quinze mil peças) (MACHADO; ABRÃO; COELHO; SILVA, 2009).

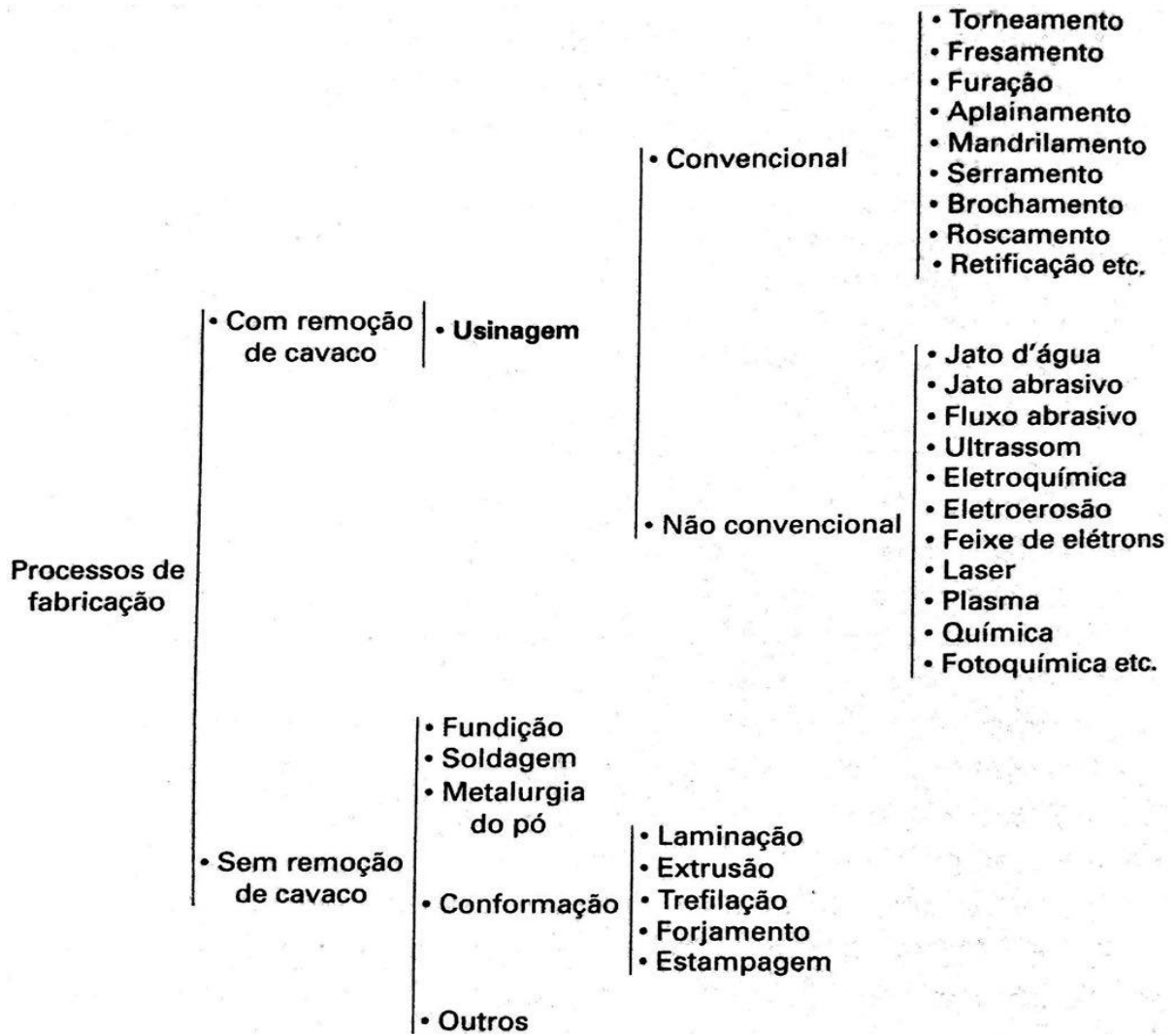
A escolha do processo de fabricação mais adequado irá depender de diversos fatores intrínsecos ao que se deseja fabricar, sendo que a maioria dos produtos são resultados de não apenas um processo, mas um conjunto de processos que são realizados de forma organizada. Segundo Kalpakjian (1995), os seguintes fatores devem ser considerados:

- Tipo de material e suas propriedades;
- Propriedades finais desejadas;
- Tamanho, forma e complexidade do componente;
- Tolerâncias e acabamento superficial exigidos;
- Custo total do processamento;
- *Lead time* necessário para produção;
- Disponibilidade de equipamentos e experiências operacionais.

Como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco (FERRARESI, 2011).

A Figura 1 apresenta a classificação dos processos de fabricação de acordo com Ferraresi, com destaque para usinagem que é o escopo deste trabalho:

Figura 1 – Classificação dos processos de Fabricação



Fonte: Ferraresi (2011)

Segundo Trent (1995), a usinagem é o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas.

Cada um dos processos de fabricação descritos acima evoluiu continuamente com a evolução do homem, iniciando-se no período da pré-história, que se subdivide em três etapas:

**Idade da Pedra Lascadas (Origem do homem – 10000 a.C):** Onde já se fabricavam facas, lanças, machados e outras ferramentas a partir de lascas de pedras e ossos de animais;

**Idade da Pedra Polida (10000 a.C – 5000 a.C):** As ferramentas eram fabricadas a partir do desgaste e polimento das pedras e ossos (princípio do processo de retificação);

**Idade dos Metais (5000 a.C – 10000 a.C):** Descoberta dos metais para fabricação das ferramentas. Os primeiros a serem usados eram o cobre, ouro e estanho. O ferro foi um dos últimos metais a serem empregados.

Aproximadamente até o final do século XVIII, o principal material utilizado na engenharia era a madeira, usinada com ferramentas simples de aço carbono, devido sua maleabilidade. Com a Revolução Industrial, já no início do século XIX, houve os primeiros projetos de máquinas-ferramentas para fabricação de outras máquinas e instrumentos, substituindo e auxiliando a mão de obra humana em diversas áreas.

Os materiais a princípio utilizados na fabricação destas máquinas eram o ferro fundido, o latão e o bronze, facilmente usinados com as ferramentas de aço-carbono temperado disponíveis na época. Ainda assim, eram necessários 27,5 dias de trabalho para mandrilar um dos cilindros de uma máquina de grande porte (TRENT, 1985).

Segundo Machado; Abrão; Coelho; Silva (2009) o primeiro torno com avanço automático foi uma criação de Henry Maudslay em 1797. Após o torno, surgiram outras máquinas tais como a plainadora e a retificadora em 1860. A primeira fresadora universal foi desenvolvida por J. R. Brown em 1862. Mais adiante, em 1896, F. W. Fellows desenvolveu uma máquina de fabricação que produz qualquer tipo de engrenagem.

O século XX foi marcado pelo surgimento de materiais mais duráveis. Estes materiais por sua vez apresentavam maiores dificuldades ao processo de usinagem. Assim houve o surgimento de ferramentas de aço rápido e carbeto de tungstênio que propiciaram a usinagem de aços e outros metais de uso crescente na época.

Na década de 1940 se iniciou o surgimento dos processos não convencionais de usinagem, que ganharam destaque pela capacidade de produzir peças com geometrias mais complexas e usinagem relativamente mais fácil em materiais de difícil usinagem, quando comparados aos processos convencionais. Os processos não convencionais ainda garantiam elevada qualidade de acabamento e tolerâncias dimensionais exatas.

Como se observa na Figura 1, existe uma grande variedade de processos convencionais e não convencionais de usinagem. A diferença principal entre ambos é que nos primeiros o corte é realizado através da deformação plástica seguida pelo cisalhamento do material, o que implica forças de corte entre a peça a ser usinada e a ferramenta de corte. Já o segundo não necessita de nenhum contato físico entre a peça e a ferramenta de corte (que variará de processo para processo), não havendo assim forças de corte contínuas inerentes aos processos.

Ainda neste processo de desenvolvimento e evolução da usinagem, surgiram os processos de microusinagem, que é a usinagem aplicada em microdimensões. Segundo Cardoso e Davim (2012), a demanda por componentes de microdimensões tem crescido demasiadamente nos últimos anos. Crescimento este no campo da eletrônica com os semicondutores, circuitos elétricos mais compactos, entre outros; No campo da medicina que vem exigindo produtos com dimensões cada vez menores para aplicações cirúrgicas através ferramentas, próteses, pinos, parafusos na área ortopédica, entre outros.

A microusinagem é um processo de alta precisão que envolve a fabricação de peças que possuem dimensões na ordem de micrometros (Chae;Park; Freiheit, 2006). As faixas de dimensões das ferramentas utilizadas na micro usinagem é da ordem de 1 a 999  $\mu\text{m}$ . Outros autores consideram que o processo de microusinagem também ocorre quando se utiliza pequenos valores de avanço e profundidade de corte.

De acordo com Câmara et al. (2012), as características mais importantes do processo de microusinagem está no fato de que a espessura de corte e o tamanho do grão da microestrutura do material da peça a usinar, tenham dimensões comparáveis ao raio da cunha cortante da ferramenta de microusinagem. Normalmente o raio característico de uma aresta de ferramenta de corte em processos de micro usinagem é da ordem de 1 a 4  $\mu\text{m}$ .

Microcomponentes requerem tolerâncias muito estreitas, e ambos os requisitos funcionais e estruturais exigem o uso de vários materiais de engenharia, incluindo aços inoxidáveis, titânio, latão, alumínio, platina, irídio, plásticos, cerâmicas e compósitos (Liu et al. 2004). Essa diversidade de materiais permite a fabricação de diferentes microcomponentes.

Como tal, o trabalho presente possui como proposta a fabricação de uma microfresa para operações de microfresamento através do processo de usinagem não convencional de Eletroerosão (*Electrical Discharge Machining – EDM*). O material

utilizado para fabricação são descartes de fresas utilizados pela Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR, para fabricação de circuitos impressos. As fresas usadas são de Metal Duro e Aço Rápido.

Comercialmente, as microfresas de menores dimensões encontradas atualmente no mercado são da ordem de 25  $\mu\text{m}$  de diâmetro e são projetadas para fresagem de componentes eletrônicos e fabricadas pelo processo de retificação, custando um valor médio de US\$ 25,00. A proposta aqui é a tentativa de replicar este tipo de ferramenta em laboratório, em uma escala superior, na casa de poucos milímetros e reduzindo-se consideravelmente o seu custo de fabricação.

## **1.1 Justificativa**

A microusinagem ainda é um processo pouco estudado, principalmente no Brasil, de tal forma que este projeto poderá contribuir com a aplicação e desenvolvimento da tecnologia em termos de máquina ferramenta e microferramentas de corte.

Sendo assim, a principal justificativa para o desenvolvimento do presente trabalho, é a fabricação de microfresas pelo método da eletroerosão para o estudo e desenvolvimento dos processos de microusinagem, mais precisamente o microfresamento, contribuindo assim para a evolução científica através de trabalhos posteriores.

O presente estudo justifica-se também pela sua contribuição acadêmica e científica, deixando documentado o processo de fabricação de uma micro fresa pelo método da eletroerosão e corroborando para o desenvolvimento de pesquisas posteriores.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Fabricar em laboratório uma microfresa por meio do processo de usinagem não convencional de eletroerosão que será utilizada em pesquisas posteriores para investigar o processo de microusinagem de materiais avançados, tais como ligas de Titânio, ligas de Níquel e Aços Inoxidáveis devido suas características de

biocompatibilidade, onde se estará interessado em avaliar os fenômenos de microfresamento, dentre os quais: Formação de rebarbas, rugosidade da superfície usinada, desgaste e vida da ferramenta e esforços de usinagem.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Aprofundar conhecimentos na área de usinagem não convencional por eletroerosão;
- Aplicar os conceitos adquiridos em sala de aula na disciplina de Processos Especiais de Fabricação;
- Contribuir para o desenvolvimento e evolução científica dos processos de micro usinagem;
- Fomentar e incentivar mais pesquisas relacionadas aos processos de usinagem não convencional na UFG.

## 2. Revisão Bibliográfica

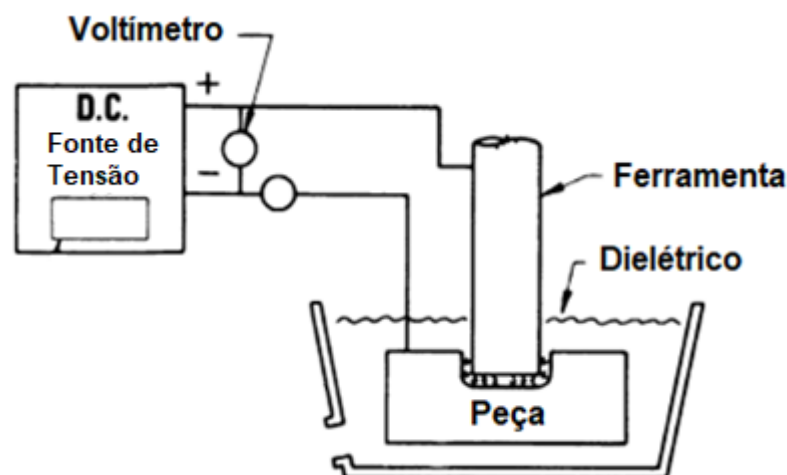
### 2.1 Eletroerosão

A Eletroerosão é um processo não convencional de usinagem cuja remoção de material ocorre através de efeitos térmicos. Existe uma descarga elétrica entre dois materiais condutores de eletricidade, eletrodo e peça a ser usinada, que irá gerar um arco elétrico entre os dois corpos.

O arco elétrico é um fenômeno resultante de uma ruptura dielétrica de um fluido, no caso da eletroerosão um fluido dielétrico, que produz uma descarga de plasma (fluido ionizado) que é resultado de um fluxo de corrente em um meio isolante (o fluido dielétrico). O arco elétrico na eletroerosão ocorrerá entre o eletrodo e a peça a ser usinada, o que resulta em altas temperaturas que são capazes de fundir ou vaporizar o material que se é usinado.

Desta forma, o arco elétrico aquecerá a superfície a ser usinada, sublimando o material e havendo assim a sua remoção, isto é, erosão da superfície da peça. A Figura 2 exemplifica o processo.

Figura 2 – Processo de usinagem por Eletroerosão



Fonte: Adaptado de Benedict (1987)

### 2.1.1 Princípio de Funcionamento

A peça e o eletrodo são ligados em uma fonte de corrente contínua (eletrodo (+) e peça (-)), formando-se assim uma tensão entre ambos. Quando a distância entre eletrodo e peça denominada GAP (Figura 3) atinge um valor determinado, haverá abertura do arco elétrico entre ambos, ocorrendo assim a passagem de cargas elétricas entre os corpos e gerando calor.

Para controlar este arco elétrico e as descargas existentes, um fluido com propriedades isolantes (fluido dielétrico) é utilizado.

Como explicado anteriormente, o calor gerado é suficiente para sublimar o metal a ser usinado, erodindo a superfície da peça. Esta remoção de material ocorre tanto na peça quanto no eletrodo, uma vez que ambos estão sujeitos ao superaquecimento. Entretanto, com ajustes convenientes na máquina é possível controlar o desgaste no eletrodo, obtendo-se por exemplo 99,5% de remoção na peça e apenas 0,5% no eletrodo.

A Tabela 1 representa condições econômicas de usinagem apresentados pelo fabricante da máquina utilizada no laboratório, ou seja, parâmetros de trabalho (que serão expostos mais adiante) que geram o menor desgaste no eletrodo usado.

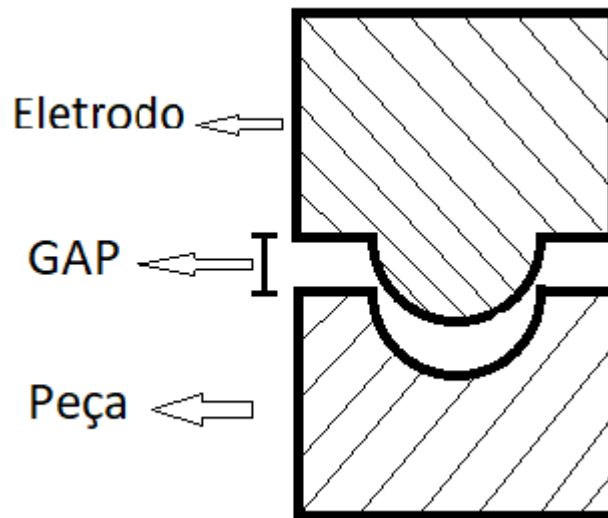
Tabela 1 - Condições econômicas de usinagem para um eletrodo de Cobre Tungstênio usinando uma peça de Metal Duro

On ( $\mu$ s)	Ie	Dc (%)	Desgaste (%V/V)
2	1	25	18
2	2	25	18
2	4	29	18
2	5	29	17
2	6	29	16
2	6	29	16
2	12	29	17
2	12	29	17
5	12	33	19
10	18	39	22
20	12	48	20
20	18	53	23

Fonte: Manual ONC 400

A forma do eletrodo define a área onde ocorrerão as descargas elétricas, determinando assim a forma da cavidade/furo resultante na peça usinada, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Eletrodo e peça: O formato do eletrodo define a forma usinada na peça



Fonte: TAVARES,2018

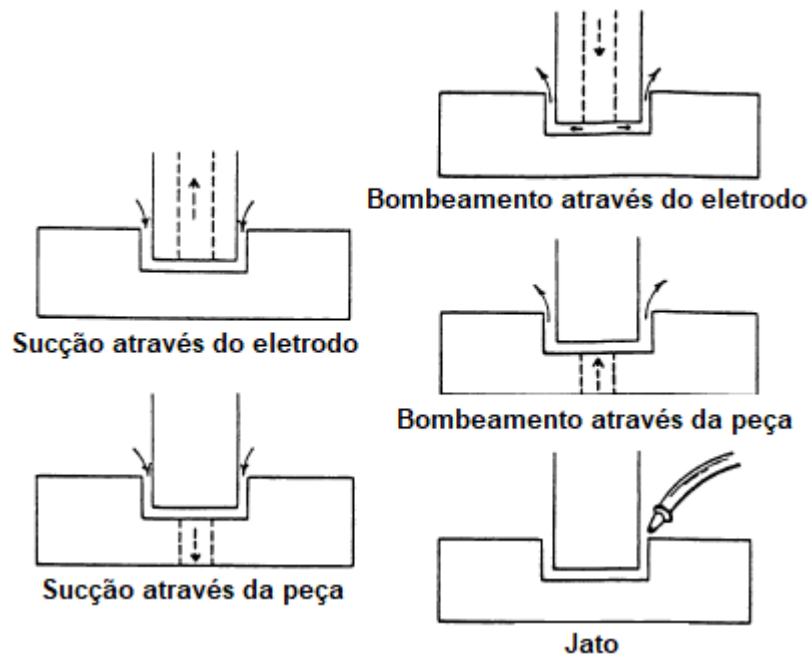
### 2.1.2 Fluido Dielétrico

O fluido usado como dielétrico deverá ter uma baixa condutividade elétrica. Em geral se utiliza como dielétrico hidrocarbonetos, tais como o querosene e óleo mineral. Pode ser usado também como alternativa a água desmineralizada. Dentre as principais funções do dielétrico, destacam-se:

- Retirar as partículas de material refundido, conhecido como carvão;
- Refrigeração da peça e do eletrodo;
- Restringir e formar o arco elétrico de forma adequada;
- Isolar eletrodo e peça.

O fluido dielétrico pode ser aplicado de diversas maneiras distintas, como mostra a Figura 4. O mesmo é bombeado e posteriormente passa por um filtro para retirada das impurezas adquiridas durante o seu uso, tais como o carvão, e segue para o reservatório.

