

**Desenvolvimento de equipamento para ECM e sua
aplicação na maquinagem de AISI 304**

João Miguel Vieira de Sousa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Dr. Gabriel Rosa Ribeiro

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Vogais: Eng. Alcino Pereira dos Reis

Eng. António Maria Brito Pina

Junho 2019

Agradecimentos

No desenvolvimento deste tipo de investigação, conta-se, inevitavelmente, com o apoio de inúmeras pessoas e entidades. Nesse sentido, gostaria de expressar os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a sua realização.

Gostaria de começar com um especial agradecimento ao meu Pai, que se encontra diariamente longe da família e de todos os que ama a lutar para que de alguma forma me possa oferecer uma oportunidade de estudar diariamente e lutar por aquilo que sempre sonhei.

Ao meu orientador, Professor Pedro Rosa, detentor de uma motivação e de uma determinação raras, pela extraordinária capacidade de estar sempre disponível e, sobretudo, por me ter estendido a oportunidade de trabalhar no Laboratório de Micro Fabrico e também no Núcleo de Oficinas, onde vi crescer o meu gosto pela engenharia.

Ao meu coorientador, Doutor Gabriel Ribeiro, pela boa disposição com que me auxiliou na descoberta do quadrado e pela genuína curiosidade demonstrada ao longo de toda a investigação.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Micro Fabrico, que acompanharam de perto o meu trabalho e com quem tive o prazer de partilhar um espaço onde reinou sempre o espírito de entreatajuda, nomeadamente, ao Pedro Santos, Duarte Andrade, Luís Almeida, Daniel Ferreira, Paulo Farinha e Flávio Duarte.

Aos elementos do Núcleo de Oficinas, Eng. Afonso Gregório, Eng. Alcino Reis, Diogo Pereira, João Raposo, Flávio Mocho, André Santos, Sr. José e Sr. Fernando, com os quais não me canso, diariamente, de aprender, por todo o apoio e conhecimentos transmitidos durante o desenvolvimento da componente experimental da presente investigação.

Aos meus amigos e colegas de curso que me deram motivação e contribuíram para que ultrapassasse as constantes dificuldades, em especial ao João Frazão, Pedro Roleira e Pedro Pereira.

À minha namorada, Inês Sousa, pelo apoio, amor, amizade e confiança depositada ao longo de todo o curso e, principalmente, no desenvolvimento da dissertação de mestrado.

Finalmente, para além do especial agradecimento ao meu pai, gostaria de agradecer à minha mãe, irmãos e a toda a minha família, por estarem sempre disponíveis para dar tudo para que eu pudesse concretizar os meus sonhos.

A todos os referidos anteriormente e todos os demais que apoiaram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste projeto, um muito obrigado!

(Página intencionalmente deixada em branco)

Resumo

A maquinagem eletroquímica é uma tecnologia não convencional que permite processar materiais condutores independentemente da sua dureza com elevada precisão geométrica e integridade superficial sem desgaste do eletrodo-ferramenta. Apesar das suas vantagens, esta é ainda uma tecnologia pouco explorada do ponto de vista do campo de aplicação e da definição das condições operativas. Para o presente estudo foi desenvolvido um equipamento para maquinagem eletroquímica (ECM) que permitisse controlar os principais parâmetros operativos do processo de fabrico. Numa segunda fase, o equipamento foi utilizado para desenvolver uma avaliação da influência dos principais parâmetros operativos. Para a investigação foram utilizados provetes em AISI 304 e eletrodos com 20 μm de diâmetro. Os resultados demonstram que a tecnologia pode ser utilizada com sucesso na maquinagem de rasgos e contornos.

Palavras-Chave: maquinagem, micro maquinagem eletroquímica, dissolução anódica, tolerância geométrica, acabamento superficial.

(Página intencionalmente deixada em branco)

Abstract

Electrochemical machining (ECM) is a contactless non-conventional technology with the ability to process without tool wear any conductive material, regardless of its physical properties with an excellent commitment between dimensional accuracy and surface finish. Despite its advantages, it still urges for research of its field of application and operational conditions. In this research, an ECM machine was developed that allowed the control of the manufacturing process operational parameters and subsequently the study of main operational parameters influence. For the investigation, electrodes with 20 μm of diameter were used to machine AISI 304 specimens and the results demonstrate that the technology can be successfully used in machining slots and contours.

Key Words: machining, electrochemical micro machining, anodic dissolution, geometric tolerance, surface finishing.

(Página intencionalmente deixada em branco)

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	ix
Lista de Acrónimos	x
Lista de Símbolos	xi
1. Introdução	1
2. Maquinagem Eletroquímica	3
2.1. Mecanismo de remoção de material	3
2.2. Micro Maquinagem Eletroquímica	4
2.3. Solução eletrolítica	6
2.4. Eléctrodo-ferramenta.....	6
2.5. Fonte de potência pulsada	8
2.6. Material do eléctrodo-peça.....	9
2.7. Folga entre eléctrodos.....	9
3. Desenvolvimento Experimental	10
3.1. Fabrico e montagem da máquina de ensaios	10
3.1.1. Estrutura da máquina de ensaios.....	10
3.1.2. Circuito de recirculação do eletrólito	11
3.1.3. Servomecanismos de movimento do carro móvel	12
3.1.4. Circuito gerador de potência	13
3.1.5. Interface de controlo	16
3.2. Aparato experimental	16
3.3. Instrumentação e ferramentas	17
3.4. Plano de ensaios	18
4. Resultados e Discussão	20
4.1. Análise exploratória dos parâmetros operativos	20
4.1.1. Rugosidade superficial da ferramenta.....	21

4.1.2.	Ação de lavagem por recirculação do eletrólito	22
4.1.3.	Ação de lavagem por imersão ultrassónica.....	23
4.1.4.	Concentração molar do eletrólito.....	24
4.1.5.	Temperatura do eletrólito.....	25
4.2.	Aplicação na maquinagem por fio do aço AISI 304	25
4.2.1.	Evolução do perfil dos rasgos com a frequência.....	27
4.2.2.	Evolução da folga lateral e frontal com a frequência	28
4.2.3.	Evolução da qualidade superficial com a concentração	30
5.	Conclusão e perspetivas de trabalhos futuros	32
6.	Bibliografia	34
7.	Anexos	1
	Anexo I – Leis de Faraday.....	1
	Anexo II – Carro móvel 8MT167-25L	2
	Anexo III - Optoacoplador SFH617A	3
	Anexo IV – MOSFET IRF730	4
	Anexo V – Procedimento de utilização da máquina	5
	Anexo VI – Desenhos 2D	6

Lista de Figuras

Figura 1: Célula Eletroquímica.	3
Figura 2: Esquema do processo de ECM.	5
Figura 3: Representação da cavidade a) sem revestimento e b) com revestimento.	7
Figura 4: Elementos de um gerador de potência com corrente pulsada.	8
Figura 5: Geometrias obtidas por μ ECM em: a) aço inoxidável; b) ligas de níquel.	9
Figura 6: Máquina de ensaios: a) ligações elétricas; b) componentes da estrutura: 1 - Cabeçote fixo; 2 - Cabeçote móvel; 3 - Pinça; 4 - Estrutura de suporte; 5 - Recirculação de solução; 6 - Relógio comparador; c) adaptabilidade da estrutura de suporte ao tanque de eletrólito.	11
Figura 7: Ilustração do circuito de recirculação de eletrólito.	12
Figura 8: Carro móvel 8MT167-25LS.	12
Figura 9: Esquema eletrônico do circuito desenvolvido.	13
Figura 10: a) Gerador de funções TTI TG550 e b) tipo de pulso utilizado.	13
Figura 11: Esquema do funcionamento de um optoacoplador.	14
Figura 12: MOSFET Vishay IRF730.	14
Figura 13: Representação esquemática do sinal elétrico típico: a) pretendido; b) com potencial elétrico ativo; c) com inversão de sinal.	15
Figura 14: Desenvolvimento do circuito elétrico: a) Simulação do circuito numa breadboard; b) Placa com o circuito funcional.	15
Figura 15: Interface de controlo a) de parâmetros eletrônicos; b) dos motores.	16
Figura 16: Aparato experimental completo.	17
Figura 17: Instrumentação: a) Fonte de tensão TTI QL355T; b) Leitor de corrente para altas frequências Bergoz CT-C0.5; c) Sonda de osciloscópio PicoTech TA042; d) Osciloscópio TENMA™ 72-8725.	17
Figura 18: Pinça de fixação do respetivo elétrodo.	18
Figura 19: Cavidade obtida na análise exploratória da frequência: (a) 50 kHz; (b) 100 kHz; (c) 150 kHz (M=0.15 mol de H ₂ SO ₄ /L; V=6V; A=0.6A; d=50%; T=18.5°C; a=10 μ m/min; circulação on).	21
Figura 20: Topo da ferramenta como fornecido comercialmente: a) antes do ensaio; b) depois do ensaio.	21
Figura 21: Superfície topo do elétrodo-ferramenta: (a) polida com lixa granulometria 150; (b) pastas de polimento; (c) polimento eletroquímico e (d) superfície do elétrodo-ferramenta após maquinagem.	22

Figura 22: Cavidades maquinadas com eléctrodo polido com: (a) lixa granulométrica 150; (b) pastas de polimento; (c) polimento eletroquímico ($f=150\text{kHz}$; $M=0.15$ mol de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$; $V=6\text{V}$; $A=0.6\text{A}$; $d=50\%$; $T=18.5^\circ\text{C}$; $a=10\mu\text{m}/\text{min}$; circulação on).....	22
Figura 23: Limpeza assistida por ultrassons: (a) tanque de ultrassons PS-10A da JARCOM e (b) integração com a estrutura da máquina de ensaios.	23
Figura 24: Cavidade maquinada: (a) sem isolamento; (b) com isolamento e (c) respectivo eléctrodo pós maquinagem ($f=150\text{kHz}$; $M=0.15$ mol de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$; $V=6\text{V}$; $A=0.6\text{A}$; $d=50\%$; $T=18.5^\circ\text{C}$; $a=10\mu\text{m}/\text{min}$; circulação off).	24
Figura 25: Cavidade e respectivo eléctrodo pós-maquinagem com concentração molar de 0.3 mol de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ ($f=150\text{kHz}$; $V=6\text{V}$; $A=0.6\text{A}$; $d=50\%$; $T=18.5^\circ\text{C}$; $a=10\mu\text{m}/\text{min}$; circulação off; ultrassons on). .	24
Figura 26: Maquinagem com temperatura de: (a) 35°C ; (b) 50°C e (c) respectivo eléctrodo pós maquinagem ($M=0.3$ mol de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$; $f=150\text{kHz}$; $V=6\text{V}$; $A=0.6\text{A}$; $d=50\%$; $a=10\mu\text{m}/\text{min}$; ultrassons off; circulação off).	25
Figura 27: Desenvolvimento de (a) fixação para o eléctrodo-ferramenta (fio) e (b) porta provetes com recurso a (c) eletroerosão por penetração.	26
Figura 28: Configuração de montagem da nova ferramenta e do porta provetes (1 - Esticadores; 2 - Aperto do provete; 3 - Provette; 4 - Fio (ferramenta); 5 - Porta provetes).	26
Figura 29: Vista de topo e lateral de um rasgo obtidos por μECM com uma ferramenta de $20\mu\text{m}$	27
Figura 30: Evolução do perfil dos rasgos (μm) com a frequência (5, 50 e 500 kHz) para 0.1 mol de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ ($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T=19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5\mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20\mu\text{m}$).	27
Figura 31: Evolução do perfil dos rasgos (μm) com a frequência (5, 50 e 500 kHz) para 0.3 mol de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ ($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T=19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5\mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20\mu\text{m}$).	28
Figura 32: Evolução do perfil dos rasgos (μm) com a frequência (5, 50 e 500 kHz) para 0.5 mol de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ ($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T=19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5\mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20\mu\text{m}$).	28
Figura 33: Evolução da folga lateral (μm) em função da frequência (kHz) para diferentes concentrações moleculares (0.1, 0.3 e 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$)($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T=19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5\mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20\mu\text{m}$).	29
Figura 34: Evolução da folga frontal (μm) em função da frequência (kHz) para diferentes concentrações moleculares (0.1, 0.3 e 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$)($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T=19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5\mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20\mu\text{m}$).	29
Figura 35: Evolução do raio de entrada (μm) em função da frequência (kHz) para diferentes concentrações moleculares (0.1, 0.3 e 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$)($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T=19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5\mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20\mu\text{m}$).	30

Figura 36: Evolução do perfil do rasgo (μm) com frequência de 50 kHz para diferentes concentrações moleculares (0.1, 0.3 e 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$) e a respetiva análise à qualidade superficial ($A=0.3A$; $d=40\%$; $T= 19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5 \mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20 \mu\text{m}$). 31

(Página intencionalmente deixada em branco)

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Designação dos diversos comandos da interface de controlo.	16
Tabela 3.2: Plano de ensaios.	19

(Página intencionalmente deixada em branco)

Lista de Acrónimos

μECM	Micro Maquinagem Eletroquímica
DC	Corrente Contínua
ECM	Maquinagem Eletroquímica
EDM	Maquinagem por Eletroerosão
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LBM	Maquinagem por Laser
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PVC	Policloreto de Vinilo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
TRM	Taxa de Remoção de Material
TRMT	Taxa de Remoção de Material Teórica
USM	Maquinagem por Ultrassons

(Página intencionalmente deixada em branco)

Lista de Símbolos

<i>Símbolo</i>	Definição	Unidade
<i>a</i>	Avanço	$\mu\text{m}/\text{min}$
<i>A</i>	Corrente	A
<i>d</i>	<i>Duty cycle</i>	%
<i>f</i>	Frequência	kHz
<i>gap</i>	<i>Folga entre elétrodos</i>	mm
<i>M</i>	Concentração molar	mol/L
<i>t_{off}</i>	<i>Tempo de pulso inativo</i>	μs
<i>t_{on}</i>	<i>Tempo de pulso ativo</i>	μs
<i>T</i>	<i>Temperatura</i>	$^{\circ}\text{C}$
<i>V</i>	Tensão	V

(Página intencionalmente deixada em branco)

1. Introdução

A tendência atual para a miniaturização de produtos, juntamente com o desenvolvimento de novos materiais, tem apresentado novos desafios para a indústria da maquinagem de componentes (Uhlmann et al. 2016). A procura de produtos de escala micrométrica em diversos materiais com propriedades extremas, com tolerâncias geométricas e dimensionais mais apertadas (Hansen et al. 2017), promoveu o desenvolvimento das capacidades das tecnologias de maquinagem existentes, assim como o desenvolvimento de novas tecnologias de micro maquinagem não convencional (Saxena et al. 2018).

A aplicação de processos de maquinagem convencionais no fabrico de micro componentes representa por si só um desafio, uma vez que a existência de efeitos de escala nos processos tecnológicos aumenta a instabilidade operativa (Rosa 2008). Por consequência, têm sido feitos esforços na área dos processos não convencionais para procurar alternativas e soluções tecnológicas que permitem responder a especificações de fabrico cada vez mais exigentes.

O termo micro maquinagem refere-se à obtenção funcionalidades geométricas, com dimensões entre 1 e 999 μm , como por exemplo a furação de micro cavidades, caixas e superfícies complexas em peças muito pequenas e finas (Bhattacharyya et al. 2004). A escolha de tecnologias não convencionais tem por base a avaliação comparativa das vantagens que este grupo de tecnologias apresenta relativamente às tecnologias convencionais e tradicionais (T. Masuzawa 2000).

Os processos de maquinagem não convencionais podem ser estruturados por: (i) processos térmicos como a maquinagem a laser (LBM), maquinagem por feixe de eletrões (EBM) e maquinagem por eletroerosão (EDM) que podem causar defeitos superficiais na superfície da peça devido à entrega térmica do processo (McGeough 1974); (ii) processos não térmicos, como a maquinagem por ultrassons (USM) e destaque ainda para a maquinagem eletroquímica (ECM), como um processo bastante inovador, devido à sua capacidade de maquinar todo o tipo de materiais condutores sem desgaste das ferramentas utilizadas (Bhattacharyya et al. 2002). Para além destes aspetos principais, este processo apresenta como vantagens uma elevada taxa de remoção de material (TRM), um excelente acabamento superficial e elevada precisão dimensional (Landolt et al. 2003).

A tecnologia de ECM tem como base a dissolução anódica dos metais, de acordo com os princípios de *Faraday* (1791-1867). *Gussef* introduziu a patente de ECM em 1929, mas apenas na década de 50 é que foram feitos os primeiros desenvolvimentos, quando esta tecnologia foi utilizada na indústria aeronáutica para maquinar ligas de alta resistência térmica e de elevada rigidez (El-Hofy 2005). Nessa altura, esta tecnologia havia sido introduzida na indústria aeronáutica e aeroespacial, essencialmente em operações de acabamento e polimento de peças com grandes dimensões, apresentando pouca visibilidade noutras áreas (Bhattacharyya et al. 2004).

Ainda que o processo de ECM seja apontado como uma tecnologia promissora devido às suas vantagens face às alternativas tecnológicas, uma série de questões técnicas continuam a dificultar a

sua implementação definitiva numa gama mais alargada de indústrias. Na gama de micro fabrico este atraso ainda é maior, existindo ainda pouco conhecimento técnico e científico, bem como poucas empresas a oferecer soluções tecnológicas com recurso a este processo.

A adaptação desta tecnologia ao micro fabrico, denominada de micro maquinagem eletroquímica (μ ECM), surgiu com naturalidade, visto que algumas das vantagens referidas acima são essenciais quando se reduz a escala de fabrico ao nível micrométrico. Esta adaptação tem como base os mesmos princípios da ECM à escala macrométrica, sendo que variam alguns parâmetros operativos, como a entrega de potência, a solução eletrolítica e a folga entre o eletrodo e a peça. Contudo, existem diversas dificuldades na implementação da tecnologia, visto que o mecanismo de remoção de material por meio eletroquímico é muito sensível a pequenas variações das condições operativas (Davydov et al. 2004). Torna-se assim muito difícil obter resultados consistentes sem realizar um estudo prévio da influência dos parâmetros operativos, seguindo geralmente, uma abordagem empírica, até obter uma combinação de parâmetros que permitem atingir o resultado pretendido. A aplicação desta abordagem neste domínio é aceite pela comunidade científica e demonstra a dificuldade existente na compreensão do mecanismo de remoção de material por dissolução anódica.

A presente investigação tem como objetivo compreender a influência dos parâmetros operativos, de um ponto de vista tecnológico. Para tal, desenvolveu-se um aparato experimental para controlar facilmente cada um dos parâmetros operativos, possibilitando ajustar o pulso elétrico do processo (dimensão do impulso, frequência, etc.), troca da solução eletrolítica, ajustar a temperatura do banho eletrolítico, ajustar a folga entre o eletrodo e a peça e trocar a ferramenta.

Após ter sido desenvolvido o aparato experimental, desenvolveu-se uma avaliação funcional do mesmo, onde se analisaram alguns parâmetros operativos como, parâmetros do pulso elétrico, banho de ultrassons, escoamento e temperatura do eletrólito. Após o qual foi realizada uma análise exploratória sobre a influência da rugosidade da ferramenta, concentração molar, revestimento, etc. no processo, assim como a determinação do intervalo de valores ideal para o funcionamento da tecnologia. Com a janela operativa da tecnologia identificada, desenvolveu-se um plano de ensaios, onde foram identificados os parâmetros operativos com maior influência e, por isso, de maior interesse para este tipo de investigação.

