

Estudo comparativo entre eletroerosão com fio de latão e fio de molibdénio

Sérgio Rafael da Silva Freitas

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Drº. José Marafona

Orientador no INEGI: Prof. Ana Reis

Orientador na ESS: Eng. Manuel São Simão



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro de 2016

“Sê a mudança que queres ver no mundo”

Mahatma Gandhi

Resumo

A electroerosão é hoje em dia um processo de fabrico chave em toda a indústria metalomecânica nacional devido ao facto de conseguir maquinar todo o tipo de materiais condutores, independentemente da sua resistência mecânica. Recentemente um novo material de fio chegou ao mercado português, o fio de molibdénio, que permite executar várias passagens com o mesmo fio e esta dissertação visa estudar quais as vantagens e desvantagens que este novo fio traz em relação ao já existente fio de latão..

Na revisão bibliográfica apresenta-se o processo de electroerosão e a sua evolução histórica desde os primeiros relatórios sobre o poder erosivo da descarga elétrica elaborados por Priestley em 1776 até as evoluções de hoje em dia, passando claro pelos irmãos Lazarenko durante a segunda grande guerra.

A parte experimental deste trabalho foi realizada com base numa matriz L_{18} Taguchi onde foram realizados 36 ensaios (18 em cada variante) com diferentes parâmetros de modo a tentar perceber a influência de cada um dos parâmetros de entrada seleccionados nos resultados e tentar também estabelecer pontos de comparação entre os resultados dos dois fio (molibdénio e latão).

Realizou-se ainda uma análise comparativa de custos, onde se maquina a mesma peça nas duas tecnologias estudadas com os seus parâmetros ideais e comparam-se os resultados obtidos.

No final foi possível verificar qual a influência dos parâmetros operativos nos resultados, em termos de rugosidade superficial, taxa de remoção de material e precisão dimensional.

Foi possível perceber que a electroerosão com fio de molibdénio ainda tem um longo caminho a percorrer para conseguir atingir os resultados uniformes do fio de latão, mas o mote está dado e podem agora abrir-se diversas portas a este método “low cost”.

Comparative study of WEDM with brass wire and molybdenum wire

Abstract

Electrical discharge machining (EDM) is nowadays a key process in the whole national metalworking industry due to the fact of being able to machine any kind of material, even those tougher to work on. Recently, a new material arrived to the portuguese market, a molybdenum wire that enables numerous passes with the same wire, and this thesis aims to study the pros and cons of this technology in relation to brass wire.

The literature review covers the EDM process and it's history since the first notes on electrical discharge by Priestley in 1776 until to today, going through the Lazaranko brothers during the Second World War.

The experimental element of this paper was achieved using a L_{18} Taguchi array, creating 36 trials (18 in each one) with different inputs trying to understand the impact of each one in the results, and also to establish a comparison between the results of both wire materials.

A cost comparing analysis was also made where the same part was manufactured using both technologies with its optimal settings, and later comparing the results.

In the end, it was possible to observe the impact of each input in the results, concerning surface roughness, speed of cutting and dimensional precision.

It was possible to understand that molybdenum wire EDM still has a long way to go before being able to achieve the uniform results of brass wire, but the tone is set and new doors can be open with this low cost method.

Agradecimentos

Ao Eng^o Manuel São Simão, orientador na ESS, pela oportunidade concedida e pela confiança depositada em mim.

Ao Prof.^o Dr. José Marafona, orientador na FEUP, pela disponibilidade, espírito crítico e pela partilha de conhecimentos, a sua experiência foi crucial para o desenvolvimento deste trabalho, foi uma honra poder trabalhar com ele.

À Prof.^a Dr^a Ana Reis, orientadora no INEGI, por todo o apoio, simpatia, simplicidade e disponibilidade demonstrados ao longo de todo o trabalho.

Ao Eng. Pedro Teixeira pelos conselhos e pela total disponibilidade.

À Armanda Marquês e ao Prof. Ramiro Martins pela disponibilidade e ajuda na verificação dos resultados, sem eles não seria possível apresentá-los.

A todos os trabalhadores da ESS, por terem disponibilizado os meios necessários à realização desta dissertação e pela forma como me acolheram.

À Escola Secundária Rocha Peixoto, em especial ao Prof. Marvim Fernandes, por disponibilizarem as suas instalações para a realização dos ensaios, e pela partilha de conhecimentos, sem a sua contribuição este trabalho não seria possível realizar.

Aos meus pais e irmã por todo o amor, carinho, paciência e força incondicional que me transmitiram ao longo destes anos de estudo que culminam nesta dissertação.

À Tatiana por me ter apoiado e ajudado durante todo este tempo, sendo a minha principal incentivadora em todos os momentos.

Aos “restelos”, pela amizade e pelos momentos de distração e alegria que me foram proporcionando, Ana Paula, Casimiro Faria, Daniel Varela, Diogo Duarte, Hugo Leite, João Caldas, Marina Alves e Rogério Oliveira.

Aos amigos do ISEC, André Silva, Álvaro Bizarro, Daniel Caetano, João Leitão, João Santos e Isaac Ferreira e aos amigos da FEUP, João Simas, Pedro Santos e Inês Esteves pelo companheirismo e apoio em todos os momentos.

A todos os meus familiares pelo carinho e força.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que este trabalho esteja agora concluído.

Índice

Introdução	1
1.1 Enquadramento da tese	3
1.2 Apresentação da empresa Ernesto São Simão	3
1.3 Enquadramento da dissertação na empresa	3
1.4 Estrutura da dissertação	4
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Processo de electroerosão.....	5
2.1.1 História e principais evoluções	5
2.1.2 Fenómeno da descarga elétrica no processo de electroerosão	9
2.2 Processo de electroerosão por fio	11
3 Caracterização dos materiais	15
3.1 Material da peça	15
3.1.1 Aço AISI 1045	15
3.2 Material da ferramenta	15
3.2.1 Molibdénio	15
3.2.2 Latão	16
4 Processo Experimental	19
4.1 Apresentação das máquinas	19
4.1.1 BAOMA DK7732.....	19
4.1.2 ONA AF25	24
4.2 Design of Experiments.....	27
4.2.1 Taguchi	27
4.2.2 Tecnologia de fio de molibdénio	28
4.2.3 Tecnologia de fio de latão	29
4.3 Metodologia das experiências	30
4.3.1 Tecnologia Molibdénio	31
4.3.2 Tecnologia Latão.....	32
4.4 Resultados.....	32
4.4.1 Tempo.....	33
4.4.2 Kerf	33
4.4.3 Rugosidade	35
4.5 Análise de variância (ANOVA).....	38
4.5.1 Pooling	38
4.5.2 Taguchi Signal-to-Noise	38
4.5.3 Resultados	39
4.5.3.1 Molibdénio	39
4.5.3.1.1 Taxa Remoção de Material.....	39
4.5.3.1.2 Kerf	40
4.5.3.1.3 Rugosidade superficial	42
4.5.3.1.4 Verificação dos resultados	43
4.5.3.1.5 Resultados da verificação dos Resultados.....	43
4.5.3.2 Latão.....	44
4.5.3.2.1 Taxa Remoção de Material.....	44
4.5.3.2.2 Kerf	45
4.5.3.2.3 Rugosidade superficial	46

4.5.3.2.4	Verificação dos resultados	47
4.5.3.2.5	Resultados da verificação de resultados	47
5	Análise e discussão de resultados	49
5.1	<i>Análise técnico-económica</i>	50
5.1.1	Primeira peça	50
5.1.2	Fio de Molibdénio	51
5.1.3	Fio de Latão	52
5.1.4	Comparação dos resultados	52
5.1.5	Segunda peça	52
5.1.6	Fio Molibdénio	54
5.1.7	Fio latão	54
5.1.8	Comparação de resultados	54
6	Conclusão	56
7	Recomendações para trabalhos futuros	58
	Referências	60
	ANEXOS	62
ANEXO B:	Resultados das medições do <i>Kerf</i>	64
ANEXO C:	Resultados das medições da rugosidade superficial	66
ANEXO D:	Fotos de trabalhos na BAOMA DK7732	68
ANEXO E:	Resultados Experimentais	72

Lista de Abreviaturas e Siglas

AISI - American Iron and Steel Institute

CNC – Computer Numerical Control (Controlo Numérico Computorizado)

d.o.f. – degrees of freedom (graus de liberdade)

DEMec - Departamento de Engenharia Mecânica

DoE – Design of Experiments

EDM – Electrical Discharge Machining (Electroerosão)

ESS – Ernesto São Simão Lda.

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

Mean Sq – Mean Square

S/N – Signal-to-Noise (Sinal-para-ruído)

Se – Mean Square due to experimental error

SS – Sum of squares (Soma dos quadrados)

TRM – Taxa de Remoção de Material

WEDM – Wire Electrical Discharge Machining (Electroerosão por fio)

Simbologia e unidades

A –ampere

CuZn37 – Latão

dB – Decibel

min – Minutos

mm - Milímetros

Mo – Molibdênio

s – Segundos

V –Volt

Ω m – Ohm x metro

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema representativo dos dois tipos de electroerosão. a) Electroerosão por penetração; b) Electroerosão por fio. Fonte: [3].....	1
Figura 2 – Ilustração representativa do <i>gap</i> na electroerosão por penetração.....	2
Figura 3 – Fenómeno de eletroerosão Fonte: [4].....	2
Figura 4 – Relatório de Priestley sobre o poder erosivo da electricidade Fonte: [6]	5
Figura 5 – Uma das primeiras máquinas de electroerosão Fonte:[7], consultado em 2015-12-7	6
Figura 6 – a) Circuito RC ; b) circuito RLC. Fonte: Adaptado de [10], consultado em 2015-12-7	6
Figura 7 – Máquina de electroerosão por penetração atual (2015) Fonte : [13], consultado em 2015-12-5	7
Figura 8 – Máquina de electroerosão por fio do fabricante AGIE, do final dos anos 70. Fonte: [15], consultado em 2016-01-14.....	8
Figura 9 – a) Máquina de electroerosão por fio do fabricante Sodick vendida hoje em dia; Fonte: [18], consultado em 2016-01-02 b) Máquina de electroerosão por fio do fabricante BAOMA comercializa em 2015. Fonte:[7], consultado em 2016-01-02	9
Figura 10 – Demonstração dos pontos de faísca Fonte: Adaptado de [11]	10
Figura 11 – Princípios do processo de electroerosão Fonte: Adaptado de [20]	10
Figura 12 – Principais nuances na electroerosão por fio Fonte: Adaptado de [21].....	11
Figura 13- <i>Gap</i> e <i>Kerf</i> na electroerosão por fio.....	12
Figura 14 – Ilustração de um corte emerso Fonte: Modificado de [22]	13
Figura 15 – Placas de aço AISI 1045 usadas nos ensaios	15
Figura 16- Detalhes sobre o fio de molibdénio fornecido pelo fabricante. Fonte: [25] , consultado em 2016-01-03	16
Figura 17 – Fio de Latão – AC Brass LP 900	17
Figura 18 – Gráfico das características do fio dado pelo fabricante Fonte: [26].....	17
Figura 19 – Máquina BAOMA DK7732 com legenda	20
Figura 20 – Controlador Fonte: Modificado de [27]consultado em 2016-01-27	20
Figura 21 – Líquido de corte fornecido pelo fabricante da máquina.....	21
Figura 22 – Interface do programa BMXP	22
Figura 23 – Add in do Autocad na fase de escolha de parâmetros.....	22
Figura 24 – Máquina de ONA AF25 com legenda.....	24
Figura 25 – Tabela dos parâmetros de corte da ONA AF25	25
Figura 26 – Metodologia das experiências	30
Figura 27 – Interface do software Autocad 2005.	31
Figura 28 – Add-in no software Autocad que permite a escolha dos parâmetros de corte	31
Figura 29 – Interface do programa BMXP	31
Figura 30 – Interface de trabalho ONA AF25.....	32

Figura 31 – Microscópio ótico Olympus PMG 3	34
Figura 32 – Exemplo de uma imagem usada na análise do <i>kerf</i>	35
Figura 33 – Rugosímetro Hommelwerke D-7730	36
Figura 34 – Demonstração dos locais onde se realizaram os testes de rugosidade	36
Figura 35 – Taguchi S/N para maximizar a TRM	39
Figura 36 - Taguchi S/N para minimizar o Kerf	40
Figura 37 - Taguchi S/N para minimizar a Rugosidade Superficial	42
Figura 38 - Taguchi S/N para maximizar a TRM.....	44
Figura 39 - Taguchi S/N para minimizar o Kerf	45
Figura 40 – Taguchi S/N para minimizar a Rugosidade Superficial	46
Figura 41 – Desenho 3D do mordente	50
Figura 42 – Desenho 2D com cotas do mordente.....	51
Figura 43 – Parâmetros de corte para mordente	51
Figura 44 – Fotografia do mordente após sair da máquina BAOMA DK7732.....	52
Figura 45 – Desenho 3D do cone	53
Figura 46 – Desenho 2D com cotagens do cone	53
Figura 47 – Cone após erosão com fio de molibdênio	54

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características dos principais tipos de fios Fonte: Adaptado de [23].....	14
Tabela 2 – Propriedades químicas do aço AISI 1045.....	15
Tabela 3 – Especificações da máquina BAOMA DK7732	21
Tabela 4 – Especificações da máquina ONA AF25	24
Tabela 5- Parâmetros e valores escolhidos para realizar os DoE de fio de molibdénio.....	28
Tabela 6 – Matriz Taguchi para tecnologia de molibdénio	28
Tabela 7 – Parâmetros constantes ao longo dos ensaios	29
Tabela 8 - Parâmetros e valores escolhidos para realizar os DoE de fio de latão	29
Tabela 9 – Parâmetros constantes ao longo dos ensaios	29
Tabela 10 - Matriz Taguchi para tecnologia de latão	30
Tabela 11 –Tempo e Taxa de Remoção do Material dos ensaios	33
Tabela 12 – Resultados do <i>kerf</i> dos ensaios	34
Tabela 13 – Resultados da Rugosidade média (Ra)	37
Tabela 14 – Parâmetros para TRM máxima.....	39
Tabela 15 – Dados relativos à análise ANOVA para TRM – Tecnologia molibdénio	39
Tabela 16 – Pooling da TRM para a tecnologia de molibdénio	40
Tabela 17 - Parâmetros para <i>Kerf</i> mínimo.....	40
Tabela 18 - Dados relativos à análise ANOVA para o <i>kerf</i> - Tecnologia molibdénio	41
Tabela 19 – Pooling do <i>kerf</i> para a tecnologia de molibdénio	41
Tabela 20 - Parâmetros para Rugosidade superficial mínima	42
Tabela 21 - Dados relativos à análise ANOVA para a Rugosidade Superficial – Tecnologia molibdénio.....	42
Tabela 22 – Pooling da rugosidade superficial para a tecnologia de molibdénio	43
Tabela 23 – Parâmetros para confirmação de resultados para o fio molibdénio.....	43
Tabela 24 – Resultados dos ensaios para confirmação de resultados para o fio molibdénio ...	43
Tabela 25 - Dados relativos à análise ANOVA para TRM – Tecnologia latão	44
Tabela 26 - Pooling da TRM para a tecnologia de latão	44
Tabela 27 - Dados relativos à análise ANOVA para o <i>kerf</i> – Tecnologia latão.....	45
Tabela 28 - Pooling do <i>kerf</i> para a tecnologia de latão	45
Tabela 29 - Dados relativos à análise ANOVA para rugosidade superficial – Tecnologia latão	46
Tabela 30 – Pooling da rugosidade superficial para a tecnologia de latão.....	46
Tabela 31 – Parâmetros para confirmação de resultados para o fio de latão.....	47
Tabela 32 – Resultados para a confirmação de resultados do fio de latão	47
Tabela 33 – Comparação dos resultados na maquinagem do mordente.....	52

Tabela 34 – Parâmetros de maquinagem para cone	54
Tabela 35 – Comparação de resultados na maquinagem do cone	54

Introdução

A electroerosão, conhecida pela sigla EDM (Electrical Discharge Machining), é um processo não tradicional de maquinagem no qual o poder erosivo da descarga eléctrica é usado para obter a peça. Durante o processo é gerada uma descarga eléctrica entre a ferramenta e a peça que, devido ao efeito termoelétrico, leva à remoção de material na peça e também na ferramenta. O facto de não haver contacto direto entre a peça e a ferramenta faz com que não haja tensões mecânicas na peça, o que é benéfico, pois aumenta-lhe o tempo de vida útil e ainda permite que sejam maquinadas peças de pequeno porte sem que estas sejam danificadas.

Segundo [1], o processo de electroerosão tem capacidade para maquinar rigorosamente formas complexas e irregulares, usando o controlo CNC. Como a força de corte neste processo é baixa, faz dele o ideal para maquinar peças pequenas e complexas.

A electroerosão foi usada a primeira vez em 1943 [2] e desde essa altura já sofreu muitos avanços em todo o processo tornando-se hoje em dia num dos processos mais usados na maquinagem de materiais, tidos como de difícil maquinagem pelos métodos convencionais, tais como superligas, compósitos, cerâmicos e outros metais duros, pois na maquinagem por electroerosão a dureza do metal não é relevante, o que é relevante é a sua condutibilidade eléctrica, sendo um processo relevante na indústria dos moldes, já que permite fazer furação, fresagem e contornos.