Figura 4 – Técnicas de aplicação do fluido dielétrico



Fonte: Adaptado de Benedict (1987)

### 2.1.3 Eletrodo

Os eletrodos utilizados devem ser feitos de materiais que possuem elevado ponto de fusão, evitando-se assim um desgaste excessivo do mesmo e com boa condutividade elétrica. Os principais materiais são: Cobre eletrolítico, Cobre-Tungstênio, Cobre sinterizado e grafite.

Eletrodos metálicos fornecem ótimos acabamentos e um desgaste mínimo durante o processo. Já os eletrodos não-metálicos são insensíveis a choques térmicos, conservam suas qualidades mecânicas a altas temperaturas, praticamente não se deformam e são leves. No caso do eletrodo de grafite, deve-se trabalhar com altas correntes (altas temperaturas) pois o mesmo é frágil. Caso contrário o desgaste seria muito grande.

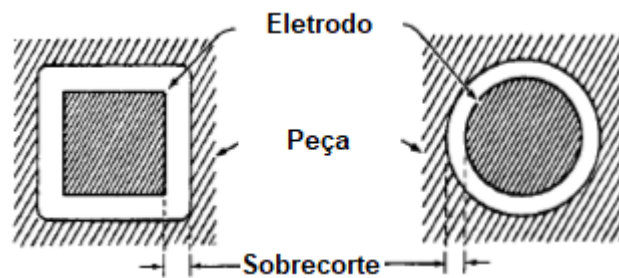
A Relação de Desgaste do processo é dada pela Equação 1:

$$R_D = \frac{\text{Desgaste da Ferramenta}}{\text{Desgaste da Peça}} \quad (1)$$

Comparando o eletrodo de Cobre com o de grafite para as mesmas condições de usinagem, Benedict (1987) afirma que a relação de desgaste do grafite é menor que a do Cobre, isto é,  $RD_{Grafite} < RD_{Cu}$ .

Um cuidado que se deve ter durante a usinagem que está relacionada ao eletrodo é o *overcut*, Figura 5. Traduzindo para o Português, o *overcut* seria o corte excessivo, ou seja, além do necessário.

Figura 5 – Overcut em usinagem axial



Fonte: Benedict (1987)

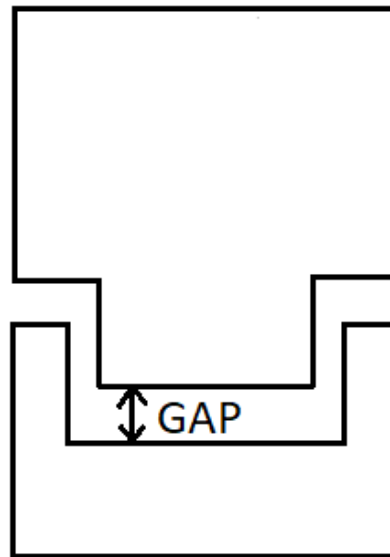
Ao analisar a Figura 5, é possível notar um sobre corte. A área usinada na peça é um pouco maior que a área do eletrodo. Isto se deve ao fato de que o arco elétrico que se forma entre o eletrodo e a peça não está restrito às áreas limítrofes dos mesmos. O arco elétrico foge um pouco além da região compreendida entre os dois corpos, havendo assim retirada de material nesta porção externa.

Portanto, ao se selecionar um eletrodo deve-se considerar o efeito do *overcut*, escolhendo um com tamanho compensatório para produzir a erosão desejada, não cortando além do projetado.

#### 2.1.4 GAP

Como já foi mencionado acima, o GAP é a distância mínima entre o eletrodo e a peça no instante em que as descargas elétricas começam a ocorrer, Figura 6.

Figura 6 – GAP: Folga entre o eletrodo e a peça durante o processo



Fonte: TAVARES,2018

O GAP varia de acordo com a corrente elétrica aplicada no processo. Existe um sistema de servomotores que regulam o tamanho do GAP com a necessidade requerida. Normalmente os valores usais estão no intervalo entre 0,012mm a 0,25mm. Na máquina ONC 400 da fabricante Eletro e usada no laboratório, existem sensores que medem a tensão no GAP e enviam sinais para os servomotores realizarem a regulação do mesmo.

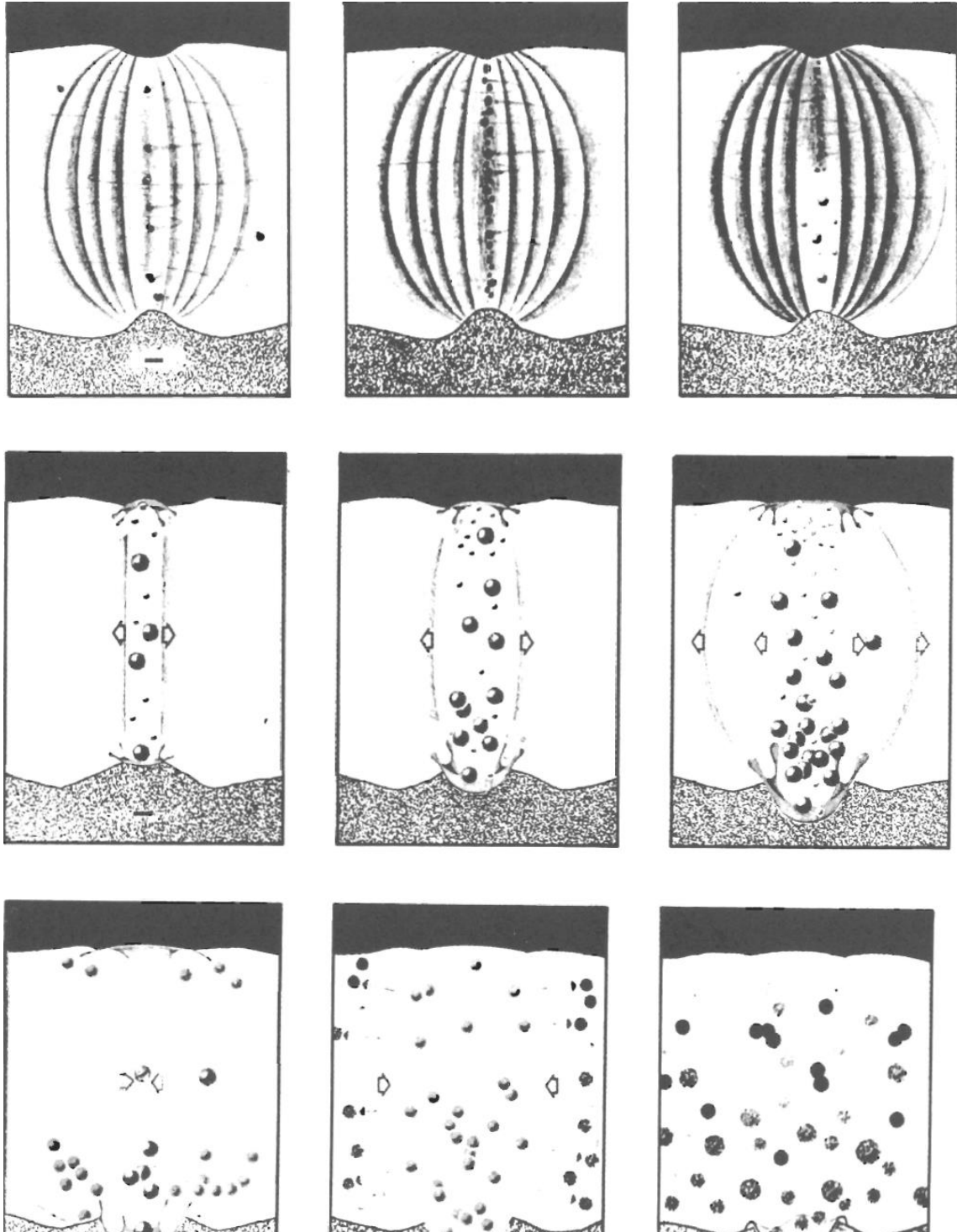
### 2.1.5 Parâmetros do Processo

De acordo com Benedict (1987), os principais parâmetros que influenciam o processo de usinagem por eletroerosão são basicamente 5. A **Potência**: Com o aumento da potência da fonte de tensão, aumenta-se a taxa de remoção, rugosidade superficial e também o desgaste da ferramenta; **Frequência do Pulso**: Aumento da frequência do pulso implica em diminuição da taxa de remoção e da rugosidade superficial; **GAP**: Diminuir o GAP ocasiona diminuição da taxa de remoção e rugosidade superficial e aumento da precisão do corte; **Ponto de fusão do material**: Quanto maior o ponto de fusão do material a ser usinado, menor a taxa de remoção e rugosidade superficial; **Condutividade Elétrica**: Quanto maior a condutividade elétrica do material, maior a taxa de remoção e rugosidade superficial da peça.

### 2.1.6 A Física da Eletroerosão

A Figura 7 representa o processo físico que ocorre durante a formação do arco elétrico e a remoção de material durante a usinagem.

Figura 7 – Sequencia de eventos durante um pulso elétrico de um ciclo da Eletroerosão



Fonte: Benedict (1987)

Quando a fonte DC libera um pulso elétrico entre o eletrodo e a peça, um campo elétrico é formado entre ambos nos pontos de irregularidades presente entre os mesmos, o que se explica através do poder das pontas, que de uma forma mais grosseira significa que as cargas elétricas encontrarão maiores facilidades de se descarregarem pelas pontas.

Com a formação do campo e as leis da elétrica, iniciará um fluxo de partículas suspensas e carregadas (próprio material da peça e do eletrodo, impurezas, etc) entre os elementos, onde positivo atrai negativo e vice-versa. Fluxo este que se concentra na parte mais forte do campo elétrico, isto é, no seu centro.

Simultaneamente, cargas elétricas negativas começam a serem emitidas a partir da peça (polo negativo da fonte DC). Juntos, as partículas carregadas e as descargas elétricas formarão o arco elétrico, que pode ser comparado a uma ponte com uma alta condutividade elétrica e que liga o eletrodo à peça, permitindo assim a passagem das cargas elétricas.

Com o aumento da voltagem entre eletrodo e peça no início do pulso elétrico, as altas temperaturas desenvolvidas fazem com que a condutividade elétrica do arco elétrico cresça continuamente. Desta forma, uma pequena porção do fluido dielétrico e das partículas carregadas existentes no arco elétrico irão se vaporizar e ionizar, resultando em um canal de faíscas entre as duas superfícies. Faíscas estas que são as próprias bolhas de vapor formadas.

Aproximadamente na metade do pulso elétrico, a voltagem no GAP diminui elevando assim a corrente elétrica. Isto aumenta consideravelmente a temperatura e a pressão neste canal de faíscas mencionado. Quando esta temperatura atinge um valor extremo (ponto de fusão do material do eletrodo e peça), a porção da peça e do eletrodo sujeita a este canal formado irá derreter e posteriormente vaporizar-se.

Quando o pulso elétrico finaliza, o arco elétrico se fecha, finalizando esse canal de faíscas formado e os efeitos gerados pelo calor e pressão. Assim as bolhas formadas pelo material vaporizado implodem e com o dielétrico presente (efeito refrigerante) há a solidificação destas partículas. Esta espécie de cavaco formado é chamada de carvão e é expulsa da região de usinagem pelo fluxo do dielétrico.

A sequência acima como dita, é o que ocorre para apenas um pulso elétrico e ocorre em uma alta frequência, se repetindo mais de mil vezes por segundo. O resultado final é uma erosão uniforme que ocorre tanto no eletrodo quanto na peça.

Com o progresso do processo e o avanço do eletrodo sobre a peça para manutenção do GAP, uma cavidade é formada pelo negativo do formato do eletrodo e representa a remoção do material na peça usinada.

## 2.2 Fresamento

Na operação de fresamento, a ferramenta de corte gira enquanto a peça a ser usinada é presa à mesa. Esta por sua vez é responsável pelos movimentos de avanço longitudinal e transversal, garantindo assim o deslocamento da peça. Existe também a possibilidade da peça permanecer estática enquanto a ferramenta de corte se movimenta e executa a usinagem.

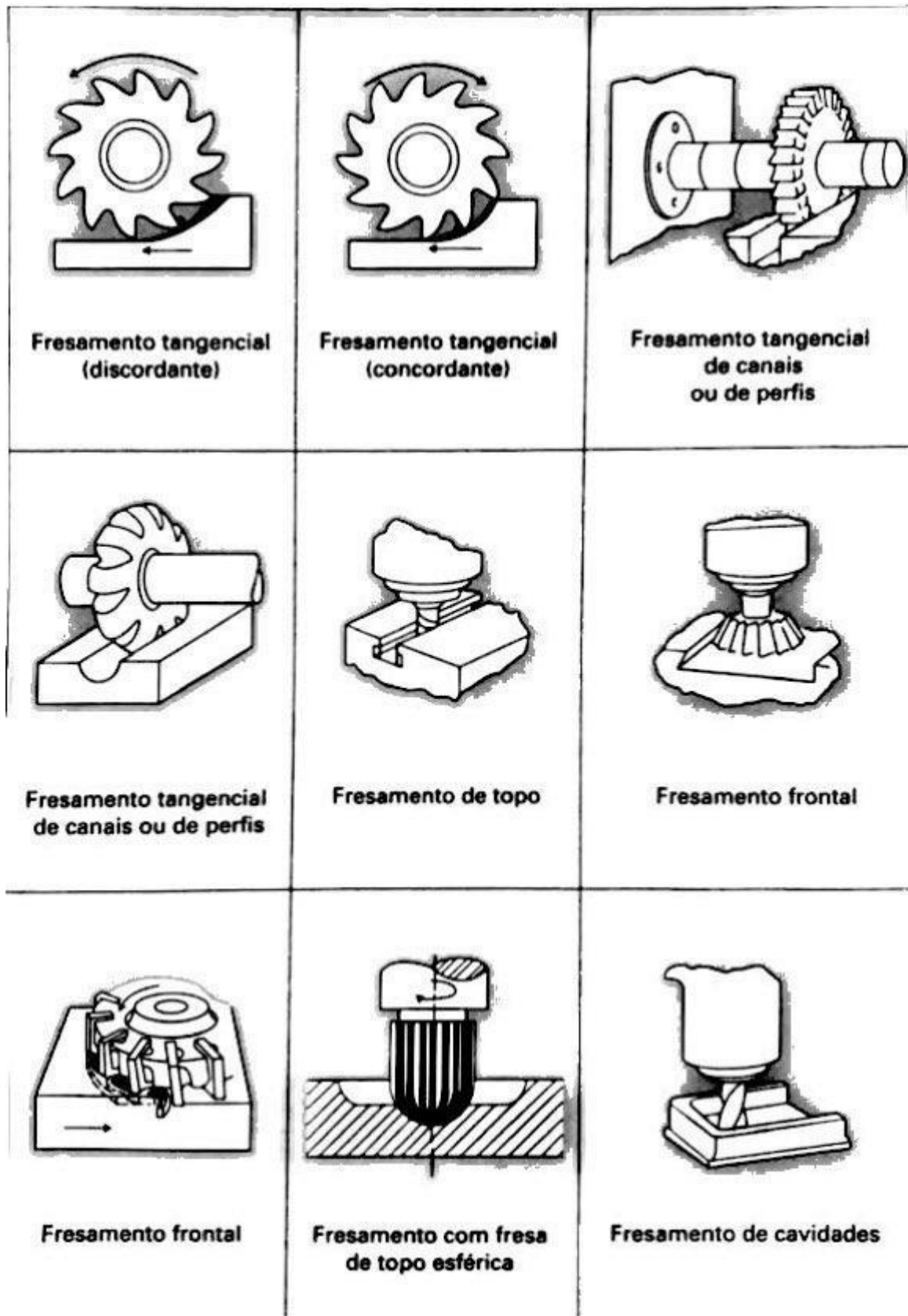
Existem diversas formas de se realizar o fresamento, dentre as quais se destacam:

- Fresamento tangencial (concordante ou discordante);
- Fresamento tangencial de canais ou de perfis;
- Fresamento de topo;
- Fresamento frontal;
- Fresamento com fresa de topo esférica;
- Fresamento de cavidades.

A Figura 8 exemplifica estes processos.

A operação de fresamento é reconhecida pela versatilidade na produção de geometrias diversas, além de garantir elevadas taxas de remoção de material, visto que a ferramenta (fresa) possui múltiplas arestas de corte (MACHADO; ABRÃO; COELHO; SILVA, 2009).

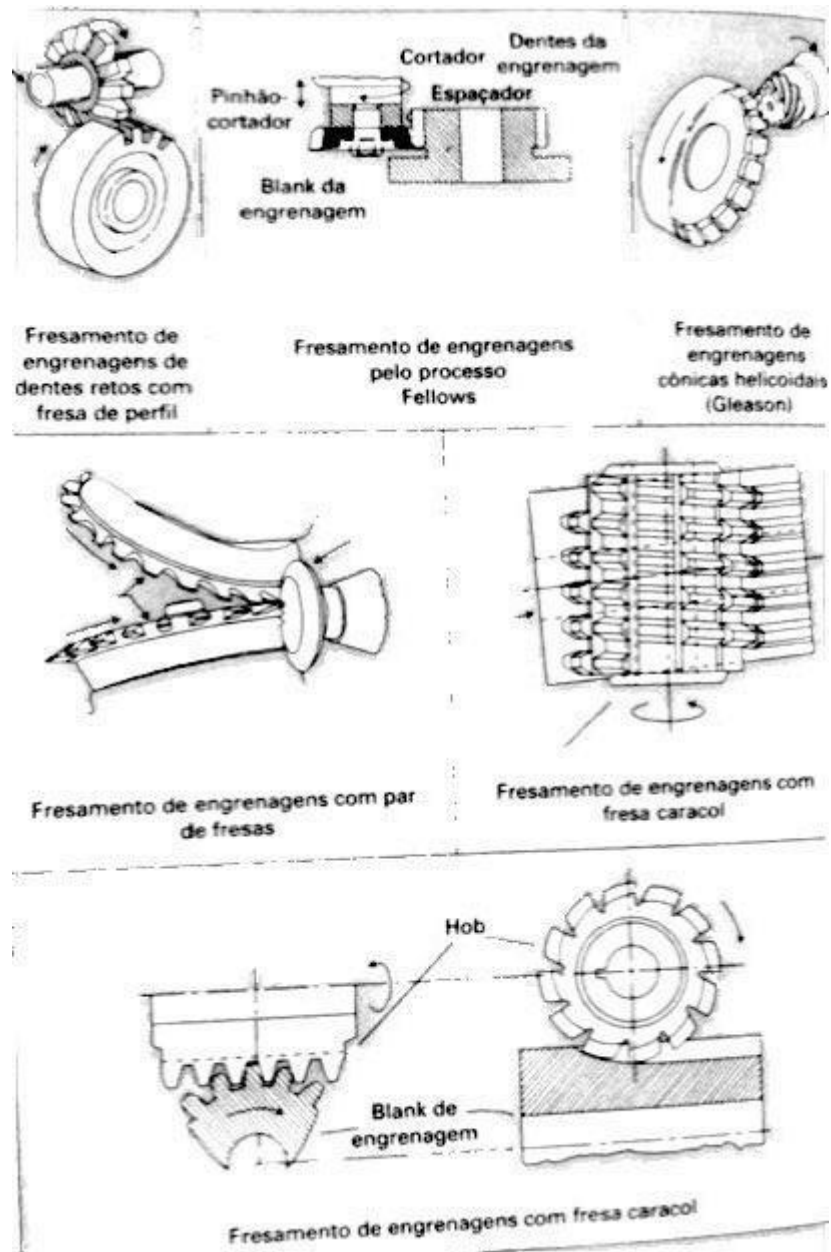
Figura 8 – Tipos de processos de fresamento



Fonte: Machado; Abrão; Coelho; Silva (2011)

Além disso, o fresamento também é utilizado para fabricação de engrenagens, Figura 9.