Este documento encontra-se dividido em cinco partes, começando pela presente introdução, que contextualiza a investigação e apresenta os seus principais objetivos. No segundo capítulo, faz-se uma breve apresentação dos fundamentos base da tecnologia, enquanto que o terceiro capítulo descreve toda a componente experimental de desenvolvimento do aparato experimental, assim como o plano de ensaios. O quarto capítulo visa a discussão, análise e otimização dos resultados e divide-se em duas fases: (i) fase inicial e exploratória, onde se testaram e avaliaram diversos parâmetros do processo; (ii) fase com a máquina otimizada onde se avaliou a influência dos principais parâmetros operativos da tecnologia. Após a obtenção de resultados, no quinto capítulo, estão as conclusões decorrentes da investigação, visando uma contribuição para a melhor compreensão do processo de μ ECM e possíveis trabalhos futuros aspirando futuras contribuições para a tecnologia.

2. Maquinagem Eletroquímica

O presente capítulo faz uma breve introdução aos fundamentos da maquinagem eletroquímica e ao seu campo de aplicação. Apresenta os principais parâmetros operativos e elucida o sentido esperado da sua influência no desempenho do processo e na qualidade da peça.

2.1. Mecanismo de remoção de material

O processo de ECM é um processo de maquinagem não convencional que combina energia elétrica com reações químicas para remoção de material. Neste processo o mecanismo de remoção de material é baseado no princípio de dissolução anódica, estabelecido por Michael Faraday em 1883 (ver Anexo I – Leis de Faraday), denominado de eletrólise, estando também na gênese de diversos processos de fabrico como μ ECM, polimento eletroquímico ou deposição eletroquímica.

O mecanismo de remoção de material por dissolução anódica trata-se de um fenómeno químico que tem por base o estabelecimento de uma diferença de potencial entre um eléctrodo-ferramenta (cátodo) e o eléctrodo-peça que se pretende maquinar (ânodo). Ambos os eléctrodos estão imersos numa solução aquosa condutora (eletrólito) que permite a passagem de corrente elétrica entre os eléctrodos. A este sistema dá-se o nome de célula eletroquímica (Figura 1) e contrariamente ao que acontece nos meios condutores metálicos, numa solução eletrolítica a corrente não consiste num fluxo de electrões, mas de iões (átomos que perderam ou ganharam electrões, adquirindo uma carga positiva ou negativa)(McGeough 1974).

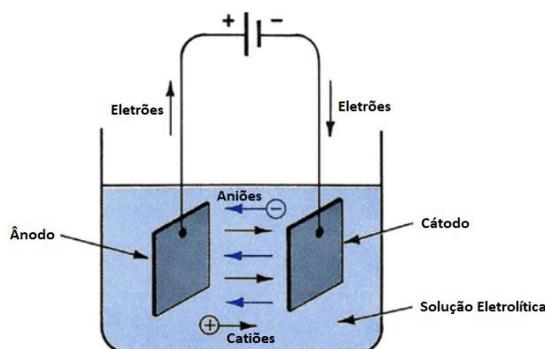


Figura 1: Célula Eletroquímica.

O potencial elétrico estabelecido numa célula eletroquímica e no processo de ECM permite a ocorrência de três processos parciais (M. Ferreira 2001):

- (i) Processo anódico: ionização do átomo metálico, que a partir de um nível crítico de ionização sofre uma reação de oxidação com os elementos ativos do eletrólito;
- (ii) Processo de transporte de electrões do ânodo para o cátodo através do condutor elétrico e lavagem de produtos de reação química (iões) com conseqüente exposição de uma nova camada metálica para continuação do processo de maquinagem;
- (iii) Processo catódico: reações de redução próximas do eléctrodo-ferramenta que resultam na formação de gases.

No processo de μ ECM podem-se ter três tipos diferentes de soluções eletrolíticas que variam com o tipo de solução:

1) Soluções eletrolíticas ácidas (Ex: H_2SO_4):

i) Reação anódica de dissolução do metal.



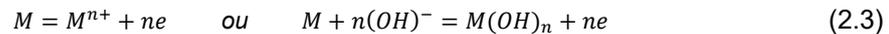
Onde M^{n+} é o ião de metal com valência “n” e “e” é a carga de eletrões.

ii) Reação catódica de libertação de hidrogénio.



2) Soluções eletrolíticas neutras (Ex: NaCl):

i) Reação anódica de dissolução do metal.



ii) Reação catódica de libertação de hidrogénio.



3) Soluções eletrolíticas alcalinas:

i) Reação anódica de dissolução do metal.



ii) Reação catódica de libertação de hidrogénio.



2.2. Micro Maquinagem Eletroquímica

Na escala macrométrica do processo de maquinagem eletroquímica, é imposta na célula eletroquímica, uma tensão que pode variar entre 5 a 30V, composta por um eléctrodo-ferramenta e pelo eléctrodo-peça que se pretende maquinar, estando imersas numa solução eletrolítica (Rosa 2013). Sendo o processo característico de não existir contacto entre eléctrodos, existe uma folga (*gap*) entre eles que pode variar entre 0.1mm e 1mm. Em função da dimensão da folga, atravessa uma densidade de corrente variando entre 20 a 800 A/cm², que resulta em elevadas taxas de dissolução anódica.

Quando se diminui a escala de funcionamento para a gama micrométrica, é colocado em prática a tecnologia de μ ECM, onde pequenas quantidades de material são removidas com precisão

micrométrica. A configuração dos elementos do processo (Figura 2) é semelhante em ambas as situações, sendo a geometria de maquinagem obtida em função do eléctrodo-ferramenta utilizado.

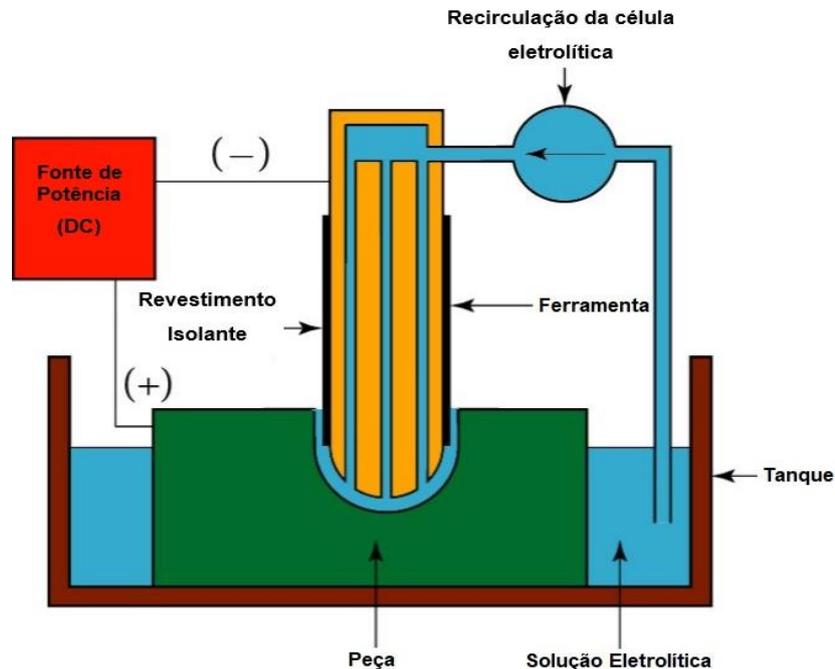


Figura 2: Esquema do processo de ECM.

Quando se trata de uma diminuição de escala, a tecnologia revela-se também bastante promissora. A tecnologia de μ ECM adota algumas das vantagens da sua vertente macrométrica, onde a maquinagem sem contacto entre eléctrodos, não introduz desgaste na ferramenta nem tensões residuais na peça maquinada, permitindo elevadas precisões e um elevado grau de acabamento superficial em materiais condutores, independentemente das suas propriedades mecânicas. Do ponto de vista estrutural, a inexistência de máquinas de grandes dimensões, com fontes de potência de grande capacidade para suportar elevadas densidades de corrente e ainda a existência de uma diminuição dos fluxos de solução eletrolítica e conseqüente diminuição de pressões hidrostáticas são algumas das vantagens da miniaturização.

Quanto às suas desvantagens, compartilhando também algumas com o processo macrométrico, tem-se: risco de corrosão dos elementos da máquina devido à utilização de eletrólitos corrosivos; restrição de maquinagem apenas a materiais condutores; elevada energia consumida em função da remoção de material; formação de canais de cavitação que podem deteriorar a superfície da peça; perigo de explosão devido à formação de hidrogénio durante a maquinagem. Quanto às desvantagens específicas da escala micrométrica os efeitos de escala tornam-se preponderantes assim como os elevados custos de preparação da ferramenta devido à sua geometria (Rosa 2013).

De forma a que seja implementado a μ ECM na indústria de micro fabrico, têm sido estudados diversos obstáculos que podem surgir no desenvolvimento de uma máquina desta tecnologia. Nesse sentido, as investigações académicas têm abordado, transversalmente, problemas como o desenho e

desenvolvimento de micro ferramentas, o controlo e monitorização da folga entre eléctrodos, a TRM e a precisão geométrica, ou ainda o desenvolvimento de fontes de potência alternativas.

Existem diversos parâmetros que estão diretamente relacionados com a eficiência e a eficácia de uma operação de μ ECM e que vão influenciar substancialmente a TRM, a precisão dimensional e o acabamento superficial que se obtêm. Alguns destes parâmetros são a natureza e concentração da solução, bem como a forma como esta circula entre a ferramenta e a peça, a geometria e o material da ferramenta, o material da peça, a densidade e a distribuição de corrente e se esta é pulsada ou contínua. O correto ajuste destes parâmetros é essencial para garantir um bom desempenho do processo de maquinagem e obter os resultados desejados.

2.3. Solução eletrolítica

A solução eletrolítica promove o fecho do circuito na célula eletrolítica e favorece as reações químicas, estabelecendo condições para que se promova a dissolução anódica, praticar uma boa lavagem dos produtos de reação na folga entre os eléctrodos e potenciar a dissipação de calor (Leese 2016). A geometria da ferramenta e da estrutura da máquina vão influenciar bastante na forma como a solução eletrolítica flui no interior da ferramenta e através da folga, uma vez que, se a lavagem não for bem conseguida, os produtos da maquinagem acumulados podem influenciar negativamente as tolerâncias geométricas, assim como o acabamento superficial da peça a maquinar.

Numa operação de μ ECM, o fluxo de solução utilizado apresenta velocidades na ordem dos 3 m/s, valores consideravelmente mais baixos que a ECM “convencional” (10 m/s a 60 m/s), em consequência da escala reduzida dos componentes utilizados (ferramentas e estrutura da máquina) serem comprometidos com vibrações mais fortes (Bhattacharyya et al. 2004). No domínio de μ ECM, a concentração de solução apresenta um leque de valores bastante alargado consoante o tipo de maquinagem que se pretende. Com concentrações mais baixas, obtém-se melhor precisão de maquinagem, geram-se menos produtos da solução diminuindo o risco de formação de lamas. Por outro lado, concentrações superiores, aumentam o potencial de remoção de material do processo, aumentando a deposição de lamas e diminuindo a precisão do processo (De Silva et al. 2003).

Relativamente às soluções utilizadas, ainda que exista uma vasta variedade, as mais comuns são NaCl ou NaNO₃ para maquinar uma vasta gama de aços inoxidáveis (Rajurkar et al. 2007) (De Silva et al. 2003) (Neto et al. 2006). Para além destas soluções também foram desenvolvidos estudos com NaClO₃ e NH₄NO₃ (Kozak et al. 2004) e com soluções ácidas de H₂SO₄, HCl e H₃PO₄ (Cagnon et al. 2003) (Xu et al. 2016) (Kock et al. 2003) (Kim et al. 2005) (B. J. Park et al. 2006).

2.4. Eléctrodo-ferramenta

A ferramenta de μ ECM, é uma das áreas que suscita maior interesse à comunidade científica, não só pela sua geometria, mas também pelas características de escoamento que esta proporciona ao eletrólito e o isolamento apropriado para prevenir fenómenos de *overcut*. Este é um fenómeno que se desenvolve devido ao aquecimento do eletrólito, formação e deposição de produtos provenientes da

maquinagem, etc. que leva a fluxos de correntes irregulares e resulta em diminuição na precisão dimensional da peça a maquinar (Tiwari et al. 2015). De facto, a ferramenta é um tópico tão exigente para a μ ECM que o seu próprio fabrico constitui, por si só, um complicado desafio de micro fabrico. Quando se fala em μ ECM, as dimensões das ferramentas são tão reduzidas, que a própria gravidade é suficiente para deformar a ferramenta, se esta não for manuseada com cuidado. Como já referido, uma das vantagens principais da ECM e também da μ ECM é o fato de a ferramenta não sofrer desgaste durante o processo, sendo a sua vida útil dependente da sua resistência à solução eletrolítica, da existência de curto circuitos acidentais ou, mau manuseio do utilizador. O facto de não sofrer desgaste tem também como vantagem, não ser necessária a troca de eléctrodo-ferramenta.

Na escolha do material para a ferramenta de μ ECM, é fundamental ter em atenção a sua maquinabilidade, dureza, resistência à corrosão, condutividade térmica e eléctrica. Tendo em consideração estas características foram desenvolvidos estudos com materiais comumente utilizados em ECM, como o cobre, níquel, latão e aço inoxidável (El-Hofy 2005), mas também materiais menos comuns como tungsténio, carbono (grafite), carbonetos de tungsténio, titânio, platina, entre outros (Kim et al. 2005) (Swain 2010) (De Silva et al. 2007) (Bhattacharyya et al. 2002) (B. J. Park et al. 2006).

Em condições perfeitas o que se pretende maquinar seria exactamente o negativo da ferramenta, mas como estas condições são impossíveis de alcançar, é feita uma aproximação ao negativo da peça, aumentando a precisão do processo. Em operações de ECM e μ ECM, onde o movimento é exclusivamente vertical (furação), à medida que a ferramenta afunda, a área imersa no eletrólito aumenta, diminuindo a densidade de corrente e, conseqüentemente, a TRM, ou seja, à medida que se afunda na cavidade as paredes laterais da ferramenta vão dissolvendo anodicamente as paredes laterais da cavidade, obtendo uma forma cónica (Jo et al. 2009) como se pode observar na Figura 3a. De forma a contornar este fenómeno, aplica-se um isolamento eléctrico, neste caso, das faces laterais da ferramenta, através do uso de um revestimento adequado, concentrando a dissolução anódica apenas no topo da ferramenta e aumentando a precisão do processo como se observa na Figura 3 b).

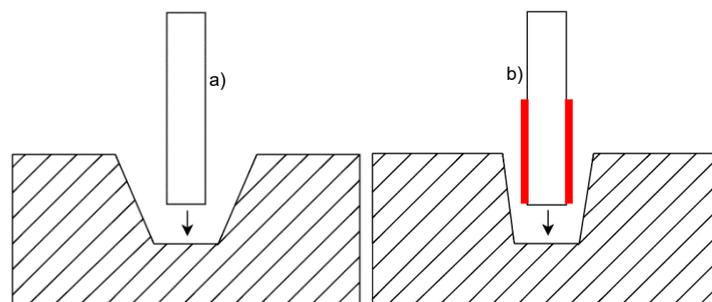


Figura 3: Representação da cavidade a) sem revestimento e b) com revestimento.

2.5. Fonte de potência pulsada

Para a ocorrência do fenômeno de dissolução anódica de metais numa célula eletroquímica é imposto um potencial elétrico entre o cátodo e o ânodo, sendo a fonte de potência um dos componentes essenciais para a tecnologia. Tipicamente, em ECM as máquinas disponíveis estão equipadas com fontes de potência DC com capacidade de potência entre os 50 e 40000A e de tensão entre os 5 e 30V (Helmi A. Youssef et al. 2008), mas com as investigações desenvolvidas no âmbito desta tecnologia, a corrente pulsada tem sido uma aposta imutável em detrimento da contínua, nomeadamente em μ ECM.

As elevadas densidades de corrente apresentadas induzem grandes concentrações de produtos da reação que contaminam a zona de maquinagem, promovendo a adesão destes à ferramenta e prejudicando os resultados com dissoluções heterogêneas das peças. De forma a contornar este entrave, poder-se-ia aumentar o fluxo de eletrólito, mas devido aos efeitos de escala, iriam ser introduzidas elevadas vibrações na zona de maquinagem, contudo foram conseguidas melhorias neste aspeto ao ser introduzida corrente pulsada na tecnologia.

A corrente pulsada em μ ECM consegue-se, recorrendo a um gerador de sinais e uma fonte de potência que, em conjunto, fornecem os impulsos de corrente aos elétrodos (Figura 4). Durante o impulso “on”, que ocorre em poucos microssegundos, desenvolve-se o fenômeno de dissolução anódica, que a par com o aumento da densidade de corrente, permite obter maior estabilidade do processo com folgas de maquinagem reduzidas e melhoramentos na precisão de maquinagem (Rajurkar et al. 1999), enquanto que, o tempo “off”, ou seja, o tempo em que não existe dissolução anódica tem uma grande influência no processo, uma vez que é nesta fase que se promove a lavagem da zona de maquinagem e recuperação das condições iniciais de maquinagem, melhorando significativamente a precisão da operação (Bhattacharyya et al. 2004).

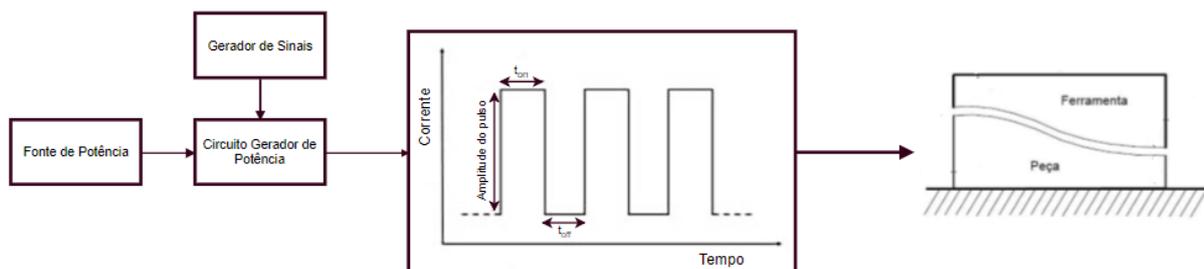


Figura 4: Elementos de um gerador de potência com corrente pulsada.

Em μ ECM com corrente pulsada, a tensão imposta é inferior a 10 V, substancialmente inferior à tensão utilizada em ECM, assim como a corrente diminuí para valores a rondar os 1 ou 2 A e a gama de frequências utilizadas encontra-se numa gama de kHz e MHz, sendo estes valores suficientes para garantir densidades de corrente elevadas (Bhattacharyya et al. 2004), consequente da diminuição de escala para a gama de micro fabrico.

2.6. Material do eletrodo-peça

Qualquer material condutor de eletricidade é passível de ser maquinado por dissolução anódica, desde que estejam reunidas as condições favoráveis às reações pretendidas. A capacidade da tecnologia de maquinar o material não é influenciada pelas propriedades mecânicas do material, mas sim por parâmetros como a afinidade química com o eletrólito e os parâmetros de potência do processo. Para ligas de difícil maquinabilidade, a capacidade de remoção de material deste processo acaba por ser elevada comparativamente a tecnologias mais convencionais (Helmi A. Youssef et al. 2008). Na Figura 5a é possível observar uma geometria maquinada por μ ECM, em aço inoxidável com a forma de uma pirâmide (Cagnon et al. 2003) e na Figura 5b também uma geometria complexa mas gravado numa liga de níquel (Kock et al. 2003).

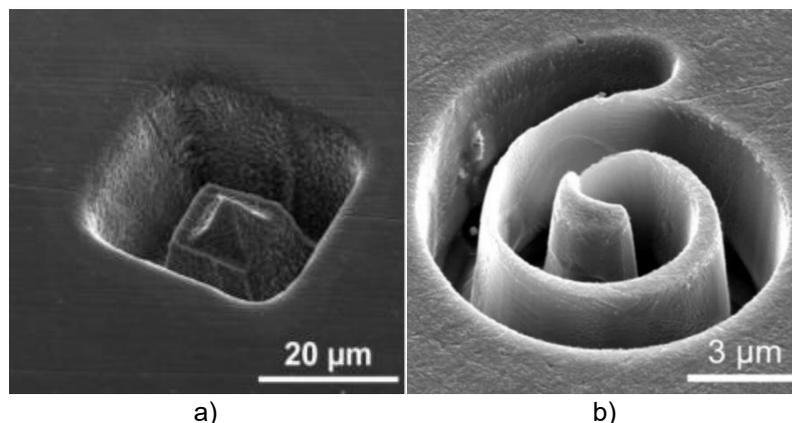


Figura 5: Geometrias obtidas por μ ECM em: a) aço inoxidável; b) ligas de níquel.