Há dois tipos de electroerosão, como se pode observar na Figura 1, a electroerosão por penetração, em que são usados normalmente eléctrodos ferramenta de cobre ou grafite, e a electroerosão por fio, onde é utilizado um fio ferramenta que pode ser de cobre, latão, tungsténio ou molibdénio entre outros metais condutores.

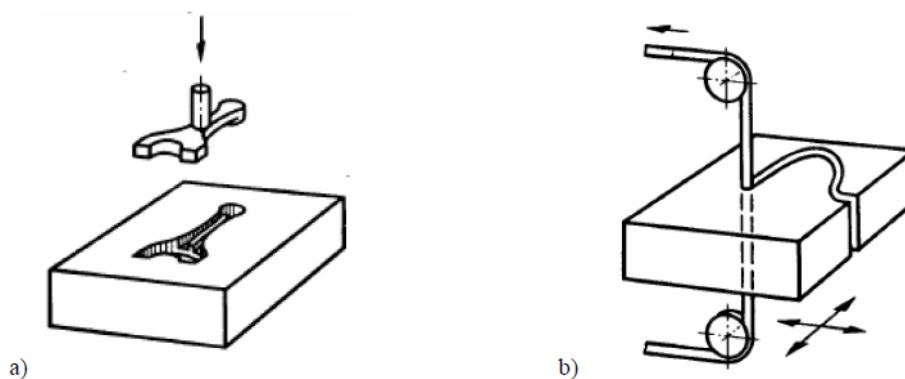


Figura 1 - Esquema representativo dos dois tipos de electroerosão. a) Electroerosão por penetração; b) Electroerosão por fio.

Fonte: [3]

Independentemente do tipo de electroerosão, o fenómeno da descarga é idêntico, pois nos dois casos são geradas uma serie de impulsos eléctricos entre a peça e a ferramenta numa zona de não contato designada por *gap*, como se pode observar na Figura 2, onde se atingem temperaturas elevadíssimas.

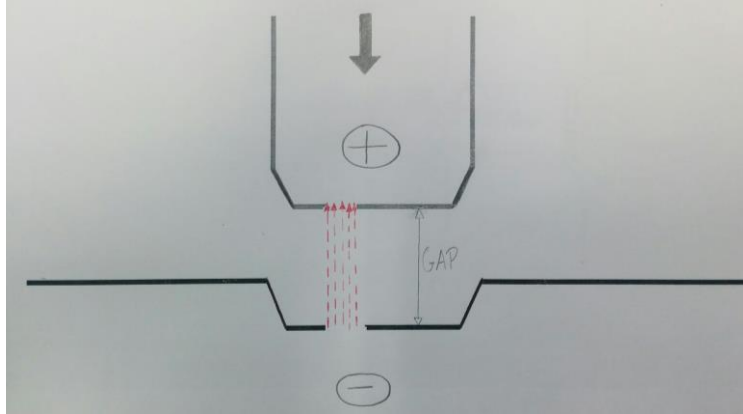


Figura 2 – Ilustração representativa do *gap* na electroerosão por penetração

Para se conseguir um melhor aproveitamento é usado um líquido dielétrico (isolante eléctrico), que pode variar desde um óleo de hidrocarbonetos até água desionizada, onde a peça é submersa. O líquido dielétrico é importante para baixar a temperatura no *gap* e para remover os metais que se vão soltando da peça para fora da zona de descarga eléctrica.

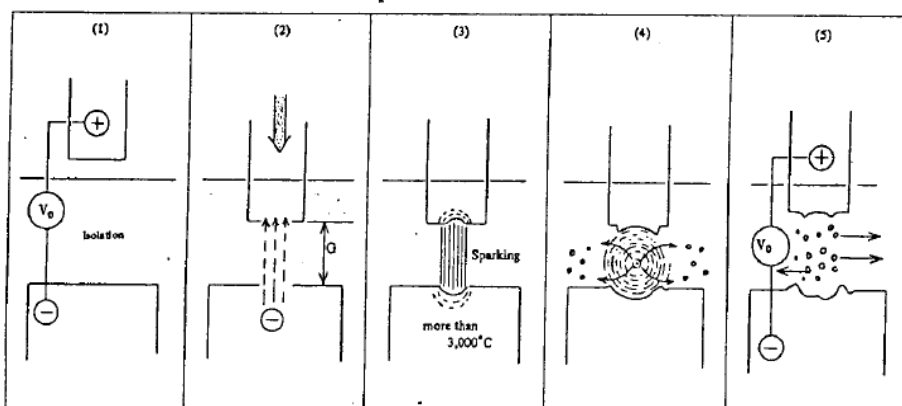


Figura 3 – Fenómeno de eletroerosão

Fonte: [4]

A electroerosão por fio, conhecida como WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) é uma evolução/adaptação da electroerosão por penetração que surgiu em 1969. Neste sistema a corrente eléctrica passa pelo fio, que está sempre tensionado, e devido ao poder erosivo da descarga eléctrica vai cortando a peça, dando-lhe a forma pretendida.

Dentro da electroerosão por fio há duas possibilidades para a utilização da peça no tanque, o emerso e o submerso. O submerso funciona com um tanque cheio de dielétrico, o emerso funciona só com um jato de dielétrico apontado à zona de erosão.

A evolução na electroerosão tem conduzido a resultados bastante satisfatórios já que a velocidade de corte tem sido duplicada a cada 4 anos e o acabamento superficial já melhorou mais de 15 vezes em relação à primeira utilização.

1.1 Enquadramento da tese

Esta dissertação foi realizada para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O estudo e desenvolvimento do projeto foram realizados na empresa de acolhimento Ernesto São Simão, na qual foram efetuados grande parte dos ensaios, nomeadamente na electroerosão por fio de molibdénio. Os restantes ensaios, electroerosão por fio de latão, foram realizados na Escola Secundária Rocha Peixoto sediada na Póvoa de Varzim. A análise dos resultados foi realizada no INEGI.

Deste modo, pretende-se apresentar novas e relevantes informações sobre os processos de electroerosão por fio de latão e fio de molibdénio, rentabilizando assim o uso destes processos por parte das empresas.

1.2 Apresentação da empresa Ernesto São Simão

A empresa de acolhimento onde foi realizada esta dissertação de mestrado, designa-se por Ernesto São Simão Lda. - ESS. A ESS é uma empresa que se dedica maioritariamente à conceção e produção de moldes metálicos.

A ESS foi fundada em 1947 e teve como primeira atividade o fabrico de cunhos para ourivesaria e só na década de 1950 é que se iniciou na produção de moldes para a injeção de plástico.

Desde sempre a ESS baseou o seu crescimento num investimento constante em tecnologias sofisticadas com o intuito de aumentar cada vez mais a satisfação dos seus clientes.

Atualmente, as exportações representam 60% do volume total de negócio, destacando-se os mercados da Europa, América Latina e Norte de África.

1.3 Enquadramento da dissertação na empresa

A tecnologia de electroerosão por fio é fundamental no processo de fabrico de moldes, pois só com esta tecnologia se conseguem maquinar os mais diversos materiais (das mais diversas durezas), dando-lhes as formas mais complexas e variadas.

A ESS adquiriu uma máquina de electroerosão por fio de molibdénio, uma tecnologia nova no mercado europeu, devido a ser um produto ainda pouco conhecido há ainda uma falta de conhecimento sobre esta nova tecnologia e por esse facto ainda não é possível tirar o melhor aproveitamento da máquina.

Devido à necessidade de usar este tipo de tecnologia, surgiu a oportunidade para se realizar esta dissertação que aborda novos estudos sobre a eletroerosão por fio de molibdénio, tentando afinar os seus parâmetros de corte e comparando-a com a eletroerosão por fio de latão.

1.4 Estrutura da dissertação

O presente documento encontra-se dividido em três partes distintas: revisão bibliográfica; procedimento experimental, resultados e sua discussão; conclusões e trabalhos futuros.

A revisão bibliográfica foi estruturada de acordo com a sequência histórica do processo de electroerosão, começando com uma breve história e depois passando à apresentação do processo de remoção de material por ação de descargas elétricas.

No trabalho experimental são expostos os procedimentos adotados durante toda a dissertação, bem como as matérias-primas necessárias para a sua realização e os resultados desses mesmos ensaios.

Na parte das conclusões e trabalhos futuros, fez-se um apanhado dos resultados obtidos enquadrando-os dentro das pretensões de todos os intervenientes, definiram-se ainda alguns trabalhos futuros com base nesta dissertação para maior exploração de alguns dos temas aqui tratados.

2 Revisão Bibliográfica

Na revisão bibliográfica irá ser explicado o processo e a evolução da electroerosão por penetração e por fio, que são métodos de maquinagem de não contacto que usam o poder erosivo da descarga elétrica para dar forma aos metais, muitos deles considerados difíceis de maquinar por métodos convencionais.

2.1 Processo de electroerosão

2.1.1 História e principais evoluções

Os primeiros relatos do poder erosivo das descargas elétricas datam de 1776, quando o físico inglês Josef Priestley elaborou um relatório acerca da remoção de material sob condições laboratoriais através de uma descarga elétrica.[5].

“June the 13th, 1766. After discharging a battery, of about forty square feet, with a smooth brass knob, I accidentally observed upon it a pretty large circular spot, the center of which seemed to be superficially melted. (...) After an interruption of melted places, there was an intricate and exact circle of shining dots, consisting of places superficially melted, like those at the center.”

“June the 14th, 1766. (...) Examining the spots with a microscope, both the shining dots that formed the central spot, and those which formed the external circle, appeared evidently to consist of cavities, resembling those on the moon, as they appear through a telescope, the edges projecting shadows into them, when they were held in the sun.”

Figura 4 – Relatório de Priestley sobre o poder erosivo da electricidade

Fonte: [6]

Mas só muito mais tarde, durante a 2ª Guerra Mundial, é que o processo de remoção de material devido à electricidade conheceu avanços, quando os irmãos Lazarenko (B.R. Lazarenko e N.I. Lazarenko) descobriram que poderiam controlar o poder erosivo da electricidade, tendo adaptado uma furadora com uma cabeça vibratória, que permitia uma rápida sucessão de descargas entre a peça (fixa) e o eléctrodo (móvel) na primeira máquina de electroerosão, conseguindo assim uma precisão de corte muito elevada, para os valores que se obtinham na época.

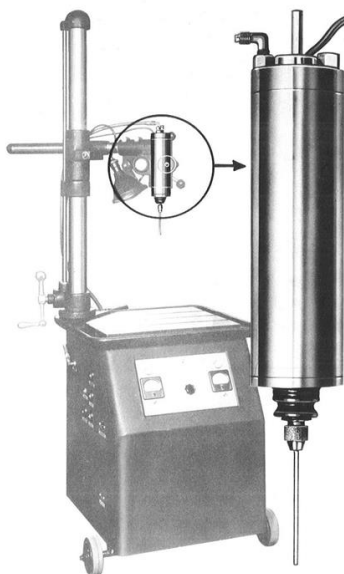


Figura 5 – Uma das primeiras máquinas de electroerosão
Fonte:[7], consultado em 2015-12-7

Os irmãos Lazarenko usavam a descarga de um gerador chamado circuito de relaxação RC (com uma resistência e um condensador), conhecido também como circuito Lazarenko, que funciona como um circuito oscilatório, onde periodicamente há uma inversão entre corrente e tensão de trabalho até que a energia elétrica armazenada nos condensadores se esgote [8]. Com isto diminui-se a formação de arcos elétricos e curto-circuitos entre os eletrodos [9]. Este circuito anos mais tarde evoluiu para um circuito RCL (com uma resistência, um condensador e um indutor) que gerava descargas elétricas.

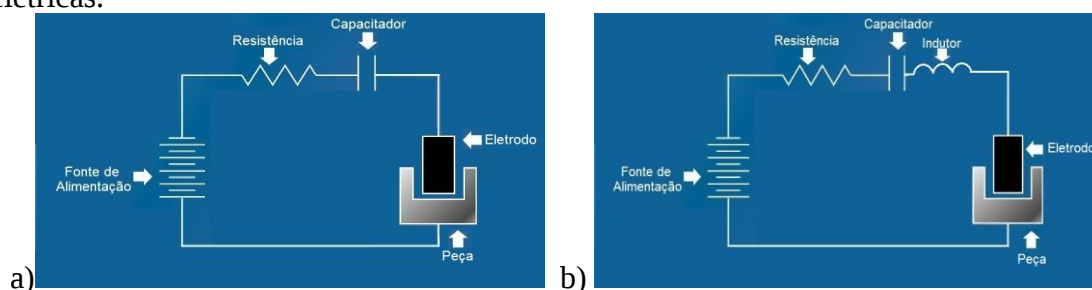


Figura 6 – a) Circuito RC ; b) circuito RLC.
Fonte: Adaptado de [10], consultado em 2015-12-7

Nessa mesma altura, depois da descoberta dos irmãos Lazarenko ser patenteada pela SU-Patent 70010 / Priority 3.4.1943.

Em 1947, Dagobert W. Rudorff patenteou no Reino Unido também uma máquina de electroerosão capaz de cortar diversas geometrias, aproveitando o facto de a URSS não pertencer à Convenção de Patentes Paris (Convenção de Paris para a proteção de propriedade industrial).

No final da 2ª Guerra Mundial, a URSS era líder mundial na investigação e desenvolvimento sobre electroerosão, com várias universidades, cientistas e físicos a dedicarem-se inteiramente a este processo, sendo o ENIMS (Metallcutting Machine Tools, Experimental Scientific Research Institute) em Moscovo a entidade que mais contribuiu com desenvolvimento tecnológico, com vários protótipos de máquinas, acessórios e eletrodos. [11]

Após alguns anos de investigação sobre o fenómeno de remoção de material através da descarga elétrica, Zingerman do Instituto de Leninegrado, apresentou em 1959 aquela que ainda hoje é tida como a explicação mais correta para o fenómeno da descarga elétrica no processo de electroerosão, segundo Zingerman é o efeito termoelétrico que provoca a remoção de material. [5]. Este efeito termoelétrico pressupõe que é devido às altas temperaturas geradas pela alta intensidade de corrente que o material é removido da peça [12].

No início dos anos 60 desenvolveram-se os sistemas semi-condutores que permitiram uma considerável melhoria no processo, com a incorporação do transístor e tirístor conseguiu-se melhorar o acabamento superficial das peças devido à duração do impulso, que atingiu o milissegundo, o desgaste da ferramenta também diminui com esta modificação [5].

No final dos anos 60 e inícios dos anos 70 foram implementados os sistemas de controlo numérico de posição (CNC) o que fez com que se conseguisse alcançar uma maior precisão nos movimentos dos eléctrodos.

Durante as décadas seguintes os principais avanços foram ao nível do design dos geradores, da automatização do processo e dos servo-controladores, sendo que o acabamento superficial e a velocidade de corte têm evoluído rapidamente, tendo tido já diversos avanços.



Figura 7 – Máquina de electroerosão por penetração atual (2015)
Fonte : [13], consultado em 2015-12-5

Voltando cronologicamente atrás, aos finais da década de 1960, para introduzir um novo conceito de electroerosão, a **electroerosão por fio** (conhecida também pela sigla WEDM). Decorria o ano de 1969 quando a empresa suíça Agie apresentou ao mundo um novo conceito de electroerosão que surgiu de uma feliz experiência no desenvolvimento da electroerosão por penetração, um novo paradigma na metalomecânica a nível mundial. “É provavelmente a máquina mais diversificada e excitante produzida nos últimos 50 anos” [14]



Figura 8 – Máquina de electroerosão por fio do fabricante AGIE, do final dos anos 70.
Fonte: [15], consultado em 2016-01-14

O fio, que funciona como ferramenta, é normalmente de cobre, latão, molibdénio ou tungsténio, mas poderá ainda ser de outro qualquer metal condutor. Os fios usados hoje em dia têm diâmetros compreendidos entre os 0,05mm e os 0,3mm, permitindo assim maquinar uma quantidade quase infindável de peças.

Segundo [16] com a eletroerosão por fio os metais complicados de maquinar tornam-se fáceis de cortar, devido ao facto de não haver contacto entre a ferramenta e a peça possibilita também que sejam maquinadas peças pequenas, sem que estas sejam destruídas ou danificadas [14].

Ao longo destes cerca de 45 anos de existência, a electroerosão por fio tem sofrido as suas principais evoluções ao nível do acabamento superficial e da velocidade de corte, que segundo [17] a velocidade de corte tem vindo a dobrar a cada 4 anos e o acabamento superficial já diminuiu cerca de 15 vezes em relação ao conseguido com as primeiras máquinas.

O facto do controlo numérico para a electroerosão por penetração ter surgido na altura do aparecimento da electroerosão por fio fez com que essa tecnologia tenha sido quase logo implementada em todas as máquinas de electroerosão por fio.



Figura 9 – a) Máquina de electroerosão por fio do fabricante Sodick vendida hoje em dia;

Fonte: [18], consultado em 2016-01-02

b) Máquina de electroerosão por fio do fabricante BAOMA comercializa em 2015.