Figura 9 – Fresamento na fabricação de engrenagens



Fonte: Machado; Abrão; Coelho; Silva (2011)

### 2.2.1 Microfresamento

Análogo ao processo de fresamento é o processo de microfresamento que se insere no campo da microusinagem. Segundo Chae; Park; Freiheit (2006), a microusinagem é um processo de alta ou ultra precisão que envolve a fabricação de

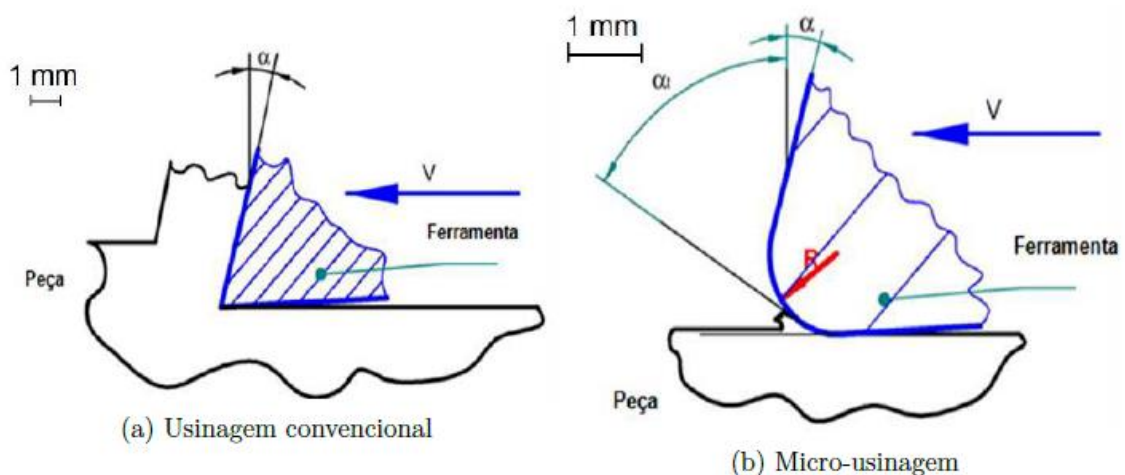
peças que possuem dimensões na ordem de micrometros, como definido por Masuzawa (2000), que enfatiza que o prefixo “micro” em microusinagem representa a faixa de dimensões das ferramentas utilizadas no processo, de 1 a 999  $\mu\text{m}$ .

### 2.2.1.1 Efeito do raio de aresta da ferramenta

Câmara et al. (2012) considera que a característica mais importante atribuída ao processo de micro usinagem está no fato de que a espessura de corte e o tamanho de grão da microestrutura do material da peça a usinar, tenham dimensões comparáveis ao raio da cunha cortante da ferramenta de micro usinagem.

O raio da aresta da ferramenta é um fator crítico no processo de microfresamento, uma vez que está intimamente relacionado à formação de cavaco e forças envolvidas durante o corte. A Figura 10, retirada de Cunha D. F (2016) representa esquematicamente uma comparação entre o processo de microusinagem e macrousinagem quanto ao raio de aresta da ferramenta.

Figura 10 – Relação do raio de aresta da ferramenta nos processos de macro e micro usinagem



Fonte: Cunha, D. F. (2016)

O raio de aresta é um fator bastante influente na microusinagem, entretanto, na macro usinagem se torna pouco influente. Este raio se torna importante na microusinagem pois o cavaco que se forma é geralmente menor que o mesmo, assim este cavaco passa a se formar na área no próprio raio de aresta da ferramenta, sendo sujeito assim a um ângulo de saída altamente negativo.

No entanto, a mesma situação ocorre com uma frequência muito menor quando se trata de macrousinagem. O processo de corte neste tipo de trabalho considera a ferramenta de corte sendo perfeitamente afiada, sem arredondamento das arestas, não sendo observado assim um ângulo de saída negativo do cavaco.

### **2.2.1.2 O Efeito Escala**

Apesar de serem processos análogos e de grande semelhança, o microfresamento se difere do fresamento convencional por algumas peculiaridades. Aramcharoen; Mativenga (2009) considera que existe uma diferença fundamental entre os processos de usinagem convencional e da micro usinagem, que é o chamado efeito escala. Este efeito é caracterizado pelo aumento não linear na energia específica de corte, ou seja, pelo aumento da energia por unidade de volume com a redução da espessura de corte

Assim, na microusinagem, a energia específica envolvida no processo é muito maior do que na usinagem convencional. Com a redução das dimensões da ferramenta e do material removido, o avanço por dente também é reduzido. Entretanto, isso não ocorre com o tamanho de grão do material de trabalho, ou seja, o mesmo não é reduzido proporcionalmente. Dessa forma, em um processo de fresamento convencional, por exemplo, a formação do cavaco abrange o cisalhamento de diversos grãos prevalecendo as propriedades mecânicas do material. Já no micro fresamento, o cavaco é formado dentro de poucos ou apenas um grão de cada vez. Essa característica se estende a todos os processos de microusinagem (Bissaco; Hansen; Chiffre, 2005).

### **2.2.1.3 Formação de cavaco**

Outra diferença importante está relacionada ao processo de formação de cavaco. O cavaco é formado devido às forças cisalhantes provocadas pela aresta de corte da ferramenta na peça a ser usinada e que criam trincas que vão de propagando e promovendo a separação de material.

Este cavaco pode não ser formado quando a profundidade de corte é menor do que uma espessura crítica ( $h_{min}$ ). Isso se deve aos efeitos elásticos que ocorrem quando se usina pequenas espessuras de cavaco, que podem causar, também,

instabilidades no corte (Da Silva, 2013). Desta forma, quando a espessura de corte é menor que uma espessura mínima estabelecida, ocorrerá apenas a deformação elástica do material e nenhum cavaco será formado, caracterizando assim, a formação de sulcamentos.

#### 2.2.1.4 Formação de rebarba

De acordo com ASTM (1959) e Olvera e Barrow (1996), rebarbas são projeções indesejáveis de material que ultrapassam os limites físicos da peça de trabalho definido por suas arestas e faces devido à deformação plástica durante a usinagem. Sendo assim, após a usinagem é necessário a remoção das rebarbas formadas através de outro processo denominado rebarbação, o que no processo de micro usinagem é um outro fator crítico devido ao tamanho micrométrico das peças que estão sendo fabricadas.

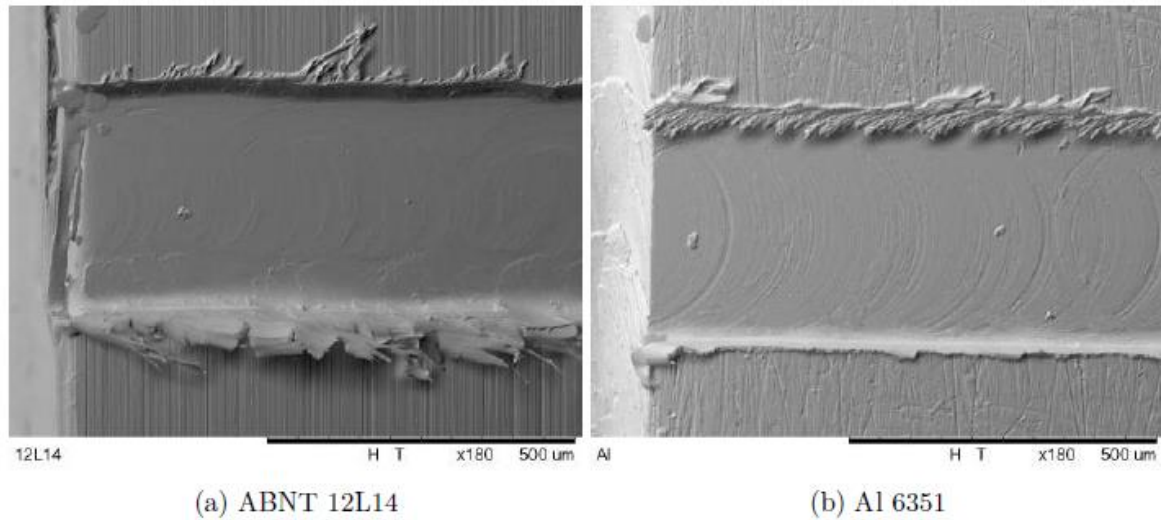
Cunha, D.F (2016) realizou testes de micro fresamento com amostras comerciais, tais como mostra a Figura 11 em uma Liga de Alumínio 6351 e em aço livre de corte 12L14. A seguir, a Figura 12 apresenta imagens retiradas com auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV com as rebarbas formadas durante os processos.

Figura 11 – Exemplos de micro fresas comerciais



Fonte: Bazar Geral e-Commerce Brasil – 2018

Figura 12 – Presença de rebarbas na lateral concordante (inferior) e na lateral discordante (superior)



(a) ABNT 12L14

(b) Al 6351

Fonte: Cunha, D. F. (2016)

Analisando a Figura 12, é possível notar que a rebarba do lado concordante é mais larga e apresentam uma grande curvatura, enquanto no processo discordante, as rebarbas são ligeiramente inclinadas. Este resultado encontrado por Cunha, D. F. (2016) já fora mencionado anteriormente por Piquard et al. (2014).

As fresas utilizadas para o presente experimento são elementos fabricados pelo processo de metalurgia do pó, através do Metal Duro e Aço rápido.

### 2.3 Metal Duro

O metal duro é um compósito a base de Carbeto de Tungstênio (WC) que foi desenvolvido em meados da década de 1920 na Alemanha por Karl Schroter devido a necessidade de um material que apresentasse alta resistência ao desgaste, alta dureza e boa tenacidade. Logo após sua descoberta, suas aplicações na fabricação de ferramentas de corte foram amplamente utilizadas, e se mantem até os dias atuais.

A principal característica do metal duro é que o mesmo possui duas fases: Uma fase dura e outra fase ligante. A primeira tem como característica sua alta dureza e resistência mecânica ao desgaste (entre 5 e 10 vezes maior que os aços comuns), enquanto a segunda fase confere tenacidade e plasticidade do material. A fase dura possui como elemento principal o Carbeto de Tungstênio. Já a fase ligante consiste em Cobalto (Co), Níquel (Ni) e em alguns casos o Ferro (Fe).

A fabricação do metal duro ocorre através do processo de sinterização, onde há a mistura dos pós contendo o Carbeto de Tungstênio como elemento principal e também outros elementos como TaC, MoC, NbC ou TiC, que ajuda a conferir sua alta resistência e dureza. Nesta mistura ainda se inclui o metal ligante, que vai conferir a tenacidade desejada. Após a mistura, são compactados e sinterizados.

As propriedades mecânicas do Metal Duro dependem principalmente da microestrutura do material após a sinterização, o que está intimamente ligado às características dos pós utilizados na mistura antes da sinterização. Para tanto é necessário um balanço ideal entre as quantidades de pó utilizadas para se atingir as propriedades finais requeridas.

## **2.4 Aço Rápido**

Este tipo de aço é chamado de rápido devido sua alta capacidade de usinar metais com altas velocidades de corte, quando comparados com os aços ferramenta de baixa ou de média liga, reduzindo-se assim o tempo de trabalho. É um aço de alta liga, composto por elementos tais como o Tungstênio (W), Molibdênio (Mo), Cromo (Cr), Vanádio (Vn) e Cobalto (Co), que lhes conferem alta dureza. E da mesma forma como o metal duro, o aço rápido também pode receber camadas de recobrimento, sendo os mais usados: TiN, TiCN e TiAlN.

Uma composição típica de aço rápido, por exemplo, é 18% de tungstênio, 4% de cromo, 1% de vanádio, 0,7% de carbono e o resto de ferro.

Outra grande vantagem do aço rápido que justifica sua intensa aplicação nos processos de usinagem é sua característica de manter inalterado sua capacidade de corte mesmo quando as temperaturas provocadas pelos efeitos de atrito atingem valores muito altos (ordem de 500°C ou 600°C). Isso permite o uso das ferramentas em períodos contínuos, sem alterações significantes dos ângulos de corte e no procedimento de corte.

Nos dias atuais, mesmo com novas tecnologias de fabricação de materiais para ferramentas, o aço rápido ainda é bastante empregado em ferramentas de furação, brochamento, fresamento, entre outros.

### 3. Metodologia Prática

#### 3.1 Máquina de Eletroerosão

De posse de todos os dados teóricos necessários para o entendimento e abordagem do assunto, antes de seguir adiante, uma explicação sucinta a respeito do maquinário utilizado para as experiências práticas é necessária.

A Máquina utilizada é uma máquina da fabricante Eletro – Máquinas e Equipamentos de Eletroerosão, cujo modelo é a ONC 400, Figura 13.

Figura 13 – Máquina de eletroerosão Eletro ONC 400



Fonte: Manual ONC 400

A Tabela 2 apresenta alguns dados técnicos do maquinário.

Tabela 2 – Dados técnicos da máquina de eletroerosão Eletro ONC 400

Pesos aproximados		
Máquina	Kg	1400
Bandeja		
Dimensões internas	mm	900x500x350
Tempo de enchimento	s	80
Tempo de esvaziamento	s	100
Volume do dielétrico	l	140
Abertura	-	Frontal/lateral
Consumo de Energia		
Tensão	V	220/380 60Hz
Potência total	kVA	4,6

Fonte: Manual ONC 400

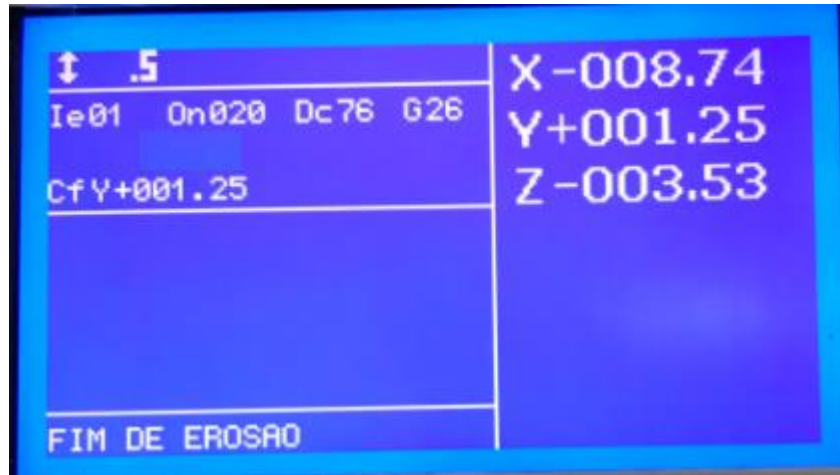
### 3.1.1 Parâmetros da máquina

Como já abordado na seção de fundamentação teórica do presente trabalho, o método da eletroerosão é dependente de alguns parâmetros que irão qualificar a forma como a usinagem será executada, onde se ressalta:

- Potência;
- Frequência do Pulso;
- GAP;
- Corrente Elétrica;
- Condutividade Elétrica do Material;

Para o equipamento em questão o fabricante permite a seleção dos seguintes parâmetros de usinagem, como mostrado no painel de controle da máquina, vide Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros de usinagem



Fonte: TAVARES,2018

Onde:

#### I.le: Densidade de Corrente Média

Cada unidade selecionada na máquina corresponde a 3,33A. Por exemplo:

Ie01: 3,33A;

Ie02: 6,66A;

Ie00: 0,8A – Corrente mínima que o equipamento é capaz de operar.

O manual do fabricante oferece alguns dados acerca da corrente ideal para cada tipo de eletrodo. A Tabela 3 mostra algumas condições de trabalho para o eletrodo de cobre eletrolítico.

Tabela 3 – Parâmetros para eletrodo de cobre eletrolítico

Condições de Trabalho	Corrente	Quantidade de Ie
Acabamento Baixo desgaste do eletrodo	1 a 3,33 A/cm <sup>2</sup>	Até 1 Ie
Desbaste Alta remoção de material	4 a 7 A/cm <sup>2</sup>	2 Ie

Fonte: Manual ONC 400

A seleção da corrente correta irá influenciar nas seguintes características:

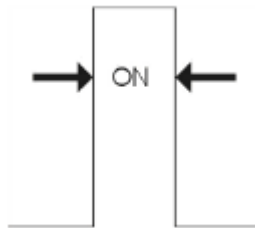
- Rugosidade necessária (acabamento superficial);

- Máximo desgaste do eletrodo permitido;
- Velocidade de erosão necessária;
- Características térmicas do eletrodo;
- Condições de gap;
- Área de contato eletrodo/peça.

## II. On: Comprimento de Onda

O ON determina a duração do pulso (tempo de descarga) e possui como unidade de referência o microssegundo ( $\mu\text{s}$ ), Figura 15.

Figura 15 – Duração do pulso: Tempo ON

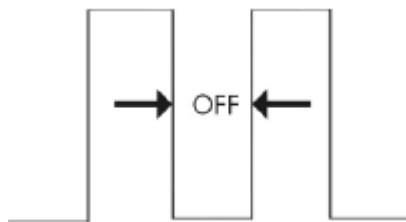


Fonte: Manual ONC 400

## III. Dc: Tempo de pausa

Dc relaciona-se ao tempo de pausa entre duas descargas consecutivas. Neste tempo ocorre a interrupção da descarga. Ele é dado como um percentual de On.

Figura 16 – Tempo de pausa



Fonte: Manual ONC 400

## IV. G: GAP

O GAP é a folga resultante entre o eletrodo e a peça durante o processo de eletroerosão, dado em  $\mu\text{m}$ , Figura 6.

## **V. Cf: Cota Final**

É o valor da dimensão que se deseja usinar na peça. Normalmente, dado pela profundidade a ser usinada.

## **VI. Afastamento**

Define-se o afastamento como um distanciamento que existe entre o eletrodo e a peça. O afastamento é estabelecido de acordo com um número de ciclos definidos pelo operador e sua unidade é o mm.

A máquina possui outros parâmetros além destes apresentados. Entretanto suas apresentações fogem do escopo deste trabalho visto que não foram utilizadas.

### **3.1.2 A função orbital**

Uma outra função importante que a máquina permite é a função orbital. Com a função orbital, a usinagem por eletroerosão ocorre através de orbitas definidas pelo operador. Assim é possível a usinagem de materiais descrevendo órbitas circulares ou quadradas ao redor da peça a ser usinada, estabelecendo-se os eixos requeridos e os movimentos desejados, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Função Orbital

GEOMETRIA	QUADRANTE	MOVIMENTO XYZ	MOVIMENTO XY

GEOMETRIA	QUADRANTE	MOVIMENTO XYZ	MOVIMENTO XY

Fonte: Manual ONC 400

### 3.2 Usinagem por Eletroerosão do Metal Duro e do Aço Rápido

Após o processo de preparação da máquina foi iniciado o processo de usinagem. A primeira tentativa de realização do processo de usinagem por eletroerosão foi realizada em Metal Duro e cujos resultados serão expostos na seção 4. A amostra utilizada no experimento é um descarte de microfresa utilizada por Cunha, D. F(2016) em sua tese de Doutorado, presente na Figura 18.

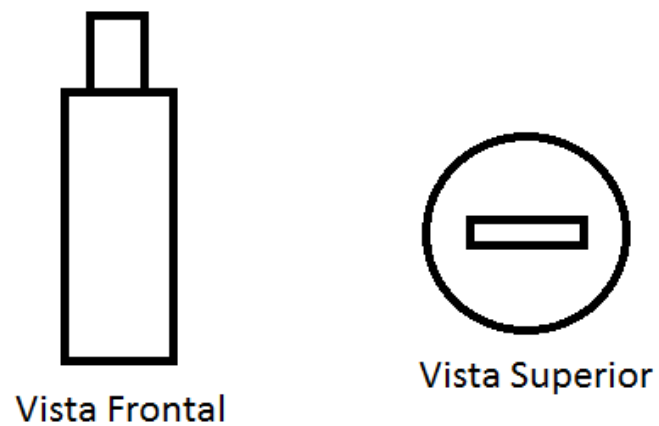
Figura 18 – Descarte de micro fresa utilizado na primeira tentativa



Fonte: TAVARES,2018

A geometria desejada para a ferramenta de corte é semelhante a uma fenda (chave de fenda), como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Geometria desejada para a micro fresa



Fonte: TAVARES,2018

A metodologia empregada neste trabalho foi proposta na tentativa de reaproveitar o corpo das ferramentas com arestas já desgastadas ou quebradas. Mesmo não sendo possível reproduzir uma aresta de corte afiada, a geometria da ferramenta atende ao processo devido ao elevado ângulo negativo de saída do cavaco gerado no processo.