2.7. Folga entre eletrodos

O tamanho da folga entre os eletrodos, também designada por “*gap*”, numa operação de ECM tem um papel fundamental no resultado final da operação. Enquanto que em ECM “convencional” as folgas apresentam valores entre os 0.1 e os 1mm, quando se fala em μ ECM as folgas correntes diminuem para valores entre 5 e 100 μ m, que garantem a remoção de material de forma precisa, permitindo obter geometrias bem definidas e raios de concordância entre os 10 e os 100 μ m (Bhattacharyya et al. 2004).

Diversas investigações abordam a questão da folga, onde alguns procuram que a folga permaneça constante durante as operações, sincronizando o avanço com a TRM (Mount et al. 2003) (M. S. Park et al. 2007), enquanto que noutras situações procuram sistemas mais inovadores que beneficiam a limpeza da zona de maquinagem utilizando uma vibração ultrassônica da ferramenta (Han et al. 2009) (Skrabalak et al. 2003).

(Página intencionalmente deixada em branco)

3. Desenvolvimento Experimental

Este capítulo apresenta o desenvolvimento dos sistemas mecânicos, eletrônicos e a aplicação de instrumentação do aparato experimental. Serão ainda descritas as soluções adotadas no desenvolvimento da bancada de ensaios. Termina descrevendo o plano de ensaios da presente investigação.

3.1. Fabrico e montagem da máquina de ensaios

De acordo com os objetivos desta investigação, foi necessário o desenvolvimento de uma bancada de ensaios para proporcionar um controlo adequado dos principais parâmetros operativos do processo de μ ECM. O desenvolvimento do aparato experimental foi dividido em diversas secções, e em cada uma dessas secções, serão descritas minuciosamente as opções tomadas.

3.1.1. Estrutura da máquina de ensaios

A Figura 6 mostra a máquina de ensaios utilizada na presente investigação. Esta máquina tem estrutura aberta do tipo “C” fabricada em PVC. A estrutura principal apresenta esta geometria para facilitar a acessibilidade à zona de trabalho e foi fabricada em polímero devido ao ambiente corrosivo a que está sujeita. A estrutura principal pode ser dividida em duas partes: (i) cabeçote móvel onde está inserida a pinça de fixação do eléctrodo-ferramenta (cátodo); (ii) cabeçote fixo que apresenta o provete a maquinar, ou seja, o eléctrodo-peça (ânodo).

Ainda relativamente à Figura 6a e à estrutura principal, as ligações elétricas estão integradas no interior da estrutura, protegendo-as também do ambiente corrosivo característico do processo. Toda a estrutura principal, referida até então, está integrada numa estrutura de suporte em alumínio que assenta no tanque de eletrólito, facilmente adaptável a tanques de diferentes dimensões (Figura 6c) e eletricamente isolada por pés de borracha. Esta base de alumínio serve de suporte para a estrutura principal e também para promover rigidez estrutural à máquina.

O sistema de fixação da ferramenta, apresenta circulação de eletrólito pelo interior da mesma, sendo que o utilizador não está restrito apenas a esta pinça, e que facilmente efetua a sua troca. Por último, foi ainda integrado na estrutura um relógio comparador, para medir/registar a distância relativa do eléctrodo-ferramenta em relação ao eléctrodo-peça a maquinar.

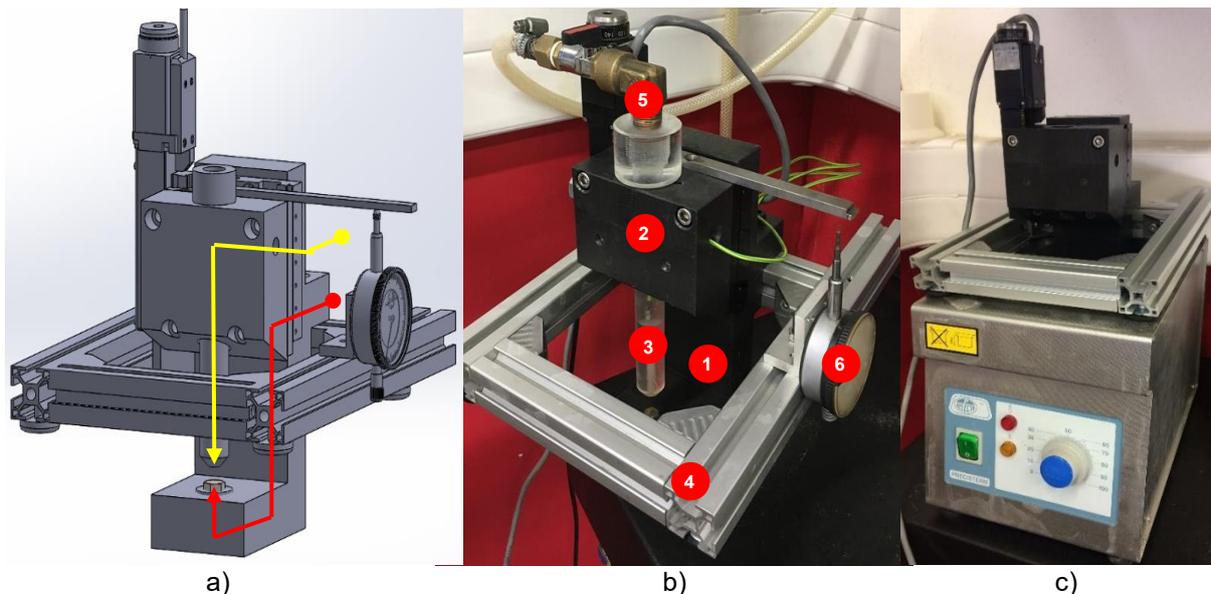


Figura 6: Máquina de ensaios: a) ligações elétricas; b) componentes da estrutura: 1 - Cabeçote fixo; 2 - Cabeçote móvel; 3 - Pinça; 4 - Estrutura de suporte; 5 - Recirculação de solução; 6 - Relógio comparador; c) adaptabilidade da estrutura de suporte ao tanque de eletrólito.

De notar que a bancada de ensaios é essencial para o desenvolvimento desta investigação, pelo que, para a obtenção de resultados foi necessário efetuar ensaios com elevada repetibilidade. Para isso, destaca-se a elevada mobilidade de toda a estrutura da máquina, que entre cada ensaio, era retirada do tanque de eletrólito para uma bancada próxima e aí era feita a manipulação e avaliação do provete e dos resultados da maquinagem, tendo a estrutura tipo “C” um papel preponderante devido à notória acessibilidade à zona de trabalho que esta proporciona.

3.1.2. Circuito de recirculação do eletrólito

Com o objetivo de efetuar a lavagem de detritos provenientes da maquinagem e homogeneizar a temperatura da solução na zona de maquinagem, foi desenvolvido um sistema de recirculação de solução eletrolítica, que obriga o eletrólito a circular no interior da ferramenta, garantindo circulação na zona de maquinagem, assim como a lavagem e circulação de solução em todo o tanque, promovida pelo caudal de saída da solução.

O circuito de circulação de solução (Figura 7) é composto por um cilindro (depósito) em PVC, resistente à corrosão, que se encontra no interior de uma estrutura metálica e tem uma capacidade de aproximadamente 3 litros (J. Ferreira 2013). O cilindro é pressurizado com recurso ao ar comprimido da rede do laboratório e é passível de regulação com o regulador de pressão.

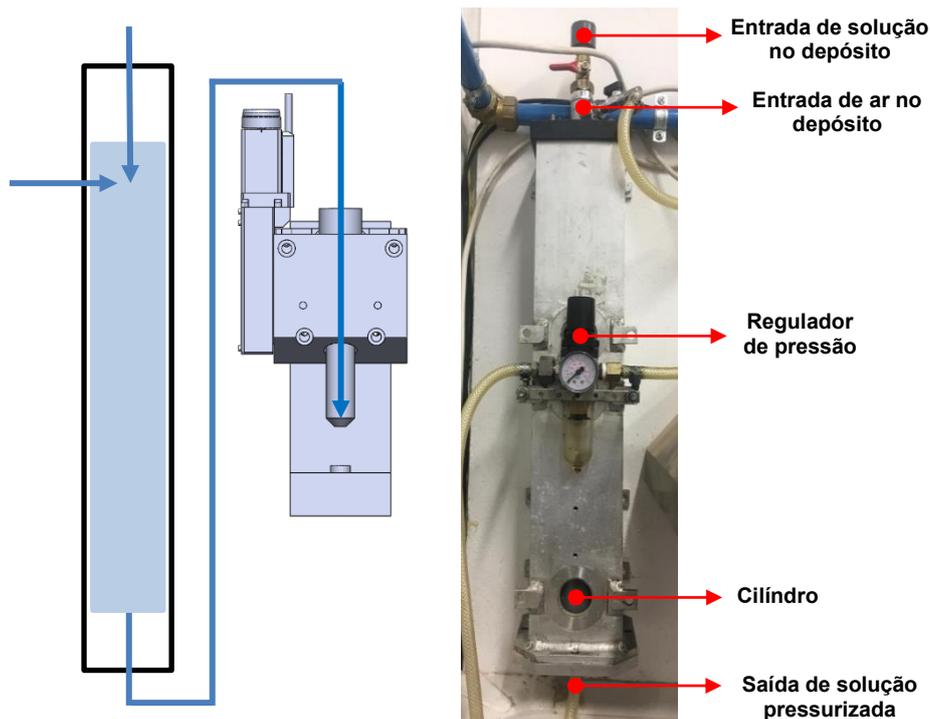


Figura 7: Ilustração do circuito de recirculação de eletrólito.

De notar que, para forçar a circulação de solução no interior da ferramenta, devido ao seu diâmetro reduzido ($300\ \mu\text{m}$) são necessárias pressões sempre superiores a 4 bar. Uma vez que as pressões disponíveis na rede estão limitadas a um máximo de 6.5 bar, não há um intervalo de funcionamento muito grande. Antes de efetuar um ensaio é necessário ter em atenção a quantidade de solução que existe no depósito, para prevenir que durante o ensaio comece a sair apenas ar comprimido danificando os resultados do ensaio.

3.1.3. Servomecanismos de movimento do carro móvel

Para a maquinagem de cavidades, apenas é necessária a utilização de um eixo vertical. Para isso, utilizou-se um módulo de controlo do carro móvel já anteriormente desenvolvido. O carro móvel de translação rápida utilizado, da marca *Standa*, modelo 8MT167-25LS (Figura 8) permite ser operado com diversas precisões de movimento até $0.156\ \mu\text{m}$ (ver Anexo II – Carro móvel 8MT167-25L). De notar que a precisão do movimento deste carro móvel, é bastante vantajosa aquando a distância ao provete é inferior a 1mm, uma vez que, quando a folga é muito pequena os incrementos têm de ser reduzidos para impedir que exista contacto entre os elétodos.



Figura 8: Carro móvel 8MT167-25LS.

3.1.4. Circuito gerador de potência

No decorrer da presente investigação, houve a necessidade de desenvolver de raiz um circuito de potência que estará na base do processo de μ ECM, sendo um dos elementos essenciais do aparato experimental. O circuito desenvolvido pode ser repartido em três partes essenciais, como se pode verificar na Figura 9.

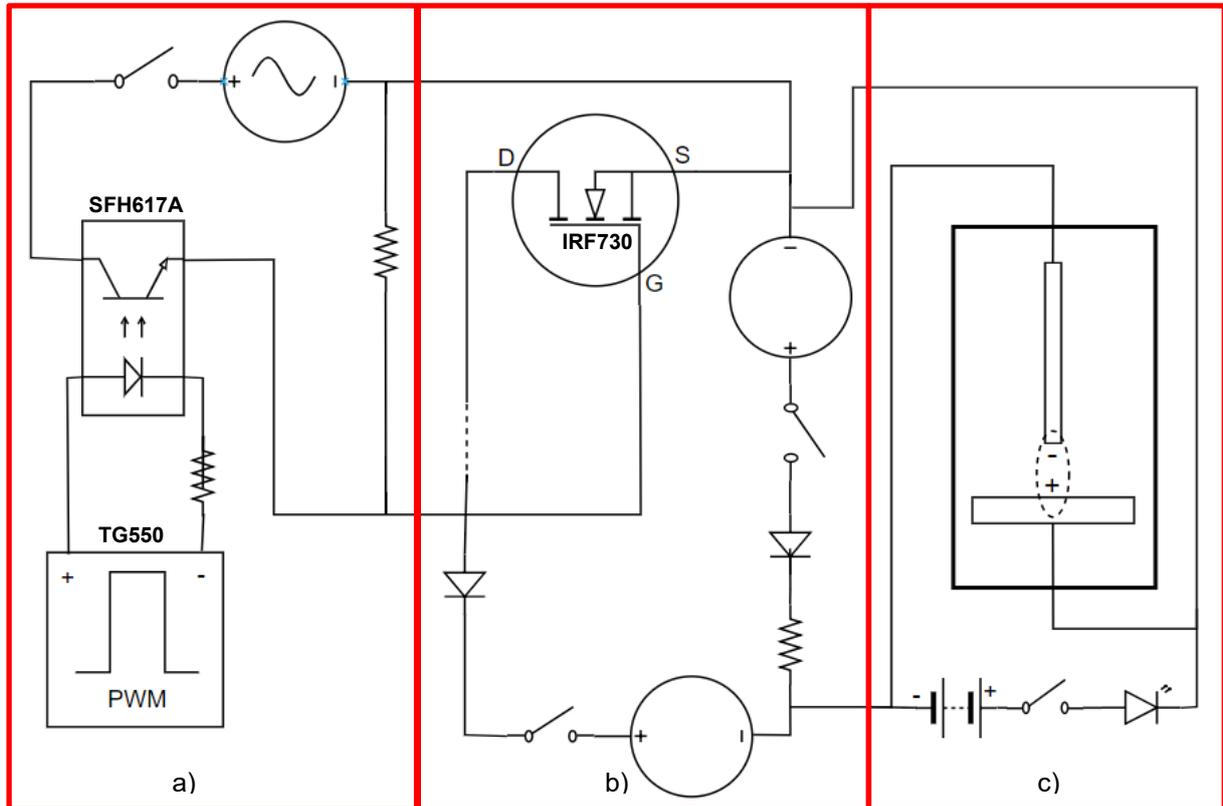


Figura 9: Esquema eletrônico do circuito desenvolvido.

Na Figura 9a está a integração no circuito da máquina o Pulse Width Modulation (PWM). O PWM envia um sinal digital, com recurso ao gerador de funções TG550 da TTI (Figura 10a) e permite ao utilizador modular o sinal digital. O equipamento permite a utilização diversos tipos de onda (quadrada, sinusoidal e triangular). O objetivo desta investigação era a utilização de um sinal quadrado (Figura 10b), onde o utilizador tem ainda a possibilidade de alterar parâmetros como frequência (f), amplitude, tempo de impulso *on* (t_{on}), tempo de impulso *off* (t_{off}).



Figura 10: a) Gerador de funções TTI TG550 e b) tipo de pulso utilizado.

Normalmente a parcela do circuito concernente à potência está isolada galvanicamente da parcela de controlo, para evitar perturbações das elevadas tensões/correntes no sinal de controlo, para isso, colocou-se um fototransistor optoacoplador SFH617A da *Vishay* (ver Anexo III - Optoacoplador SFH617A) entre a fonte de potência e o gerador de funções. O princípio de funcionamento de um optoacoplador é a transferência de sinais elétricos por meio ótico entre dois circuitos isolados. Aplicando estes conceitos ao circuito desenvolvido, o gerador de funções envia um pulso, com os parâmetros pretendidos para o optoacoplador, este recebe o sinal de controlo e por intermédio de luz infravermelha envia-o para o fototransistor (Figura 11), que por sua vez ativará o circuito de potência.

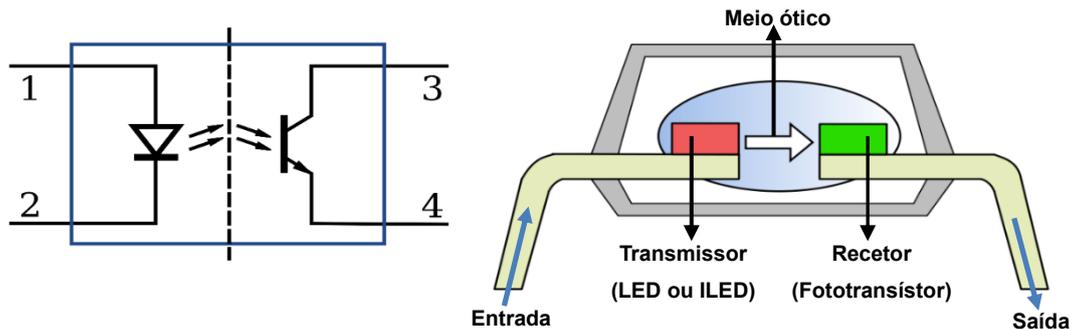


Figura 11: Esquema do funcionamento de um optoacoplador.

De seguida, na Figura 9b, tem-se o circuito de potência e, uma das principais dificuldades nesta fase foi compreender o funcionamento do *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) e, como adaptá-lo no circuito de forma a que este funcione como um “botão”. O MOSFET (Figura 12) é um dos transistores mais utilizados em eletrónica e é composto pelo *Gate* (G), *Drain* (D) e a *Source* (S) que, quando aplicada uma certa tensão entre os canais *Gate* e *Source*, o campo elétrico gerado permite a passagem de corrente elétrica. O MOSFET utilizado foi um IRF730 da *Vishay* (ver Anexo IV – MOSFET IRF730). Neste caso, o sinal é enviado pelo gerador de funções, que por sua vez é transmitido pelo optoacoplador que comunicará com o MOSFET quanto tempo é que deixará passar corrente.

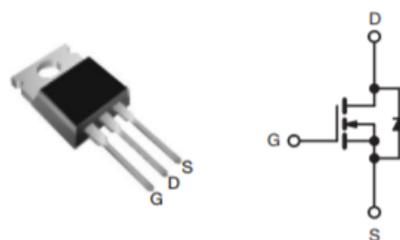


Figura 12: MOSFET Vishay IRF730.

Nesta ótica, dois metais submersos numa solução eletrolítica e na presença de um potencial elétrico entre eles, formam uma pilha eletroquímica. Em condições perfeitas, a assinatura elétrica que o utilizador dá ao processo tem o aspeto da Figura 13a, mas quando se impõe uma tensão pulsada num meio como o descrito, existe uma componente capacitiva do circuito no período de descanso (t_{off}) como se pode ver na Figura 13b, dificultando que a diferença de potencial se anule. Com este problema surge a necessidade de introduzir funcionalidades no circuito elétrico principal que permitam compensar a diferença de potencial indesejada no tempo de repouso, mas com o sinal invertido (circuito

inversor), de forma a compensar o potencial ativo que existe e a promover um tempo de descanso (t_{off}) real. A introdução de um circuito inversor força o valor de tensão durante o tempo de descanso a baixar para valores negativos, então, num curto espaço de tempo as partículas invertem o sentido do movimento e, desagregam-se da ferramenta sendo então lavadas da zona de maquinagem devido à circulação constante de solução existente.