Fonte:[7], consultado em 2016-01-02

2.1.2 Fenómeno da descarga elétrica no processo de electroerosão

O processo de electroerosão, não tradicional de maquinagem, como já foi referido anteriormente, tem por base o poder erosivo das descargas elétricas criadas entre a ferramenta e a peça e que conseguem fazer com que seja dada a forma pretendida à peça. Para este processo funcionar a dureza e resistência dos metais difíceis de maquinar deixaram de ser os fatores problemáticos que dificultam o processo [1], neste caso só é necessário garantir que ambos os materiais, da ferramenta e da peça, sejam condutores elétricos e assim o processo realizar-se-á. Atenção, o processo não se inicia nem continua se, em qualquer momento, houver contacto físico entre a peça e a ferramenta, dá curto-circuito e o processo é interrompido.

Embora existam dois tipos diferentes de electroerosão (penetração e fio), o fenómeno físico e elétrico da remoção do material, a nível microscópico, é igual nos dois casos [19] e tem por base a troca de energia entre dois polos opostos num circuito elétrico, ou seja, a diferença de potencial entre a peça e a ferramenta (que nunca se tocam fisicamente e têm polos opostos), faz com que se gere uma faísca. Por convenção a polaridade é chamada de positiva quando o eléctrodo é polarizado positivamente, e é chamada de negativa quando acontece o contrário e o eléctrodo está polarizado negativamente [20]. Normalmente considera-se que a peça é o polo negativo, o cátodo, e a ferramenta o polo positivo, o ânodo. [12].

A ferramenta de corte e a peça a trabalhar estão mergulhadas num líquido dielétrico, geralmente o líquido dielétrico é óleo de hidrocarbonetos ou água desionizada, segundo [20].

Quando o eléctrodo inicia o seu processo de aproximação à peça, também o dielétrico começa a movimentar-se, nesses momentos de aproximação, o campo elétrico no *gap* chega até um valor selecionado, valor esse teoricamente ideal para ser lançada a primeira descarga elétrica, normalmente ocorre quando a tensão atinge valores na ordem dos 200 Volt [20]. Após se atingir esse valor de tensão forma-se o canal de plasma,

onde irá acontecer dentro de breves instantes a primeira descarga eléctrica, que ocorre, geralmente, através do caminho eletricamente mais curto entre a ferramenta e a peça a trabalhar [5] como se pode observar na Figura 10.

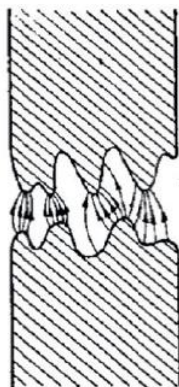


Figura 10 – Demonstração dos pontos de faísca
Fonte: Adaptado de [11]

Na zona entre a peça e a ferramenta, imersa no dielétrico, é gerada uma serie de faíscas elétricas, sendo que cada uma individualmente remove valores muito pequenos de material, entre os 10^{-6} e 10^{-4} mm³, parece muito pouco, mas se tivermos em conta que em cada segundo ocorrem cerca de 10000 faíscas já se torna um valor considerável [20].

Cada faísca cria uma zona de fusão na peça e um pedaço de material fundido é retirado da zona de erosão pelo líquido dielétrico, o restante material fundido que não é retirado pelo dielétrico solidifica na peça como uma camada de resolidificação. Podemos observar na Figura 11 a maneira como a tensão e a corrente variam durante as várias fases do processo.

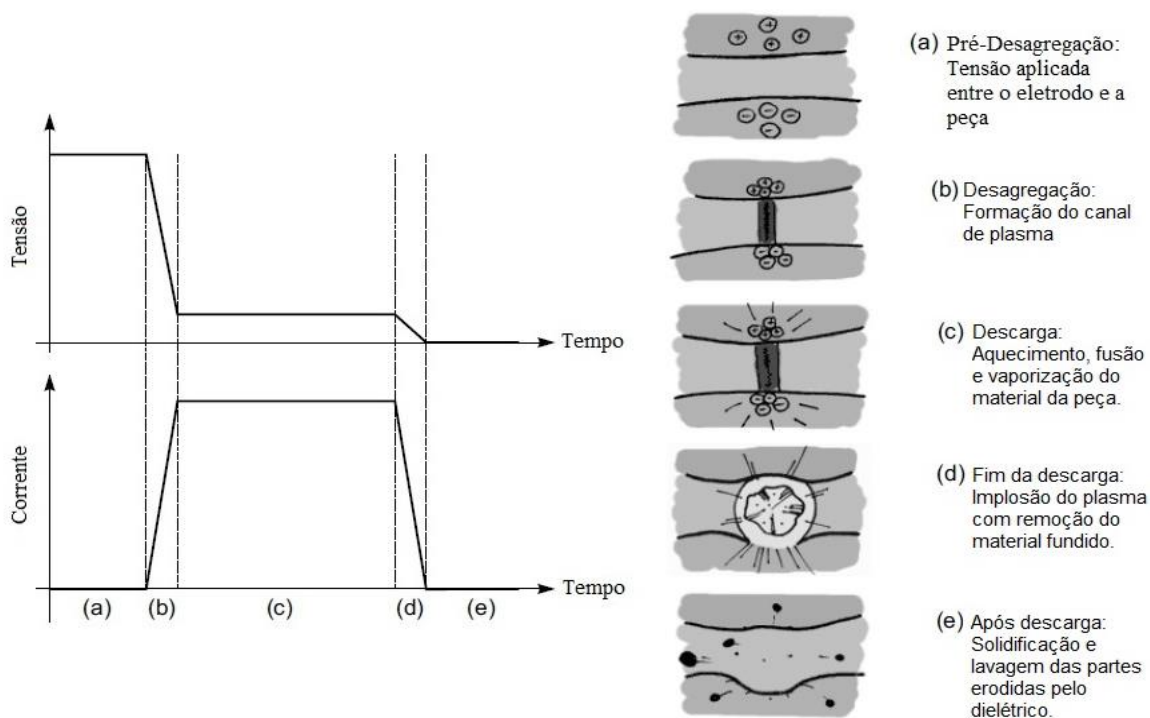


Figura 11 – Princípios do processo de electroerosão
Fonte: Adaptado de [20]

O dielétrico tem um papel fundamental em todo o processo pois é responsável por arrefecer o eléctrodo e garantir uma elevada pressão no plasma o que garante uma elevada força de remoção do material fundido. Após a descarga e durante o período em que o eléctrodo abre, o dielétrico limpa as partículas removidas para que a próxima descarga aconteça o mais “limpa” possível. Se as partículas ficarem no intervalo, a condutividade eléctrica do dielétrico aumenta, levando a um mau controlo do processo e má qualidade de maquinagem. O dielétrico geralmente flui através do *gap*, e vai trazendo líquido “fresco” a cada momento, criando assim condições para que a descarga aconteça num ambiente o mais favorável possível.

É possível calcular a energia gerada em cada faísca com base na diferença de potencial (V) entre os dois polos, a intensidade da corrente (I) e a duração da faísca (T)

$$E = V \times I \times T \quad (1)$$

Desde o início da descarga eléctrica até ao seu final tanto o eléctrodo como a peça têm que estar em constante condução eléctrica sobe pena do processo não fluir. Estes também não se podem tocar, pois geram um curto-circuito que faz com que o processo pare.

2.2 Processo de electroerosão por fio

O fenómeno da descarga eléctrica é idêntico à electroerosão por penetração, só que neste caso específico a ferramenta usada é um fio, que vai sendo desenrolado de uma bobina. A medida que o fio se vai desenrolando da bobina a mesa de trabalho vai se movimentando para que este vá percorrendo o trajeto previamente definido no programa de interface.

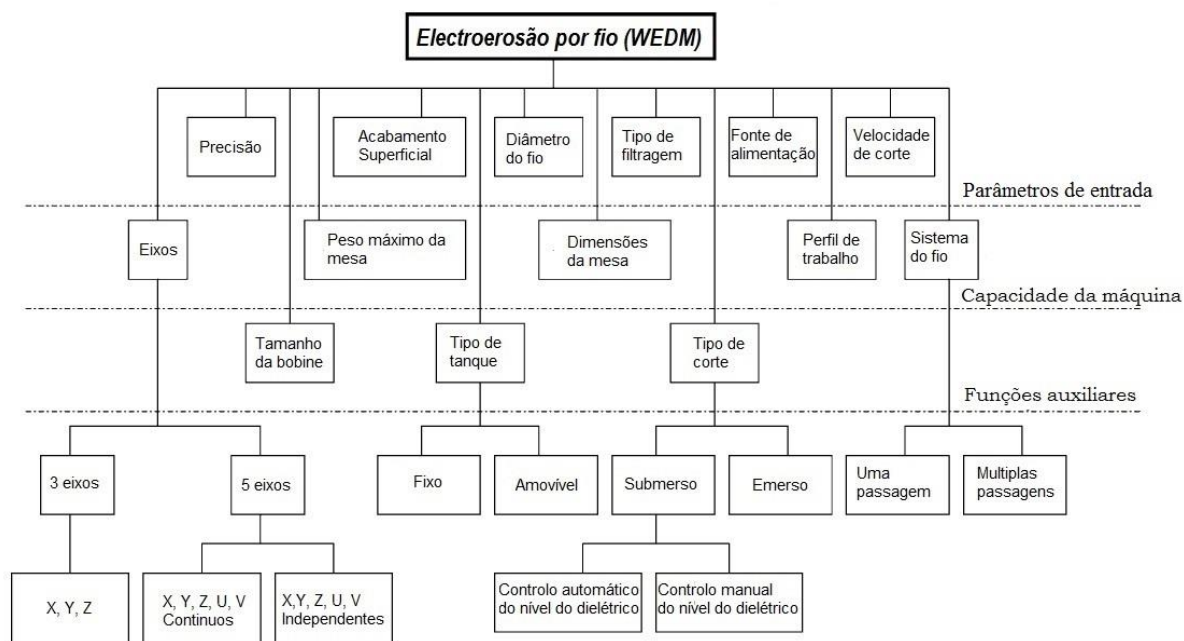


Figura 12 – Principais nuances na electroerosão por fio
Fonte: Adaptado de [21]

Aqui, neste caso, o *gap* é medido entre o fio e a extremidade mais próxima da peça, sendo que o *kerf* (espaço deixado pelo fio) é possível calcular segundo a Equação 2:

$$Kerf = 2 \times gap + \varnothing fio \quad (2)$$

O fio também sofre as consequências da força da descarga elétrica e vai se desgastando, perdendo algumas das suas propriedades físicas e mecânicas e reduzindo o seu diâmetro inicial, o que leva a fazer-se uma distinção entre fios que só realizam uma passagem (perdem demasiadas propriedades numa só passagem que não permitem efetuar outro corte com o mínimo de qualidade) e os que aguentam um número finito de passagens (vão maquinando até ao fio atingir um desgaste tal que acabe por romper).

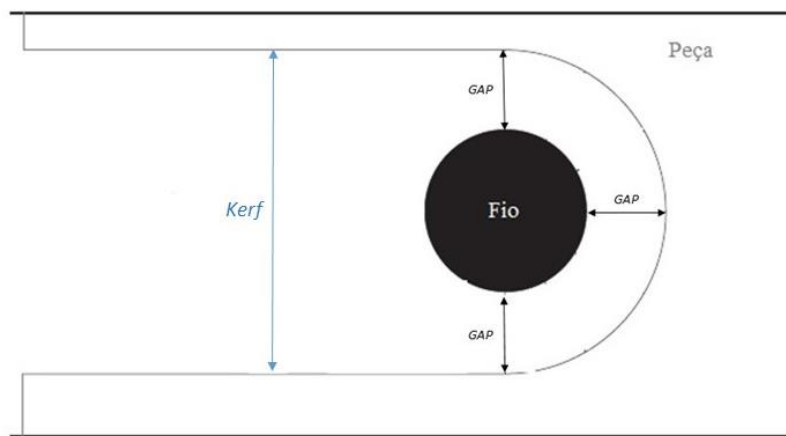


Figura 13- *Gap* e *Kerf* na electroerosão por fio

Há ainda outra distinção entre o tipo de corte, emerso ou submerso. No submerso a peça de trabalho fica imersa no dielétrico (que pode ter controlo automático de nível ou não), geralmente água desionizada, neste tipo de maquinagem há um aumento da exatidão geométrica do processo e um aumento na velocidade de corte, porém há um grande consumo de dielétrico e resinas associadas, devido ao maior volume de líquido usado no processo. Neste tipo de processo a visualização da peça durante a maquinagem é muito complicada devido à contaminação da água pelo material removido e transformado em pequenas partículas.

Emerso: Neste tipo de corte, existe apenas um jato lavado do dielétrico sobre a peça, como se verifica na Figura 14. É um sistema que consome menos quantidade de dielétrico e permite visualizar melhor o trabalho, porém a rugosidade e exatidão geométrica são piores comparativamente ao tipo submerso, há também uma certa dificuldade do processo pois em alguns cortes ocorrem demasiadas paragens.[9]

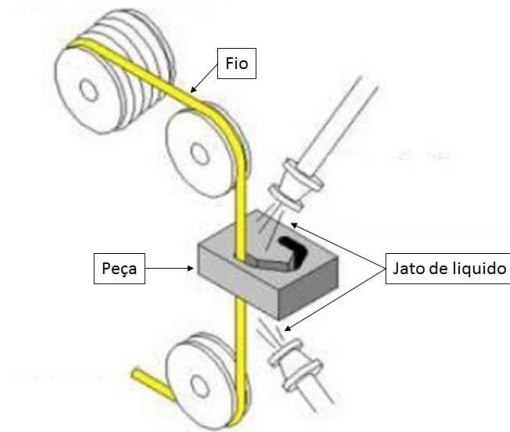


Figura 14 – Ilustração de um corte emerso
Fonte: Modificado de [22]

Segundo [9] um fio para eletroerosão deve ter as seguintes características:

- Alta condutividade térmica e elétrica;
- Boa resistência mecânica;
- Excelente acabamento superficial;
- Diâmetro e verticalidade constantes.

Para além dessas 4 características “chave” os fios devem apresentar baixos índices de impurezas, ter boa condutividade elétrica, pois os geradores das máquinas poderão exceder correntes de 45 A. Os fios devem ser capazes de produzir alta frequência e baixa amperagem para maquinar superfícies com bom acabamento, rugosidades médias – Ra - inferiores a 0,2 μm .

Entre os vários fios existentes no mercado, há uns mais indicados do que outros para determinadas utilizações, como por exemplo, os fios de cobre e latão com revestimento são, pelo menos, cerca de 20 % mais rápidos do que os mesmos sem revestimento, os fios de cobre apresentam um melhor acabamento que os fios de latão e passando agora para o processo de fabrico do fio, se pretendermos maquinar peças de alta precisão temos que utilizar um fio que tenha uma excelente precisão geométrica do seu diâmetro sobe pena de ficarmos com imprecisões na peça. Quando pretendemos ter uma baixa rugosidade superficial na zona erodida o fio que deve ser utilizado é um que tenha alta resistência à tração, para que seja possível exercer maior tensão no fio de forma a obter um melhor acabamento.

Resta dizer que os vários tipos de fio têm diferentes custos, pelo que antes de cada utilização deve ser avaliado o custo/benefício que irá ter aquele fio naquele processo.

Tabela 1 – Características dos principais tipos de fios
Fonte: Adaptado de [23]

Tipo de fio	Resistência à tração (kgf/mm ²)	Condutibilidade (Cu = 100%)
Latão	40	20
Cobre	25	100
Latão + alumínio	122	21
Latão extra duro	90	20
Molibdénio	196,9	34
Latão com revestimento de zinco	49,22	21
Tungsténio	250	34,5

O processo tem várias variáveis que podem ser controladas durante a maquinagem (duração do impulso, tempo de pausa, Tensão, Intensidade de corrente entre outros) que influenciam o desempenho da electroerosão (velocidade de corte, rugosidade superficial e precisão dimensional).

3 Caracterização dos materiais

3.1 Material da peça

3.1.1 Aço AISI 1045

O aço AISI 1045, conhecido vulgarmente como aço de construção, é um aço de médio teor em carbono, com boas propriedades mecânicas, com dureza compreendida entre os 180 e 300 HB é usado regularmente na indústria para peças sem grande especificidade. Por ser largamente utilizado na indústria e nomeadamente na empresa de acolhimento, ESS, foi o material escolhido para sofrer os testes.

Tabela 2 – Propriedades químicas do aço AISI 1045

Elemento	Símbolo	Percentagem
Ferro	Fe	98.51 - 98.98 %
Carbono	C	0,42 – 0,5 %
Manganês	Mn	0,6 – 0,9 %
Fósforo	P	<= 0,04 %
Enxofre	S	<= 0,05 %

Na Figura 15 podemos observar as placas de aço, com as diferentes espessuras (20, 40 e 60 mm) que foram utilizadas nos ensaios.



Figura 15 – Placas de aço AISI 1045 usadas nos ensaios

3.2 Material da ferramenta

3.2.1 Molibdénio

O fio de molibdénio que foi utilizado nos ensaios tem uma composição química de 99,95% de molibdénio e 0,05% de outros metais. O fabricante não fornece muitas informações sobre o fio, mas sabe-se que o molibdénio tem uma temperatura de fusão

na ordem dos 2610 °C, uma resistência elétrica de 52 nΩm, uma condutibilidade térmica de 135 W/mk, uma densidade de 10.22 g/cm³ e um coeficiente de expansão térmica de 4,9 m⁻⁶ [24] para além disso apresenta ainda uma resistência à tração de 196,9 kgf/mm² e uma condutibilidade de 34% (considerando Cu=100% como é possível observar na Tabela 1 presente na página 14.)