### 3.2.1 TESTE 1

O manual da máquina oferece alguns parâmetros que foram ensaiados pelo fabricante para determinação de condições econômicas de corte, vide Tabela 1. No caso deste primeiro experimento, denominado TESTE 1, o eletrodo utilizado foi o Cobre Eletrolítico, Figura 20. Assim como uma primeira tentativa utilizou-se os dados do fabricante como aproximação para usinagem do Metal Duro, presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados na primeira tentativa

On ( $\mu$ s)	Ie	Dc (%On)	Remoção de material ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	Desgaste (%)	GAP ( $\mu\text{m}$ )
100	1	87	3.5	0.0	25

Fonte: Manual ONC 400

Figura 20 – Eletrodo de Cobre Eletrolítico



Fonte: TAVARES,2018

Os parâmetros utilizados presentes na Tabela 4 acima foram escolhidos por apontar um desgaste do eletrodo de praticamente zero.

Neste primeiro momento, o resultado encontrado não foi satisfatório, como será apresentado na seção de resultados. A amostra foi levada ao microscópio do Laboratório de Pesquisa e Ensino de Metalografia e Metrologia – LAPEMM da UFG e o que foi observado é acabamento muito grosseiro do interior da micro fresa, onde é notório a presença de grãos muito grandes que formam a estrutura interna da mesma. Vale ressaltar que estes descartes são fabricados pelo processo de metalurgia do pó, assim é normal de se esperar a presença de grãos em sua estrutura, mas não grãos tão grandes como os que foram apresentados.

Como a tendência é de se obter grãos mais refinados em um processo de sinterização, as amostras utilizadas nos experimentos foram trocadas. O lote contendo as amostras doadas pelo Professor Dr. Daniel Fernandes da Cunha foram descartadas para os testes e trocadas por amostras doadas pelo curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR.

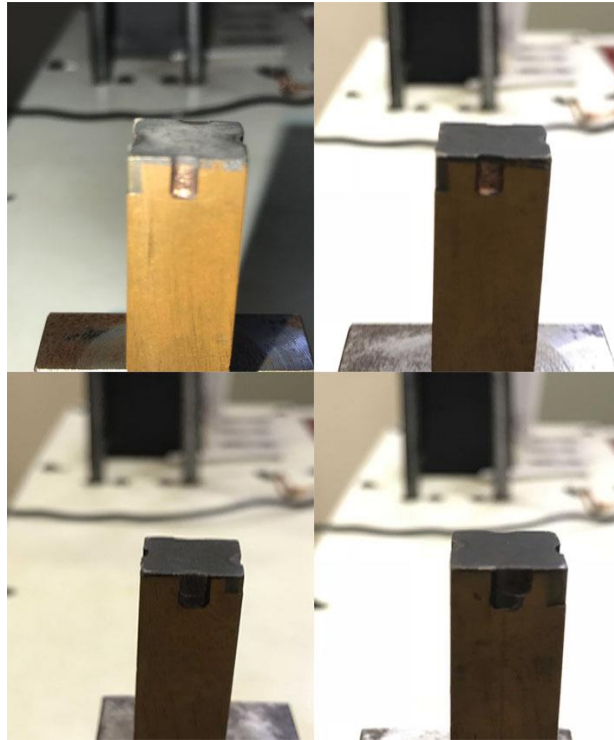
### **3.2.2 TESTES 2 e 3**

Este novo lote de amostras usado contém amostras de Metal Duro e Aço Rápido. Assim as tentativas seguintes, TESTE 2 e TESTE 3, foram em cima destes dois tipos de materiais para se analisar e tomar uma decisão de qual material oferece mais vantagens a ser usado nos experimentos seguintes.

A primeira tentativa neste lote, o TESTE 2 do experimento, foi feita no Metal Duro. Todas as demais amostras utilizadas daqui em diante possuem o mesmo aspecto mostrado na Figura 18. Nos TESTES 2 e 3, todos parâmetros e métodos usados foram os mesmos escolhidos para o TESTE 1 e contidos na Tabela 4, bem como o eletrodo, sem nenhuma distinção.

Com base nos resultados encontrados, a decisão tomada foi de prosseguir os testes utilizando as amostras de Metal Duro, entretanto, os parâmetros de usinagem apresentavam elevado desgaste no eletrodo, como mostrado na Figura 21. Os parâmetros usados são os menos severos dentre todos os que o fabricante oferece, sugerindo menor desgaste da ferramenta. Então o ideal não seria mexer nesses parâmetros nesse momento.

Figura 21 – Desgastes no eletrodo de Cobre Eletrolítico



Fonte: TAVARES,2018

A ideia tomada então foi de reduzir o diâmetro das amostras para então repetir os processos realizados anteriormente. Assim o material a ser usinado pelo método de eletroerosão seria menor, conseqüentemente se reduziria a taxa de desgaste do eletrodo. A preocupação de manter a integridade do eletrodo se justifica pelo seu alto custo.

Desta forma alguns testes foram realizados para redução deste diâmetro. O diâmetro original da ferramenta é de 3mm, e o desejado é a redução desse diâmetro para 1mm.

A primeira tentativa foi a usinagem dessa amostra na retífica cilíndrica, pois existe uma no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação – LAMAF da UFG e o processo oferece um ótimo acabamento com boas tolerâncias. Entretanto a máquina de retífica cilíndrica disponível é uma convencional, de grande porte e que gera muitas vibrações durante seu uso, Figura 22. Por isso o resultado final não foi

satisfatório por que todas as amostras em que se tentou realizar a redução de diâmetro quebraram.

Figura 22 – Retífica Cilíndrica do LAMAF - UFG



Fonte: TAVARES,2018

A segunda tentativa foi tentar reduzir esse diâmetro através da Afiadora Universal também do LAMAF, Figura 23. Mais uma vez não se obteve sucesso no trabalho realizado. O reboło disponível não era apropriado para o processo. Durante a retificação para redução do diâmetro da ferramenta, o reboło apresentava desgaste, não sendo possível a continuação do processo pelo método selecionado.

Figura 23 – Afiadora Universal do LAMAF - UFG



Fonte: TAVARES,2018

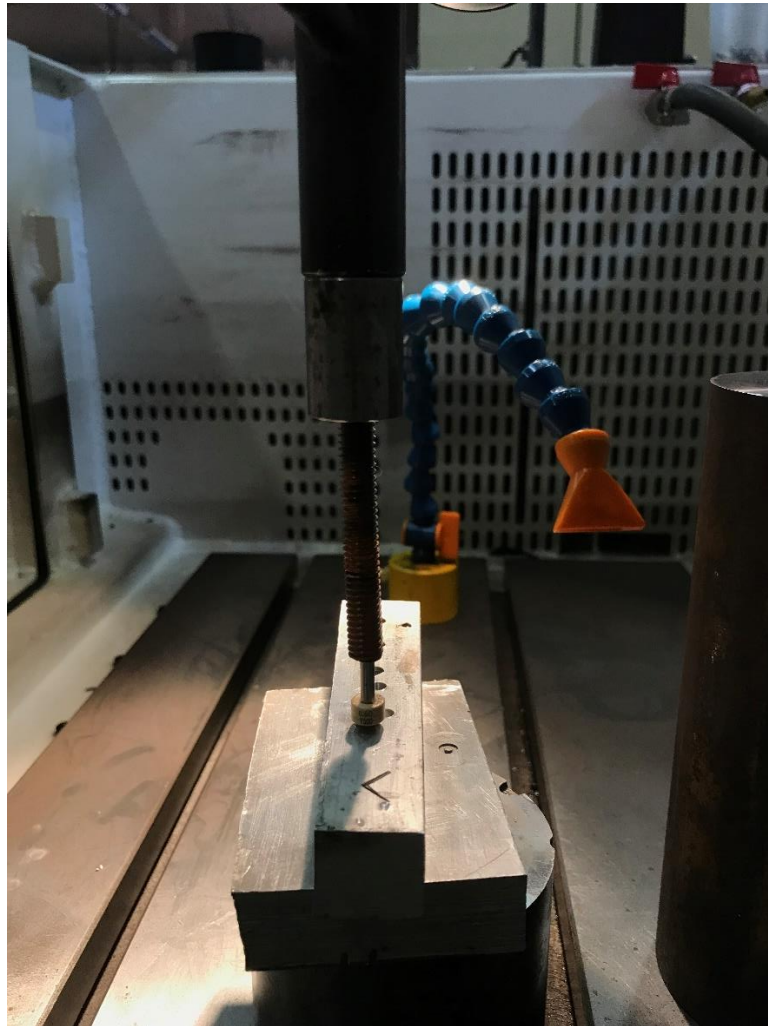
Por fim, a única solução encontrada foi reduzir o diâmetro pelo método da eletroerosão interna.

### 3.2.3 TESTE 4

A redução do diâmetro pelo método da eletroerosão interna põem em prática o uso da função orbital do maquinário, já descrito em seções anteriores deste trabalho.

O eletrodo utilizado nesta etapa foi uma sucata de cobre encontrada no LAMAF. A Figura 24 exemplifica como o processo foi realizado bem como o eletrodo utilizado.

Figura 24 – Eletroerosão interna para a redução do diâmetro da amostra



Fonte: TAVARES,2018

Os parâmetros usados desta vez se diferem dos realizados nas etapas anteriores, como apresenta a Tabela 5. Por ser um processo de usinagem não convencional, uma de suas características é a baixa taxa de remoção de material, sendo este um fator que eleva significativamente o tempo de usinagem. Para essa primeira amostra, TESTE 4, o tempo gasto para esse desbaste de diâmetro foi de três horas e meia.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados nas etapas de desbaste de diâmetro

On ( $\mu$ s)	Ie	Dc (%On)	Remoção de material ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	Desgaste (%)	GAP ( $\mu$ m)
20	2	76	23	7	25

Fonte: Manual ONC 400

Pela primeira vez os resultados obtidos foram próximos do esperado, entretanto, apenas por uma pequena falha gerada na superfície usinada. O eletrodo utilizado não possuía cilindricidade exata e apresentava imperfeições internas, de tal forma que o resultado obtido apresentou algumas imperfeições na superfície da amostra.

Foi necessário assim selecionar outro eletrodo para que se desse seguimento ao trabalho de desbaste do diâmetro da ferramenta.

### 3.2.4 TESTE 5

As tentativas seguintes foram realizadas com bicos de solda Mig (Liga de Cobre-Cromo) descartados pelo setor de soldagem do LAMAF, Figura 25. Assim, os mesmos processos descritos no TESTE 4 foram repetidos novamente, com os mesmos parâmetros, diferenciando-se somente pela troca do eletrodo.

Figura 25 – Eletrodo de bico de solda MIG



Fonte: TAVARES,2018

Nesta etapa foram ensaiadas 4 amostras de metal duro, não se chegando a nenhum resultado conclusivo de melhora. Todas amostras tiveram de ser descartadas por imprevistos com a máquina de eletroerosão. O processo de usinagem, após iniciado, não apresentou a correta retirada do cavaco (carvão), levando a um descarte dos ensaios devido ao contato do eletrodo com a peça.

Quando há este contato, há um curto circuito, uma vez que eletrodo e peça estão em contato físico, desta forma, máquina para instantaneamente o processo de usinagem e se reseta automaticamente.

Na tentativa de melhorar este processo de retirada de material, além de haver a imersão total da peça usinada e do eletrodo no fluido dielétrico, também foi necessário aplicar um jato de fluido dielétrico através do orifício no interior do eletrodo (Pressure Through Electrode – Figura 4), atingindo diretamente a interface de usinagem e removendo o carvão, evitando-se assim estes imprevistos.

Como os resultados obtidos a partir dos testes com metal duro não estavam satisfatórios, optou-se por realizar os mesmos testes em outras amostras de aço rápido. Com esta mudança o tempo necessário para realização do desbaste reduziu-se, o que nos fez optar por essa troca de forma definitiva. Para o aço rápido, o tempo médio necessário para o desbaste estava próximo de 40min, contra uma média de três horas e meia para o metal duro, considerando também o desgaste do eletrodo que apresentou ser reduzido quando comparado com o desgaste no metal duro.

Em tese esses resultados já eram esperados, visto que a dureza do metal duro é muito superior a dureza do aço rápido, apresentando assim maior dificuldade de usinagem.

### **3.2.5 TESTE 6**

O TESTE 6 foi então realizado com o desbaste da amostra de aço rápido. Da mesma forma que o metal duro, a ideia é desbastar um diâmetro de 3mm para 1mm. Os parâmetros aqui utilizados são os mesmos que foram utilizados para o metal duro. Preferiu-se deixar os mesmos parâmetros para analisar a diferença entre os dois processos de desbaste.

O bico de solda MIG que se estava sendo utilizado como eletrodo sofreu desgastes acentuados, quando comparados com os demais eletrodos utilizados anteriormente. Desta forma, ele não mantinha a cilindricidade necessária para desbaste de toda a circunferência do eletrodo. Em uma região ele estava mais desgastado que outra, e nessa região que havia este desgaste superior, não houve a usinagem pois não havia a proximidade necessária para que se abrisse o arco elétrico.

### **3.2.6 TESTE 7 e 8**

Nesse momento já se faz necessário a troca do eletrodo. Não se sabe qual tipo de cobre ele é formado, visto que é descarte, sucata do laboratório, Figura 26. Os processos que foram realizados com seu uso, notaram-se um desgaste muito inferior ao desgaste obtido com os bicos de solda MIG, além de fornecer uma boa granulometria na estrutura interna da ferramenta.

Figura 26 – Eletrodo de sucata



Fonte: TAVARES,2018

Com um desgaste tão pequeno, faz-se necessário comparar o comportamento de dois eletrodos. O primeiro um eletrodo de Cobre Eletrolítico, que foi fornecido pelo fabricante da máquina e o segundo este mesmo eletrodo que foi utilizado pela última vez, fruto de sucatas do laboratório e o qual não temos informações acerca de sua constituição. Os TESTES 7 e 8 foram, portanto, conduzidos em comparação com estes dois eletrodos.

Para ambos testes, os parâmetros foram novamente modificados, Tabela 6. Sendo essa modificação usada igualmente para os dois testes, ou seja, as mesmas condições.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados nos TESTES 7 e 8

On (μs)	Ie	Dc (%On)	Remoção de material (mm <sup>3</sup> /min)	Desgaste (%)	GAP( μm)
10	1	65	4.0	5	25

Fonte: Manual ONC 40

Com resultados mais uma vez insatisfatórios, partiu-se para a última tentativa, ou seja, troca mais uma vez do tipo de eletrodo para a fabricação da ferramenta, em busca de melhores resultados.

### 3.2.7 TESTE 9

Houve assim, mais uma vez, a troca do tipo de eletrodo. Foi utilizado para o TESTE 9 um eletrodo de Liga de Cobre-Cobalto-Berílio que é muito empregado na fabricação de barramentos de painéis elétricos para geradores de energia. Como se estava perdendo muito tempo com todo o trabalho complexo de desbaste das amostras utilizadas, basta observar a quantidade de testes realizados sem sucesso, retomou-se novamente à metodologia inicial, ou seja, usinando-se direto a amostra com diâmetro nominal no intuito de construir as arestas de corte conforme a Figura 19.

Nesta etapa, novos parâmetros foram ajustados para o corte. Como não se conhecia o comportamento da Liga de Cobre-Cobalto-Berílio no método da Eletroerosão, bem como o manual do fabricante não oferece nenhum parâmetro de usinagem utilizando este tipo de eletrodo, selecionamos os seguintes parâmetros, Tabela 7:

Tabela 7 – Parâmetros utilizados no TESTE 9

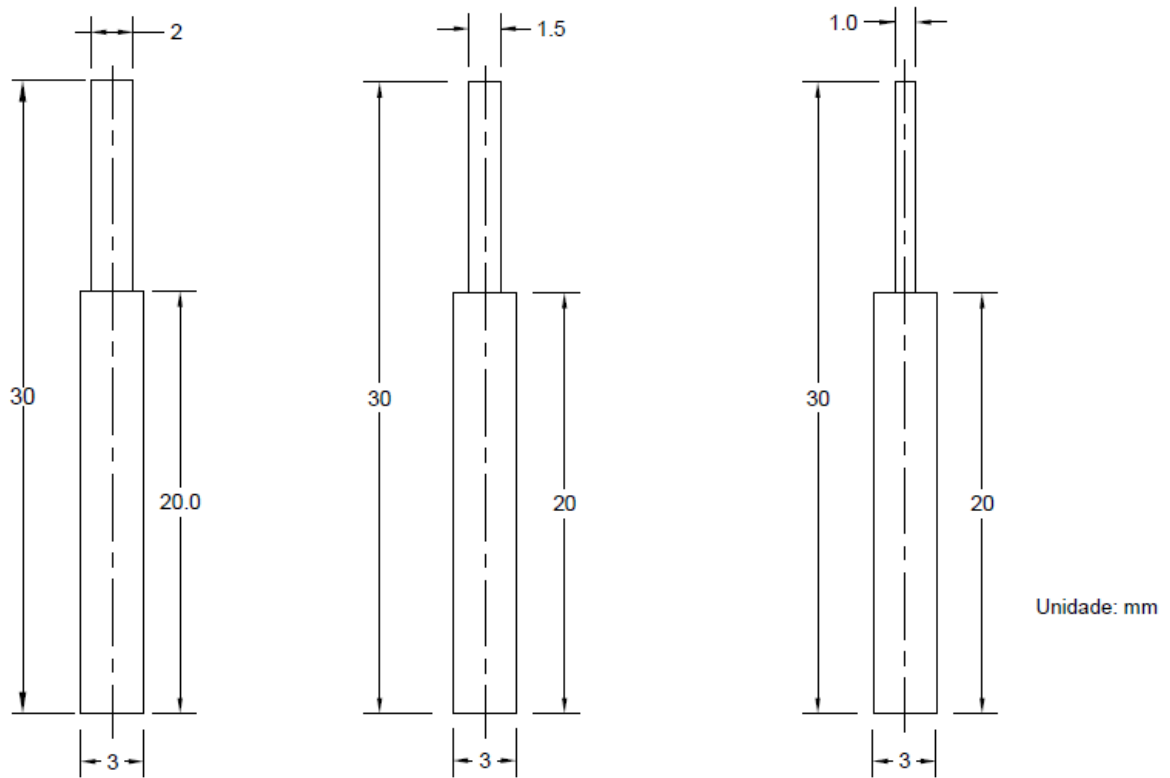
On ( $\mu$ s)	Ie	Dc (%On)	Remoção de material ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	Desgaste (%)	GAP ( $\mu$ m)
200	2	90	14	0	25

Fonte: Manual ONC 40

Os parâmetros da tabela acima são para o eletrodo de Cobre Eletrolítico usinando Aço Rápido. Sua escolha se dá devido ao baixo percentual de desgaste do eletrodo. O método é experimental, baseia-se em tentativas e erros, por isso selecionar um valor com base em um referencial (baixo desgaste), e testá-lo.