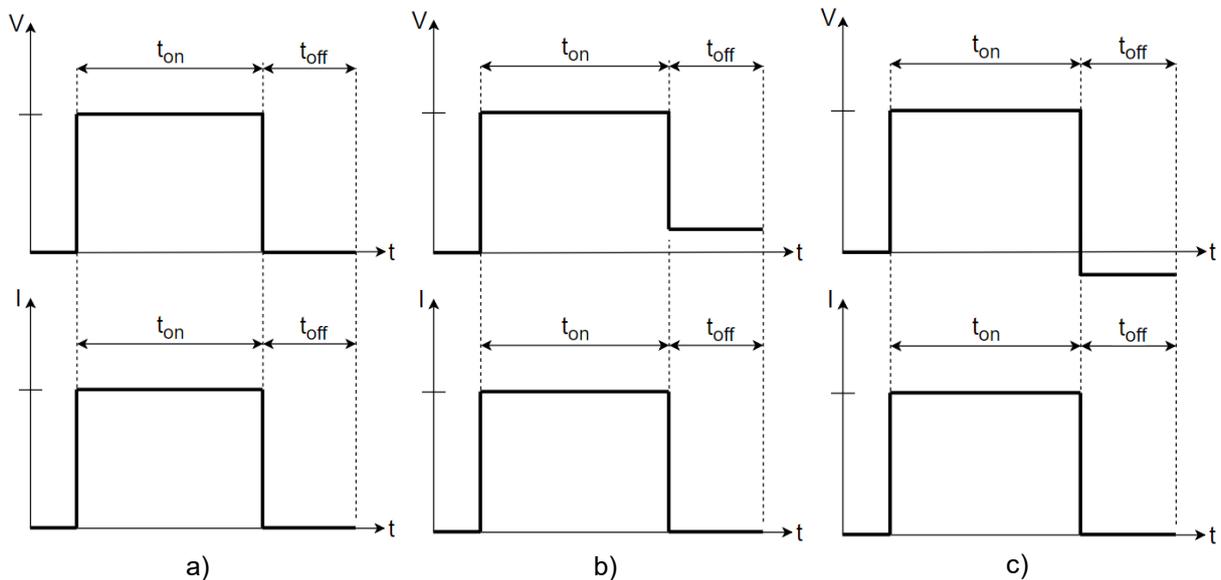


Figura 13: Representação esquemática do sinal elétrico típico: a) pretendido; b) com potencial elétrico ativo; c) com inversão de sinal.

Por último, na Figura 9c, estão representados o elétrodo-ferramenta e o elétrodo-peça. Além disso, tem-se ainda um circuito para zerar a máquina, isto é, quando a ferramenta toca na peça, o LED liga, sinal que corresponde a uma distância nula entre os elétrodos, permitindo o utilizador mover o relógio comparador para a posição pretendida.

Em conclusão, após desenvolvido do esquema do circuito elétrico, procedeu-se ao desenvolvimento do circuito real correspondente. Este foi primeiro simulado numa *breadboard* como se pode ver na Figura 14a e só então se desenvolveu a placa do circuito como se observa na Figura 14b.

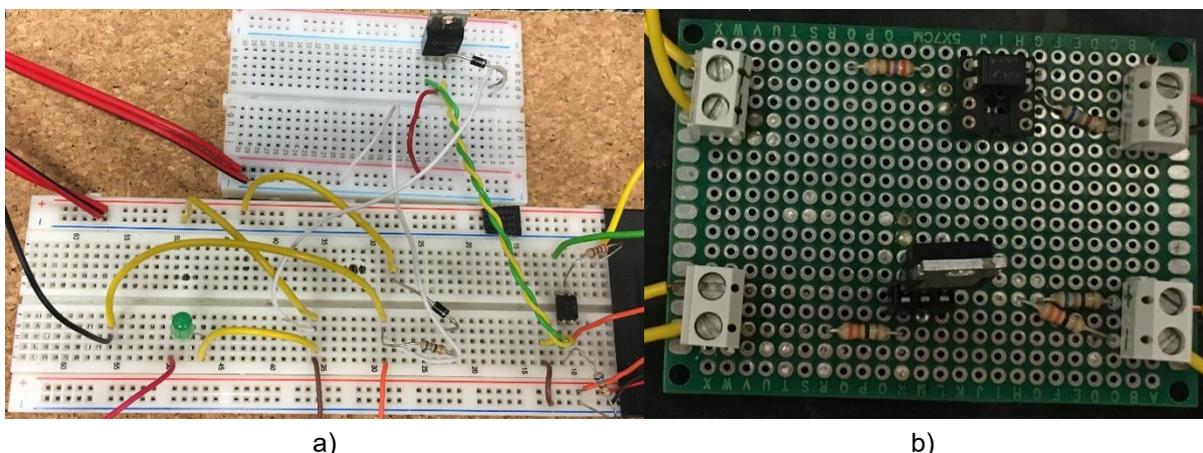


Figura 14: Desenvolvimento do circuito elétrico: a) Simulação do circuito numa *breadboard*; b) Placa com o circuito funcional.

3.1.5. Interface de controlo

A interface da máquina serve para o utilizador ter controlo individual de componentes e/ou parâmetros específicos do aparato experimental. Dentro desta ótica, o presente aparato experimental está dividido em duas interfaces essenciais (Figura 15): (a) controlo de parâmetros eletrónicos; (b) controlo dos motores.

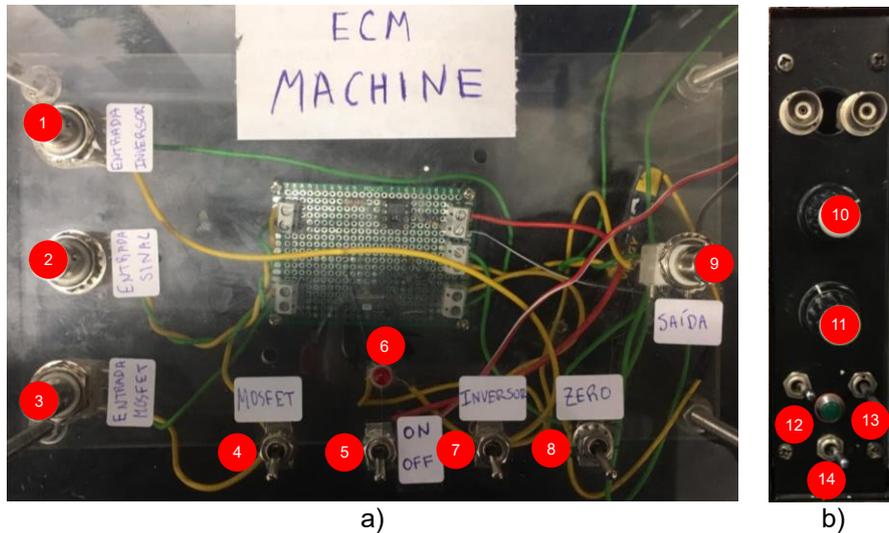


Figura 15: Interface de controlo a) de parâmetros eletrónicos; b) dos motores.

Em conformidade com o descrito, na Tabela 3.1, estão ilustrados todos os comandos que permitem ao utilizador operar todo o sistema.

Tabela 3.1: Designação dos diversos comandos da interface de controlo.

Nº	Designação	Nº	Designação
1	Alimentação do circuito inversor	8	Ligação do circuito para zerar
2	Entrada do gerador de sinais	9	Saída para o processo
3	Alimentação do MOSFET	10	Resolução do motor
4	Acionamento do MOSFET	11	Velocidade do motor
5	Acionamento do optoacoplador	12	Modo manual/Automático
6	Luz indicadora do zero	13	Direção manual
7	Acionamento do inversor	14	Acionamento do motor

3.2. Aparato experimental

O aparato experimental está estruturado em dois sistemas distintos: (i) à direita na Figura 16, encontra-se toda a estrutura cinemática do aparato experimental; (ii) à esquerda na Figura 16 apresenta-se o sistema de potência e de controlo do aparato experimental, no qual é possível controlar e visualizar todos os parâmetros do processo.



Figura 16: Aparato experimental completo.

Os dois sistemas foram separados, para que o ambiente corrosivo não tenha interferência no sistema de potência e controlo do processo. Uma vez que esta tecnologia, envolve ambientes corrosivos e gases prejudiciais derivados do processo, uma série de medidas de segurança foram tidas em consideração, como a aplicação de um exaustor por cima zona onde vai ser efetuada a maquinagem, a fixação de um quadro com medidas de segurança aquando existe interação com substâncias químicas e/ou em caso de acidente e ainda, o armazenamento isolado de todas as substâncias químicas utilizadas. Foi desenvolvido um procedimento de utilização da máquina, tendo em conta alguns aspetos referidos anteriormente (ver Anexo V – Procedimento de utilização da máquina). Em anexo encontram-se também alguns dos desenhos 2D dos componentes desenvolvidos ao longo da investigação (Anexo VI - Desenhos 2D).

3.3. Instrumentação e ferramentas

A instrumentação tem o objetivo de visualizar e controlar os diversos parâmetros do processo e, para além do gerador de sinais referido anteriormente, foi utilizada uma fonte de tensão QL355T da TTI (Figura 17a), que fornece simultaneamente potência ao circuito e ao inversor de sinal. Para estudar o processo ECM e obter resultados do processo, foi utilizado um leitor de corrente para altas frequências CT-C0.5-BNC da Bergoz (Figura 17 b), uma sonda de osciloscópio TA042 da PicoTech (Figura 17c) e ainda um osciloscópio 72-8725 da TENMA™ (Figura 17 d).

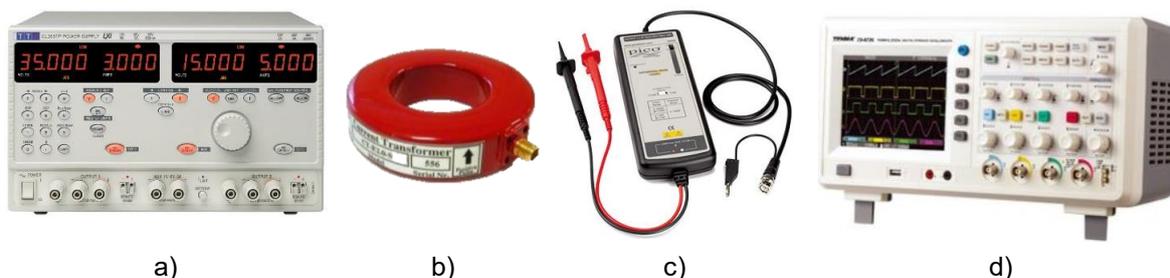


Figura 17: Instrumentação: a) Fonte de tensão TTI QL355T; b) Leitor de corrente para altas frequências Bergoz CT-C0.5; c) Sonda de osciloscópio PicoTech TA042; d) Osciloscópio TENMA™ 72-8725.

A ferramenta dará a forma à geometria que se pretende maquinar, logo, no desenvolvimento dos ensaios primários da máquina utilizou-se um eletrodo-ferramenta com 1mm de diâmetro externo e 0.3mm de diâmetro interno, em cobre, normalmente utilizado na tecnologia de EDM por perfuração, como se pode verificar na Figura 18 à direita e, nesse sentido, desenvolveu-se também uma pinça em função da ferramenta, representada na Figura 18 à esquerda. Como referido anteriormente, no topo da pinça existe um encaixe para a mangueira do circuito de solução eletrolítica pressurizada que circulará no interior da mesma e, conseqüentemente no interior da ferramenta (eletrodo de cobre).



Figura 18: Pinça de fixação do respectivo eletrodo.

Após a análise exploratória, tendo em conta os resultados obtidos foi necessário efetuar algumas mudanças concernentes à ferramenta, assim como à circulação de eletrólito no interior da mesma, por conseguinte este tópico será abordado novamente a posteriori.

3.4. Plano de ensaios

Após o desenvolvimento do aparato e, para avaliar o bom funcionamento da bancada experimental, estabeleceu-se um plano de ensaios que pode ser dividido em duas fases essenciais: (i) análise exploratória; (ii) análise científica. Inicialmente, analisaram-se diversos parâmetros do processo, para identificar a janela operativa e avaliar o impacto de cada um dos parâmetros operativos no desempenho do processo e na qualidade da geometria produzida. Entre os parâmetros avaliados destaca-se a lavagem do processo, a rugosidade da ferramenta, temperatura do eletrólito e a concentração de solução.

Um dos objetivos desta investigação é o estudo de alguns parâmetros da tecnologia de μ ECM, tendo em consideração a sua aplicabilidade na indústria. Apesar de já diversos estudos terem referido que μ ECM é uma tecnologia bastante apetecível para o micro fabrico, não só por não existir desgaste de ferramentas mas também por não haver tensões residuais na superfície dos materiais após a maquinação, torna-se necessário verificá-lo e, quando se parte para uma vertente industrial, tolerância geométrica e acabamento superficial das peças maquinadas são dois pontos cruciais, por isso, na análise científica, correspondente à segunda parte dos resultados, o foco será direcionado para estas duas condições.

Para avaliar a influência dos parâmetros operativos no rigor geométrico e no acabamento superficial foram selecionados parâmetros e condições operativas (material da ferramenta, solução eletrolítica, material a maquinar) disponíveis na literatura como ponto de partida (J. Ferreira 2013)(Ribeiro 2014), de onde resultou o plano de ensaios representado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Plano de ensaios.

Material da Ferramenta	Cobre	Material do provete	AISI 304
Diâmetro da Ferramenta [μm]	20	Área da ferramenta [mm²]	0.016
Frequência (f) [kHz]	5, 50, 500	Circuito Inversor	Ligado
Concentração (M) [mol/L]	0.1, 0.3, 0.5	Lavagem (p)	Desligada
Solução Eletrolítica	H ₂ SO ₄	Ultrassons	Desligado
Corrente (I) [A]	0.3	Profundidade [μm]	100
Concentração Mássica [g/L]	9.81, 29.4, 49.04	Incremento [μm]	15
Duty Cycle (d)	50	Avanço da ferramenta (a) [μm/min]	5
Temperatura (T) [°C]	19	Folga inicial (gap) [μm]	20

4. Resultados e Discussão

O capítulo começa por apresentar um estudo exploratório sobre a influência dos principais parâmetros operativos e a determinação da janela operativa para o processo de maquinagem eletroquímica. Estes resultados foram posteriormente utilizados num caso de estudo relacionado com a maquinagem eletroquímica por fio de aço AISI 304.

4.1. Análise exploratória dos parâmetros operativos

A análise exploratória teve o duplo objetivo de avaliar o desempenho da máquina protótipo e de identificar a influência dos principais parâmetros operativos na qualidade das funcionalidades maquinadas. Numa primeira fase, foram considerados os seguintes parâmetros operativos: frequência do pulso (f); *duty cycle* (d); tensão (V); corrente (A); circulação de eletrólito no interior da ferramenta (p); avanço (a); a temperatura (T); concentração de ácido na solução (M).

A Figura 19 elucida quanto à influência da frequência de pulso na qualidade da cavidade maquinada. Mantendo os restantes parâmetros operativos, o rigor geométrico e dimensional das cavidades maquinadas parece ser bastante influenciado pela frequência do pulso. Porém, a inspeção visual das imagens não é suficiente para elucidar quanto ao sentido desta influência nem permite identificar a razão do aumento do diâmetro da cavidade com a frequência. Mais, a ocorrência inesperada de textura superficial no fundo da cavidade contraria a literatura da especialidade quando é evocada a capacidade do processo em reduzir texturas e protuberâncias superficiais. A observação complementar da superfície da ferramenta, antes e após o ensaio de maquinagem (Figura 20a e Figura 20b), mostra a existência de camadas de material escuro de aspeto brilhante. Este material parece resultar do depósito dos produtos da reação química que ocorrem no meio eletrolítico sobre a textura superficial da ferramenta. A formação deste depósito adultera a geometria da ferramenta e a distribuição das linhas de potencial elétrico em redor da ferramenta. Deste modo, interessa identificar os parâmetros que controlam a formação do depósito para permitir a sua correção durante o processo de maquinagem.

Para reduzir a adesão de filmes na superfície da ferramenta, não sendo possível alterar a química do processo, torna-se necessário promover o mecanismo de deterioração dos produtos de reação e também o mecanismo de lavagem dos detritos na folga entre elétrodos. A textura superficial é também um parâmetro importante por contribuir para o mecanismo de deposição e adesão dos filmes sobre as protuberâncias e rugosidades superficiais da ferramenta. A influência destes mecanismos no desempenho do processo foi investigada através de ensaios laboratoriais orientados para a contribuição individual e independente de cada um dos parâmetros operativos. Os principais resultados do estudo exploratório são apresentados nas seções que se seguem.

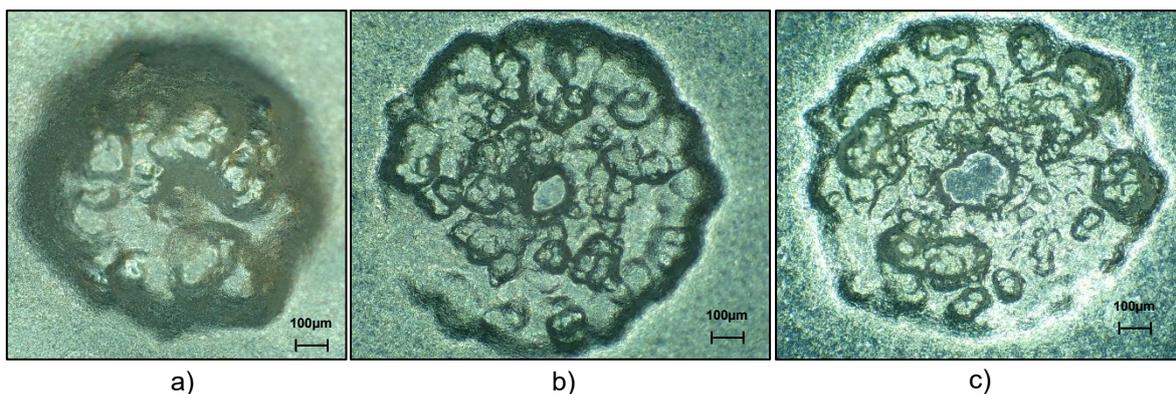


Figura 19: Cavidade obtida na análise exploratória da frequência: (a) 50 kHz; (b) 100 kHz; (c) 150 kHz ($M=0.15$ mol de H_2SO_4/L ; $V=6V$; $A=0.6A$; $d=50\%$; $T=18.5^\circ C$; $a=10\mu m/min$; circulação on).

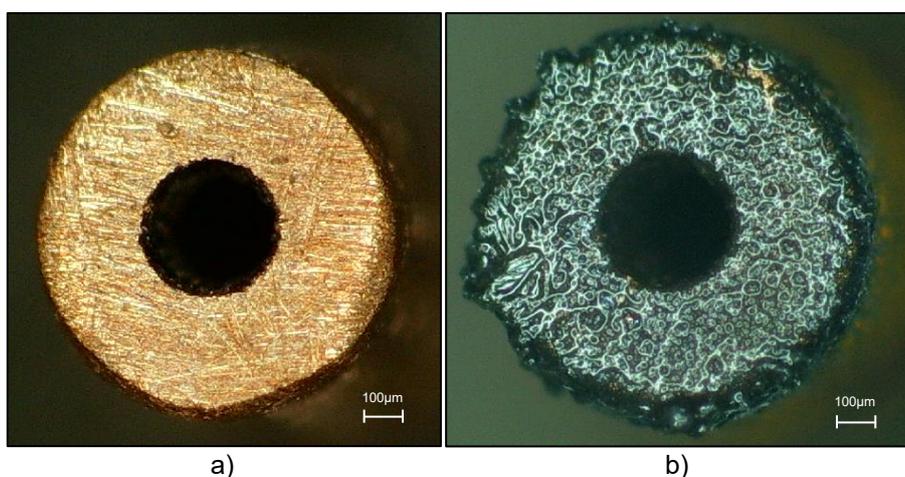


Figura 20: Topo da ferramenta como fornecido comercialmente: a) antes do ensaio; b) depois do ensaio.