Quick Details

Local de produção Jiangsu, China (Mainland)

Diâmetro 0.18mm

Composição química 99.95% Molibdénio

Tolerância ±0.002-±0.004mm

BAOMA Molybdenum Wire

Material: high purity molybdenum

Technical: the most advanced cold drawn technology

1. High tensile strength: 12% higher than National standard GB4182-84
2. High melting point, Low density and Thermal coefficients
3. Good thermal conductivity properties and Resistance of high-temperature
4. Under the same working condition, there will be less wire broken for BAOMA brand Moly-wire
5. Percentage of Extension: less than 3%, which make our moly-wire not easy to tie a knot and not easy to elongate to improve the processing stability and the precision.
6. Longer using life: Good finishing, high precision. Can be used 1.2 times (improve 120%) longer than normal moly-wire.
7. Vacuum packing: can be kept for more than one year without go bad.

Figura 16- Detalhes sobre o fio de molibdénio fornecido pelo fabricante.

Fonte: [25] , consultado em 2016-01-03

3.2.2 Latão

O latão é uma liga metálica composta de cobre e zinco, dependendo do tipo do latão a percentagem de zinco pode variar entre os 5% e 45%. Podem ser adicionados outros metais, variando a quantidade e a proporção desses mesmos metais, alterando-se assim as propriedades da liga.

É uma liga dúctil, maleável e boa condutora de energia elétrica e térmica. O seu ponto de fusão não é fixo, pois dependerá da sua composição química, mas no geral situa-se entre 900° e 940°C.

O fio utilizado nestes ensaios foi o AC Brass LP 900, sendo este fio talvez o mais utilizado nas máquinas de electroerosão por fio de corte submerso em Portugal, fruto das suas boas características é utilizado em erosões não especiais.



Figura 17 – Fio de Latão – AC Brass LP 900

Tem uma resistência à tração de 900 MPa, uma elongação de 1,5% e uma condutividade de 22% IACS.

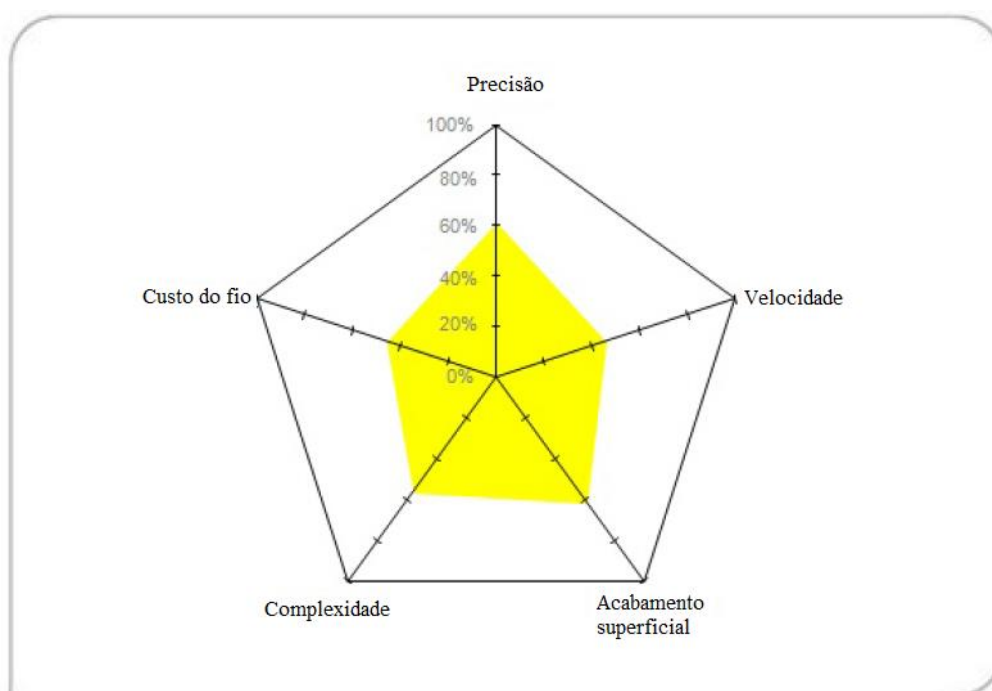


Figura 18 – Gráfico das características do fio dado pelo fabricante
Fonte: [26]

Como se pode observar na Figura 18, este é um fio com desempenho médio em todas as vertentes, aliando estas características a uma boa relação qualidade/preço.

4 Processo Experimental

O processo experimental usado nesta dissertação é descrito neste capítulo, começando por apresentar as máquinas usadas durante os ensaios, a técnica utilizada, o DoE Taguchi, e os resultados obtidos.

A finalidade desta dissertação é a compreensão da influência dos parâmetros de entrada nos parâmetros de saída (precisão dimensional, tempo de maquinagem e acabamento na superfície erodida), também se pretendem comparar os resultados das duas tecnologias ao nível dos parâmetros de saída e aferir qual a tecnologia mais precisa, mais rentável (analisando o tempo que necessita para realizar o trabalho) e com melhor acabamento superficial na zona de erosão.

As duas tecnologias que se pretendem comparar apresentam diferentes materiais ferramenta, nomeadamente molibdénio e latão. O material da peça foi sempre o mesmo, nomeadamente o aço AISI 1045, denominado aço de construção.

4.1 Apresentação das máquinas

Durante a realização deste estudo foram efetuados testes em duas máquinas diferentes, a BAOMA DK7732 para a tecnologia de electroerosão com fio de molibdénio e uma ONA AF25 para a tecnologia de electroerosão com fio de latão que em seguida são apresentadas.

4.1.1 BAOMA DK7732

A Suzhou Baoma Numerical Control Equipment Co., Ltd é uma empresa de construção de máquinas industriais fundada em Janeiro de 2001 na China, onde é reconhecida como uma marca importante e com grande procura. Recentemente tem tentado expandir a sua marca além-fronteiras apostando na comercializar máquinas à escala planetária.

Foi em 2003 que construíram a primeira máquina de electroerosão por fio e em 2008 apresentaram o primeiro programa de controlo da máquina totalmente desenvolvido por eles, o BMXP.

A BAOMA tem vindo a apostar no desenvolvimento das máquinas que utilizam fio de molibdénio como material de ferramenta, tendo já conseguido resultados satisfatórios e competitivos face ao fio de latão.

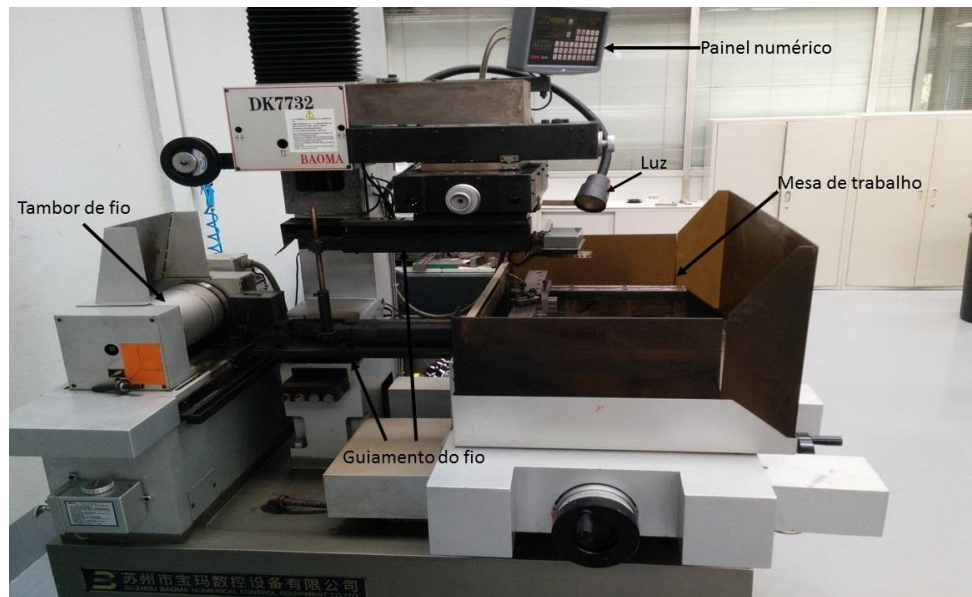


Figura 19 – Máquina BAOMA DK7732 com legenda



Figura 20 – Controlador

Fonte: Modificado de [27]consultado em 2016-01-27

Tabela 3 – Especificações da máquina BAOMA DK7732

ITEM	DK7732
Área de trabalho (mm)	320x400 (X,Y)
Tamanho da mesa (mm)	415x635 (X,Y)
Peso máximo da mesa (kg)	400
Espessura máxima de corte (mm)	500
Ângulo máximo de corte	60°
Precisão dimensional (mm)	≤0,015
Rugosidade (µm)	Ra ≤ 2,5 (um corte) Ra ≤ 1,5 (múltiplas passagens)
Velocidade máxima de corte	150 mm ² /min
Capacidade do reservatório	100 l, com 3 níveis de filtragem
Consumo de energia (KVA)	3

O fio passa várias vezes pela zona de erosão, sendo constantemente enrolado e desenrolado no tambor do fio. O processo acontece emerso com um jato lavado na zona a erodir, jato esse que é composto por uma solução que junta água com um produto fornecido pelo fabricante, o BM-06GP como se pode observar na Figura 21.



Figura 21 – Líquido de corte fornecido pelo fabricante da máquina

A interface de trabalho é bastante simples e apelativa, basicamente é um computador vulgar, com sistema operativo Windows XP onde se encontra o programa que comanda a máquina, o *BMXP Control System* (Figura 22), e o software de desenho *Autocad* que vem já munido de um *add in* (Figura 23) onde é possível definir a estratégia e os parâmetros de corte, que depois serão enviados por um pós processador para a máquina. Durante o corte, no programa *BMXP Control System* podemos observar a trajetória do fio, o tempo decorrido, a velocidade de corte, sendo também possível alterar os parâmetros de corte durante o mesmo.

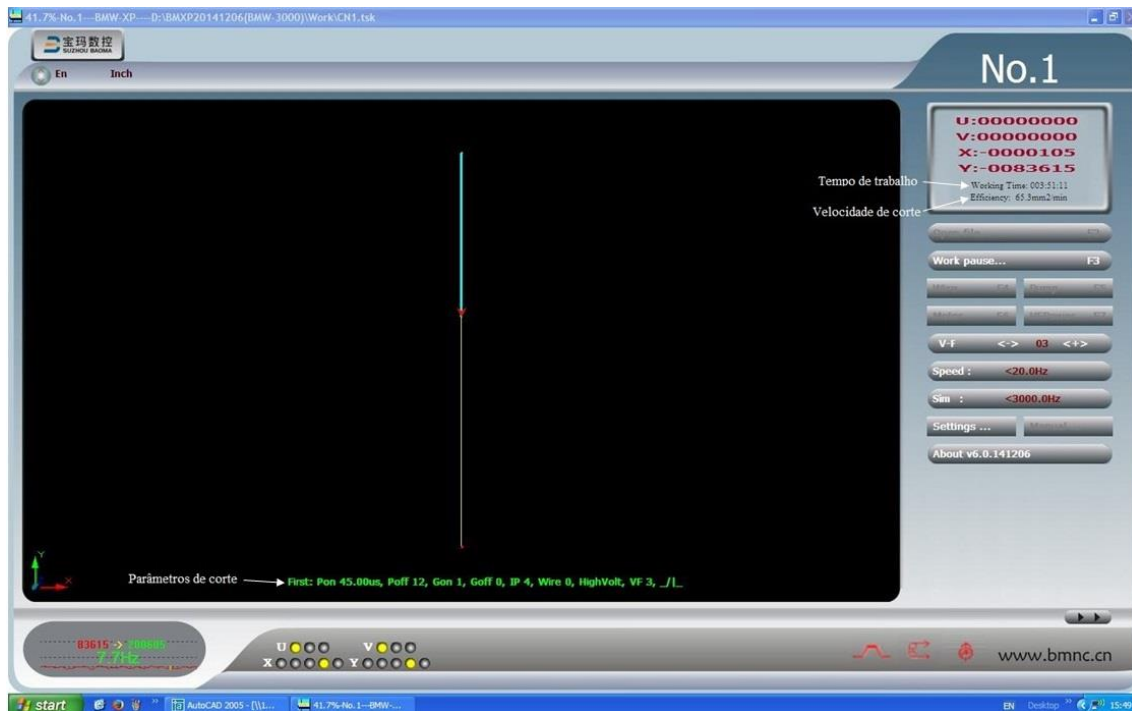


Figura 22 – Interface do programa BMXP

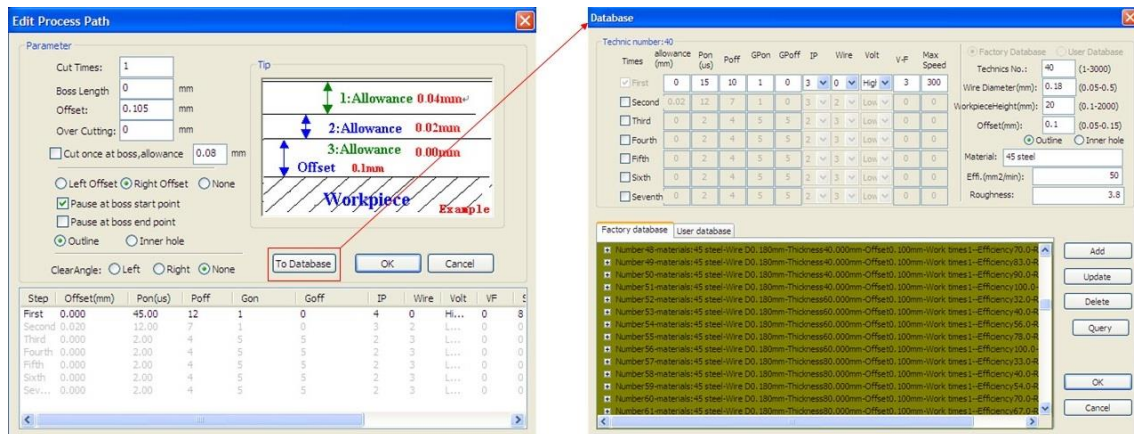


Figura 23 – Add in do Autocad na fase de escolha de parâmetros

Uma das grandes vantagens desta máquina é a possibilidade de executar peças com ângulos até 60°, algo que nas máquinas tradicionais não é possível, para além da principal, como já referi anteriormente, o fio executar várias passagens, o que permite uma poupança enorme em material ferramenta, com consequente perda de precisão.

Parâmetros ajustáveis (possível ver na Figura 23) retirados do manual do construtor:

Cut Times: o número de passagens do fio, pode ir de 1 a 5.

Allowance: Distância entre cortes consecutivos, em milímetros.

Pon: Duração do impulso, em microssegundos. Pode variar entre 0,5 e 250;

Poff: Intervalo de tempo entre cada impulso. É um fator dependente do valor de Pon, que pode variar entre 1 e 30 e pode-se calcular com base na Equação 3, onde o Poff real é o valor do intervalo entre impulsos medido em microssegundos.

$$Poff\ real = Pon \times Poff + Pon \quad (3)$$

GPon: Conjunto de impulsos, pode ir de 1 a 30;

GPoff: Intervalo entre cada conjunto de impulsos, pode ir de 1 a 30;

IP: *Intensidade*, só permite selecionar entre 6 níveis de intensidade (de 1 ampere a 6 ampere);

Wire: Velocidade do fio, pode ser selecionado um valor entre 0, 1, 2 e 3;

Volt: Tensão, o interface da máquina só permite alternar entre dois valores de tensão, alta voltagem e baixa voltagem;

V-F: Coeficiente de estabilidade, pode ir desde 0 até 500.

Max speed: Velocidade máxima do processo.

Wire Diameter: Diâmetro do fio, a máquina pode trabalhar com fio entre 0,05 e 0,5 mm.

Workpiece Height: Espessura, em milímetros, da peça a erodir, pode ir desde 0,01 até 500 milímetros.

Offset: Compensação do fio mais o *gap*. Quão desviado passa o fio da linha do desenho. Pode ir de 0.05 até 0,15 milímetros.

Um dos motivos desta dissertação é também perceber qual a influência de alguns destes parâmetros no trabalho da máquina, pois como é um método ainda pouco utilizado ainda não existem muitos estudos sobre ele.

4.1.2 ONA AF25



Figura 24 – Máquina de ONA AF25 com legenda

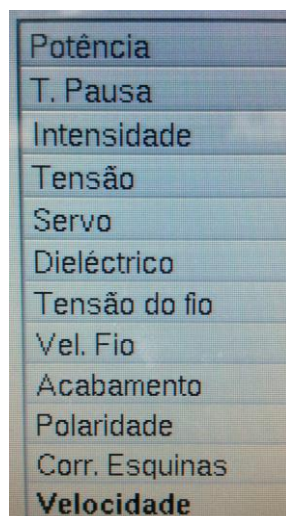
A ONA, fabricante desta máquina, é das mais antigas empresas do mundo na produção de máquinas para electroerosão, fundada em Espanha (no País Basco) no ano de 1952, então a primeira empresa europeia no ramo. Desde então a marca tem expandido e ganho experiência para a conceção de melhores e mais eficazes máquinas, tendo atualmente mais de 14000 máquinas instaladas em todo o mundo distribuídas por 60 países nos 5 continentes.