Este teste, tomado como o TESTE FINAL se constituiu em um conjunto de tentativas. As amostras usinadas se distinguem em 3 grupos, onde cada grupo é composto por uma de aço rápido e uma de metal duro. Usinou-se em cada amostra a quantidade de 0,5mm, 0,75mm e 1,0mm de cada lado, como exemplifica a Figura 27.

Figura 27 – Exemplificação das quantidades usinadas em cada grupo.



Fonte: TAVARES,2018

## **4. Resultados:**

Abaixo estão representados os resultados de todos os testes que foram descritos minuciosamente no tópico anterior, bem como a validação dos mesmos através do uso das ferramentas de corte fabricadas no TESTE 9/TESTE FINAL.

### **4.1 Resultados: TESTE 1**

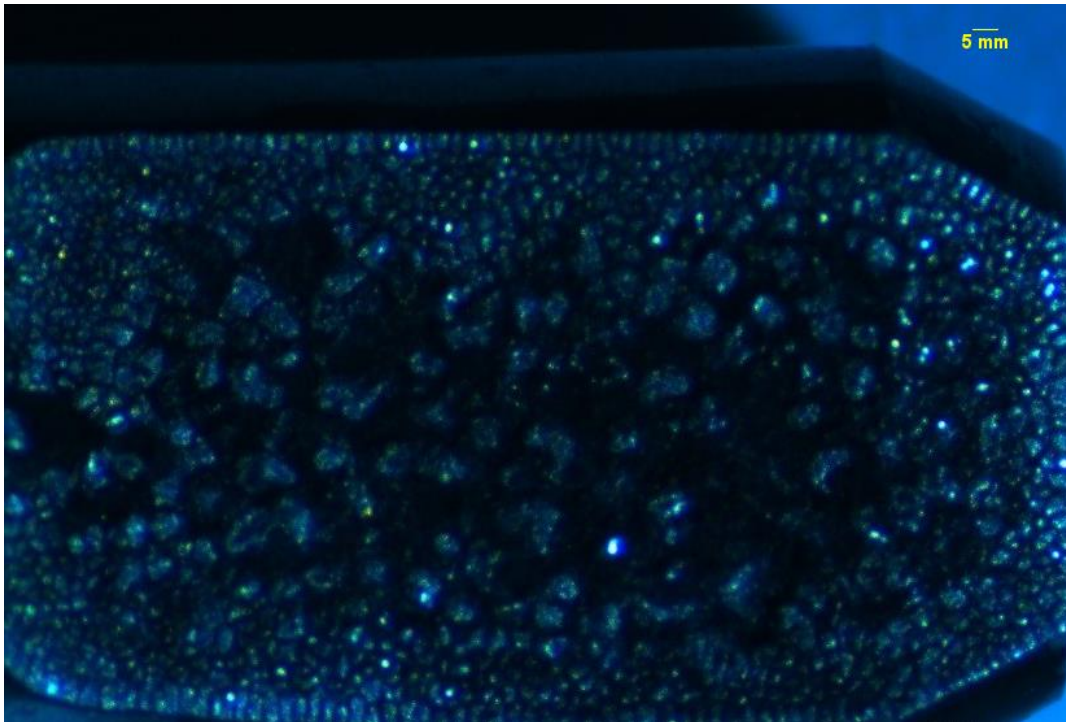
Teste que foi realizado com a amostra doada pelo Cunha, D. F., que fora utilizada em sua tese de doutorado.

A Figura 28 representa uma imagem tirada pelo microscópio das regiões usinadas. Analisando a imagem é possível perceber um acabamento muito grosseiro do interior da micro fresa, onde é notório a presença de grãos muito grandes que formam a estrutura interna da mesma.

Observando com um olhar mais criterioso, existem grãos menores que poderíamos considerar como normais na porção mais externa da ferramenta. Tamanhos estes que vão crescendo em direção ao interior da peça e se tornam anormais na região central.

Estes grãos menores podem ser atribuídos a um provável tratamento térmico externo durante a fabricação da ferramenta, muito comum em ferramentas de corte para aumentar a resistência ao desgaste. Há também a possibilidade de ser algum efeito térmico que a peça sofre durante a usinagem por eletro erosão, pois se observa grãos mais refinados na periferia enquanto o centro contém grãos mais grosseiros. A periferia da ferramenta é mais susceptível a presença do dielétrico, cuja função também é a de refrigerante, enquanto o acesso do fluido na região mais central é dificultado.

Figura 28 – Análise microscópica do TESTE 1.



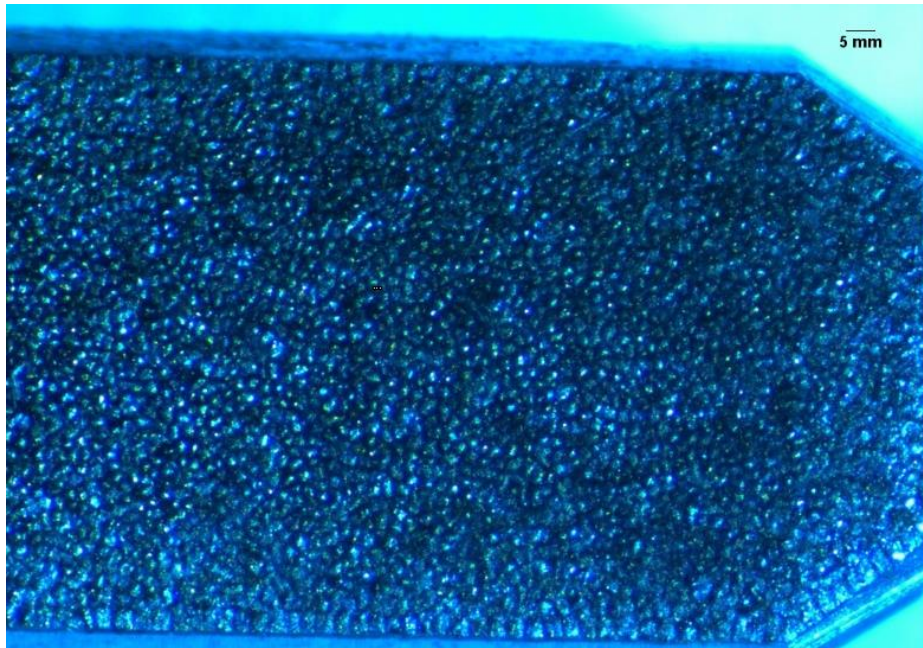
Fonte: TAVARES,2018

Outra justificativa é que poderia ser algum defeito intrínseco ao processo de fabricação da ferramenta que gerou grãos tão grandes

#### **4.2 Resultados: TESTES 2 e 3**

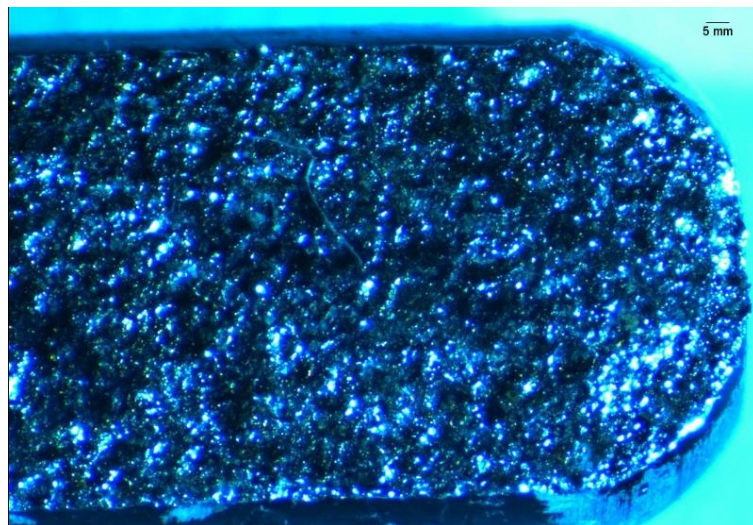
Realizados com as amostras doadas pela UFSCAR, de Metal Duro e Aço Rápido. As Figuras 29 e 30 mostram a análise microscópica da estrutura interna das ferramentas de metal duro e aço rápido respectivamente.

Figura 29 – Análise microscópica da ferramenta de metal duro no TESTE 2.



Fonte: TAVARES,2018

Figura 30 – Análise microscópica da ferramenta de aço rápido no TESTE 3.



Fonte: TAVARES,2018

Comparando as duas amostras de metal duro que foram utilizadas, conclui-se pela observação das Figuras 28 e 29 que os resultados do segundo teste foram,

visualmente, muito mais satisfatórios que os resultados do primeiro teste. Uma segunda análise comparativa pode ser realizada entre as amostras de metal duro do segundo teste e de aço rápido do terceiro teste. Este último teve um resultado bem próximo do adquirido com o metal duro do primeiro teste, com granulometria exagerada.

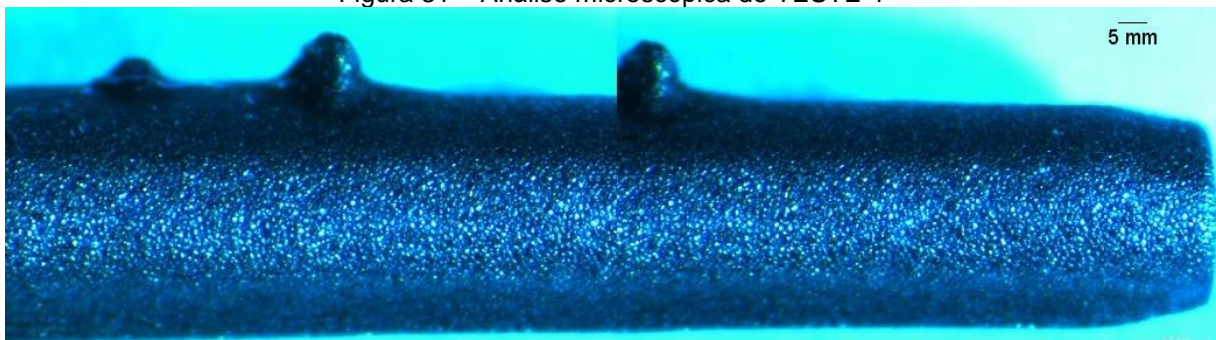
Assim, a decisão tomada foi de prosseguir os testes utilizando as amostras de Metal Duro.

#### 4.3 Resultados: TESTE 4

Se constituiu no desbaste do diâmetro nominal da amostra utilizando a função orbital da máquina com eletroerosão interna.

A Figura 31 mostra uma imagem microscópica do teste realizado.

Figura 31 – Análise microscópica do TESTE 4



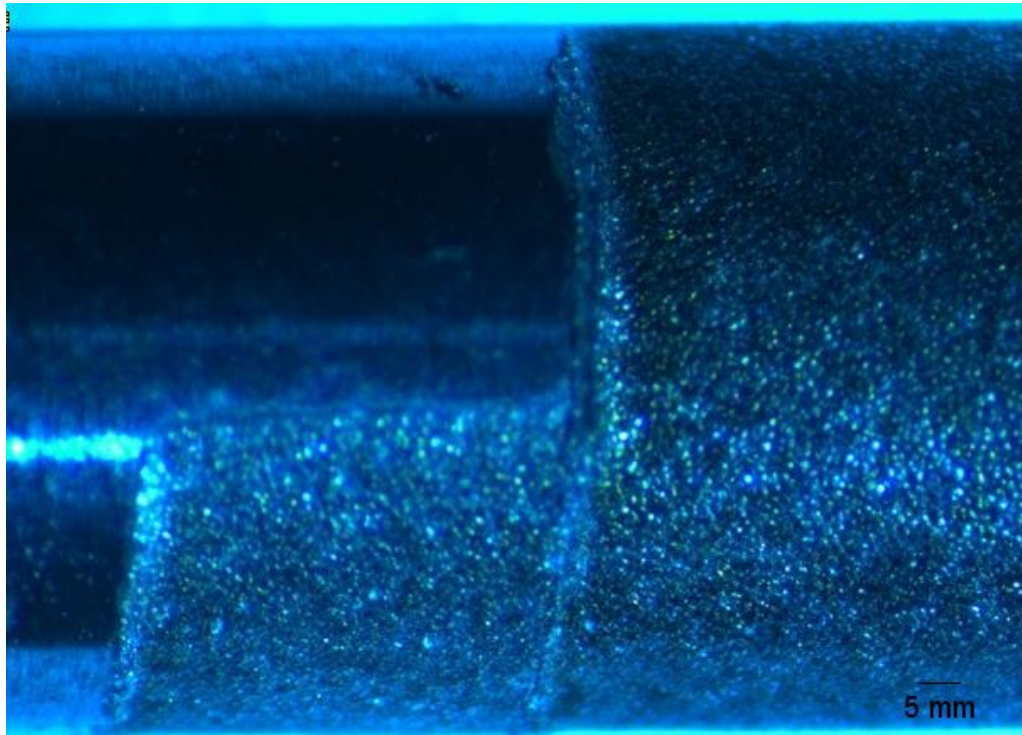
Fonte: TAVARES,2018

Devido imperfeições no eletrodo utilizado, o resultado não foi o esperado. Como observar-se, é notório a presença de pequenas rebarbas no resultado final, além do fato de que a peça ficou torta.

#### 4.4 Resultados: TESTE 5

Tentativa de redução do diâmetro das amostras utilizando um eletrodo formado por descarte de bicos de solda MIG queimados. No total foram 4 tentativas, não se chegando a nenhum resultado plausível, nem próximo ao apresentado pela Figura 31 acima. A Figura 32 apresenta uma das tentativas realizadas.

Figura 32 – Análise microscópica do TESTE 5



Fonte: TAVARES,2018

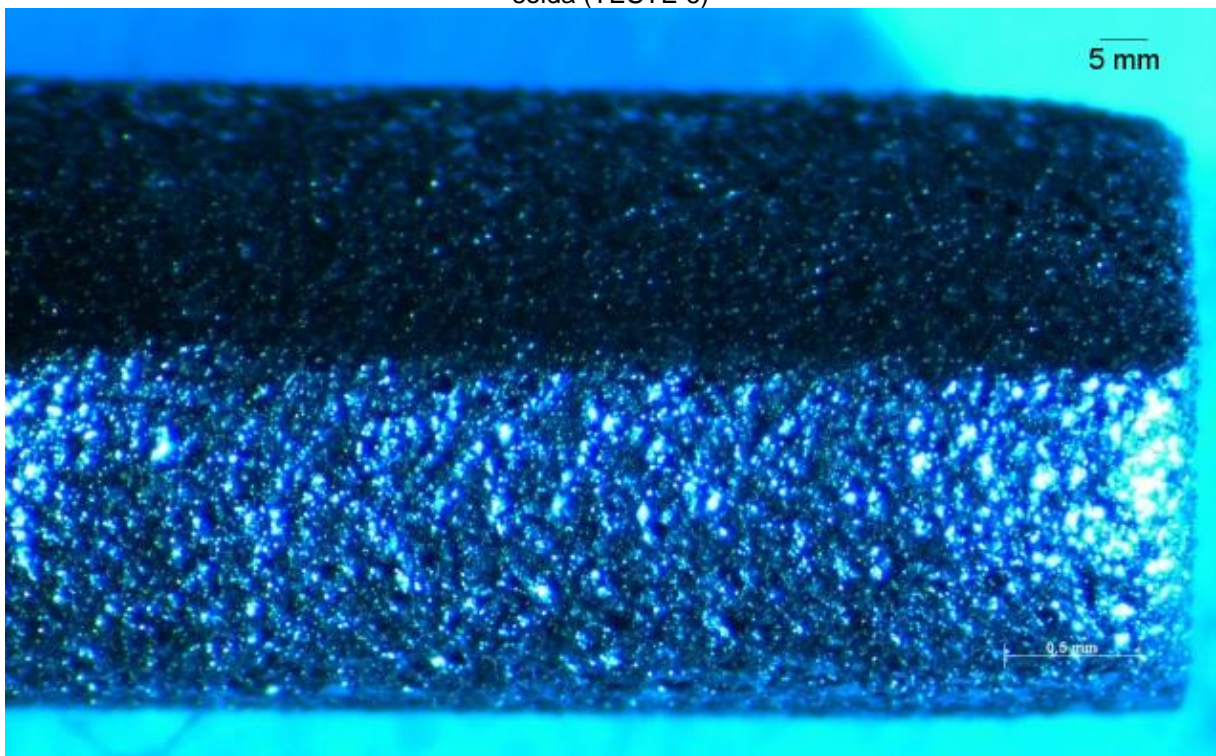
Nesta amostra houveram duas tentativas distintas, ambas sem sucesso.

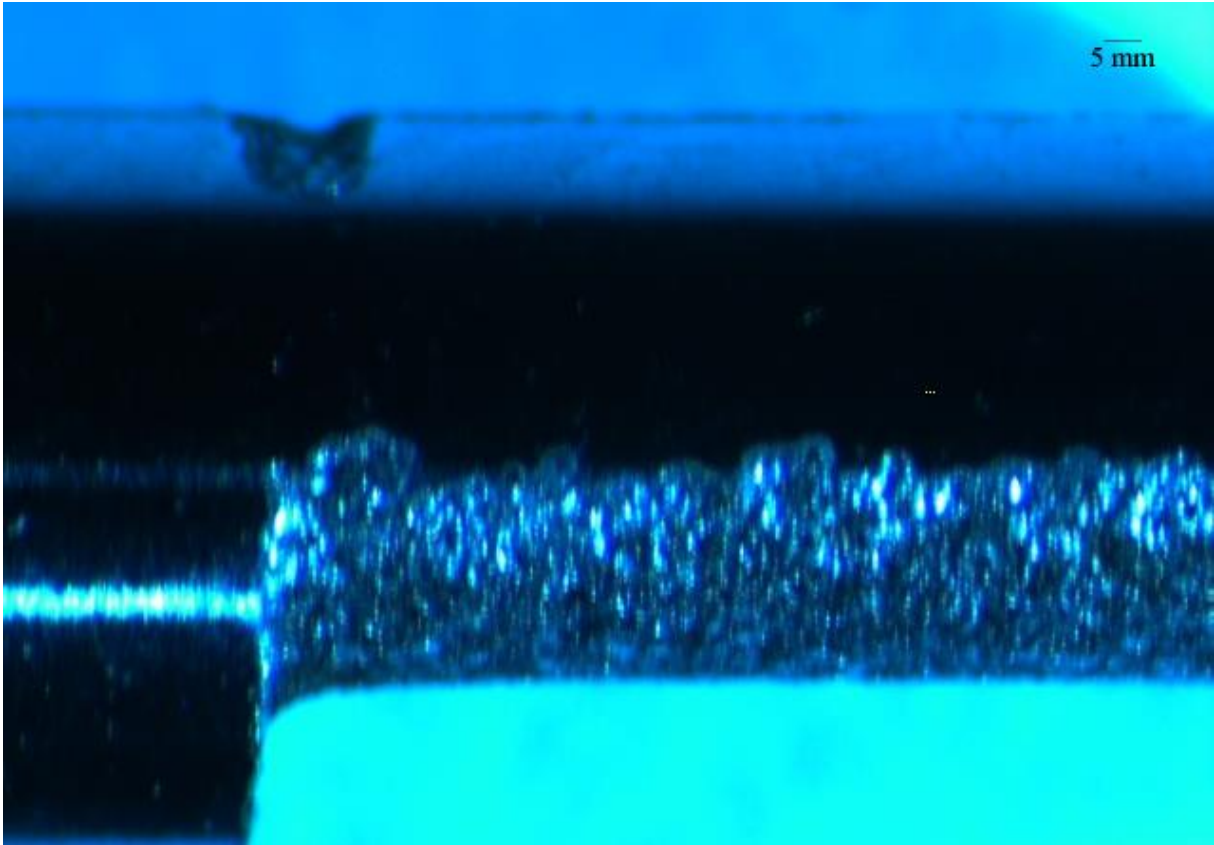
#### 4.5 Resultados: TESTE 6

Houve a troca dos testes em metal duro por testes em aço rápido. Assim, prosseguiu-se com a redução do diâmetro de amostras de aço rápido, por levar um tempo muito inferior ao do metal duro, além do desgaste do eletrodo ser muito menor.