4.1.1. Rugosidade superficial da ferramenta

A rugosidade superficial da ferramenta promove a existência de micro geometrias, que aumentam a área real do eléctrodo-ferramenta e facilitam a deposição dos produtos de reação. A Figura 21 mostra diferentes condições da ferramenta antes do ensaio de maquinagem. No caso da Figura 21c, a superfície do eléctrodo de cobre foi polida electroquimicamente (ligeiro boleamento das arestas provocado pelo processo electroquímico). A Figura 22 mostra a influência da condição superficial da ferramenta na qualidade das cavidades obtidas, permitindo observar que a qualidade geométrica e superficial da cavidade maquinada aumenta com o polimento da ferramenta. A alteração da geometria da cavidade resultante do boleamento das arestas deve ser considerada em separado por estar relacionada com a geometria da ferramenta. Relativamente a superfície do eléctrodo-ferramenta após realizado o ensaio observa-se uma diminuição significativa do material depositado, aparentando uma espessura menor e uma textura mais uniforme (Figura 21d) relativamente ao eléctrodo-ferramenta polido com pasta de diamante.

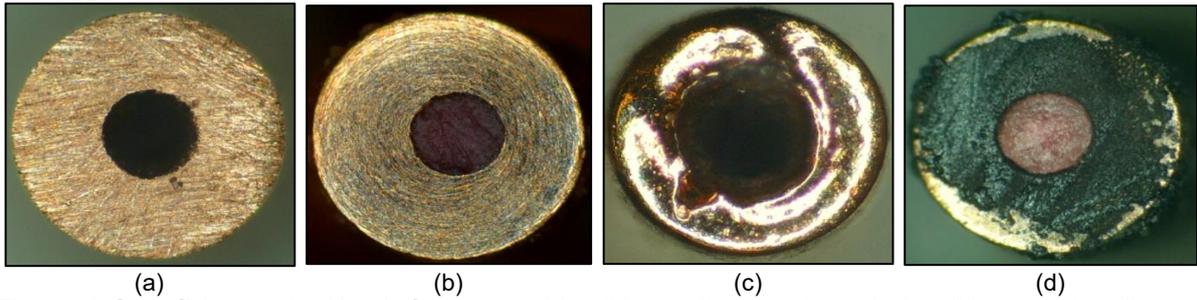


Figura 21: Superfície topo do elétrodo-ferramenta: (a) polida com lixa granulometria 150; (b) pastas de polimento; (c) polimento eletroquímico e (d) superfície do elétrodo-ferramenta após maquinagem.

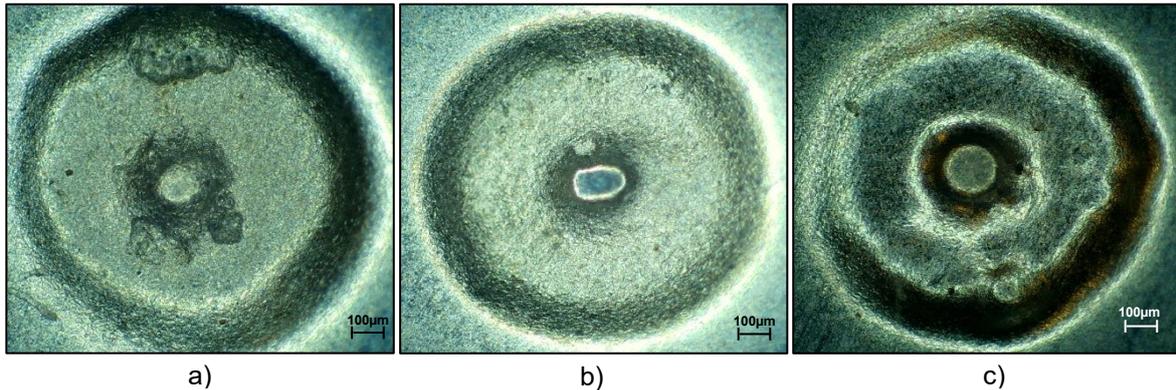


Figura 22: Cavidades maquinadas com elétrodo polido com: (a) lixa granulométrica 150; (b) pastas de polimento; (c) polimento eletroquímico ($f=150\text{kHz}$; $M=0.15\text{ mol de H}_2\text{SO}_4/\text{L}$; $V=6\text{V}$; $A=0.6\text{A}$; $d=50\%$; $T=18.5^\circ\text{C}$; $a=10\mu\text{m}/\text{min}$; circulação on).

4.1.2. Ação de lavagem por recirculação do eletrólito

A recirculação do eletrólito permite simultaneamente renovar as condições operativas na interface entre elétrodos e remover as lamas e detritos da zona de maquinagem. Na presente investigação utilizou-se um elétrodo com canal interno para circulação de eletrólito na ordem dos 300 μm de diâmetro. Apesar do diâmetro interno do elétrodo ser adequado para a circulação do eletrólito, observou-se que a folga entre elétrodos (tipicamente na gama dos 80 a 40 μm) estrangula o fluxo do líquido eletrólito. Esta limitação só pode ser ultrapassada através do aumento da pressão de injeção para valores acima dos 7 bar disponíveis na rede do laboratório. Esta limitação foi ultrapassada pela introdução da circulação de fluido eletrolítico pelo exterior, tendo sido necessário adaptar o circuito hidráulico da máquina. A passagem do eletrólito pelo exterior dos elétrodos, ainda que menos eficaz, contribui para melhorar o desempenho do processo. A utilização de uma bomba de baixo caudal e pressão de saída mostrou ser capaz de remover os produtos de reação à volta da zona de maquinagem, mas não de forma efetiva entre elétrodos, onde ocorrem os mecanismos de reação química de oxirredução. Ainda, a ação lateral do fluido sobre o elétrodo-ferramenta introduz vibrações indesejadas com o aumento do fluxo de eletrólito, e conseqüentemente a qualidade das cavidades maquinadas.

4.1.3. Ação de lavagem por imersão ultrassônica

A ação mecânica do fluxo eletrolítico arrasta as lamas e detritos, em suspensão no líquido, para fora da folga entre elétrodos. Para este mecanismo de lavagem ser eficaz é importante evitar que os produtos de reação adiram às superfícies dos elétrodos. Tendo por base esta ideia, foram aplicadas ondas de ultrassons através do eletrólito para gerar um mecanismo de cavitação nas superfícies dos elétrodos, cuja ação permite simultaneamente impedir a deposição (sucção) e promover a remoção de detritos depositados (arrancamento).

A máquina de ensaios foi modificada para permitir a utilização de um tanque de limpeza por ultrassons PS-10A da JARCOM (Figura 23). Para evitar a transmissão de vibrações indesejadas através dos elétrodos foi necessário separar a máquina do tanque de ultrassons. A máquina passou a assentar diretamente na mesa de granito evitando a passagem de vibrações através dos componentes metálicos da máquina. Nesta configuração as ondas de ultrassons são transmitidas exclusivamente através do líquido eletrolítico.



Figura 23: Limpeza assistida por ultrassons: (a) tanque de ultrassons PS-10A da JARCOM e (b) integração com a estrutura da máquina de ensaios.

A Figura 24 mostra as cavidades obtidas com limpeza assistida por ultrassons. A morfologia da cavidade apresenta melhorias significativas ao nível do rigor geométrico e dimensional comparativamente com os resultados anteriores apresentados na Figura 22. A separação estrutural entre o tanque de eletrólito e a máquina de ensaios permitiu isolar a propagação de vibrações e melhorar a qualidade superficial da cavidade (Figura 24b) comparativamente à cavidade sem isolamento (Figura 24a). A observação da superfície do elétrodo-ferramenta mostrou uma redução da espessura da camada depositada e uma maior uniformidade em resultado da maior efetividade dos mecanismos de lavagem (Figura 24c).

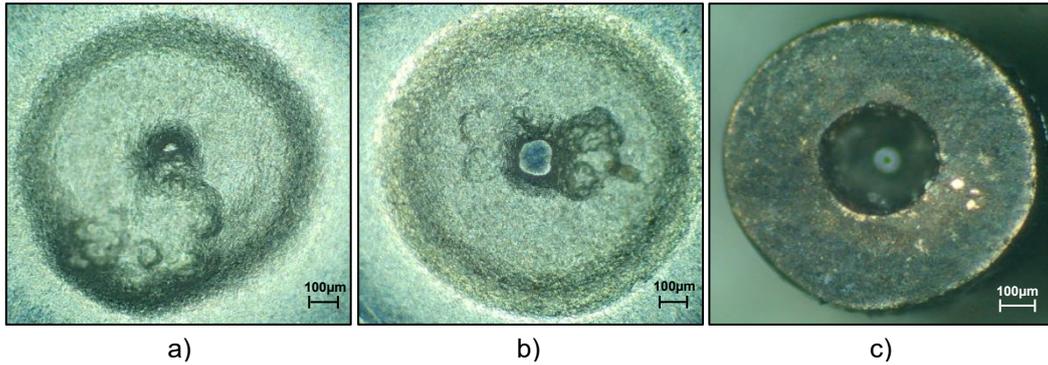


Figura 24: Cavidade maquinada: (a) sem isolamento; (b) com isolamento e (c) respectivo eletrodo pós maquinagem ($f=150\text{kHz}$; $M=0.15\text{ mol de H}_2\text{SO}_4/\text{L}$; $V=6\text{V}$; $A=0.6\text{A}$; $d=50\%$; $T=18.5^\circ\text{C}$; $a=10\mu\text{m}/\text{min}$; circulação off).

4.1.4. Concentração molar do eletrólito

O eletrólito desempenha um papel fundamental no transporte das cargas elétricas e no fornecimento de íons ao mecanismo de dissolução anódica de material. Este é caracterizado tanto pelo tipo de íon ativo como pela sua concentração molar (densidade iônica) que controla a capacidade para conduzir corrente elétrica e remover íons metálicos da peça. Para além da contribuição para o estabelecimento da pilha eletroquímica, o eletrólito tem uma ação puramente química sobre os materiais imersos na solução aquosa. Uma maior concentração de ácido promove reações químicas secundárias que dissolvem alguns dos produtos de reação diminuindo a taxa de depósitos sobre a superfície do cátodo (Leese 2016). Este mecanismo de lavagem química parece ter suporte nos resultados apresentados na Figura 25, quando o aumento da concentração de H_2SO_4 em água destilada para 0.3 mol eliminou o depósito dos produtos de reação.

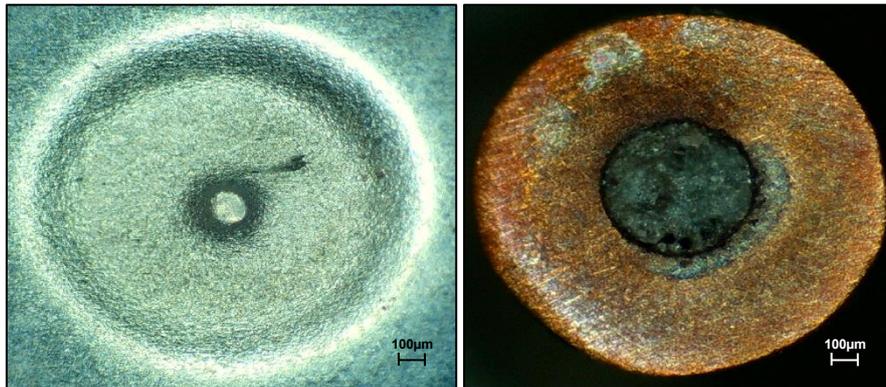


Figura 25: Cavidade e respectivo eletrodo pós-maquinagem com concentração molar de $0.3\text{ mol de H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ ($f=150\text{kHz}$; $V=6\text{V}$; $A=0.6\text{A}$; $d=50\%$; $T=18.5^\circ\text{C}$; $a=10\mu\text{m}/\text{min}$; circulação off; ultrassons on).

4.1.5. Temperatura do eletrólito

A influência da temperatura foi analisada fazendo variar a temperatura do tanque de ultrassons, tendo como principal foco a sua influência na formação de depósitos. Os resultados não mostraram influência clara da temperatura na formação de depósitos sobre a superfície do eletrodo-ferramenta, como se pode observar na Figura 26c. Porém, tem um impacto significativo no rigor geométrico das cavidades maquinadas. A geometria tende a perder rigor com o aumento da temperatura em linha com descrições presentes na literatura.

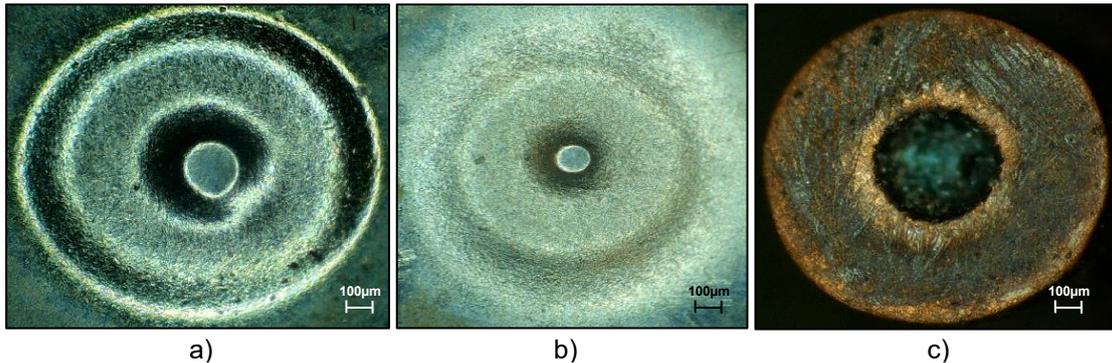


Figura 26: Maquinagem com temperatura de: (a) 35°C; (b) 50°C e (c) respectivo eletrodo pós maquinagem ($M=0.3$ mol de H_2SO_4/L ; $f=150kHz$; $V=6V$; $A=0.6A$; $d=50\%$; $a=10\mu m/min$; ultrassons off; circulação off).

4.2. Aplicação na maquinagem por fio do aço AISI 304

Os resultados da secção anterior permitiram identificar os principais parâmetros do processo e identificar a gama de valores que permite a aplicação com sucesso da maquinagem eletroquímica no fabrico de micro componentes. É possível destacar o acabamento superficial da ferramenta para manter a integridade geométrica do eletrodo-ferramenta, a aplicação de ultrassons e da concentração para facilitar a processo de lavagem e renovação das condições operativas na folga entre eletrodos, e a utilização de pulsos de alta frequência para melhorar o rigor geométrico das funcionalidades maquinadas. Importa ainda perceber a tendência do processo para o processamento de micro geometrias. A literatura indica que o desempenho da tecnologia melhora com a diminuição da geometria a maquinar. Para o presente trabalho foram estudadas várias opções para o fabrico de micro eletrodos utilizando a ablação laser, a eletroerosão e ainda a micro fresagem. Os resultados mostraram que a obtenção de micro ferramentas com superfícies polidas é por si só um desafio técnico-científico que carece de atenção e excede o âmbito da presente tese. Nestas condições, optou-se por um caso de estudo no domínio da maquinagem por fio tendo como especial vantagem a facilidade na obtenção do eletrodo-ferramenta, assim como, a ausência de desgaste da ferramenta que facilita a implementação na máquina-ferramenta. Foi utilizado um fio de cobre de um cabo multifilar utilizado em eletrónica com 20 μm de diâmetro. Este tipo de fio apresenta um excelente acabamento superficial pelas características do processo de trefilagem.

A Figura 27a apresenta a fixação desenvolvida para a ferramenta (fio), com recurso a corte por laser e torneamento. Optou-se por reposicionar o provete tendo-se desenvolvido um novo porta-

provetes (Figura 27b), recorrendo ao torneamento, à fresagem e ainda à eletroerosão por penetração. A Figura 27c mostra uma ferramenta de eletroerosão desenvolvida especificamente para o fabrico do porta-provetes. A Figura 28 apresenta a nova configuração elétrodo-ferramenta e elétrodo-peça que dá suporte à presente investigação.

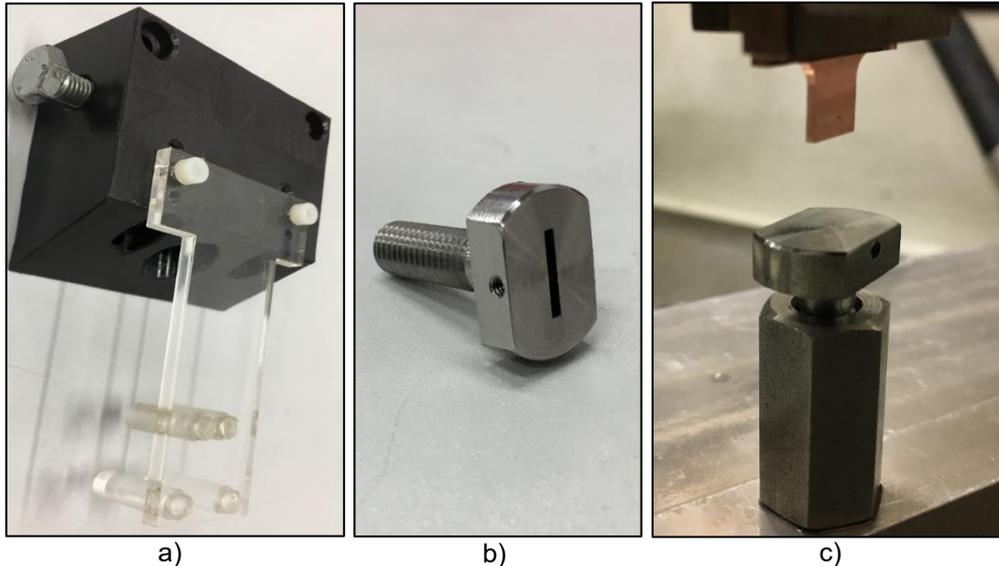


Figura 27: Desenvolvimento de (a) fixação para o elétrodo-ferramenta (fio) e (b) porta provetes com recurso a (c) eletroerosão por penetração.

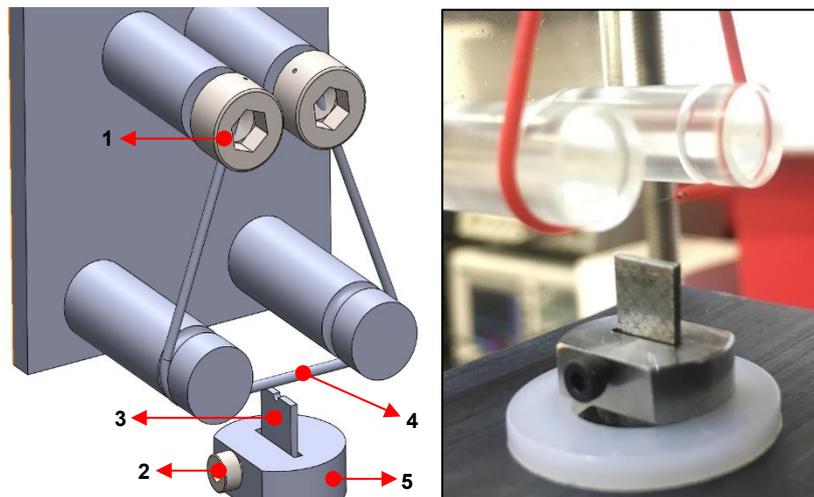


Figura 28: Configuração de montagem da nova ferramenta e do porta provetes (1 - Esticadores; 2 - Aperto do provete; 3 - Provette; 4 - Fio (ferramenta); 5 - Porta provetes).

Observou-se que a mistura de ácido sulfúrico em água destilada origina reações exotérmicas que podem aumentar a temperatura da solução aquosa até 5°C, dependendo da concentração de ácido sulfúrico misturado. Por esta razão, quando se faz a mistura da solução aquosa, é necessário normalizar a temperatura da solução para a temperatura ambiente, de forma a diminuir os erros associados à variação de temperatura não controlada. Em cada ensaio colocou-se uma nova ferramenta e fez-se o zero à máquina antes de colocar a solução. Os ensaios começaram com a ferramenta a uma altura relativa entre elétrodos de 20 µm e tiveram uma duração de aproximadamente 25 min, sendo que, após o ensaio o provete era retirado e analisado num microscópio ótico, de onde

eram retiradas imagens à mesma escala dos resultados obtidos, como apresentado na Figura 29, para serem tratadas à posteriori. As imagens obtidas no microscópio foram tratadas no *SolidWorks*, *GetData Graph Digitizer* e *MasterCam* para levantamento da morfologia dos rasgos maquinados.