Nesta máquina o corte acontece submerso e o fio não é reutilizado, outra particularidade desta máquina é que permite tensionar, cortar e enfiar automaticamente o fio, poupando assim um enorme tempo e trabalho ao operador. É possível selecionar mais do que um tipo de fio, desde latão, a cobre ou tungsténio, podendo estes ser revestidos ou não e terem diferentes diâmetros. A máquina traz incorporado um controlador onde é possível observar em tempo real do percurso do fio, bem como alterar os parâmetros de erosão. Aqui o movimento da mesa é gerado com base em códigos CNC.

Tabela 4 – Especificações da máquina ONA AF25

Item	ONA AF25
Área de trabalho (mm)	400 x 300
Espessura máxima de corte (mm)	250
Dimensões do tanque (mm)	700 x 650 x 250
Avanço máximo do eixo U e V (mm)	150
Ângulo máximo de corte	8° (é possível mais com boquilhas especiais)
Diâmetro do fio (mm)	Entre 0,10 e 0,33 mm
Rugosidade (µm)	Ra ≥ 0,2
Velocidade máxima	450 mm ² /min para o fio de 0,33mm φ

Parâmetros ajustáveis fornecidos pelo fabricante:



Potência
T. Pausa
Intensidade
Tensão
Servo
Dielétrico
Tensão do fio
Vel. Fio
Acabamento
Polaridade
Corr. Esquinas
Velocidade

Figura 25 – Tabela dos parâmetros de corte da ONA AF25

Potência: Indica os diferentes níveis de energia que se podem obter do gerador. Podem-se seleccionar valores entre 0 a 15. Os regimes de desbaste utilizam valores compreendidos entre 8 a 15 enquanto para repassagens e acabamentos se utilizam os níveis de 0 a 7.

Cada nível de potência tem associado uma intensidade média entre o fio e a peça. Os grandes valores de potência produzem mais calor, têm uma maior duração e tamanho das faíscas, tudo isto leva a um aumento da intensidade entre o fio e a peça, o que provoca maior arranque de material e consequentemente maior velocidade de corte. Um aumento excessivo de potência pode originar roturas de fio. A potência está intimamente relacionada com a rugosidade, a valores altos de potência correspondem valores altos de rugosidade.

Tempo de Pausa: Indica a separação em tempo entre descargas sucessivas. Este parâmetro pode variar desde 1 a 127 micro segundos.

Este tempo entre ciclos é o tempo em que não existem descargas, portanto durante esse tempo não há arranque de material. Este tempo serve também para limpar do canal de descarga o material arrancado no ciclo anterior, refrescar o canal e renovar o dielétrico no canal para aí se efetuarem as descargas seguintes. Se o valor de pausa diminuir excessivamente não há tempo para a limpeza do canal e podem ocorrer numerosos micro curto-circuitos. Devido a tudo isto e à pouca refrigeração podem ainda ocorrer roturas do fio. Conforme se diminui o valor da pausa menor é o tempo entre as faíscas, aumenta a velocidade de corte e produz-se um maior incremento da intensidade entre o fio e a peça. Pequenas variações da pausa não têm influência sobre o “gap” (distância entre o fio e peça).

Tensão: Indica a diferença de potencial durante a ionização no “gap”. Pode ser seleccionado um valor entre 100 a 250 V.

Quanto maior o nível de tensão maior é a energia da descarga, portanto maior é a taxa de arranque de metal, em consequência obtêm-se maiores valores de rugosidade. Aumentando este valor aumenta a intensidade entre o fio e peça e existe um maior risco de haver rotura do fio.

Intensidade: Diz-nos a intensidade de corrente que passa no fio durante o período de corte.

Servo: Indica a diferença de tensão teórica entre o fio e a peça durante o processo de erosão. O valor do servo, controla a distância entre o fio e a peça, podendo ser selecionado de uma gama entre 1 e 256 V.

Com grandes valores de servo consegue-se um grande tamanho do canal de descarga, o tempo de ionização é maior logo a taxa de arranque diminui. Diminuindo o valor do servo, diminui-se a distância entre o fio e a peça e provoca-se assim um aumento da velocidade de corte. Em operações de desbaste, ajustar muito o servo (diminuir o seu valor), aumentando a taxa de arranque, aumenta-se também o risco de rotura do fio, já que faz com que o canal de descarga tenha menor tempo de limpeza e daí podem dar-se mais curto-circuitos.

Dielétrico: Indica o nível de dielétrico que circula entre o fio e a peça. A sua função para além de encher o canal de descarga de dielétrico é refrigerar o canal de descarga e arrastar os resíduos libertados pela erosão da zona de corte. Pode ser selecionado um valor entre 0 e 31.

A limpeza é um fator muito importante na velocidade de corte durante o desbaste. Por isso, recomenda-se utilizar o índice 31. Se se realiza um ajuste correto das bocas consegue-se uma pressão entre 10 a 11 Kg/cm² com que se consegue uma maior velocidade de corte. Não tem nenhuma influência no tamanho do “gap”, nem sobre a rugosidade.

Ao realizar repassagens deve-se ter em conta este parâmetro de modo a assegurar que há um jato de água na zona de erosão. Valores muito altos do dielétrico nas repassagens podem produzir movimentos do fio provocando a aparição de raias nas peças. Nas repassagens dentro do canal erodido deve-se usar nível 5 de pressão de dielétrico para assegurar a limpeza a toda a altura da peça. Se se está a realizar uma repassagem de uma matriz deve-se seleccionar o nível 0 ou 1.

Tensão do fio: Tensão mecânica a que está submetido o fio de corte. Pode-se seleccionar desde o nível 0 e 31.

Entre a boca superior e inferior, com um nível de tensão do fio programado de 16 deve existir perto de 1kg de tensão mecânica no fio, na zona antes do freio devem existir perto de 300gr. O incremento da tensão do fio reduz a resistência do mesmo ao desgaste produzido pelas descargas e aumenta o risco de rotura.

O valor da tensão mecânica não tem influência sobre a taxa de arranque, o “gap” ou a rugosidade. Recomenda-se utilizar valores altos de tensão do fio nos processos de repassagem pois neste caso o fio está pouco solicitado e pode-se aumentar a tensão mecânica a fim de melhorar a verticalidade das peças.

Velocidade do fio: Velocidade de alimentação do fio. Pode-se seleccionar entre uma gama de valores desde 0 a 15. É a velocidade de avanço do fio pelas guias.

Durante a erosão produz-se um desgaste do fio, devido as sucessivas descargas que têm lugar ao longo da peça. Conforme aumenta a altura da peça, um mesmo tramo de fio pode mandar um maior número de descargas incrementando-se o desgaste e portanto aumentando o risco de rotura. Em peças de grande espessura recomenda-se aumentar a velocidade do fio com a finalidade de homogeneizar o desgaste. A velocidade do fio não tem influência sobre o “gap”, velocidade de erosão nem rugosidade, mas com valores baixos de velocidade do fio aparecem problemas de conicidade nas peças e aumenta o risco de rotura.

Acabamento: Parâmetro que limita a energia de erosão para conseguir baixar rugosidades. Só se aplica em regimes de repasso.

Polaridade: Envia um sinal contrário ao do sentido da tensão de vazio e produz uma corrente com impulsos e efeito anti-eletrólise. Pode variar entre três níveis, 0, 1 e 2. Recomenda-se sua utilização em processos que se queira deixar uma boa qualidade

superficial e principalmente quando se trabalha com materiais sensíveis a eletrólise como o titânio, metais duros, etc...

Correção de esquinas: Atua nas esquinas vivas e nas esquinas redondas para melhorar a sua geometria. Seleciona-se entre 0 e 3, sendo que 0 é sem correção de esquinas e 3 é correção máxima. Os níveis 1 e 2 utilizam-se em regimes de desbaste e o valor 1 é menos exigente que o 2, enquanto o nível 3 utiliza-se em processo de acabamento.

Velocidade máxima de corte: Este parâmetro aparece no controlador como velocidade. No manual de tecnologia aparece como *limit* (mm/min). É programável até 240.

Este parâmetro limita a velocidade máxima da erosão. Esta função tem como principal finalidade na realização de repassagens. Nos repassos devido há existência de pouco material a erodir e muitas vezes é necessário o limitador de velocidade para estabilizar a erosão. Outro campo de aplicação importante é a realizar erosão de lâminas muito finas. Neste caso pode-se utilizar o limitador de velocidade para estabilizar a erosão.

É possível observar, por comparação com a tecnologia de molibdénio, que a explicação de cada um dos parâmetros é muito mais elucidativa, o que revela que estamos perante um método muito mais estudado e otimizado.

4.2 Design of Experiments

A fim de obter uma boa compreensão entre os parâmetros de entrada e os parâmetros de saída destes ensaios, utilizou-se um DoE Taguchi, que será explicado no capítulo 4.2.1. Os resultados aqui obtidos foram analisados com base no método ANOVA e apresentados no capítulo 4.5.

4.2.1 Taguchi

O método de Taguchi foi criado pelo Dr. Taguchi, ele desenvolveu um método de experiências único e poderoso, que trouxe melhorias em relação aos DoE tradicionais. A otimização de um processo de engenharia ou de um produto deve ser levada a cabo em 3 etapas, *system design*, *parameter design*, *tolerance design*. O *system design* é a fase em que se decidem os parâmetros que vamos colocar no nosso estudo, os parâmetros que queremos ver estudados. Após a seleção dos parâmetros passamos para a fase de *parameter design* onde se decide quais os valores a colocar nos parâmetros que foram previamente selecionados. Por fim temos a *tolerance design*, que é usado para afinar os resultados do *parameter design*, ajustando os parâmetros que têm mais influência no processo, normalmente com este passo conclui-se que é necessário comprar novos equipamentos ou melhores materiais. Tanto o *system design* como o *parameter design* foram realizados como manda o Taguchi, após um *brainstorm* com todos os envolvidos, e à luz dos conhecimentos atuais, foram selecionados os parâmetros e os valores que vamos estudar.

Após esta fase, veem os ensaios sem Taguchi o número de ensaios seria muito elevado, mas devido ao desenho de matrizes ortogonais do Taguchi só serão necessárias realizar um pequeno número de experiências para tirar conclusões válidas.

A matriz L_{18} que foi utilizada permite que um dos parâmetros tenha 2 níveis e os restantes 7 parâmetros possam ter 3 níveis diferentes fazendo um total de 18 experiências, todas diferentes umas das outras. Se todas as combinações de parâmetros e

níveis fossem usadas, isto iria envolver 4373 experiências, o que comparado com as 18 que foram realizadas dá uma noção do tempo e do dinheiro poupado nos ensaios.

4.2.2 Tecnologia de fio de molibdênio

Com base numa experiência de trabalho contínuo de cerca de 2 meses com esta tecnologia e com a máquina em questão e após um parecer dos operadores que nela trabalham à cerca de dois anos selecionaram-se os parâmetros e os níveis que observamos na Tabela 5:

Tabela 5- Parâmetros e valores escolhidos para realizar os DoE de fio de molibdênio

Parâmetros	Símbolo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Espessura da peça	Esp	20	40	60
Tensão	V	Baixa voltagem	Alta Voltagem	-
Pulse on	Pon	15	30	45
Pulse off	Poff	5	10	15
Group on	Gon	1	2	3
Group off	Goff	0	1	2
Intensidade	I	1	3	6
VF	VF	0	5	10

Na Tabela 6 podemos observar a matriz de ensaios gerada em função do método de Taguchi:

Tabela 6 – Matriz Taguchi para tecnologia de molibdênio

Ensaio	Tensão	Espessura	Pulse on	Pulse off	Grop On	Grop Off	Intensidade	VF
M1	Baixa	20	15	5	1	0	1	0
M2	Baixa	20	30	10	2	1	3	5
M3	Baixa	20	45	15	3	2	6	10
M4	Baixa	40	15	5	2	1	6	10
M5	Baixa	40	30	10	3	2	1	0
M6	Baixa	40	45	15	1	0	3	5
M7	Baixa	60	15	10	1	2	3	10
M8	Baixa	60	30	15	2	0	6	0
M9	Baixa	60	45	5	3	1	1	5
M10	Alta	20	15	15	3	1	3	0
M11	Alta	20	30	5	1	2	6	5
M12	Alta	20	45	10	2	0	1	10
M13	Alta	40	15	10	3	0	6	5
M14	Alta	40	30	15	1	1	1	10
M15	Alta	40	45	5	2	2	3	0
M16	Alta	60	15	15	2	2	1	5
M17	Alta	60	30	5	3	0	3	10
M18	Alta	60	45	10	1	1	6	0

Os restantes parâmetros passíveis de alteração foram mantidos constantes ao longo de todos os ensaios e podem ser consultados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros constantes ao longo dos ensaios

Parâmetro	Valor
Velocidade do fio	0
Allowance	0
Speed	0
Offset	0

4.2.3 Tecnologia de fio de latão

Com base na experiência do Professor Marvim (docente responsável pela parte de electroerosão na Escola Secundária Rocha Peixoto) e os conselhos do Prof. Marafona selecionaram-se os seguintes parâmetros e níveis presentes na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros e valores escolhidos para realizar os DoE de fio de latão

Parâmetros	Símbolo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Espessura da peça	Esp	20	40	60
Tensão	V	60	80	-
Potência	P	7	8	9
Tempo Pausa	Tpausa	18	21	24
Intensidade	I	4	5	6
Polaridade	Pola	0	1	2
Servo	S	30	40	50
Dielétrico	D	25	28	31

Na Tabela 9 podemos observar os parâmetros, e respetivos valores, que foram mantidos constantes ao longo de todos os ensaios.

Tabela 9 – Parâmetros constantes ao longo dos ensaios

Parâmetro	Valor
Tensão do fio	18
Velocidade do fio	18
Acabamento	0
Corretor de esquinas	2
Velocidade	240
Y2	175

Na Tabela 10 podemos observar a matriz de ensaios gerada em função do método de Taguchi:

Tabela 10 - Matriz Taguchi para tecnologia de latão

Ensaio	Tensão	Espessura	Potência	Tempo Pausa	Intensidade	Polaridade	Servo	Dielétrico
L1	60	20	7	18	4	0	30	25
L2	60	20	8	21	5	1	40	28
L3	60	20	9	24	6	2	50	31
L4	60	40	7	18	5	1	50	31
L5	60	40	8	21	6	2	30	25
L6	60	40	9	24	4	0	40	28
L7	60	60	7	21	4	2	40	31
L8	60	60	8	24	5	0	50	25
L9	60	60	9	18	6	1	30	28
L10	80	20	7	24	6	1	40	25
L11	80	20	8	18	4	2	50	28
L12	80	20	9	21	5	0	30	31
L13	80	40	7	21	6	0	50	28
L14	80	40	8	24	4	1	30	31
L15	80	40	9	18	5	2	40	25
L16	80	60	7	24	5	2	30	28
L17	80	60	8	18	6	0	40	31
L18	80	60	9	21	4	1	50	25

4.3 Metodologia das experiências

O material da peça, aço AISI 1045, foi retificado para ficar nas medidas pretendidas, 190x50 (X,Y), isto para cada uma das três espessuras (20, 40 e 60).

A metodologia seguida ao longo das experiências é similar nos dois casos e será explicada na Figura 26.