A Figura 33 representa a análise microscópica do teste realizado.

Figura 33 – Análise microscópica da redução do diâmetro no aço rápido com eletrodo de bico de solda (TESTE 6)





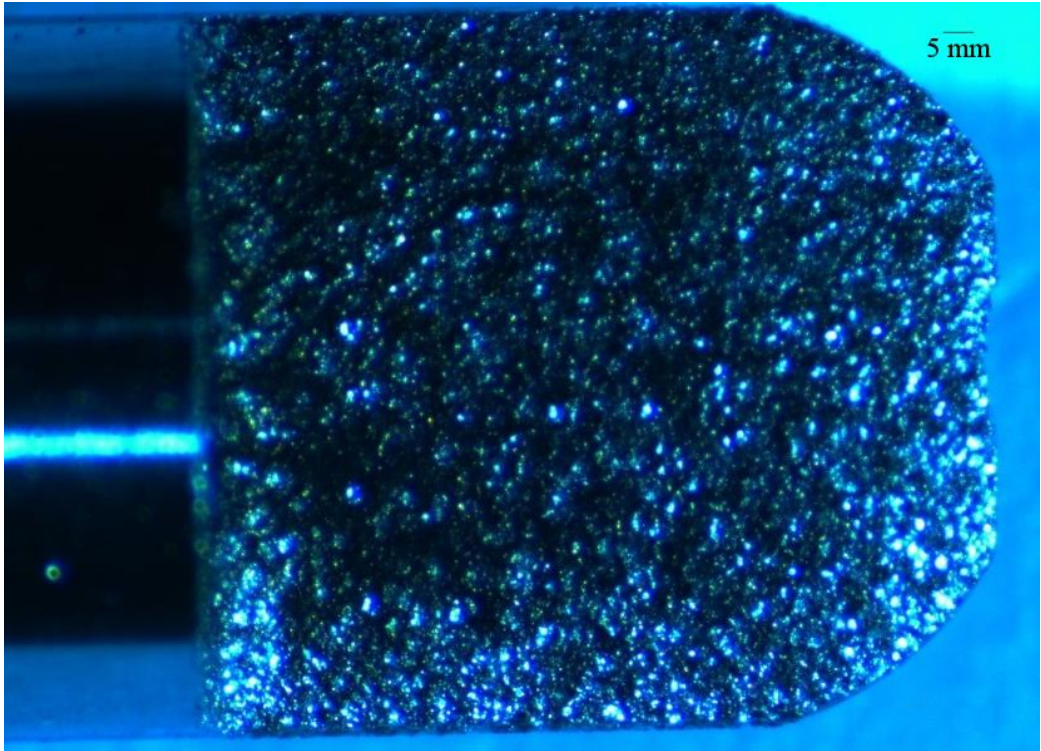
Fonte: TAVARES,2018

Como apresentado no tópico anterior, o bico de solda MIG que se estava sendo utilizado como eletrodo sofreu desgastes acentuados, quando comparados com os demais eletrodos utilizados anteriormente. Desta forma, ele não mantinha a cilindricidade necessária para desbaste de toda a circunferência do eletrodo. Em uma região ele estava mais desgastado que outra, e nessa região que havia este desgaste superior, não houve a usinagem pois não havia a proximidade necessária para que se abrisse o arco elétrico.

#### 4.6 Resultados: TESTES 7 e 8

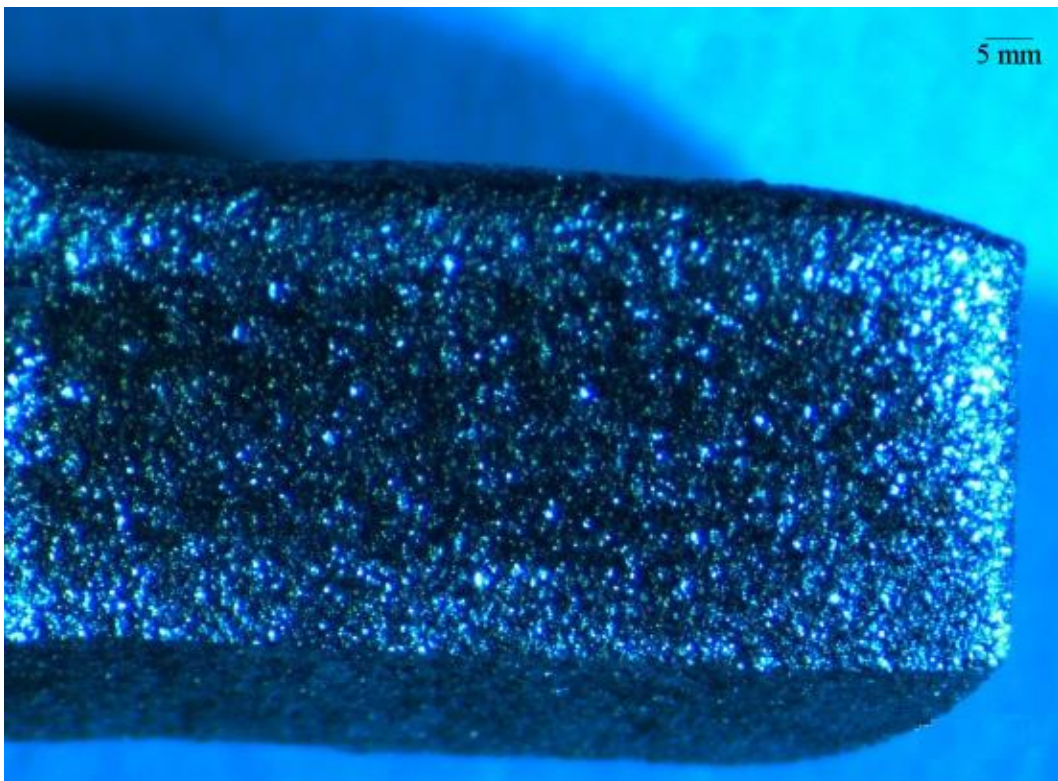
Teste comparativo entre o eletrodo de sucata encontrado no laboratório, e o eletrodo de cobre eletrolítico oferecido pelo fabricante da máquina. As Figuras 34 e 35 representam os resultados microscópicos obtidos com o uso do eletrodo de cobre eletrolítico e o eletrodo de sucata, respectivamente.

Figura 34 – Análise microscópica do Teste 7



Fonte: TAVARES,2018

Figura 35 – Análise microscópica do Teste 8



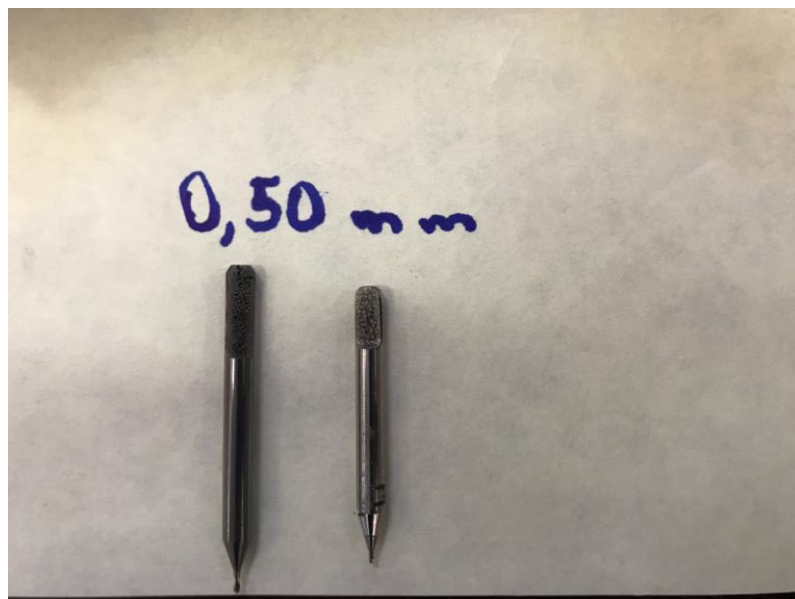
Fonte: TAVARES,2018

Ao comparar os dois resultados surge uma questão. Por que resultados tão distintos com granulometrias diferentes se os parâmetros usados nos processos são os mesmos e os materiais usinados são ambos aço rápido? A resposta destas perguntas vai além do escopo deste trabalho (e serão focos de trabalhos posteriores), que foca somente na fabricação da ferramenta e corte, mas com certeza a resposta vem através do tipo de eletrodo utilizado. E por incrível que pareça, o eletrodo de cobre eletrolítico que é o eletrodo que se deveria ter mais confiabilidade, está gerando o pior resultado.

#### 4.7 Resultados: TESTES 9

Teste realizado com um eletrodo de Liga de Cobre-Cobalto-Berílio, muito empregado na fabricação de barramentos de painéis elétricos para geradores de energia. As Figuras 36, 37 e 38 apresentam o estado final das amostras após o processo de usinagem.

Figura 36 – Amostras finalizadas de metal duro e aço rápido. Usinagem de 0,50 mm de cada lado



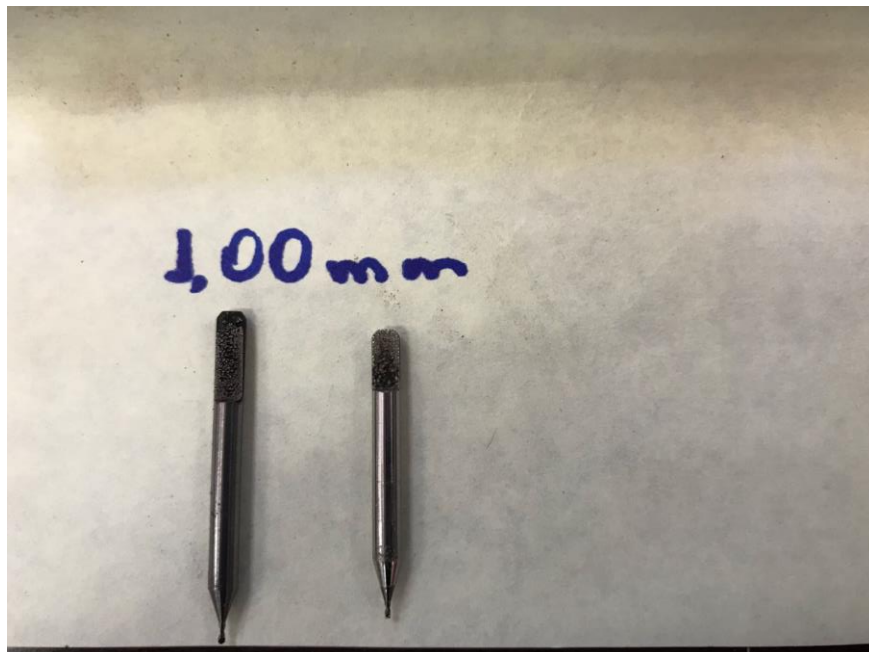
Fonte: TAVARES,2018

Figura 37 – Amostras finalizadas de metal duro e aço rápido. Usinagem de 0,75 mm de cada lado



Fonte: TAVARES,2018

Figura 38 – Amostras finalizadas de metal duro e aço rápido. Usinagem de 1,00 mm de cada lado



Fonte: TAVARES,2018

Após fabricadas pelo processo de eletroerosão no TESTE 9, as ferramentas foram posicionadas na máquina CNC do LAMAF – UFG. A máquina utilizada é do fabricante ROMI, modelo D 600, conforme mostra Figura 39.

Figura 39 – Fresadora CNC ROMI D600 utilizada nos testes das ferramentas



Fonte: TAVARES,2018

#### **4.8 Micro fresamento com amostra de Metal Duro usinada em 0,5mm**

O primeiro teste realizado foi com a amostra de Metal Duro usinada com um rebaixo de 0,5mm de cada lado. O material usinado era uma liga de Alumínio, porém não é conhecido a composição deste material. Foram realizados 4 testes com esta micro fresa.

No primeiro teste a profundidade de corte utilizada foi de 0,06mm. Um valor tão baixo se justifica pela alta pressão específica de corte inerentes aos processos de microusinagem. Não seria interessante a quebra da amostra já no primeiro teste. No entanto, para este caso não se obteve sucesso na usinagem. Na verdade, não houve nem mesmo o cisalhamento do material e remoção de cavaco. Duas hipóteses podem ser levantadas como possíveis motivos:

1. Não houve contato entre peça e material. Erro proveniente do processo de referenciamento devido às reduzidas dimensões envolvidas no processo de microusinagem;
2. Houve somente a deformação elástica do alumínio e sua posterior recuperação.

Na segunda oportunidade, a profundidade de corte foi ajustada em 0,1mm. Nesta ocasião já houve o corte e remoção de cavaco. A Figura 40 mostra o canal realizado durante o corte.

Figura 40 – Canal realizado pelo fresamento com a amostra de metal duro e profundidade de corte de 0,100 mm



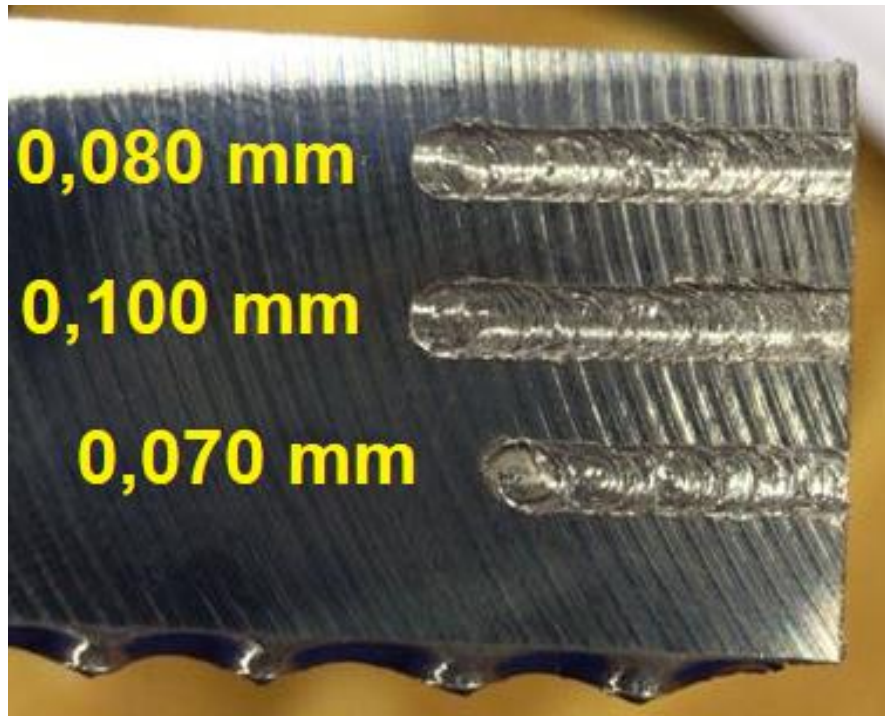
Fonte: TAVARES,2018

Desta forma, afim de descobrirmos o limite entre a deformação elástica (hipótese do primeiro teste) e o cisalhamento, foi realizado mais dois ajustes na profundidade de corte: um em 0,08mm e outro em 0,07mm.

Em ambos os casos os testes foram um sucesso, havendo o cisalhamento do alumínio e a remoção de cavaco. Entretanto, durante a usinagem da última tentativa (0,07mm de profundidade), a amostra de metal duro quebrou antes mesmo de finalizar o processo.

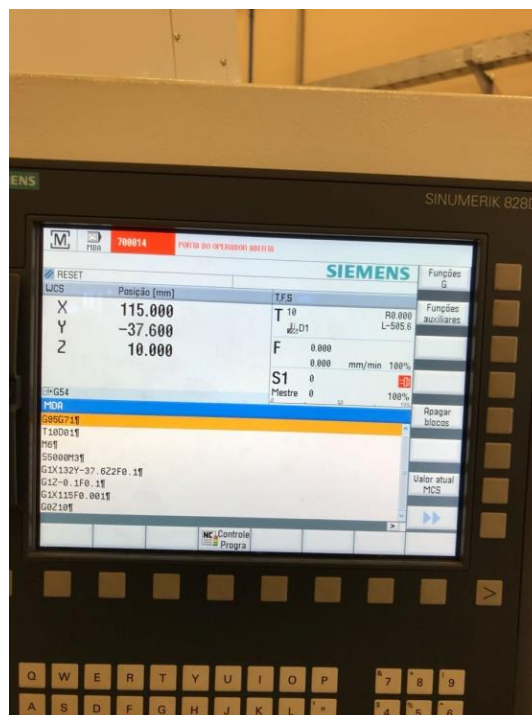
A Figura 41 apresenta os 3 canais feitos, para profundidades de corte de 0,100mm, 0,080mm e 0,070mm. Os três são muito semelhantes, visto que os parâmetros de corte utilizados são os mesmos (velocidade de corte, avanço, etc), diferenciando-se somente pela profundidade de corte, Figura 42.

Figura 41 – Canais usinados para as diferentes profundidades de corte: 0,100mm, 0,080mm e 0,070mm



Fonte: TAVARES,2018

Figura 42 – Programação realizada na máquina de fresamento CNC para a usinagem

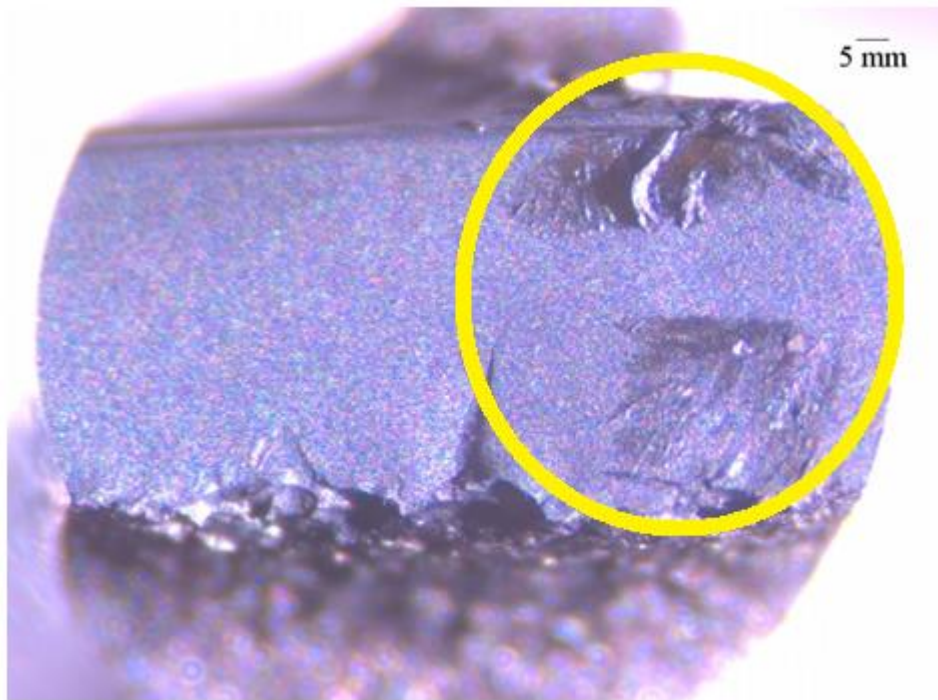


Fonte: TAVARES,2018

A fratura ocorreu exatamente em uma região concentradora de tensão que está no “pé” da ferramenta formado durante a usinagem por eletroerosão.

Ao levar a amostra ao microscópio para investigação do motivo da quebra, notou-se que a mesma possuía uma falha inerente ao processo de fabricação da mesma. Falha esta que provavelmente fragilizou a ferramenta que submetida aos esforços do corte gerou a fratura, conforme a Figura 43.