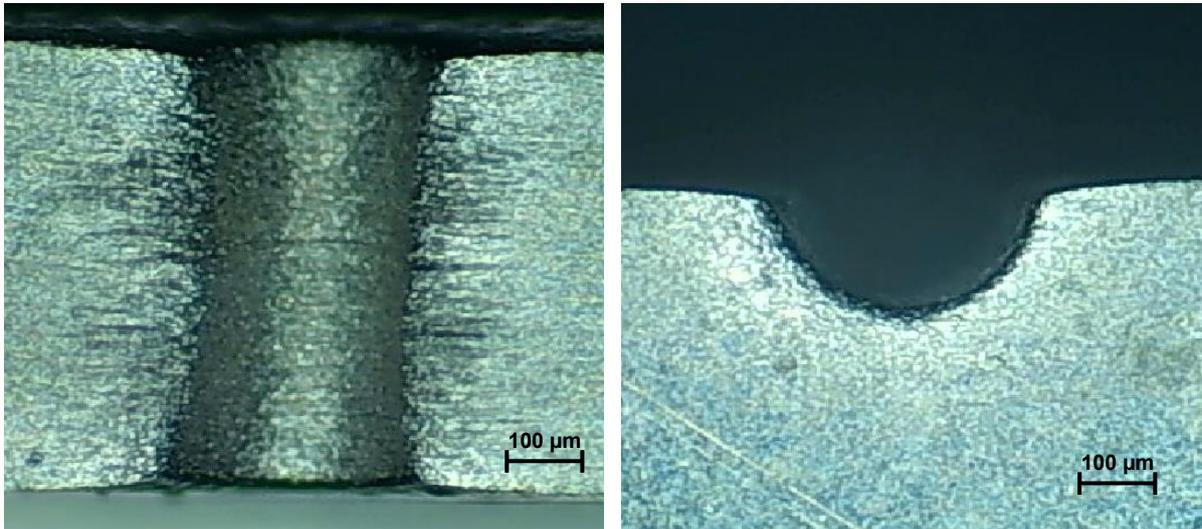


Figura 29: Vista de topo e lateral de um rasgo obtidos por μ ECM com uma ferramenta de 20 μ m.

4.2.1. Evolução do perfil dos rasgos com a frequência

Com os dados tratados, desenvolveram-se os gráficos apresentados nas Figura 30, 31 e 32, que representam os perfis maquinados por μ ECM para diferentes frequências (5, 50 e 500 kHz), com diferentes concentrações moleculares (0.1, 0.3 e 0.5 mol de H_2SO_4/L). A análise desenvolvida nos seguintes capítulos tem como base a geometria apresentada nos seguintes gráficos.

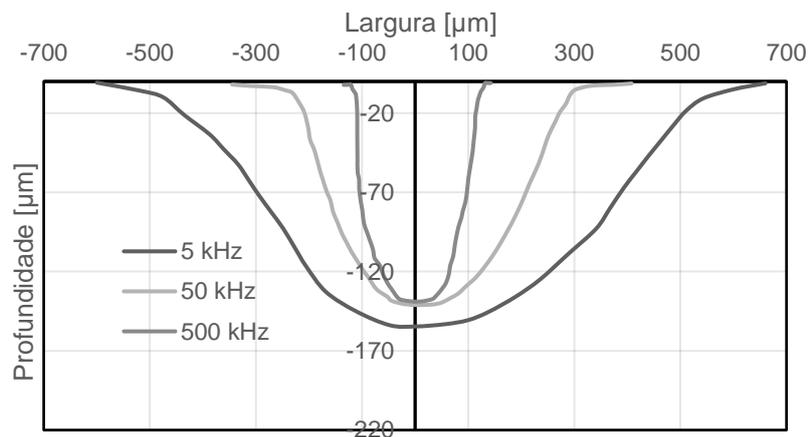


Figura 30: Evolução do perfil dos rasgos (μ m) com a frequência (5, 50 e 500 kHz) para 0.1 mol de H_2SO_4/L ($A=0.3A$; $d=40\%$; $T= 19^\circ C$; *inversor on*; *ultrassons off*; *circulação off*; $a=5 \mu\text{m}/\text{min}$; $gap=20 \mu\text{m}$).

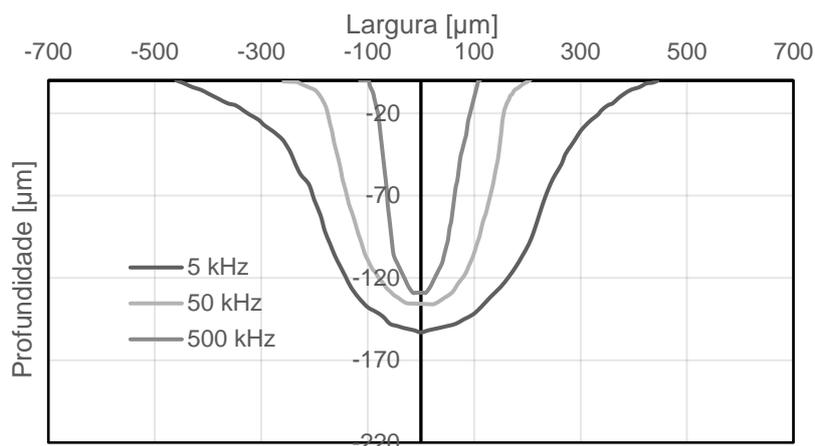


Figura 31: Evolução do perfil dos rasgos (μm) com a frequência (5, 50 e 500 kHz) para 0.3 mol de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ ($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T= 19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5 \mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20 \mu\text{m}$).

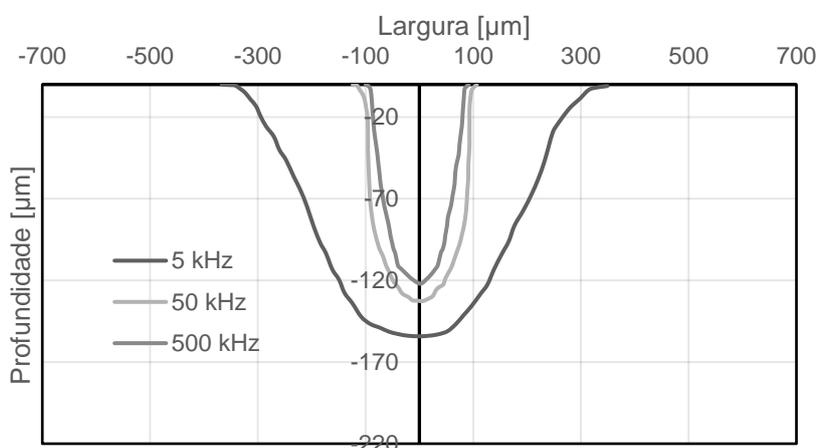


Figura 32: Evolução do perfil dos rasgos (μm) com a frequência (5, 50 e 500 kHz) para 0.5 mol de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ ($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T= 19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5 \mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20 \mu\text{m}$).

4.2.2. Evolução da folga lateral e frontal com a frequência

Nas Figura 33, 34 e 35, observa-se, respetivamente, a folga lateral, frontal e raio de entrada em função da frequência para diferentes concentrações moleculares de ácido sulfúrico. O primeiro aspeto evidenciado reside no facto da folga lateral, folga frontal e o raio de entrada diminuírem com o aumento da frequência, sendo o fenómeno explicado com base na dupla camada eletrolítica. Quando um metal é colocado numa solução eletrolítica, estabelece-se uma diferença de potencial em equilíbrio entre o metal e a solução. Esta diferença de potencial surge da transferência de iões metálicos para a solução em simultâneo com a libertação de iões da própria solução. O equilíbrio é atingido quando os eletrões que deixaram o metal contribuem para a formação de uma camada de iões, cuja carga tem valor igual, mas sinal contrário aos catiões na interface da solução. Estas cargas, positivas e negativas, formam a dupla camada eletroquímica (McGeough 1974).

Quando se aumenta a frequência, consequentemente diminuindo o tempo de pulso, a dupla camada eletrolítica tem menos tempo para recuperar no tempo de pulso “on” após a descarga no tempo de pulso “off” e, desta forma, apresenta significativamente menores espessuras, podendo ser

carregada apenas na escala dos micrómetros ou nanómetros. Esta redução de escala resulta no confinamento das reações mais próximas do eletrodo. A diminuição do *duty cycle* tem também bastante influência neste fenómeno, visto que para além da diminuição do tempo de pulso “on”, existe um consequente aumento do tempo de pulso “off” que disponibiliza mais tempo para a dupla camada eletroquímica descarregar. A redução das folgas e da geometria dos rasgos maquinados com o aumento da frequência vem de acordo com diversos outros estudos desenvolvidos (Zhi-Wen et al. 2012)(Rajurkar et al. 1993). Ainda relativamente à Figura 33 e 34, verifica-se que a folga frontal é inferior à folga lateral para qualquer frequência que se utilize, isto deve-se ao facto de existir uma dispersão crescente de corrente elétrica à medida que se aprofunda a maquinação.

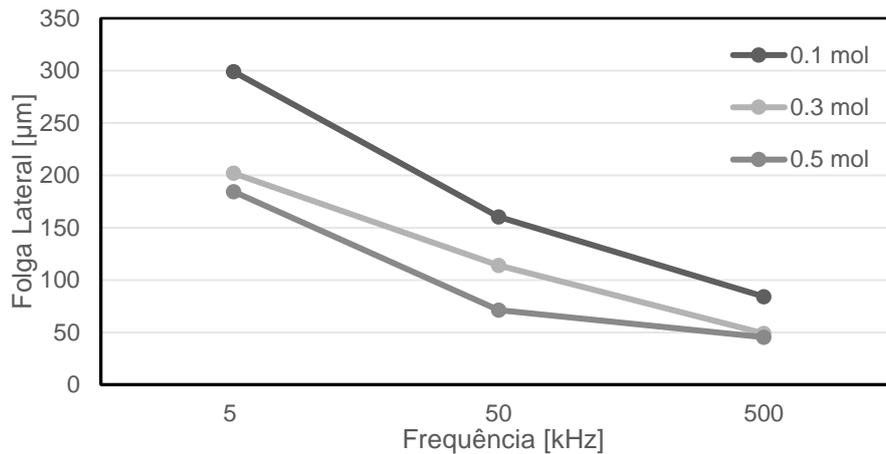


Figura 33: Evolução da folga lateral (μm) em função da frequência (kHz) para diferentes concentrações moleculares (0.1, 0.3 e 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$)($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T= 19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5 \mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20 \mu\text{m}$).

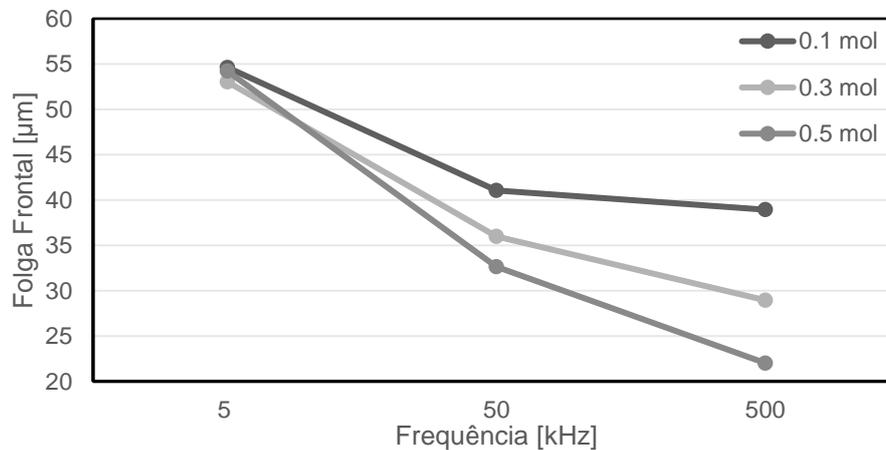


Figura 34: Evolução da folga frontal (μm) em função da frequência (kHz) para diferentes concentrações moleculares (0.1, 0.3 e 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$)($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T= 19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5 \mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20 \mu\text{m}$).

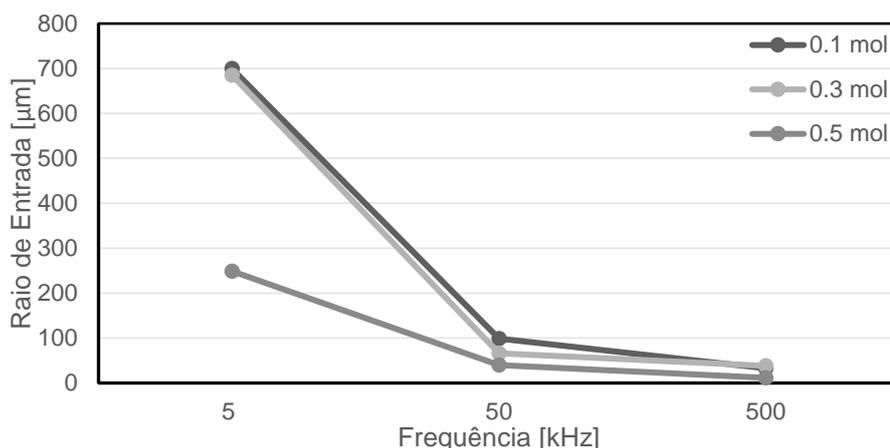


Figura 35: Evolução do raio de entrada (μm) em função da frequência (kHz) para diferentes concentrações moleculares (0.1, 0.3 e 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$) ($A=0.3\text{A}$; $d=40\%$; $T=19^\circ\text{C}$; inversor on; ultrassons off; circulação off; $a=5\ \mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20\ \mu\text{m}$).

4.2.3. Evolução da qualidade superficial com a concentração

Nesta segunda fase, o objetivo primordial era a análise da qualidade superficial das superfícies que haviam sido maquinadas. Assim, mantendo a frequência constante (50 kHz), analisaram-se superficialmente os provetes para diferentes concentrações molares (0.1, 0.3 e 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$), representado na Figura 36.

A geometria tende a ser mais precisa com o aumento da frequência, mas observando a geometria para a mesma frequência verifica-se um comportamento semelhante com o aumento concentração molecular. Para a mesma frequência, não existem variações significativas de folga lateral e frontal, com o aumento da concentração molecular. A explicação para a semelhança geométrica, deve-se ao facto de a corrente ter sido mantida constante.

Ao aumentar a concentração molecular do meio, a densidade de iões presente no mesmo aumenta, diminuindo a sua resistividade. Tendo como base investigações analisadas na literatura é método comum manter a tensão constante, consequentemente aumentando a corrente devido à diminuição da resistividade do meio. O aumento da corrente leva ao aumento da TRM (J. Ferreira 2013)(Ribeiro 2014)(Datta et al. 1983)(Bhattacharyya et al. 2003), pelo que, ao manter a tensão constante se obtêm geometrias significativamente diferentes. Ora, para a obtenção de geometrias semelhantes, optou-se por se manter a corrente constante, com uma densidade de corrente de aproximadamente $1,5\ \text{A}/\text{mm}^2$, ao longo dos ensaios, não existindo variações significativas na TRM e consequentemente nas geometrias obtidas, tornando possível a observação empírica da qualidade superficial dos rasgos obtidos com a variação da concentração molar do eletrólito, como se observa na Figura 36.

De notar que a análise foi desenvolvida para 50 kHz de frequência, sendo esta frequência a que apresentava geometrias dos rasgos mais semelhantes, com base na Figura 33, 34 e 35. A avaliação dos rasgos relativamente à qualidade superficial que estes apresentam, infelizmente, teve de ser feita qualitativamente, uma vez que, um rugosímetro comum não tem capacidade de medir a rugosidade num rasgo de 200 μm . Para além do rugosímetro, fez-se também uma microscopia confocal, também não obtendo sucesso na medição da rugosidade.

Ainda assim, avaliando qualitativamente as superfícies representadas na Figura 36, é possível concluir que a qualidade superficial dos rasgos tende a aumentar à medida que a concentração molecular aumenta, como se pode ver na imagem representativa de 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$, que se encontra bastante espelhada comparativamente às restantes, indo de acordo com afirmações referidas por outros autores na literatura (J. Ferreira 2013)(Ribeiro 2014)(Leese 2016), onde referem que aumentos de concentração molecular tendem a melhorar significativamente a rugosidade no interior da cratera e assim sucessivamente, a qualidade superficial da mesma.

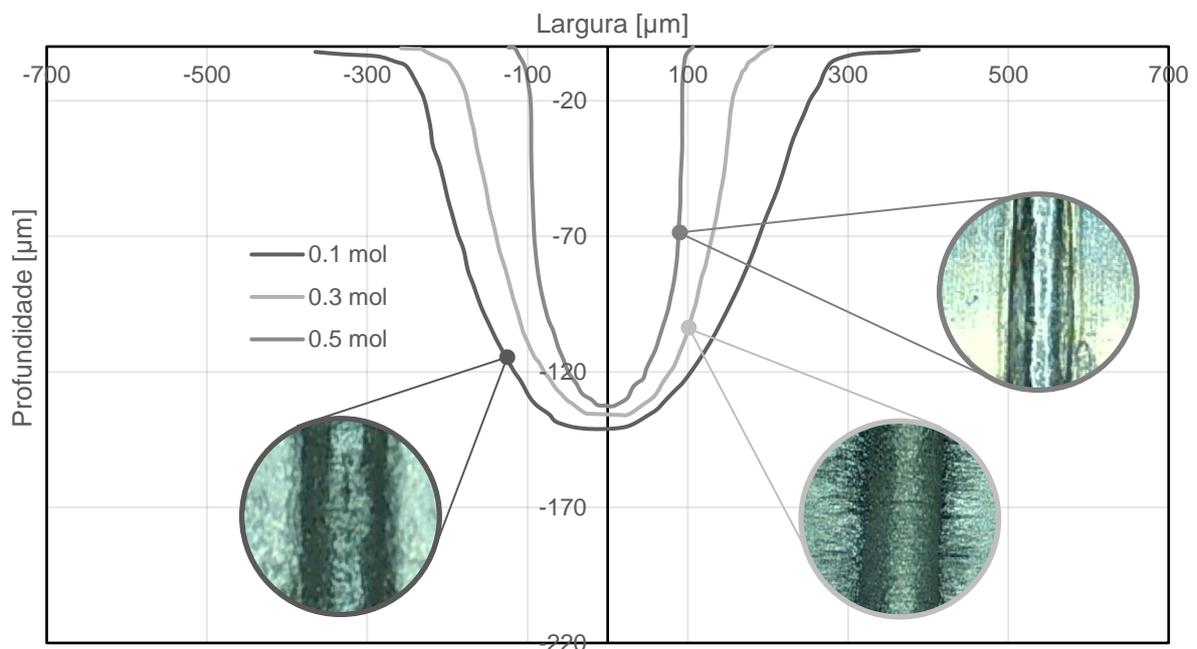


Figura 36: Evolução do perfil do rasgo (μm) com frequência de 50 kHz para diferentes concentrações moleculares (0.1, 0.3 e 0.5 mol $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$) e a respetiva análise à qualidade superficial ($A=0.3A$; $d=40\%$; $T= 19^\circ\text{C}$; *inversor on*; *ultrasons off*; *circulação off*; $a=5 \mu\text{m}/\text{min}$; $\text{gap}=20 \mu\text{m}$).