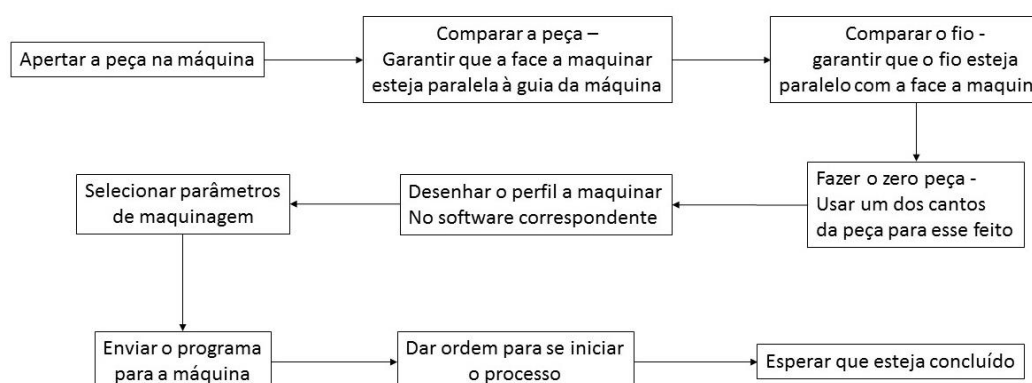


Figura 26 – Metodologia das experiências

4.3.1 Tecnologia Molibdénio

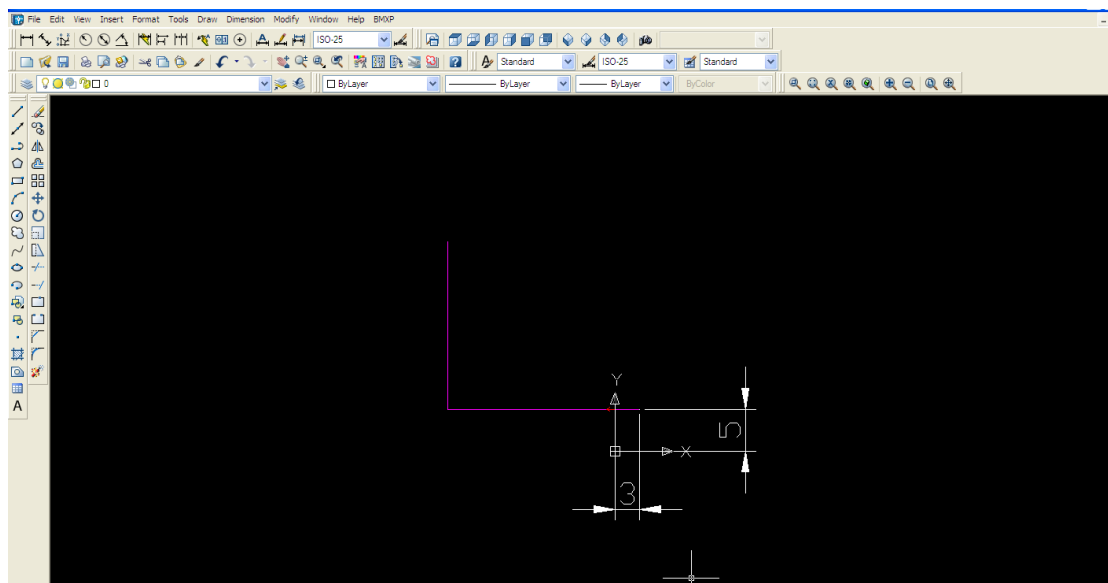


Figura 27 – Interface do software Autocad 2005.

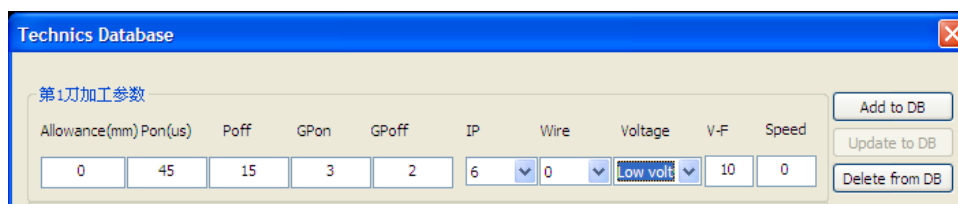


Figura 28 – Add-in no software Autocad que permite a escolha dos parâmetros de corte

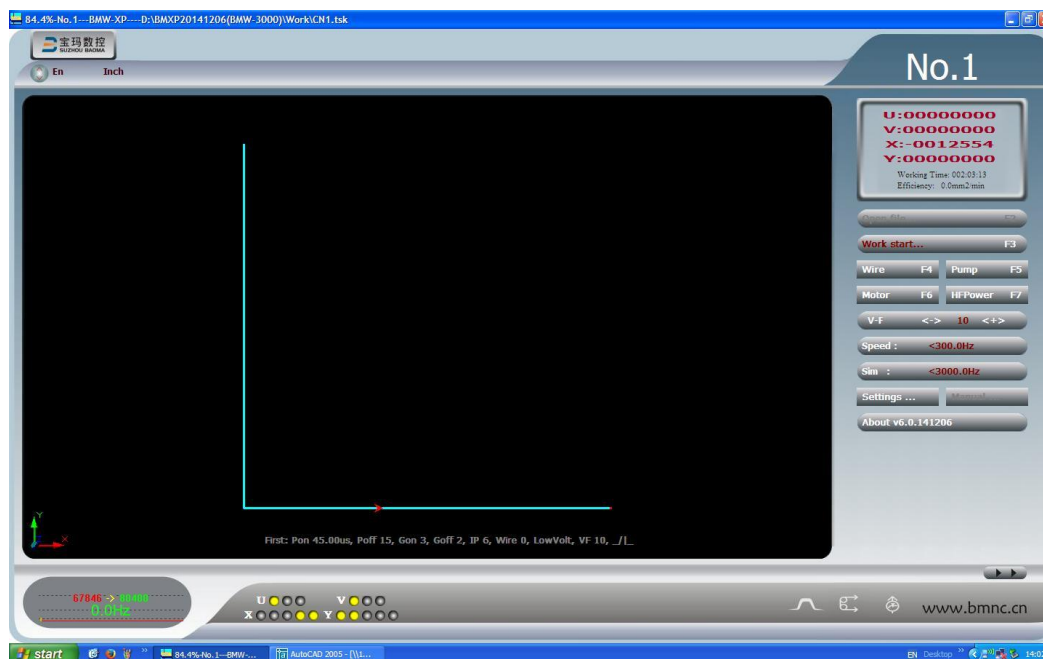


Figura 29 – Interface do programa BMXP

4.3.2 Tecnologia Latão

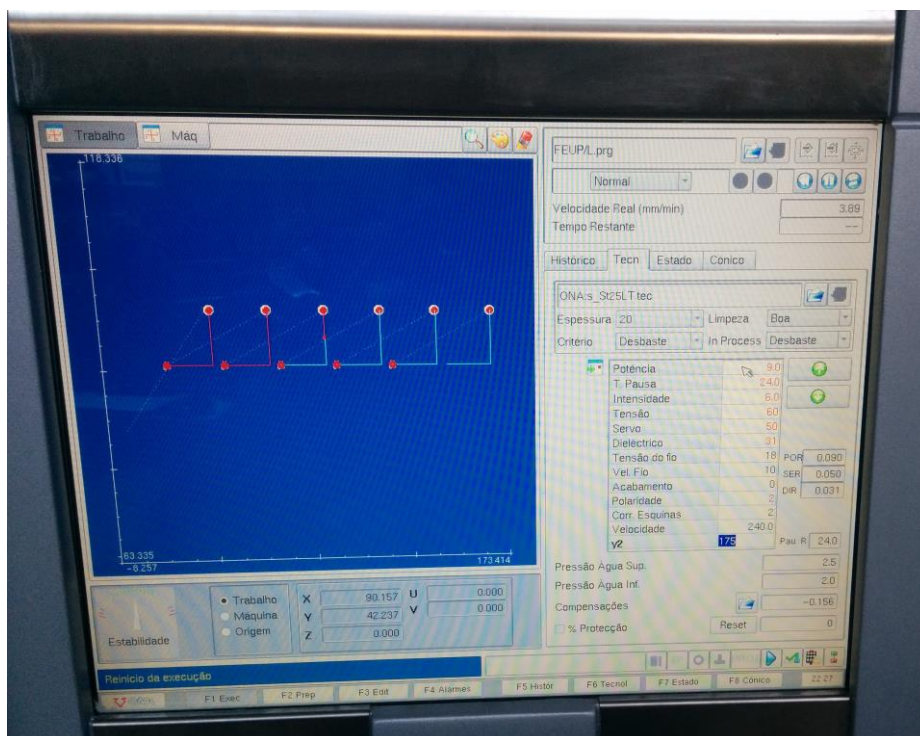


Figura 30 – Interface de trabalho ONA AF25

4.4 Resultados

Os parâmetros de saída mais importantes para um melhor conhecimento do processo são: o tempo do ensaio, o *kerf* e a rugosidade superficial nas zonas erodidas. E foram esses os parâmetros que quantificamos durante a análise dos resultados.

Os seguintes ensaios não foram possíveis concluir:

- M5 - Ocorreu um curto-circuito ao fim de 1 minuto e 40 segundos;
- M16 – Ocorreu um curto-circuito ao fim de 2 minutos;
- M17 – Fio partiu após cortar cerca de 4mm;
- L9 – Partiu o fio após 4 minutos e 9 segundos de maquinagem;
- L12 – Partiu o fio quando estava a entrar em contacto com a peça;
- L15 – Partiu o fio ao fim de 1 minuto de trabalho.

4.4.1 Tempo

Tempo que demorou cada erosão e sua velocidade de corte apresentada sobre a forma de Taxa de Remoção de Material.

Tabela 11 –Tempo e Taxa de Remoção do Material dos ensaios

Ensaio	Tempo	TRM (mm ² /min)	Ensaio	Tempo	TRM (mm ² /min)
M1	0:32:27	24,65	L1	00:10:01	79,84
M2	0:35:42	22,41	L2	00:13:52	57,68
M3	1:13:00	10,96	L3	00:11:07	71,94
M4	0:29:58	53,39	L4	00:21:17	75,19
M5	Inválido	Inválido	L5	00:19:03	83,99
M6	0:43:59	36,38	L6	00:17:36	90,91
M7	3:10:24	12,61	L7	00:38:58	61,59
M8	0:44:40	53,73	L8	00:35:50	66,98
M9	2:13:15	18,01	L9	Inválido	Inválido
M10	0:46:59	17,03	L10	00:14:36	54,79
M11	0:17:32	45,64	L11	00:16:41	47,96
M12	0:36:16	22,06	L12	Inválido	Inválido
M13	0:21:57	72,89	L13	00:27:01	59,22
M14	3:12:15	8,32	L14	00:42:53	37,31
M15	0:32:53	48,66	L15	Inválido	Inválido
M16	Inválido	Inválido	L16	00:34:06	70,38
M17	Inválido	Inválido	L17	00:41:47	57,44
M18	0:31:53	75,28	L18	00:30:07	79,68

É possível verificar que a TRM média na tecnologia de fio de molibdênio é de 33,16 mm²/min e usando a de fio de latão é de 66,33 mm²/min, ou seja, em termos médios o fio de latão é 2x mais rápido que o fio de molibdênio, sendo que a TRM máxima no caso do fio de molibdênio foi de 75,28 mm²/min e no caso do fio de latão foi de 90,91 mm²/min. A TRM mínima ocorreu para o fio de molibdênio, erodindo este a 8,32 mm²/min já na Máquina ONA AF25 com fio de latão a TRM mais baixa foi de 37,31 mm²/min.

Os valores das TRM da tecnologia de latão são mais “homogêneos” do que os da utilização do fio de molibdênio.

4.4.2 Kerf

O Kerf (canal do corte) foi medido usando o microscópio ótico invertido Olympus PMG 3 usando uma lente com ampliação de 23x, equipado com a câmara microscópica digital Olympus DP12 do laboratório C008 de materialografia do INEGI.

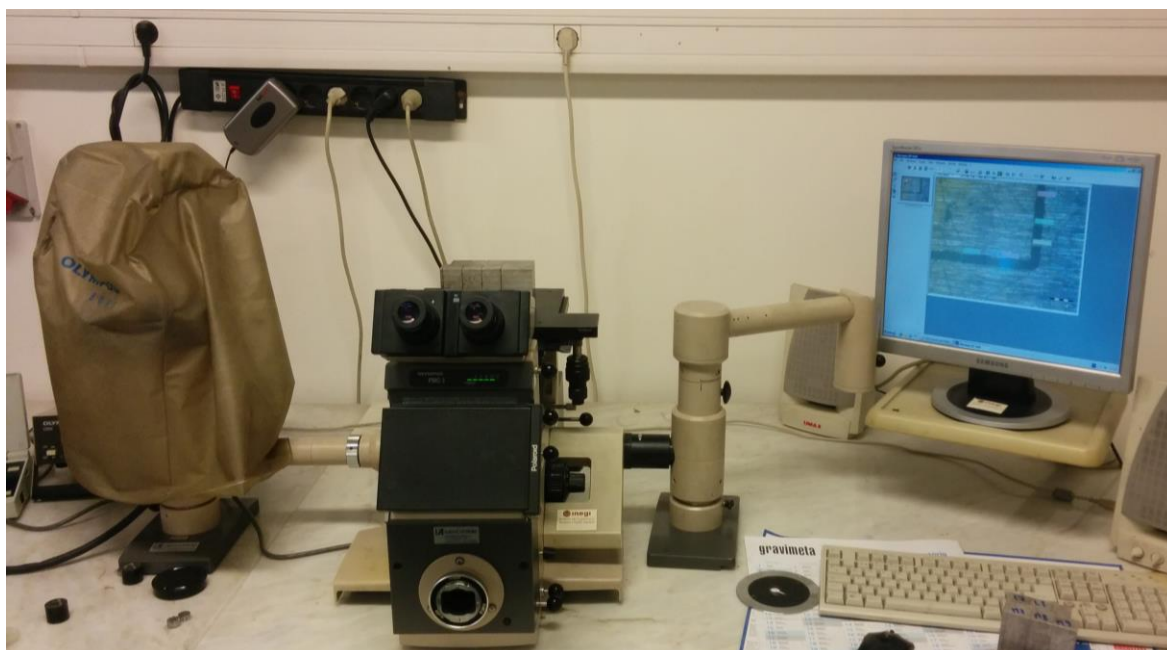


Figura 31 – Microscópio ótico Olympus PMG 3

Para cada ensaio foram realizadas 6 medições como exemplifica a Figura 32. Mas como o diâmetro dos fios utilizados nas diferentes tecnologias não são iguais seria injusto comparar só o tamanho do *kerf*, então optou-se por usar uma variação percentual do *kerf* que nos dá um rácio percentual de quanto o *kerf* é maior do que o diâmetro do fio, como se pode ver na Equação 4.

$$Kerf\ percentual = \frac{kerf - \phi\ fio}{\phi\ fio} \times 100 \quad (4)$$

Tabela 12 – Resultados do *kerf* dos ensaios

Ensaio	Kerf (μm)	Kerf percentual	Ensaio	Kerf (μm)	Kerf percentual
M1	285,33	58,52	L1	449,48	79,79
M2	328,55	82,53	L2	489,53	95,81
M3	362,82	101,56	L3	561,38	124,55
M4	323,11	79,50	L4	476,53	90,61
M5	Inválido	Inválido	L5	485,20	94,08
M6	328,52	82,51	L6	507,30	102,92
M7	335,74	86,52	L7	523,47	109,39
M8	339,35	88,53	L8	552,35	120,94
M9	350,18	94,54	L9	Inválido	Inválido
M10	305,06	69,48	L10	507,22	102,89
M11	323,11	79,50	L11	555,96	122,38
M12	416,97	131,66	L12	Inválido	Inválido
M13	362,90	101,61	L13	467,51	87,00
M14	306,86	70,48	L14	471,12	88,45
M15	404,38	124,66	L15	Inválido	Inválido
M16	Inválido	Inválido	L16	504,69	101,88
M17	Inválido	Inválido	L17	505,42	102,17
M18	413,36	129,64	L18	567,51	127,00

O *Kerf* médio no caso do fio de latão é de 103,32% do seu tamanho original já no molibdénio é de 92,08% do seu tamanho original, sendo que o *Kerf* máximo é de 131,66 % para a tecnologia que utiliza fio de molibdénio e 124,55% para a tecnologia que utiliza fio de latão.

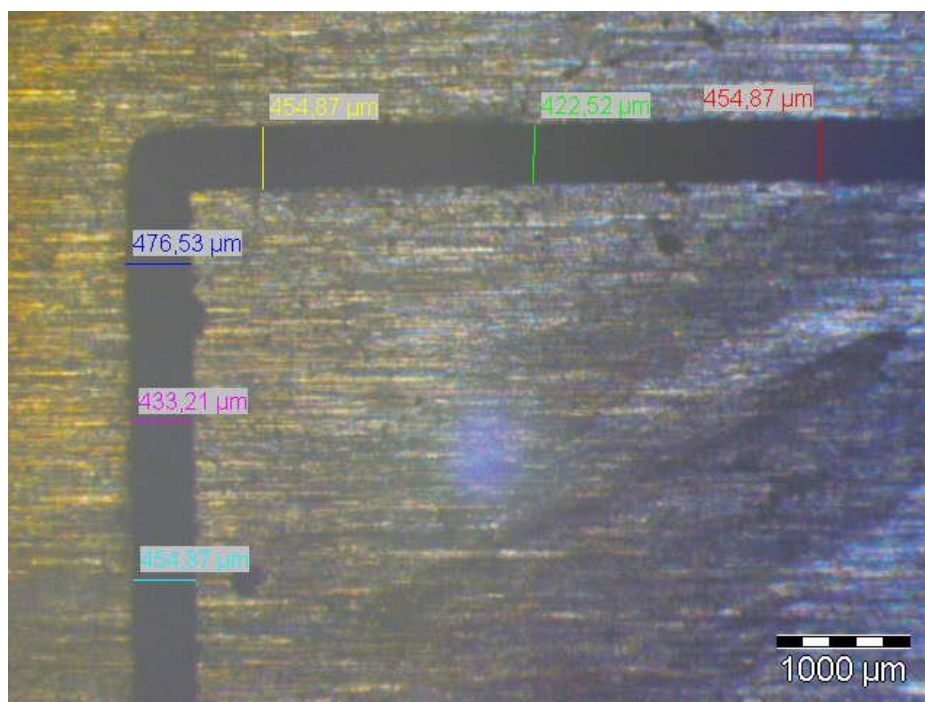


Figura 32 – Exemplo de uma imagem usada na análise do *kerf*.