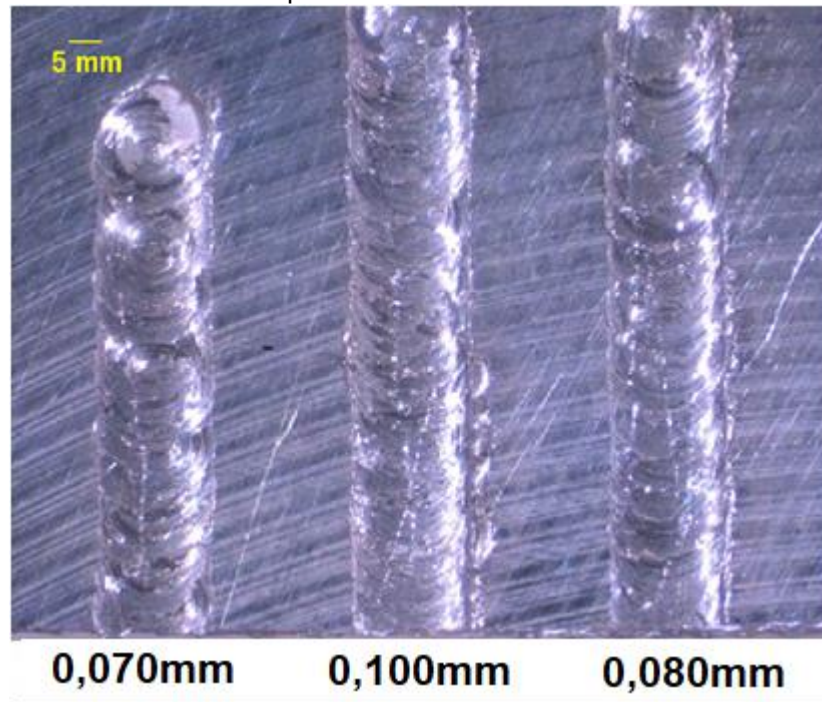
Figura 43 – Fratura da amostra de metal duro usinada em 0,5mm



Fonte: TAVARES,2018

A Figura 44 abaixo apresenta com detalhes cada um dos três canais usinados vistos pelo microscópio.

Figura 44 – Canais usinados vistos com mais detalhes pelo microscópio para as diferentes profundidades de corte



Fonte: TAVARES,2018

A ordem cronológica de usinagem foi em primeiro lugar a profundidade de 0,100mm, posteriormente, o canal de 0,080mm e finalizando no canal com 0,070mm. Observe que o primeiro canal gerou uma grande quantidade de rebarba no início do canal (entrada da ferramenta de corte na peça), fato que também pode ser notado no segundo canal e esta ausente no terceiro canal. Isto é um indício de que a ferramenta foi perdendo sua afiação ao longo dos testes e perdendo sua capacidade de corte.

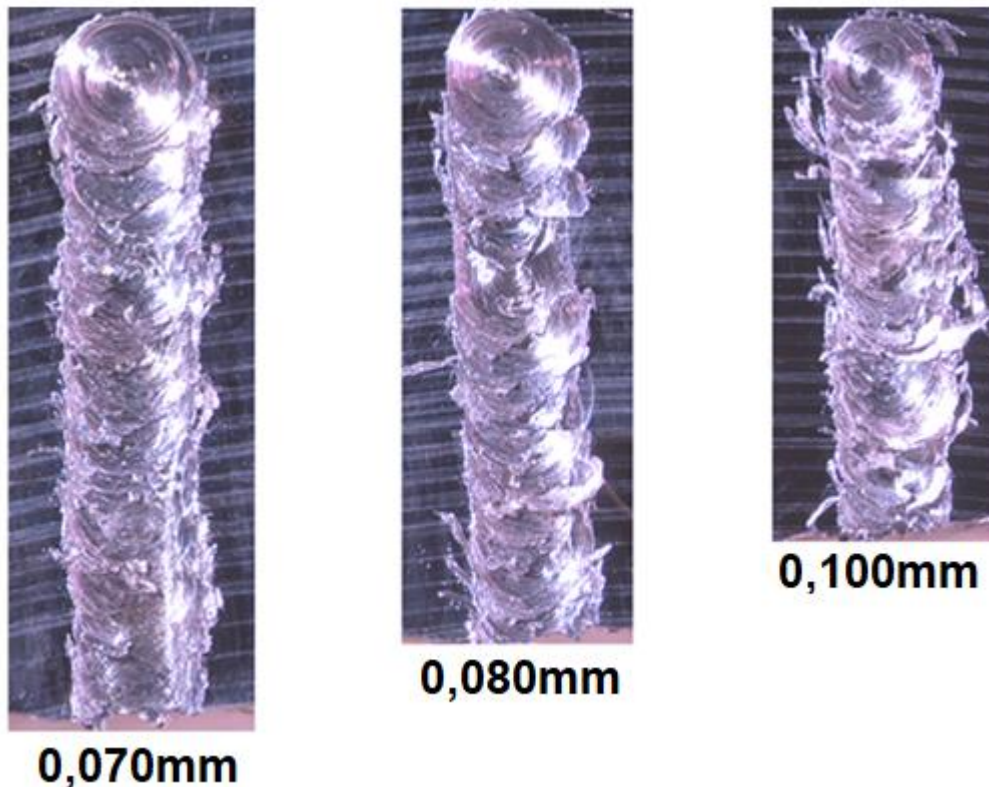
Outro fator que pode evidenciar isto é observando as marcas de avanço no leito do canal, que estão vivas e presentes nos canais um e dois, e que no terceiro canal já aparecem de forma mais disfarçada, parecendo que neste último houve mais um processo de conformação e empastamento do material do que remoção e corte.

#### 4.9 Micro fresamento com amostra de Aço rápido usinada em 0,5mm

Da mesma forma como realizado no processo anterior, e que será realizado nos testes seguintes, repete-se o mesmo procedimento para a amostra fabricada em aço rápido. Desta forma, mais três testes foram feitos, com profundidades de corte variando com 0,070mm, 0,080 e 0,100mm e mantendo-se os demais parâmetros constantes (velocidade de corte e avanço).

O procedimento realizado apresentou resultados positivos, uma vez que a amostra não quebrou e os canais foram fabricados. Entretanto, diferente do que ocorreu nos testes com metal duro, não se obteve grande êxito na qualidade do resultado final. A Figura 45 mostra os resultados obtidos.

Figura 45 – Canais usinados vistos com mais detalhes pelo microscópio para as diferentes profundidades de corte



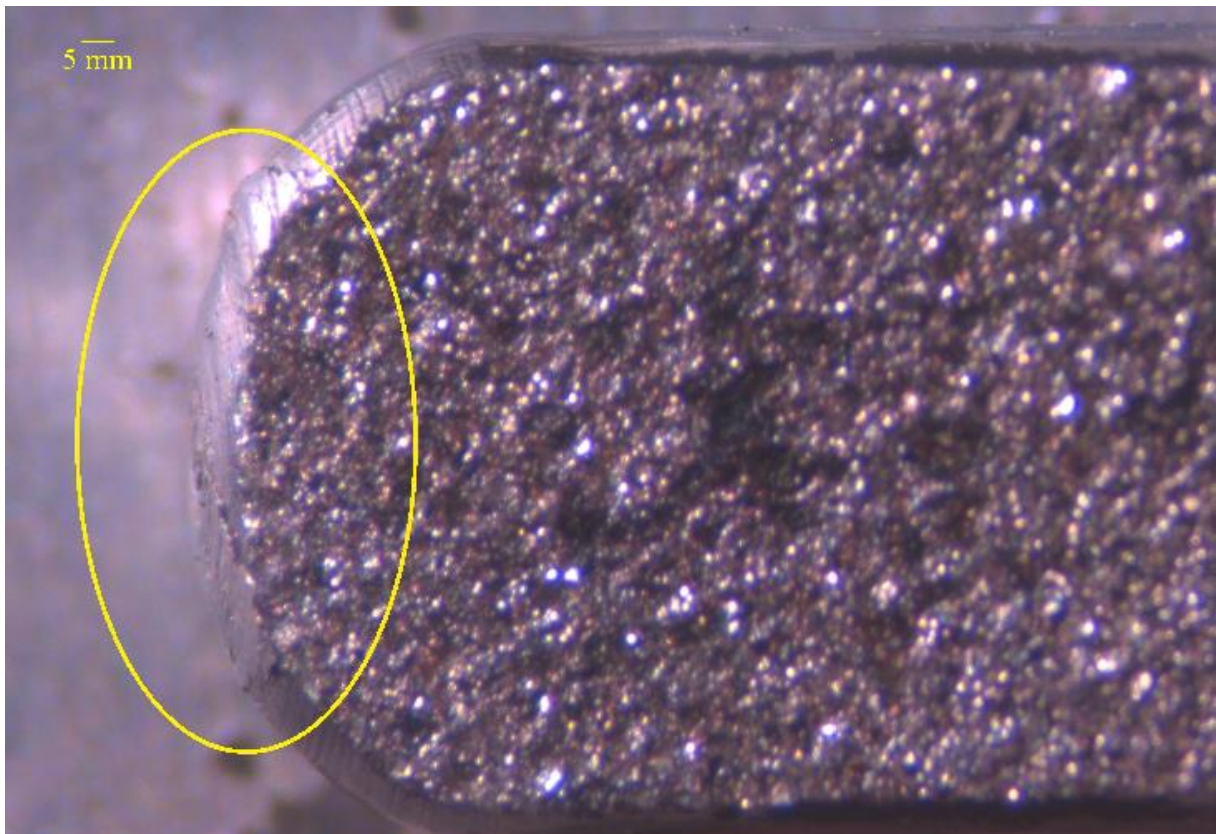
Fonte: TAVARES,2018

A análise da figura acima sugere um acabamento superficial de má qualidade após o final do processo de fresamento. Se uma base comparativa for realizada somente entre estes três casos, nota-se que o acabamento do canal com 0,070mm de profundidade, que foi o primeiro a ser realizado, é superior aos demais. No entanto, ainda deixa muito a desejar.

Outro fator observado é a análise visual da altura das rebarbas geradas nestes testes. Pelos ensaios observados, sugere-se que a amostra de aço rápido apresentou maior deformação plástica da peça a ser usinada e “arrastamento” de material, do que cisalhamento e o corte em si. A quantidade de material empastado e depositado nas laterais do canal são mais presentes à medida que a profundidade de corte aumenta.

Para tentar entender o por que disto, a ferramenta de corte foi levada ao microscópio para análise visual da aresta de corte, Figura 46.

Figura 46 – Análise da ferramenta de corte de aço rápido usinada em 0,5mm



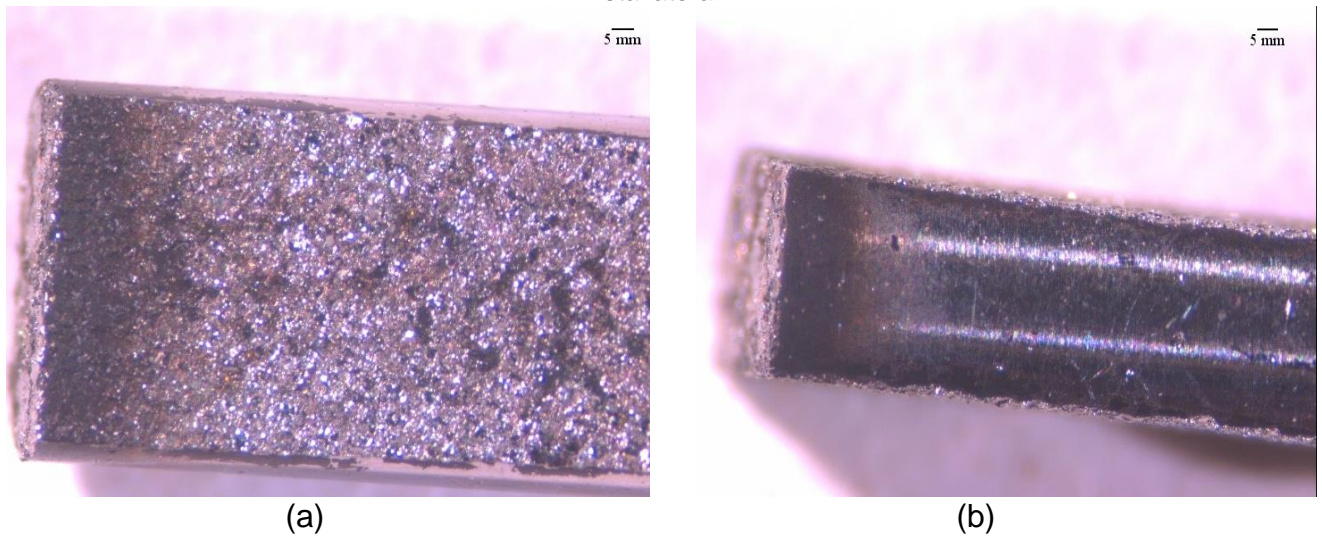
Fonte: TAVARES,2018

Através da Figura 46, uma possível justificativa para os resultados obtidos é que devido aos filetes laterais na ponta da ferramenta de corte, a aresta de corte que realmente mantém o contato com a peça durante a usinagem é a circundada de amarelo. É visível que houve um empastamento e deposição de material da peça na aresta de corte da ferramenta, o que reforça a afirmação anterior que houve em grande parte do processo de usinagem, uma deformação plástica e arrastamento de material mais frequente do que o cisalhamento do material.

Para corrigir esse erro e realizar novas tentativas, todas as amostras subsequentes, bem como esta própria amostra, foram desbastadas nesta porção superior através da eletroerosão, formando quinas vivas e aumentando a porção da aresta de corte que entrará em contato com a peça a ser usinada. Um desbaste na máquina de eletroerosão na medida de 0,60mm já foi o suficiente para atingir tal objetivo.

A Figura 47 apresenta o novo formato para a ferramenta de Aço Rápido com rebaixo de 0,50mm de cada lado.

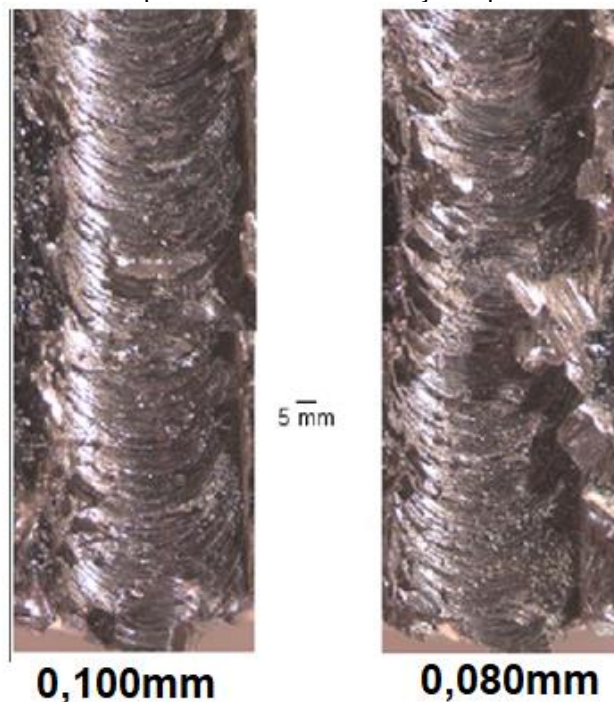
Figura 47 – Novo formato da ferramenta de Aço Rápido usinado em 0,50mm: (a) Vista superior; (b) Vista lateral



Fonte: TAVARES,2018

Feito isso realizou-se novos canais com as mesmas condições dos anteriores, para uma base comparativa se houve ou não melhoria no acabamento dos mesmos. Entretanto, agora realizou-se cortes com profundidades apenas de 0,080mm e 0,100mm. A Figura 48 apresenta o aspecto obtido com os novos canais fabricados.

Figura 48 – Novas tentativas para a ferramenta de Aço Rápido com rebaixo de 0,50mm

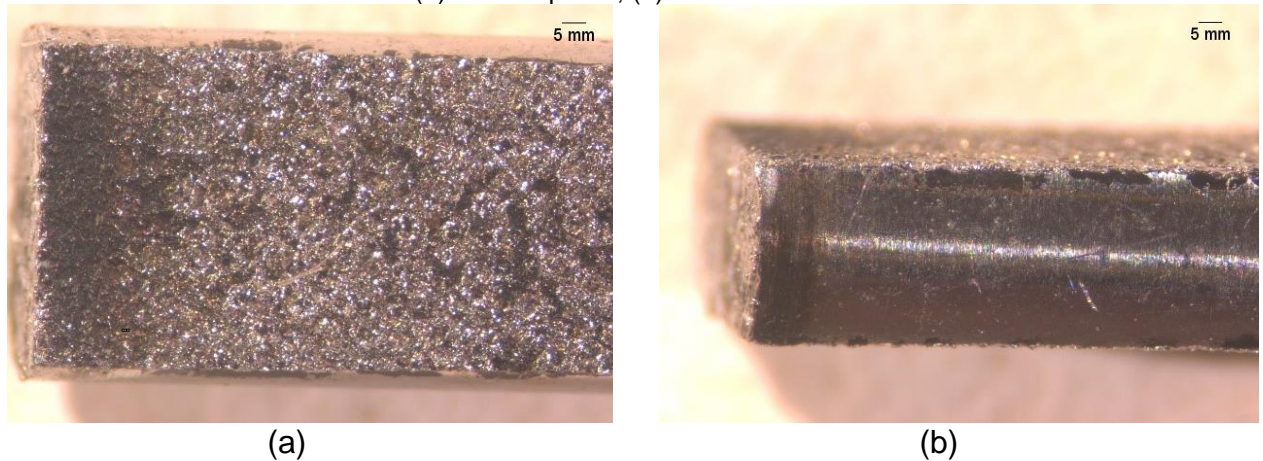


Fonte: TAVARES,2018

É notório e gritante a diferença entre a qualidade obtida no primeiro caso, Figura 45, e no segundo caso, Figura 48. Neste último houve o fresamento de forma correta, com o corte do material a ser removido. A formação de rebarba também foi muito

inferior ao primeiro caso. A Figura 49 mostra as condições da ferramenta de corte após a usinagem.

Figura 49 – Microfresa de 0,50mm após a segunda etapa de testes:  
(a) Vista superior; (b) Vista lateral



Fonte: TAVARES,2018

Ao comparar a Figura 47 que apresenta a ferramenta antes do corte e a Figura 49 que apresenta a ferramenta depois do corte, nota-se que não houve tanta discrepância assim entre as duas imagens, o que indica que na realização destes dois canais não houve tanta perda na afiação da microfresa. Isto é um resultado positivo pois indica que novos fresamentos poderiam ser realizados com a mesma ferramenta alavancando assim a produtividade e reduzindo-se os custos de produção.

Outra comparação interessante é entre a Figura 45 e a Figura 48. No segundo caso não houve o empastamento de material na aresta de corte como no primeiro, fator este, responsável pela melhoria observada com relação ao processo de fresamento.

#### 4.10 Microfresamento com amostra de Metal Duro usinada em 0,75mm

O processo de fresamento com a amostra usinada em 0,75mm no Metal Duro não houve êxito como nos realizados anteriormente. Próximo à metade do percurso total a ser usinado para a profundidade de corte de 0,080mm, a amostra sofreu fratura e o processo foi interrompido. A Figura 50 mostra o resultado do canal obtido até o ponto de fratura da microfresa.