5. Conclusão e perspectivas de trabalhos futuros

A presente investigação procurou contribuir duplamente para o conhecimento existente sobre a tecnologia de μ ECM. Com o objetivo de estudar parâmetros operativos da tecnologia desenvolveu-se, numa primeira fase, um aparato experimental dedicado, de simples maneabilidade e com capacidade para serem controlados os diversos parâmetros operativos do processo. Foi desenvolvida a estrutura (resistente à corrosão), os circuitos de circulação de solução e ainda o circuito de potência e controlo do processo, terminando com o desenvolvimento das ferramentas de fixação dos elétrodos necessárias para a realização dos ensaios.

Na fase exploratória, que consistiu em efetuar diversos ensaios para verificação funcional do que havia sido desenvolvido na primeira fase desta investigação, foram analisados os parâmetros de funcionamento do processo e a lavagem, utilizando um eletrodo de cobre de 1mm e provetes de AISI 304. Quanto à lavagem do processo, desde logo se verificou que esta estaria a ser feita de forma deficiente, pelo que foi necessário estudar a rugosidade da ferramenta, a circulação do eletrólito, o banho de ultrassons, a concentração molar e ainda a temperatura do eletrólito. A circulação de eletrólito na zona de maquinagem não se encontrava em condições ideais de funcionamento, pelo que se procedeu à introdução de um banho de ultrassons na estrutura da máquina de ensaios, onde se obtiveram melhorias na lavagem do processo que, por outro lado, acrescentava vibrações indesejadas na zona de maquinagem. A rugosidade da ferramenta revelou ser uma questão preponderante para a lavagem do processo, uma vez que, as protuberâncias que a ferramenta apresentava (elevada rugosidade) aumentava a adesão de produtos de maquinagem na superfície do eletrodo, pelo que era necessária uma ferramenta polida (baixa rugosidade). Analisou-se também a influência da concentração molar e da temperatura da solução na lavagem. À medida que se aumenta a concentração molar observam-se melhorias na lavagem do processo devido ao aumento da concentração de iões no eletrólito. Por outro lado, na análise da influência da temperatura não foram verificadas melhorias relativamente ao estado de superfície do eletrodo pós ensaio.

Na análise científica do processo, procedeu-se à alteração de alguns aspetos estruturais tendo como base ilações retiradas da análise exploratória. Foi utilizada uma ferramenta polida de cobre com um diâmetro de 20 μ m e colocou-se de lado a utilização de ultrassons para não existirem vibrações indesejadas no processo. Com o plano de ensaios estruturado, que iria ser a base para a análise científica, procedeu-se ao desenvolvimento dos respetivos ensaios, onde foram desenvolvidos ensaios em provetes de AISI 304. Variou-se a frequência (5, 50 e 500 kHz) e a concentração molecular (0.1, 0.3, 0.5 mol de H₂SO₄/L), recolhendo em cada ensaio os diversos parâmetros operativos para proceder a uma análise aprofundada dos mesmos, assim como, os resultados obtidos de cada cavidade. Da análise destas variáveis, observou-se uma clara diminuição da dimensão dos rasgos aquando o aumento da frequência, tanto em termos de profundidade como em esbeltez, ou seja, o rigor geométrico melhora à medida que se aumenta a frequência. Relativamente ao acabamento superficial, desenvolveu-se uma análise qualitativa aos rasgos obtidos nos ensaios, chegando à conclusão de que, o aumento da concentração de solução, enquanto se mantém a corrente e consequentemente a TRM

constante, melhora significativamente o acabamento da superfície maquinada. Em suma, a investigação desenvolvida contribuiu para uma melhor compreensão de parâmetros e condições fundamentais do processo, atestando a funcionalidade do aparato experimental desenvolvido e variando alguns parâmetros operacionais de μ ECM.

Ainda que a investigação desenvolvida tenha contribuído para uma melhor compreensão e caracterização do processo de μ ECM, na eventualidade de continuação do trabalho desenvolvido até agora, seria interessante aprofundar diversas áreas da tecnologia. Estruturalmente, seria importante a integração da máquina numa *hotte*, de forma a isolar totalmente a zona onde está a ser efetuada a maquinagem, devido ao ambiente corrosivo característico. Por outro lado, seria interessante o estudo da influência da coluna de água e do posicionamento dos elétrodos (horizontal e vertical) na lavagem do processo. Tendo em conta as ferramentas utilizadas, ainda que a diminuição de duas ordens de grandeza do ensaio exploratório para o científico tenha sido um fator muito importante no desenvolvimento da investigação, seria interessante a aplicação de um mecanismo de avanço automático da ferramenta em função da TRM ou até, de avanço e recuo para se proceder à lavagem. Quando se fala em parametrização do processo, como já referido, a lacuna de conhecimentos que existe ainda é considerável, fazendo com que esta tecnologia não tenha o impacto devido na indústria. Os estudos a realizar podem e devem incidir sobre a correta parametrização do processo aplicando a diversos materiais para as ferramentas e provetes, assim como diferentes soluções eletrolíticas. Sem dúvida que o grande potencial desta tecnologia está dependente de uma compreensão profunda dos fenómenos de dissolução anódica sob as condições típicas de uma operação de μ ECM e da consequente capacidade de prever a sua evolução, de modo a permitir simplificar a implementação da tecnologia num ambiente industrial.

6. Bibliografia

- Bhattacharyya, B., S. Mitra, e A.K. Boro. 2002. «Electrochemical micro-machining : new possibilities for micro-manufacturing». *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, n. 18: 283–89.
- Bhattacharyya, B., e J. Munda. 2003. «Experimental investigation on the influence of electrochemical machining parameters on machining rate and accuracy in micromachining domain». *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (13): 1301–10.
- Bhattacharyya, B., J. Munda, e M. Malapati. 2004. «Advancement in electrochemical micro-machining». *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44 (15): 1577–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.06.006>.
- Cagnon, Laurent, V. Kirchner, M. Kock, R. Schuster, Gerhard Ertl, W. Thomas Gmelin, e Heinz Kück. 2003. «Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultrashort Voltage Pulses». *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 217 (4): 299–313. <https://doi.org/10.1524/zpch.217.4.299.20383>.
- Datta, M., e D. Landolt. 1983. «Electrochemical saw using pulsating voltage». *Journal of Applied Electrochemistry* 13 (6): 795–802.
- Davydov, A. D., V. M. Volgin, e V. V. Lyubimov. 2004. «Electrochemical machining of metals: Fundamentals of electrochemical shaping». *Russian Journal of Electrochemistry* 40 (12): 1230–65. <https://doi.org/10.1007/s11175-005-0045-8>.
- El-Hofy, Hassan Abdel-Gawad. 2005. *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. 1.^a ed. McGraw Hill Co.
- Ferreira, José. 2013. «Influência dos Parâmetros Operativos no Processamento Eletroquímico de Metais». Lisbon: Instituto Superior Técnico.
- Ferreira, Mário. 2001. «Degradação e protecção de materiais». *Sebenta da disciplina*.
- Han, Min Seop, Byung Kwon Min, e Sang Jo Lee. 2009. «Geometric improvement of electrochemical discharge micro-drilling using an ultrasonic-vibrated electrolyte». *Journal of Micromechanics and Microengineering* 19 (6). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/6/065004>.
- Hansen, Hans Nørgaard, Yang Zhang, e Aminul Islam. 2017. «Tolerances in micro manufacturing». *Wcmnm*, 2–5.
- Helmi A. Youssef, e Hassan El-Hofy. 2008. *Machining technology: machine tools and operations*. 1.^a ed. Florida: CRC Press; Taylor & Francis.
- Jo, Chan Hee, Bo Hyun Kim, e Chong Nam Chu. 2009. «Micro electrochemical machining for complex internal micro features». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (1): 181–84. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.072>.

- Kim, B. H., C. W. Na, Y. S. Lee, D. K. Choi, e C. N. Chu. 2005. «Micro Electrochemical Machining of 3D Micro Structure Using Dilute Sulfuric Acid». *CIRP Annals* 54 (1): 191–94. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60081-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60081-X).
- Kock, M., V. Kirchner, e R. Schuster. 2003. «Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses-a versatile method with lithographical precision». *Electrochimica Acta* 48 (20–22): 3213–19. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00374-8](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00374-8).
- Kozak, Jerzy, Kamlakar P. Rajurkar, e Yogesh Makkar. 2004. «Selected problems of micro-electrochemical machining». *Journal of Materials Processing Technology* 149 (1–3): 426–31. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.031>.
- Landolt, D., P. F. Chauvy, e O. Zinger. 2003. «Electrochemical micromachining, polishing and surface structuring of metals: Fundamental aspects and new developments». *Electrochimica Acta* 48 (20–22): 3185–3201. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00368-2](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00368-2).
- Leese, Rebeca Jane. 2016. «Electrochemical machining - new machining targets and adaptations with suitability for micromanufacturing». *Brunel University London*. London.
- McGeough, J.A. 1974. *Advanced Methods of Machining*. London: Springer Netherlands.
- Mount, A. R., D. Clifton, P. Howarth, e A. Sherlock. 2003. «An integrated strategy for materials characterisation and process simulation in electrochemical machining». *Journal of Materials Processing Technology* 138 (1–3): 449–54. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00115-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00115-8).
- Neto, João Cirilo da Silva, Evaldo Malaquias da Silva, e Marcio Bacci da Silva. 2006. «Intervening variables in electrochemical machining». *Journal of Materials Processing Technology* 179 (1–3): 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.105>.
- Park, B. J., B. H. Kim, e C. N. Chu. 2006. «The effects of tool electrode size on characteristics of micro electrochemical machining». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (1): 197–200. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60397-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60397-7).
- Park, Min Soo, e Chong Nam Chu. 2007. «Micro-electrochemical machining using multiple tool electrodes». *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17 (8): 1451–57. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/8/006>.
- Rajurkar, K. P., D. Zhu, J. A. McGeough, J. Kozak, e A. De Silva. 1999. «New developments in electrochemical machining». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 48 (2): 567–79. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63235-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63235-1).
- Rajurkar, K.P., Jerzy Kozak, B. Wei, e J.A. Mcgeough. 1993. «tudy of Pulse Electrochemical Machining Characteristics». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 42 (1): 231–34.
- Rajurkar, K.P., D. Zhu, e B. Wei. 2007. «Minimization of Machining Allowance in Electrochemical Machining». *CIRP Annals* 47 (1): 165–68. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62809-1](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62809-1).

- Ribeiro, Gabriel Rosa. 2014. «Análise Compreensiva do Proecssso de Maquinagem Eletroquímica». Instituto Superior Técnico.
- Rosa, Pedro. 2008. «Processos Substractivos». *Manual de Micromanufactura*.
- Rosa, Pedro. 2013. «Electrochemical machining». Em *Apontamentos da UC Micro Fabrico*.
- Saxena, Krishna Kumar, Jun Qian, e Dominiek Reynaerts. 2018. «A review on process capabilities of electrochemical micromachining and its hybrid variants». *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 127 (January): 28–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.01.004>.
- Silva, A. K.M. De, H. S.J. Altena, e J. A. McGeough. 2003. «Influence of electrolyte concentration on copying accuracy of precision-ECM». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52 (1): 165–68. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60556-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60556-3).
- Silva, A.K.M. De, H.S.J. Altena, e J.A. McGeough. 2007. «Precision ECM by Process Characteristic Modelling». *CIRP Annals* 49 (1): 151–55. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62917-5](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62917-5).
- Skrabalak, G, R Žurek, M Zybura, e A Ruszaj. 2003. «Some aspects of the electrochemical machining process supported by electrode ultrasonic vibrations optimization». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 217 (10): 1365–71. <https://doi.org/10.1243/095440503322617135>.
- Swain, A. K. 2010. «Preparation of Coated Microtools for Electrochemical Machining Applications». *MS Thesis, IMSE, University of Nebraska-Lincoln*.
- T. Masuzawa. 2000. «State of the Art of Micromachining». *CIRP Annals* 49 (2): 473–88. <https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1919.02180090021003>.
- Tiwari, Abhishek, Amitava Mandal, e Kaushik Kumar. 2015. «Optimization of Overcut in Electrochemical Machining for EN 19 Tool Steel Using Taguchi Approach». *Materials Today: Proceedings* 2 (4–5): 2337–45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.293>.
- Uhlmann, E., B. Mullany, D. Biermann, K. P. Rajurkar, T. Hausotte, e E. Brinksmeier. 2016. «Process chains for high-precision components with micro-scale features». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2): 549–72. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.001>.
- Xu, Zhengyang, Xuezhen Chen, Zesheng Zhou, Peng Qin, e Di Zhu. 2016. «Electrochemical Machining of High-temperature Titanium Alloy Ti60». *Procedia CIRP* 42 (Isem Xviii): 125–30. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.206>.
- Zhi-Wen, Fan, Hourng Lih-Wu, e Lin Ming-Yuan. 2012. «Experimental investigation on the influence of electrochemical micro-drilling by short pulsed voltage». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 61 (9–12): 957–966.

(Página intencionalmente deixada em branco)

7. Anexos

Anexo I – Leis de Faraday

As leis que governam os fenômenos de eletrólise e constituem, por isso, a base do processo de ECM, foram estabelecidas por Faraday e dizem o seguinte:

i) A quantidade de qualquer substância removida ou depositada é diretamente proporcional à quantidade de carga que passa pela célula eletroquímica:

$$m \propto Q \quad (7.1)$$

ii) A quantidade de substância removida ou depositada pela mesma quantidade de carga é proporcional ao seu equivalente eletroquímico, isto é, à razão entre o seu peso atômico e a sua valência:

$$m \propto \frac{M}{n} \quad (7.2)$$

Combinando estas leis, obtém-se a equação:

$$m = \frac{M * I * t}{n * F} \quad (7.3)$$

Tendo em conta a Equação 7.3 onde m é a massa dissolvida ou depositada no eletrodo por uma corrente I durante um tempo t . Os íons da reação têm um peso atômico M e uma valência n , sendo $\frac{M}{n}$ o equivalente electroquímico da substância, F a constante de Faraday ($F = 96500 \text{ C}$) e, por fim, Q a quantidade de carga elétrica. Esta última expressão pode ser reescrita para obter a taxa de remoção de material teórica (TRMT) de um elemento:

$$\dot{m} = \frac{M * I}{n * F} \quad (7.4)$$

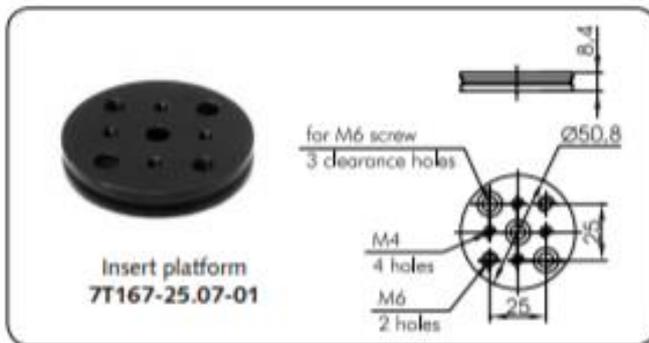
Anexo II – Carro móvil 8MT167-25L

Motorized Translation Stage



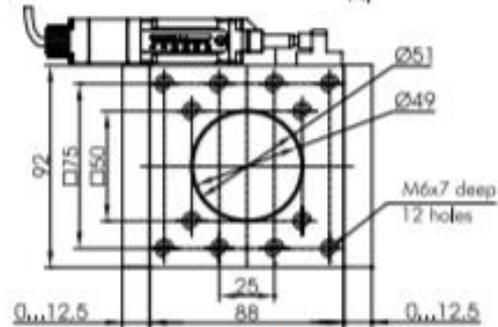
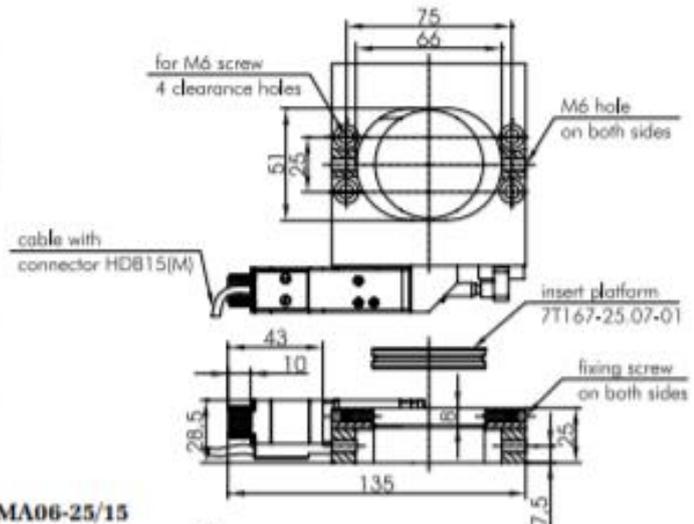
8MT167CMA-25

8MT167CMA-25 - 7T167-25 with actuator 8CMA06-25/15



Insert platform
7T167-25.07-01

8MT167CMA-25

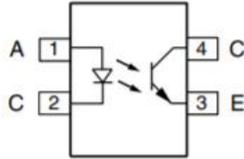
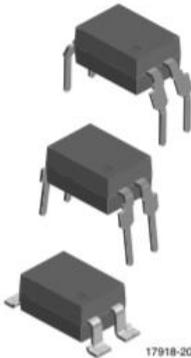


8MT167CMA-25

SPECIFICATIONS	8MT167-25	8MT167-25BS1	8MT167-25LS	8MT167CMA-25
Travel range, mm	25	25	25	25
Resolution in full step, μm	1.25	5	1.25	1.25
Resolution in 1/8 step, μm	0.156	0.625	0.156	0.156
Ball screw pitch, mm	-	1	-	-
Lead screw pitch, mm	0.25	-	0.25	0.25
Repeatability, μm	1	1.5	1	1
Maximum speed, mm/s	3	25	6	5
Maximum load capacity				
Horizontal, kg	7	30	30	6
Vertical, kg	2	7	7	0.5
Limit switches		2 pc mechanical		-
Type of actuator	-	-	-	8CMA06-25/15
Cable		1.6 m length		1.2m length
Motor connector		HDB15(M)		
Stepper motor		28		-
Weight, kg	0.8	0.8	0.8	0.6

Anexo III - Optoacoplador SFH617A

Optocoupler, Phototransistor Output, High Reliability, 5300 V_{RMS}, 110 °C Rated



DESCRIPTION

The 110 °C rated SFH617A (DIP) feature a high current transfer ratio, low coupling capacitance and high isolation voltage. These couplers have a GaAs infrared diode emitter, which is optically coupled to a silicon planar phototransistor detector, and is incorporated in a plastic DIP-4 package.

The coupling devices are designed for signal transmission between two electrically separated circuits.

The couplers are end-stackable with 2.54 mm spacing.

Creepage and clearance distances of > 8.0 mm are achieved with option 6.

FEATURES

- Operating temperature from -55 °C to +110 °C
- Good CTR linearity depending on forward current
- Isolation test voltage, 5300 V_{RMS}
- High collector emitter voltage, V_{CEO} = 70 V
- Low saturation voltage
- Fast switching times
- Low CTR degradation
- Temperature stable
- Low coupling capacitance
- End stackable, 0.100" (2.54 mm) spacing
- High common mode interference immunity
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



RoHS
COMPLIANT
HALOGEN
FREE
GREEN
(S-2008)

APPLICATIONS

- AC adapter
- SMPS
- PLC
- Factory automation
- Game consoles

AGENCY APPROVALS

The safety application model number covering all products in this datasheet is SFH617A. This model number should be used when consulting safety agency documents.