4.4.3 Rugosidade

A rugosidade superficial das zonas erodidas foi analisada no laboratório do CETRIB (INEGI) usando o rugosímetro Hommelwerke T8000 equipado com um apalpador Hommelwerke TKL300 (raio de ponta de 5 µm, ângulo de 90°, amplitude +- 300 µm).

As medições foram realizadas com um comprimento de medição de 4,8 mm e para o cálculo dos parâmetros de rugosidade foi usado um filtro cut-off de 800 µm.

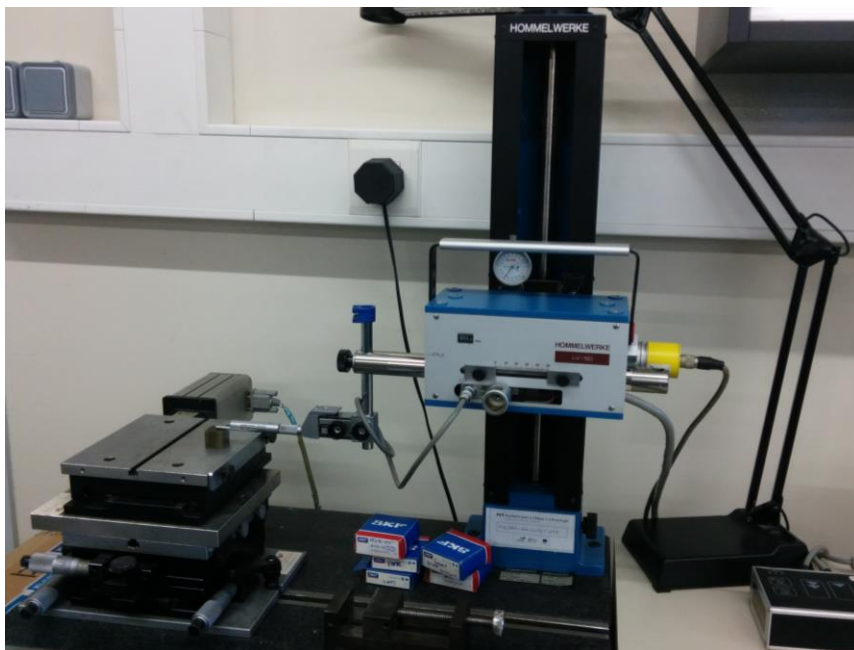


Figura 33 – Rugosímetro Hommelwerke D-7730

Para cada peça foram realizadas 6 medições de rugosidade, 3 em cada superfície erodida e em 3 ângulos diferente, 0°, 45° e 90°, como é possível observar na Figura 34.

As topografias foram obtidas com um interferómetro ótico Bruker NPFLEX. Foi usada um lente de ampliação 10x.

O valor analisado foi o Ra (Rugosidade média) que nos dá o valor médio das rugosidades na superfície.

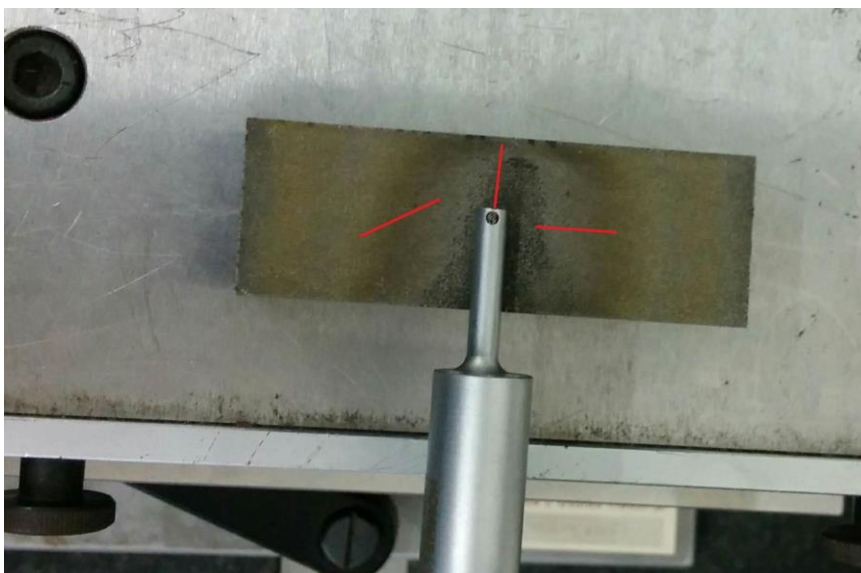


Figura 34 – Demonstração dos locais onde se realizaram os testes de rugosidade

Tabela 13 – Resultados da Rugosidade média (Ra)

Ensaio	Rugosidade Ra (μm)	Ensaio	Rugosidade Ra (μm)
M1	2,32	L1	2,53
M2	4	L2	3,47
M3	4,91	L3	3,13
M4	2,91	L4	2,76
M5	Inválido	L5	2,61
M6	4,24	L6	2,62
M7	3,41	L7	2,77
M8	5,47	L8	3,96
M9	3,85	L9	Inválido
M10	3,7	L10	2,97
M11	4,18	L11	3,1
M12	3,76	L12	Inválido
M13	4,69	L13	2,59
M14	4,17	L14	2,67
M15	4,73	L15	Inválido
M16	Inválido	L16	2,92
M17	Inválido	L17	3,09
M18	5,36	L18	2,68

A média dos valores de Ra para a tecnologia de molibdénio é de 4,11 μm e no caso do latão é de 2,74 μm , ou seja, a tecnologia de latão permite um acabamento superficial maioritariamente melhor que a tecnologia de molibdénio.

A melhor rugosidade foi obtida na máquina que utiliza a tecnologia de molibdénio e registou um Ra de 2,32 tendo sido também nesta tecnologia onde se registou o maior valor de Ra 5,47 μm .

Os valores de Ra para a tecnologia de latão são mais “homogéneos” havendo pouca discrepância entre eles.

Algumas amostras apresentavam grandes valores de oxidação, pelo que influenciaram certamente o resultado das leituras do rugosímetro.

4.5 Análise de variância (ANOVA)

Os resultados das experiências foram analisados usando a análise de variância (ANOVA), esta é uma técnica computacional que permite à pessoa responsável pelo ensaios quantificar a contribuição, em termos percentuais, que cada parâmetro de entrada apresenta no resultado final. O nível de significância de cada parâmetro é dado pelo rácio de variância, o F-Rate.

Segundo [28] se $F\text{-Rate} < 1$ significa que o erro é superior ao efeito do parâmetro, ou seja, o efeito do parâmetro é insignificante e indistinguível do efeito do erro;

$F\text{-Rate} \approx 2$ significa que o parâmetro tem um efeito moderado em relação ao erro.

$F\text{-Rate} > 4$ diz-nos que o parâmetro é muito forte em relação ao erro e por isso é claramente significativo.

O F-Rate pode ser calculado segundo a Equação 5,

$$F - Rate = \frac{MS \text{ parâmetro}}{Se^2} = \frac{\frac{S.S. \text{ parâmetro}}{d.o.f. \text{ parâmetro}}}{\frac{S.S. \text{ erro}}{d.o.f. \text{ erro}}} \quad (5)$$

Esta técnica de análise de resultados usa uma técnica matemática conhecida como *a soma dos quadrados* [28] para conferir o desvio do fator de controlo.

Para esta análise utilizou-se o software de análise *WinRobust*.

Nos ensaios inválidos, devido a limitação do software *WinRobust* não reconhecer testes com valores 0, usaram-se os seguintes valores em substituição do 0:

- TRM – 0.1, escolheu-se este valor pois neste parâmetro quanto maior for o valor melhor;
- Kerf – 200, foi escolhido este valor pois é superior a todos os restantes;
- Ra – 50, foi escolhido este valor pois supera todos os outros.

4.5.1 Pooling

O *Pooling* é um método para estimar o erro da variância, que consiste em juntar os parâmetros com pouca contribuição, F-Ratio inferior a 2%, considerando a percentagem desses parâmetros como erro e reajustando a contribuição dos outros fatores.

4.5.2 Taguchi Signal-to-Noise

A razão S/N mede a forma como a resposta varia em relação ao valor alvo sob diferentes condições de ruído.

A maximização da razão S/N constitui uma minimização da função de perda, ou seja, mesmo que o que seja pretendido seja algo tipo o “menor valor é o melhor” o S/N vai maximizar os valores, o mesmo para quando se pretende o “maior valor é o melhor”, pois ao maximizar os valores minimiza a função perda.

A relação S/N, compara o nível do sinal desejado com o nível do ruído de fundo. Quanto mais alta for o S/N, menor é o efeito do ruído de fundo sobre o sinal desejado.

4.5.3 Resultados

4.5.3.1 Molibdénio

4.5.3.1.1 Taxa Remoção de Material

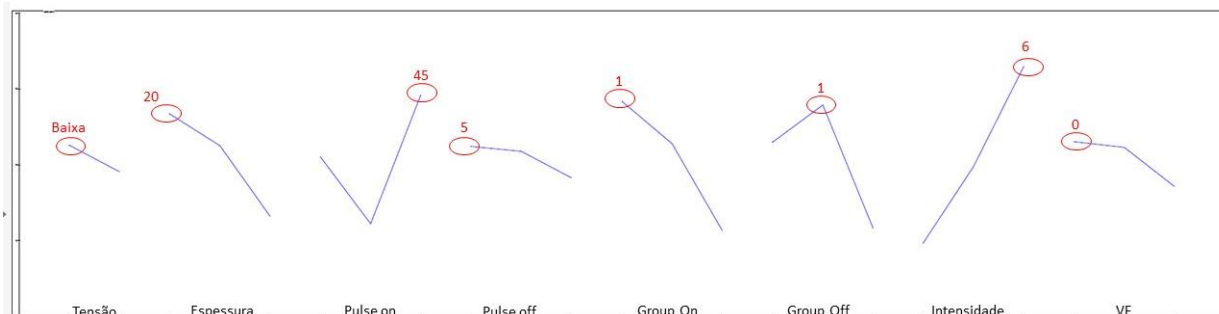


Figura 35 – Taguchi S/N para maximizar a TRM

Tabela 14 – Parâmetros para TRM máxima

Ensaio	Tensão	Espessura	Pulse on	Pulse off	Grop On	Grop Off	Intensidade	VF
VM1	Baixa	20	45	5	1	1	6	0

Tabela 15 – Dados relativos à análise ANOVA para TRM – Tecnologia molibdénio

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	% Influência
Intensidade	1636,35	2	818,18	32,33
Group On	909,09	2	454,55	17,96
Pulse On	868,66	2	434,33	17,16
Group Off	833,37	2	416,69	16,46
Espessura	573,85	2	286,93	11,34
VF	125,87	2	62,94	2,49
Tensão	55,2	1	27,60	1,09
Pulse Off	59,48	2	29,74	1,18
Total	5061,87	-	2530,94	100,00

Os parâmetros mais relevantes em termos de TRM são a *Intensidade* com 32%, o *Group On* com 18%, *Pulse on* com 17% e *Group off* com 16%. Por outro lado a *Tensão*, o *Pulse Off* e o *VF* têm uma percentagem de influência residual e podemos afirmar que a alteração dos seus níveis não leva a alterações relevantes na TRM.

Tabela 16 – Pooling da TRM para a tecnologia de molibdénio

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	F - Rate
Intensidade	1636,35	2	818,18	27,5
Group On	909,09	2	454,55	15,3
Pulse On	868,66	2	434,33	14,6
Group Off	833,37	2	416,69	14
Espessura	573,85	2	286,93	9,6
VF	125,87	2	62,94	2,1
Tensão	55,2	2	27,60	--
ERRO	59,48	1	59,48	
Total	5061,87	2	2530,94	

Daqui concluímos que a Intensidade, o Group On, Group Off, Espessura e Pulse On têm um elevado nível de significância.

4.5.3.1.2 Kerf

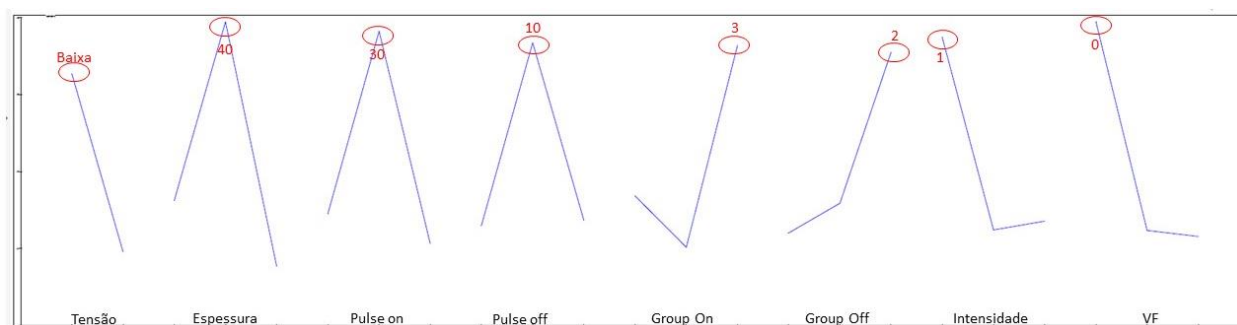


Figura 36 - Taguchi S/N para minimizar o Kerf

Tabela 17 - Parâmetros para Kerf mínimo

Ensaio	Tensão	Espessura	Pulse on	Pulse off	Grop On	Grop Off	Intensidade	VF
VM2	Baixa	40	30	10	3	2	1	0

Tabela 18 - Dados relativos à análise ANOVA para o *kerf* - Tecnologia molibdênio

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	% Influência
Tensão	384,56	1	384,56	11,78
Espessura	571,64	2	285,82	17,52
VF	484,33	2	242,17	14,84
Pulse On	428,38	2	214,19	13,13
Intensidade	382,19	2	191,10	11,71
Group On	357,11	2	178,56	10,94
Pulse off	350,63	2	175,32	10,75
Group Off	304,33	2	152,17	9,33
Total	3263,17	-	1823,87	100,00

Ao nível do *kerf* o parâmetro que mais influência é a tensão, mas com uma grande proximidade entre todos os parâmetros onde podemos afirmar que qualquer alteração dos níveis de qualquer um dos parâmetros terá o mesmo peso no resultado final do *kerf*.

Os parâmetros mais relevantes para se controlar o *Kerf* são, primeiro a *tensão*, em seguida aparece a *espessura*, e depois todos os restantes parâmetros têm praticamente a mesma relevância neste processo.

Tabela 19 – Pooling do *kerf* para a tecnologia de molibdênio

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	F - Rate
Tensão	384,56	1	384,56	2,5
Espessura	571,64	2	285,82	-
VF	484,33	2	242,17	-
Pulse On	428,38	2	214,19	-
Intensidade	382,19	2	191,10	-
Group On	357,11	2	178,56	-
Pulse off	350,63	2	175,32	-
ERRO	304,33	2	152,17	-
total	3263,17		1823,87	

No *kerf* só a tensão pode ser considerada significativa, e mesmo assim sem grande significância.

4.5.3.1.3 Rugosidade superficial

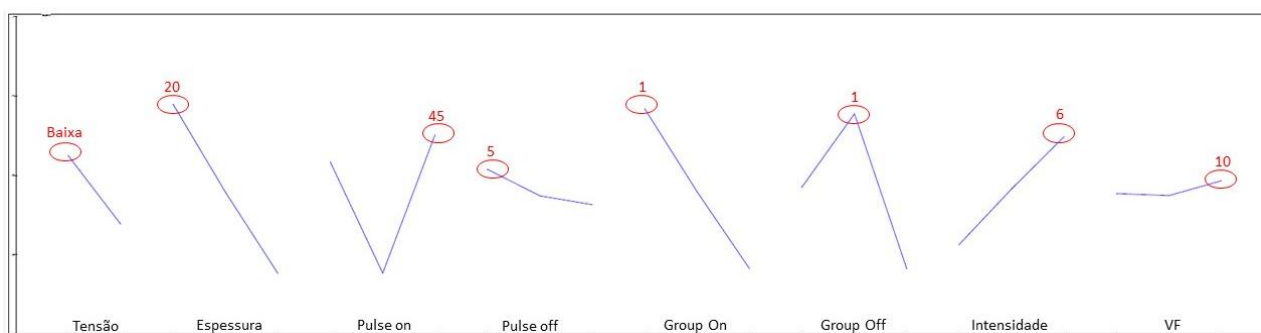


Tabela 20 - Parâmetros para Rugosidade superficial mínima

Ensaio	Tensão	Espessura	Pulse on	Pulse off	Grop On	Grop Off	Intensidade	VF
VM3	Baixa	20	45	5	1	2	6	10

Tabela 21 - Dados relativos à análise ANOVA para a Rugosidade Superficial – Tecnologia molibdênio

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	% Influência
Espessura	218,6	2	109,3	23,86
Group On	194,96	2	97,48	21,28
Group Off	184,11	2	92,055	20,09
Pulse On	164,15	2	82,075	17,92
Tensão	53,58	1	53,58	5,85
Intensidade	88,56	2	44,28	9,67
Pulse off	10,28	2	5,14	1,12
VF	1,96	2	0,98	0,21
Total	916,2	-	484,89	100,00

O parâmetro que mais interfere na rugosidade é a espessura da peça, seguido do Group on e Group off, em sentido inverso o VF e Pulse off têm uma relevância residual para se obter rugosidades diferentes.