Figura 50 – Canal usinado com a amostra de Metal Duro com rebaixo de 0,75mm

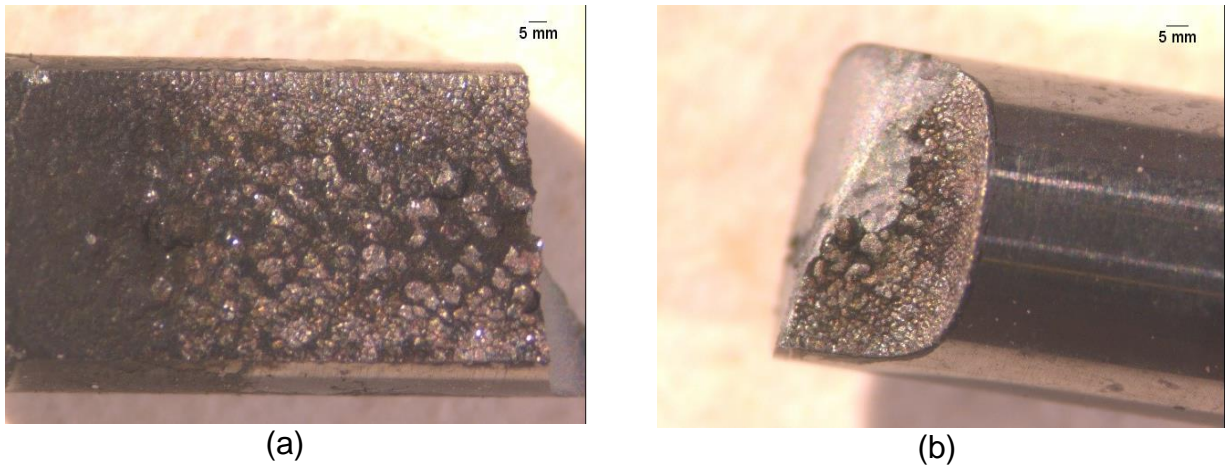


Fonte: TAVARES,2018

Comparando com os resultados anteriores, principalmente com os obtidos com a amostra de Metal duro usinada em 0,50mm (TESTE 1), Figura 44, observa-se por uma análise visual que neste caso a geração de rebarbas foi maior, bem como houve um arrastamento e deposição de material para o leito do canal formado, não gerando assim tamanha qualidade quando comparado com o primeiro caso obtido no TESTE 1.

A Figura 51 mostra as condições da ferramenta de corte após a usinagem.

Figura 51 – Micro fresa com rebaixo de 0,75mm após o teste onde ocorreu a quebra da ferramenta:  
(a) Peça quebrado; (b) Região de quebra na amostra

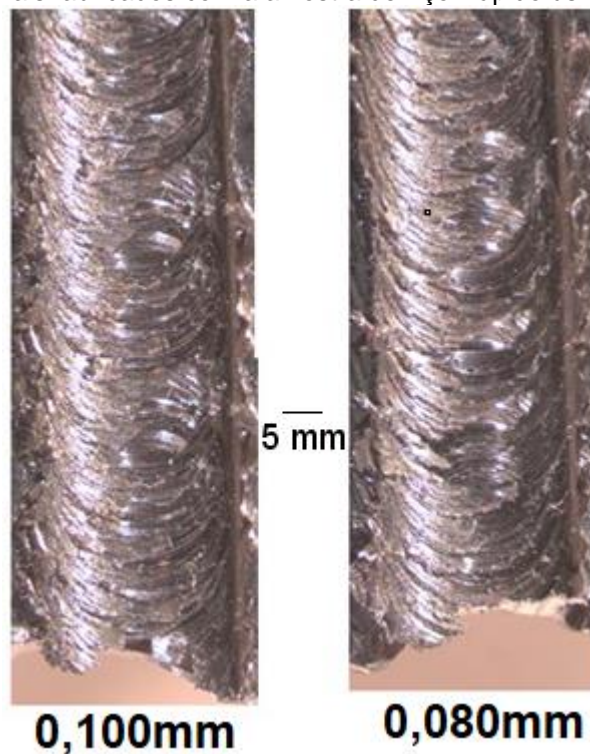


Fonte: TAVARES,2018

#### 4.11 Microfresamento com amostra de Aço Rápido usinada em 0,75mm

Para este caso, houve êxito para as duas profundidades de corte realizadas, 0,080mm e 0,100mm. A Figura 52 mostra os resultados obtidos para ambos os casos.

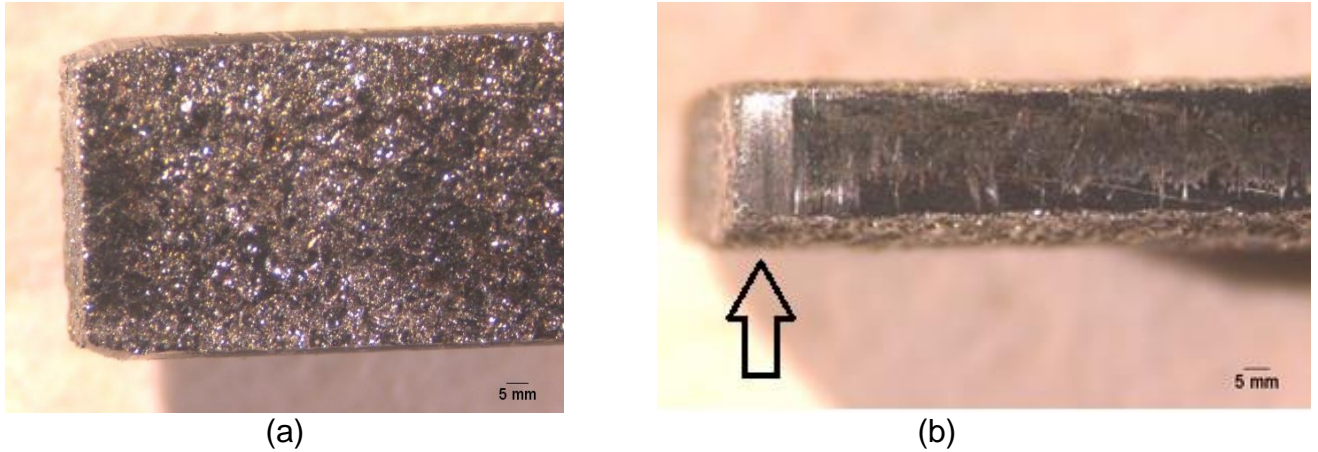
Figura 52 – Canais fabricados com a amostra de Aço Rápido usinada em 0,75mm



Fonte: TAVARES,2018

A Figura 53 mostra as condições da ferramenta de corte após a usinagem.

Figura 53 – Micro fresa de 0,75mm em Aço rápido após os testes:  
(a) Vista superior; (b) Vista lateral



Fonte: TAVARES,2018

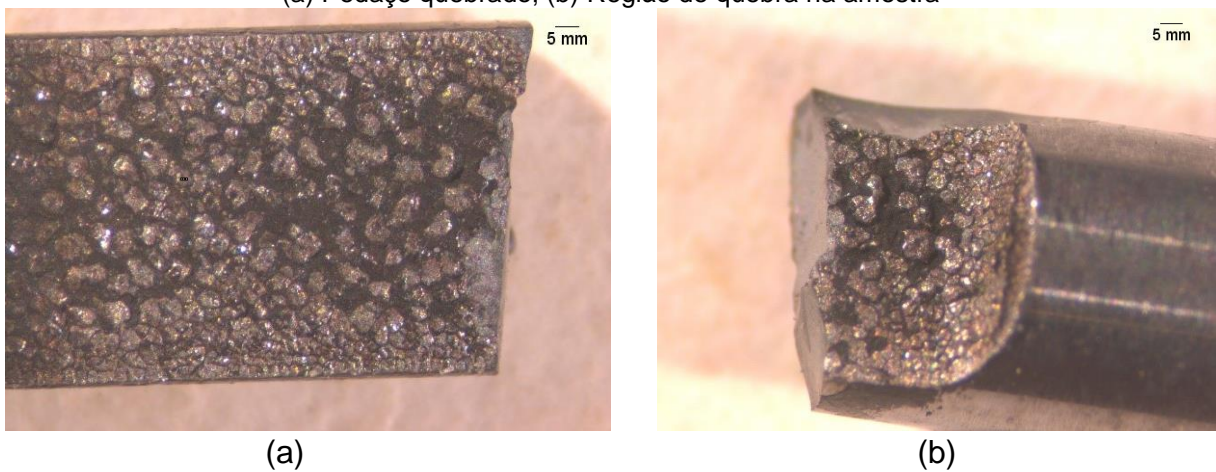
É notório e visível o desgaste sofrido pela ferramenta de corte após a usinagem dos dois canais, basta observar as quinas da microfresa que apresentam um chanfro formado pelo desgaste, bem como marcas de riscos na vista lateral, produzidas pelo atrito entre ferramenta e peça.

#### 4.12 Microfresamento com amostra de Metal Duro com rebaixo de 1,00mm

Para a microfresa fabricada com o desbaste de 1,00mm em cada lateral não se obteve sucesso nos testes. Ao ajustar a máquina para o fresamento com profundidade de corte de 0,080mm a amostra quebrou no instante de entrada na peça, não resultando assim em nenhum canal desbastado.

A Figura 54 mostra as condições da ferramenta após a tentativa de corte

Figura 54 – Micro fresa de 1,00mm após a tentativa de teste e quebra:  
(a) Peça quebrada; (b) Região de quebra na amostra

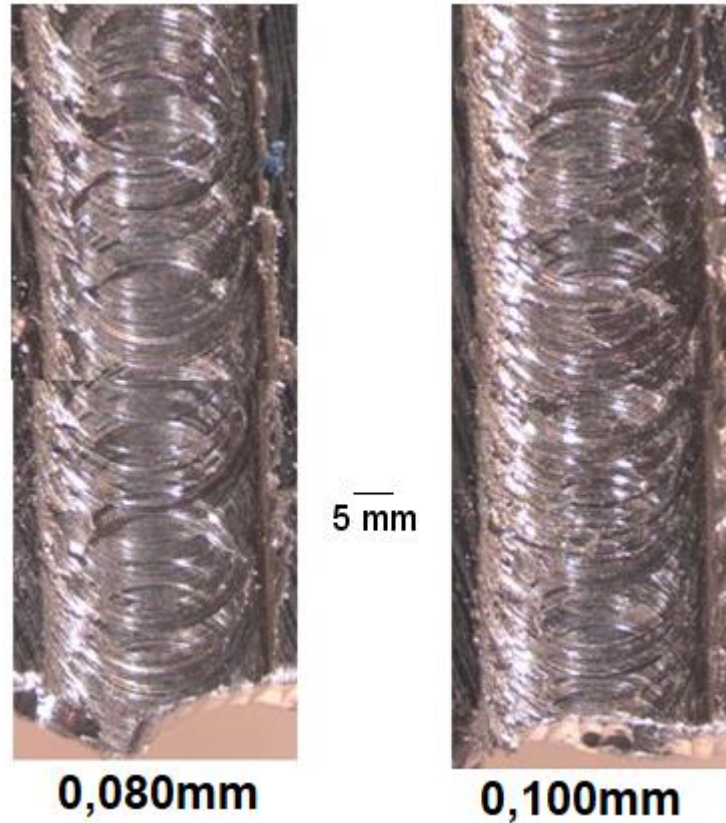


Fonte: TAVARES,2018

#### 4.13 Micro fresamento com amostra de Aço Rápido usinada em 1,00mm

Mais uma vez obteve-se sucesso na usinagem para as duas profundidades de corte realizadas, 0,080mm e 0,100mm utilizando mais uma ferramenta de Aço rápido. A Figura 55 apresenta os resultados obtidos para ambos os casos.

Figura 55 – Canais usinados com a amostra de Aço Rápido usinada em 1,00mm

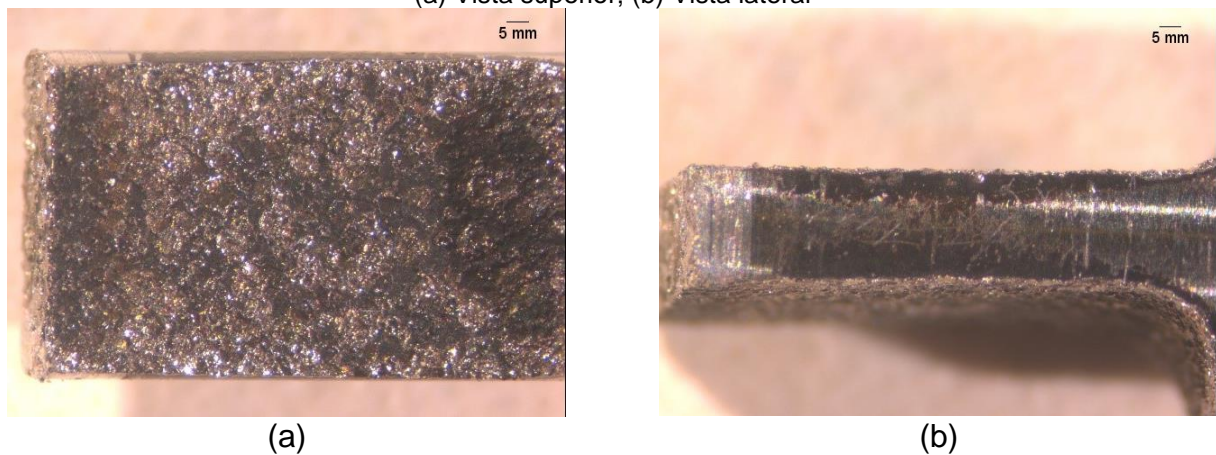


Fonte: TAVARES,2018

A Figura 56 mostra as condições da ferramenta de corte após a usinagem.

Figura 56 – Micro fresa de 1,00mm em Aço rápido após os testes:

(a) Vista superior; (b) Vista lateral



Fonte: TAVARES,2018

Para este caso houve um leve desgaste lateral na ferramenta de corte, entretanto, muito inferior ao da amostra em aço rápido usinada em 0,75mm.

## 5 Conclusão

A partir do que foi exposto durante todas as etapas realizadas para fabricação da ferramenta de corte, bem como os resultados obtidos com os testes realizados acima descritos, é possível ver que as principais metas propostas no início deste trabalho foram atingidas, uma vez que os resultados encontrados foram positivos. As microfresas fabricada em laboratório a partir de descartes já utilizados e rejeitados pelo método da usinagem não convencional de Eletroerosão apresentou um bom comportamento inicial.

A seguir, são apresentadas algumas conclusões sobre o trabalho em questão:

### **5.1 Melhor parâmetro de fabricação da ferramenta:**

- Os melhores parâmetros dentre todos os realizados foram os do TESTE 9, Tabela 7. Apesar destes apontarem um desgaste nulo do eletrodo, no teste em questão houve um desgaste em nível intermediário, nada muito absurdo igual vinha ocorrendo com o eletrodo de cobre eletrolítico quando usinando metal duro. Entretanto, vale ressaltar que estes parâmetros, dados pelo fabricante, são para o eletrodo de cobre eletrolítico, e o eletrodo que foi utilizado é o de cobre-cobalto-berílio.

### **5.2 Acabamento**

- No quesito acabamento as amostras fabricadas não apresentaram um resultado tão satisfatório. A princípio muitos testes foram realizados em busca de uma granulometria menor, o que poderia implicar em maior resistência da ferramenta de corte, como mostra o TESTE 2 na Figura 29. Entretanto nos resultados finais esse objetivo não foi atingido, mas mesmo assim as ferramentas apresentaram bom nível de resistência, uma vez que atingiram sua missão final, usinar uma liga de alumínio.

### **5.3 Desempenho durante a usinagem**

- Com os resultados apresentados, a microfresa que mostrou o melhor desempenho dentre todas fabricadas e testadas foram as microfresas fabricadas em Aço Rápido;
- A microfresa de Aço Rápido com rebaiços de 0,75mm foi a que apresentou os melhores resultados dos testes realizados, seguidos pela microfresa de Aço Rápido com rebaiços de 0,50mm;
- Todas de metal duro fraturaram em algum momento durante o início ou meio do processo de teste.

#### **5.4 Canais fabricados**

- Os melhores canais fabricados foram os usinados com a ferramenta de Aço rápido com rebaiços de 0,75 mm, Figura 52;
- Todos os canais apresentaram marcas bastante evidentes de avanço da ferramenta de corte, o que pioram o acabamento dos mesmos. Reduzir o avanço da ferramenta pode melhorar o acabamento neste quesito;
- Os resultados apresentados são válidos, pois os canais fabricados apresentaram o mesmo fenômeno de formação de rebarbas descritos por Piquard et al. (2014) e mostrados na Figura 12, basta comparar as rebarbas presentes nas fotos dos canais com as rebarbas presentes na Figura 12.

Esta pesquisa ainda não termina aqui. As etapas neste trabalho elencadas são somente o início do processo de estudo da microusinagem, e da forma de fabricação pelo método da Eletroerosão.

Todos os demais resultados obtidos foram considerados satisfatórios, mesmo nos casos que não houve a usinagem dos microcanais. Como dito, a pesquisa é pioneira na UFG e com certeza está servindo como motivação para novos estudos na área da usinagem não convencional, bem como da microusinagem, contribuindo assim para a evolução científica e fomentando novos estudos e pesquisas no ramo tanto na UFG quanto no Brasil.

#### **6 Trabalhos futuros:**

Como sugestão para trabalhos futuros encontram-se os temas que seguem:

- Otimização do processo de fabricação das microferramentas pelo processo de eletroerosão;
- Levantamento de parâmetros de usinagem por eletroerosão para reduzir o desgaste do eletrodo;
- Estudo da formação de rebarbas no processo de micro fresamento;
- Avaliação da rugosidade superficial no processo de micro fresamento;
- Estudo de desgaste nas ferramentas de microusinagem;
- Estudo dos esforços que ocasionam a quebra das ferramentas na entrada da peça;

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P.T. **Size Effect and Tool Geometry in Micromilling of Tool Steel**. Precision Engineering, Philadelphia, v. 4, p. 402-407, 2009.

BAZAR GERAL e-COMMERCE BRASIL. Disponível em < <https://www.bazargeral.com/> > Acesso em: 11 de Agosto de 2018.

BENEDICT, Gary F. **Nontraditional Manufacturing Processes**. Nova York: Marcel Dekker, 1897.

BISSACO G.; HANSES, H.N.; CHIFRE, L.D.; **Micromilling of hardened tool steel for mould making applications**. Journal of Materials Processing Technology, p. 201–207, 2005.

CARDOSO, P.; DAVIM, P. A. **Brief Review on Micromachining of Materials**, Rev.Adv. Mater. Sci. 30 (2012) 98-102.

CÂMARA, M.A.; RUBIO, J. C. C.; ABRÃO, A.M.; DAVIM, J.P. **State of the Art on Micromilling of Materials, A Review**. Journal of Materials Science & Technology, v. 28, n. 8, p. 673 – 685, 2012.

CHAE, J.; PARK, S.; FREIHET, T. **Investigation of micro-cutting operations**. Nova York: International Journal of Machine Tools & Manufacturing. 2006.

CUNHA, D. F. **Influência da utilização de fluido de corte com adição de grafeno na temperatura de usinagem e formação de rebarba no processo de micro fresamento**. 2016.

ELETRO MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS PARA ELETROEROSÃO. **Manual de Instalação, Manutenção e Operação ONC 400**. 2015

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 1977.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing engineering and technology**. 3. ed. Nova York: Addison-Wesley Publishing Co., 1995.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MCGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**. London: Chapman and Hall Ltd, 1988.

PIQUARD, R. et al. **Micro-end milling of niti biomedical alloys, burr formation and phase transformation**. Precision Engineering, p. 356–364, 2014.

PORTAL METALICA, CONSTRUÇÃO CIVIL. **Usinagem como Referencial Pré-Histórico**. Disponível em <<http://wwwo.metallica.com.br/usinagem-como-referencial-pre-historico>> Acesso em: 09 de Setembro de 2018.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. Londres: Oxford University Press, 1984.

TASK. **O que é Metal Duro?** Disponível em <<http://portalmetalduro.com.br/noticias/mas-afinal-o-que-e-metal-duro/>> Acesso em: 08 de Julho de 2018.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 2. Ed. Londres: Butterworths & Co., 1985.