- UL1577, file no. E52744
- cUL tested to CSA 22.2 bulletin 5A
- DIN EN 60747-5-5 (VDE 0884-5) available with option 1
- BSI IEC 60950; IEC 60065
- FIMKO
- CQC

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T _{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT				
Reverse voltage		V _R	6	V
Forward current		I _F	60	mA
Forward surge current	t _p ≤ 10 μs	I _{FSM}	2.5	A
LED power dissipation	at 25 °C	P _{diss}	70	mW
OUTPUT				
Collector emitter voltage		V _{CEO}	70	V
Emitter collector voltage		V _{ECCO}	7	V
Collector current		I _C	50	mA
Collector peak current	t _p /T = 0.5, t _p ≤ 10 ms	I _{CM}	100	mA
Output power dissipation	at 25 °C	P _{diss}	150	mW
COUPLER				
Operation temperature		T _{amb}	- 55 to + 110	°C
Storage temperature range		T _{stg}	- 55 to + 150	°C
Soldering temperature ⁽¹⁾	2 mm from case, ≤ 10 s	T _{slid}	260	°C

Notes

- Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of this document. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods of the time can adversely affect reliability.

⁽¹⁾ Refer to reflow profile for soldering conditions for surface mounted devices (SMD). Refer to wave profile for soldering conditions for through hole devices (DIP).

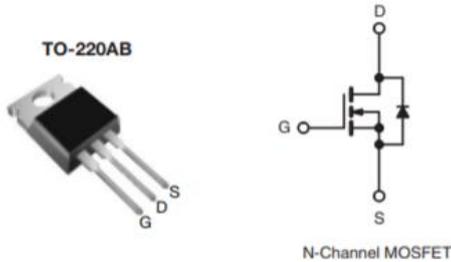
Anexo IV – MOSFET IRF730

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY	
V_{DS} (V)	400
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10\text{ V}$ 1.0
Q_g (Max.) (nC)	38
Q_{gs} (nC)	5.7
Q_{gd} (nC)	22
Configuration	Single

FEATURES

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC



DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)					
PARAMETER		SYMBOL	LIMIT	UNIT	
Drain-Source Voltage		V_{DS}	400	V	
Gate-Source Voltage		V_{GS}	± 20		
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	I_D	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	5.5	A
			$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	3.5	
Pulsed Drain Current ^a		I_{DM}	22		
Linear Derating Factor			0.59	$\text{W}/^\circ\text{C}$	
Single Pulse Avalanche Energy ^b		E_{AS}	290	mJ	
Repetitive Avalanche Current ^a		I_{AR}	5.5	A	
Repetitive Avalanche Energy ^a		E_{AR}	7.4	mJ	
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	P_D	74	W	
Peak Diode Recovery dV/dt^c		dV/dt	4.0	V/ns	
Operating Junction and Storage Temperature Range		T_J, T_{stg}	- 55 to + 150	$^\circ\text{C}$	
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 ^d		
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10	lbf · in	
			1.1	N · m	

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DD} = 50\text{ V}$, starting $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $L = 16\text{ mH}$, $R_g = 25\text{ }\Omega$, $I_{AS} = 5.5\text{ A}$ (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 5.5\text{ A}$, $dI/dt \leq 90\text{ A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 150\text{ }^\circ\text{C}$.
- 1.6 mm from case.

Anexo V – Procedimento de utilização da máquina

Após ligar o aparato experimental o procedimento de utilização tem os seguintes passos:

1. Preparar a ferramenta para o ensaio;
2. Preparar a solução eletrolítica com a concentração pretendida;
Nota: Na mistura de ácido sulfúrico com água destilada ocorrem reações exotérmicas entre os dois e por essa razão é necessário estabilizar a temperatura da solução eletrolítica após a mistura.
3. Colocar o provete no porta-provetes;
4. Colocar a estrutura da máquina no interior do tanque;
5. Antes de colocar a solução no tanque é necessário efetuar o zero à máquina, para isso, liga-se o interruptor do zero;
6. Movimentar cabeçote móvel até os elétrodos se tocarem e conseqüentemente o LED do zero ligar;
7. Com os elétrodos em contacto (zero) mover o relógio comparador até à respetiva posição.
8. Afastar os elétrodos com recurso ao controlo manual do motor, até um mínimo de 2mm de distância;
9. Colocar a solução eletrolítica no interior do tanque;
10. Colocar o valor de frequência pretendido no gerador de sinais;
11. Colocar o valor máximo de corrente na fonte de potência;
12. Com recurso aos interruptores de controlo ligar o processo e, caso pretendido, o inversor;
13. Ajustar, consoante os parâmetros pretendidos, o sinal representado no osciloscópio com recurso ao gerador de sinais e à fonte de potência;
14. Aproximar os elétrodos até ao valor inicial pretendido para o ensaio;
15. Desenvolver o ensaio com os parâmetros de avanço pretendidos;
16. Desligar o processo e afastar os elétrodos;
17. Retirar e limpar a estrutura do interior do tanque;
18. Retirar o provete para análise.
19. Desligar a máquina ou começar do primeiro passo, caso se queira repetir o ensaio.

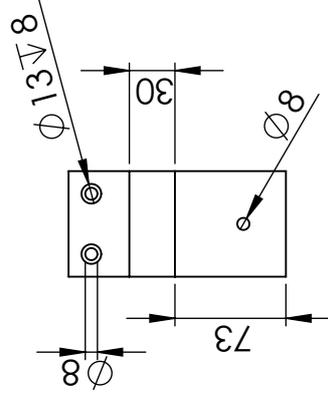
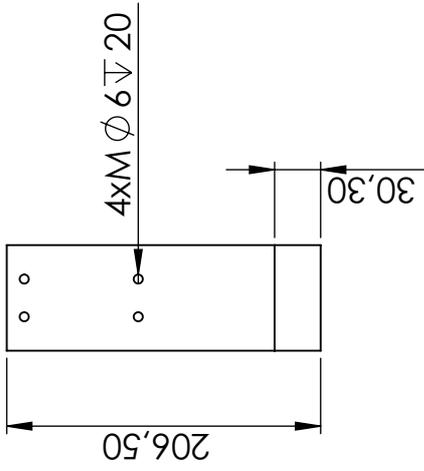
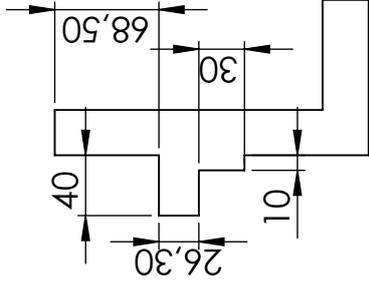
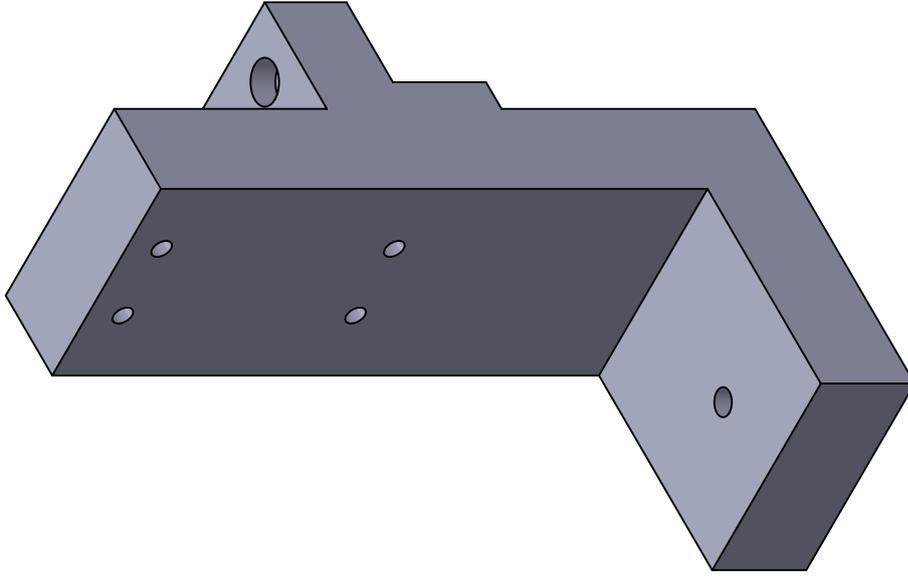
Medidas de Segurança:

- Usar sempre luvas no manuseio de qualquer componente antes, durante e após o ensaio;
- Manter a extração de gases ligada, para prevenir a inalação de gases prejudiciais;
- Antes de utilizar qualquer químico, analisar o seu rótulo, para prevenir qualquer risco de acidente;
- Avaliar os riscos das operações efetuadas antes de as desenvolver;
- Manter todas as soluções identificadas e hermeticamente fechadas;
- Caso exista contacto da pele com algum agente químico, lavar rapidamente a zona afetada e colocar sabão (solução básica) na zona inflamada.

(Página intencionalmente deixada em branco)

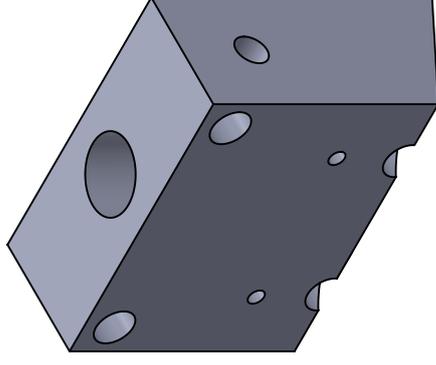
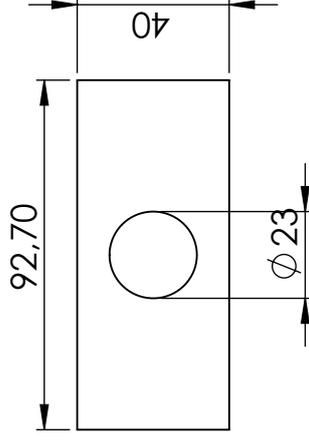
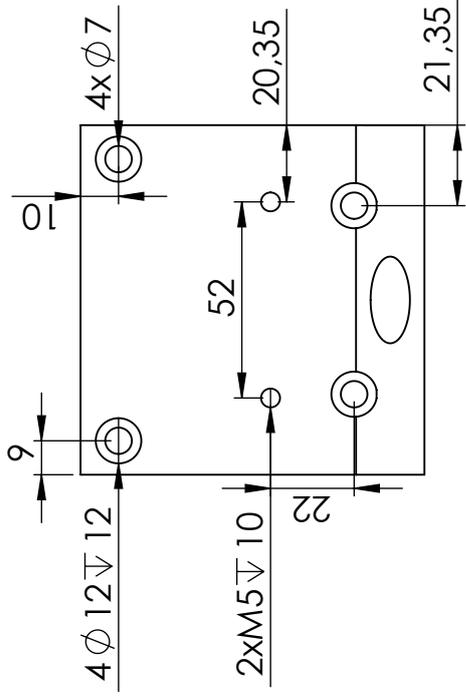
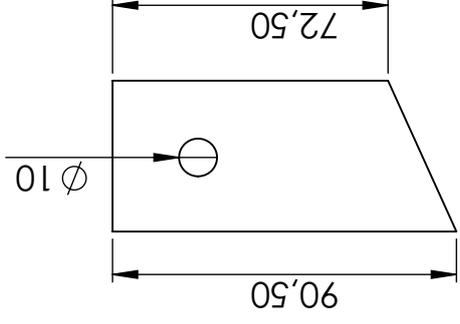
Anexo VI – Desenhos 2D

(Página intencionalmente deixada em branco)

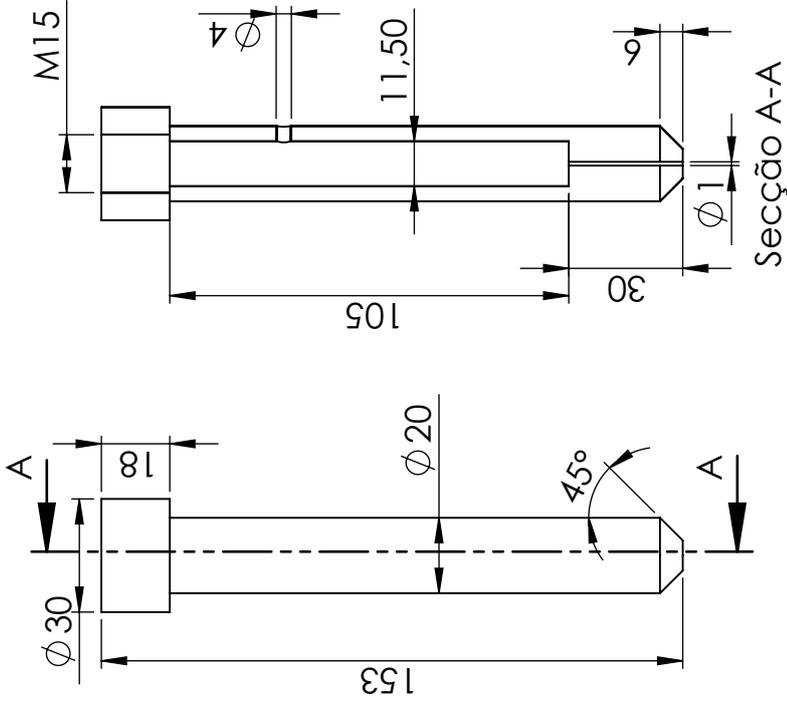


Versão n.º	1
Projectista	João Sousa
Data:	31/05/2019
Verificado	Por
Cliente:	João Sousa
Material:	PVC
Tolerância Geral:	ISO 2768-mK

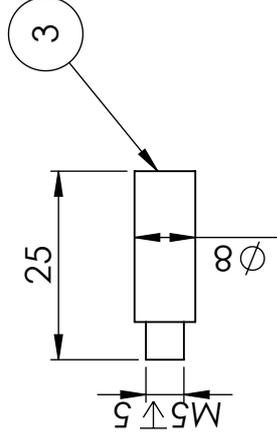
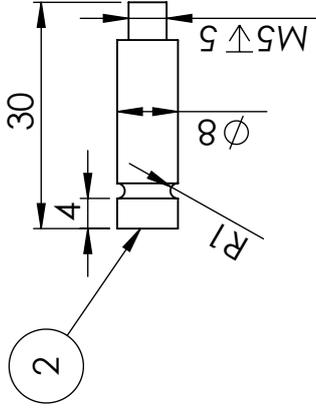
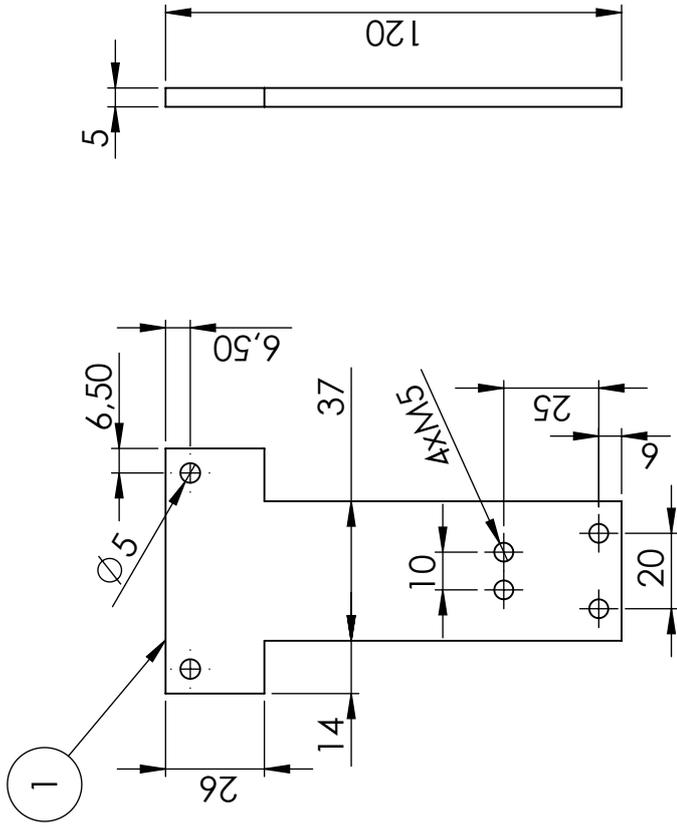
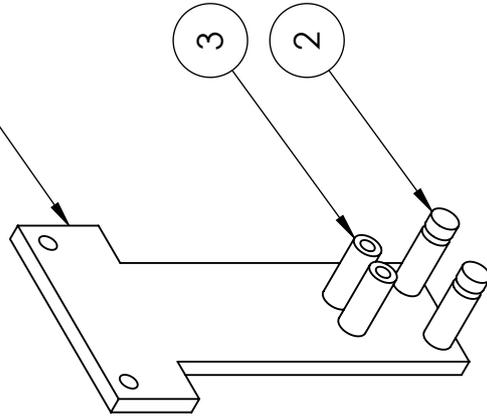
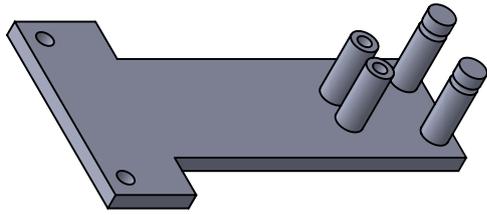
Cabeçote Fixo			
		Folha	1 de 1
Projecto n.º	1	Lote	1
Escala	1:5		



Versão n.º	1		
Projectista	João Sousa		
Data:	31/05/2019		
Verificado	Por		
Cliente:	João Sousa		
Material:	PVC		
Tolerância Geral:	ISO 2768-fH		
Folha	A4	Projecto n.º	1
		Lote	1
		Escala	1:2
		Carro Móvel	
		Folha	1 de 1



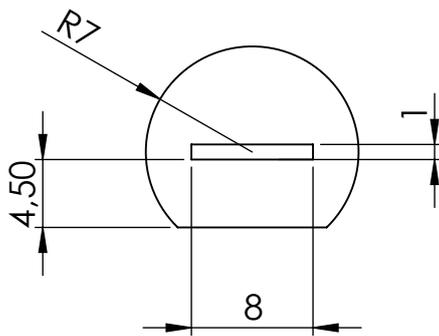
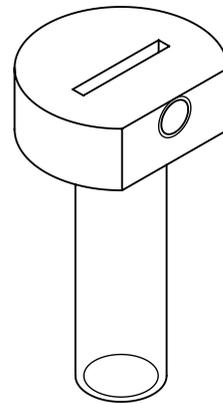
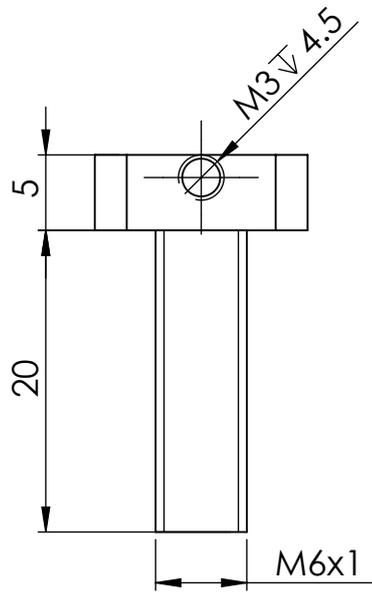
Versão n.º	1								
Projectista	João Sousa								
Data:	31/05/2019								
Verificado	Por								
Cliente:	JOÃO SOUSA								
Material:	Acrílico								
Tolerância Geral:	ISO 2768-fH								
Folha	A4	Projecto n.º	1	Lote	1	Escala	1:2	Folha	1 de 1
Ferramenta para eletrodo de 1mm									

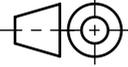


Componente nº	Qtd.	Material
1	1	Acrílico
2	2	Acrílico
3	2	Acrílico

Versão nº	1
Projectista	João Sousa
Data:	10/05/2019
Verificado	Por
Cliente:	João Sousa
Material:	Acrílico
Tolerância Geral:	ISO 2768-fH

Suporte de Ferramenta			
Folha	Projecto n.º	Lote	Escala
A4	1	1	1:2
Folha			1 de 1



Versão n.º	1					
Projectista	João Sousa					
Data:	10/05/2019					
Verificado:	Por					
Cliente:	João Sousa		Porta Provetes 			
Material:	AISI 316L					
Tolerância Geral:	ISO 2768-mK	Folha	Projecto n.º	Lote	Escala	Folha
		A4	1	1	2:1	1 de 1