Tabela 22 – Pooling da rugosidade superficial para a tecnologia de molibdénio

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	F - Rate
Espessura	218,6	2	109,3	111,3
Group On	194,96	2	97,48	99,3
Group Off	184,11	2	92,055	93,8
Pulse On	164,15	2	82,075	83,6
Tensão	53,58	1	53,58	54,6
Intensidade	88,56	2	44,28	45,1
Pulse off	10,28	2	5,14	5,2
ERRO	1,96	2	0,98	
Total	916,2		484,89	

Todos os parâmetros, excluindo o VF (que é retirado pelo Pooling) são significativos.

4.5.3.1.4 Verificação dos resultados

Após a análise dos resultados foram realizados uns ensaios de confirmação, nos quais foram usados os parâmetros presentes na Tabela 23. Sendo que o VM1 usado para maximizar o valor da TRM, VM4 para minimizar o valor do Kerf e VM3 para minimizar o valor da Rugosidade superficial.

Tabela 23 – Parâmetros para confirmação de resultados para o fio molibdénio

Ensaio	Tensão	Espessura	Pulse on	Pulse off	Grop On	Grop Off	Intensidade	VF
VM1	Baixa	20	45	5	1	1	6	0
VM4	Baixa	20	30	10	3	2	1	0
VM3	Baixa	20	45	5	1	2	6	10

4.5.3.1.5 Resultados da verificação dos Resultados

Tabela 24 – Resultados dos ensaios para confirmação de resultados para o fio molibdénio

Ensaio	Tempo	TRM (mm ² /min)	Kerf Percentual	Ra (µm)	TRM Esperado	Kerf Percentual Esperado	Ra Esperado
VM1	0:11:40	68,55	99,56	5,64	68,21	33,72	-29,24
VM4	2:24:00	5,56	76,49	3,97	3,55	-1,5	39,99
VM3	0:19:37	40,77	117,61	5,18	49,55	66,84	-29,64

Nota-se que, excetuando a TRM, os valores obtidos após os ensaios de verificação não se aproximam dos teoricamente esperados, isso poderá querer dizer que os ensaios inválidos foram mal caracterizados, e se forem substituídos os valores de TRM, kerf e rugosidade superficial arbitrados para os ensaios M5, M16 e M17 os valores teóricos serão diferentes.

Outra explicação pode ser o facto de na análise ANOVA serem considerados os parâmetros como independentes e efetivamente podem haver parâmetros que combinados tenham uma relevância maior do que a sua soma individual.

4.5.3.2 Latão

4.5.3.2.1 Taxa Remoção de Material

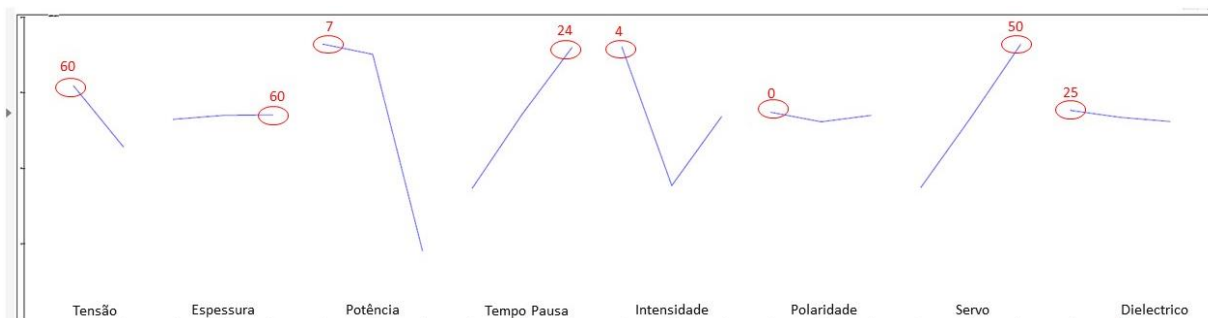


Figura 38 - Taguchi S/N para maximizar a TRM

Tabela 25 - Dados relativos à análise ANOVA para TRM – Tecnologia latão

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	% Influência
Potência	2855,48	2	1427,74	45,50
Servo	1071,13	2	535,565	17,07
T. Pausa	1039,13	2	519,565	16,56
Intensidade	1006,07	2	503,035	16,03
Tensão	291,66	1	291,66	4,65
Dielétrico	6,54	2	3,27	0,10
Polaridade	4,74	2	2,37	0,08
Espessura	1,35	2	0,675	0,02
Total	6276,1	-	3283,88	100,00

A *potência* tem 45% de relevância no TRM, os parâmetros de *servo*, *tempo de Pausa* e *intensidade* têm valores muito próximos, nomeadamente 17%, 17% e 16%, já a *espessura*, a *polaridade* e o *dielétrico* têm influências inferiores a 1%.

Tabela 26 - Pooling da TRM para a tecnologia de latão

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	F - Rate
Potência	2855,48	2	1427,74	937,7
Servo	1071,13	2	535,565	351,7
Tempo Pausa	1039,13	2	519,565	341,2
Intensidade	1006,07	2	503,035	330,4
Tensão	291,66	1	291,66	191,5
Dielétrico	6,54	2	3,27	2,1
ERRO	6,09	4	1,5225	
Total	6276,1		3282,358	

Neste caso é possível afirmar que todos os parâmetros, exceto aqueles que foram convertidos em erro pelo *Pooling* (*polaridade* e *espessura*), são significativos.

4.5.3.2.2 Kerf

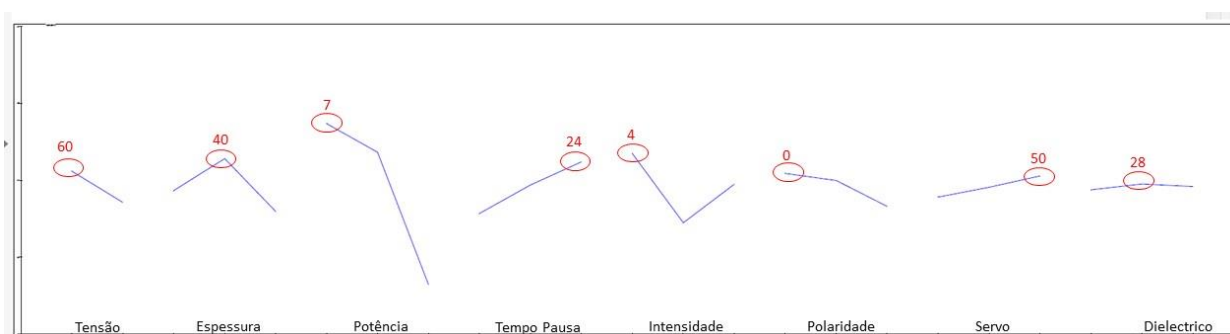


Figura 39 - Taguchi S/N para minimizar o Kerf

Tabela 27 - Dados relativos à análise ANOVA para o kerf – Tecnologia latão

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	% Influência
Potencia	59,93	2	29,965	68,70
Intensidade	9,75	2	4,875	11,18
Tensão	2,96	1	2,96	3,39
Espessura	5,78	2	2,89	6,63
T. Pausa	5,37	2	2,685	6,16
Polaridade	2,45	2	1,225	2,81
Servo	0,92	2	0,46	1,05
Dielétrico	0,07	2	0,035	0,08
Total	87,23	-	45,095	100,00

Potência é de longe o mais relevante, com 69%, seguido da intensidade com 11%. Todos os restantes parâmetros não influenciam o tamanho do kerf.

Tabela 28 - Pooling do kerf para a tecnologia de latão

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	F - Rate
Potencia	59,93	2	29,965	121
Intensidade	9,75	2	4,875	19,7
Tensão	2,96	1	2,96	12
Espessura	5,78	2	2,89	11,7
T. Pausa	5,37	2	2,685	10,8
Polaridade	2,45	2	1,225	5
ERRO	0,99	4	0,2475	
Total	87,23		44,8475	

A contribuição do *dielétrico* e do *servo* foram convertidos em erro, sendo que todos os outros parâmetros podem ser considerados significativos.

4.5.3.2.3 Rugosidade superficial

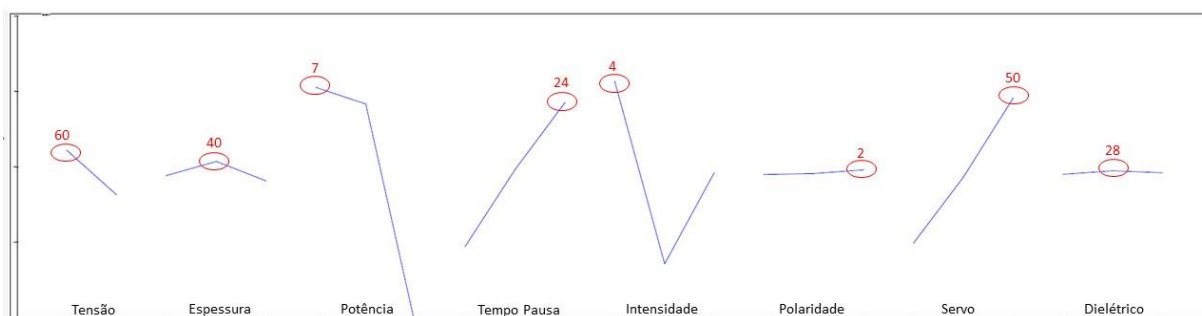


Figura 40 – Taguchi S/N para minimizar a Rugosidade Superficial

Tabela 29 - Dados relativos à análise ANOVA para rugosidade superficial – Tecnologia latão

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	% Influência
Potência	601,22	2	300,61	47,65
Intensidade	279,79	2	139,895	22,17
Servo	177,99	2	88,995	14,11
T. Pausa	173,89	2	86,945	13,78
Tensão	25,28	1	25,28	2,00
Espessura	3,37	2	1,685	0,27
Polaridade	0,22	2	0,11	0,02
Dielétrico	0,1	2	0,05	0,01
Total	1261,86	-	643,57	100,00

Para a rugosidade a *potência* e a *intensidade* voltam a ser os parâmetros mais relevantes, com 48% e 22% respectivamente, enquanto a *tensão*, *dielétrico*, *polaridade* e *espessura* são insignificantes para este resultado da rugosidade superficial.

Tabela 30 – Pooling da rugosidade superficial para a tecnologia de latão

Parâmetro	SS	d.o.f.	Mean Sq	F - Rate
Potência	601,22	2	300,61	3787,3
Intensidade	279,79	2	139,895	1762,5
Servo	177,99	2	88,995	1121,2
T. Pausa	173,89	2	86,945	1095,4
Tensão	25,28	1	25,28	318,4
Espessura	3,37	2	1,685	21,2
ERRO	0,32	4	0,08	
Total	1261,86		643,49	

Para a rugosidade superficial, os parâmetros do *dielétrico* e *polaridade* foram convertidos em erro, sendo correto afirmar que os restantes parâmetros têm valores significativos para o processo.

Após a análise ANOVA dos ensaios com fio de latão chegou-se à conclusão que.

4.5.3.2.4 Verificação dos resultados

Após analisar estes resultados fomos fazer uns ensaios de confirmação em que usamos os seguintes parâmetros.

Tabela 31 – Parâmetros para confirmação de resultados para o fio de latão

Ensaio	Tensão	Espessura	Potência	Tempo Pausa	Intensidade	Polaridade	Servo	Diéletrico
VL1	60	60	7	24	4	0	50	25
VL2	60	60	7	24	4	0	50	28
VL3	60	60	7	24	4	2	50	28

4.5.3.2.5 Resultados da verificação de resultados

Tabela 32 – Resultados para a confirmação de resultados do fio de latão

Ensaio	Tempo	TRM	Kerf Percentual	Ra	TRM Esperado	Kerf Percentual Esperado	Ra Esperado
VL1					119,61	59,48	-23,10
VL2					114,84	40,63	-23,55
VL3					111,75	50,54	-23,66

À data de entrega da presente dissertação não tinha sido desbloqueada uma situação que impediu a realização dos restantes ensaios na Escola Secundária Rocha Peixoto. Assim que possível os testes irão ser realizados e podem posteriormente ser apresentados.

5 Análise e discussão de resultados

Foi possível observar que a electroerosão por fio “tradicional” (que utiliza fio de latão) revelou-se mais rápida e com melhor acabamento na globalidade, tendo ao nível do *kerf* a tecnologia de fio de molibdénio apresentado uns valores menores do que a electroerosão por fio de latão. Estes resultados são fruto do facto da electroerosão com fio de latão ser já utilizada à largos anos (desde 1969) tendo já sido alvo de diversos estudos e otimizações que tornam o processo hoje em dia num processo muito otimizado, o que vai de encontro a similaridade dos resultados obtidos.

Outro fator que é importante salientar leva-nos à formulação da DoE Taguchi para as diferentes tecnologias, aí é possível observar que a diferença de níveis é muito menor entre os parâmetros para o fio de latão, pois o processo está otimizado de um tal modo, que com parâmetros diferentes daqueles que estão estipulados como ótimos o processo simplesmente não se realiza.

Tal como já seria de esperar, após ler a especificação do fabricante da ONAAF25 sobre os seus parâmetros, a *Potência* é o parâmetro com maior influência em todos os resultados na tecnologia de fio de latão, além deste, os parâmetros que mais influenciam o processo são a *Intensidade*, que ocupa a 2º posição na hierarquia de nível de importâncias na rugosidade e no *kerf*. Em sentido inverso pode-se verificar a *Espessura* do material a maquinar não é muito relevante e que parâmetros como o *Dielétrico* e a *Polaridade* têm um papel quase irrisório nos resultados finais obtidos.

Na tecnologia de fio de molibdénio constata-se que a *Espessura* assume um papel importante no processo, já que é o parâmetro mais relevante para se conseguir alcançar uma baixa rugosidade e um baixo *kerf*, no segundo posto aparece o *Group On* mas que apresenta grande importância ao nível da rugosidade e da taxa de remoção de material (TRM), após estes, e a completar o pódio das relevâncias aparece o *Pulse On* com menos importância percentual.

Com os dados recolhidos neste ensaios é possível afirmar que:

- A TRM é mais homogénea e mais alta na tecnologia de latão, o que é devido a uma maior otimização do processo e a uma gama mais baixa de discrepância entre os níveis do DoE Taguchi.
- O *kerf* é maioritariamente superior na tecnologia de latão, mas o maior valor de *kerf* aparece na tecnologia de molibdénio.
- Ao nível da rugosidade superficial, tal como nos outros parâmetros de saída, os resultados na tecnologia de latão são mais homogéneos ao invés da tecnologia de molibdénio que apresenta o menor valor de rugosidade superficial e o maior valor de rugosidade superficial.

Resta salientar que no DoE Taguchi analisaram-se os parâmetros independentemente e como podem existir interações entre parâmetros, alguns dos parâmetros considerados pouco relevantes, quando conjugados com outros parâmetros podem apresentar uma maior relevância.

5.1 Análise técnico-económica

Neste capítulo procurou-se fazer uma análise de rentabilidade comparada das duas tecnologias apresentadas. Foram seleccionadas duas peças (uma de utilização normal e uma com ângulo de inclinação) para serem maquinadas nas diferentes máquinas, com os seus parâmetros ótimos.

5.1.1 Primeira peça

A peça escolhida foi um mordente para um suporte de fixação.

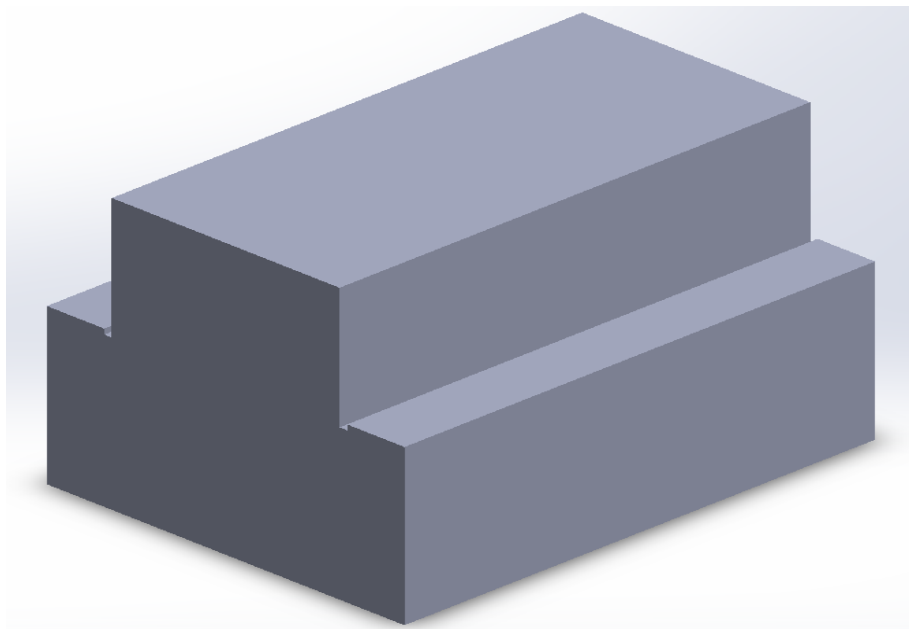


Figura 41 – Desenho 3D do mordente

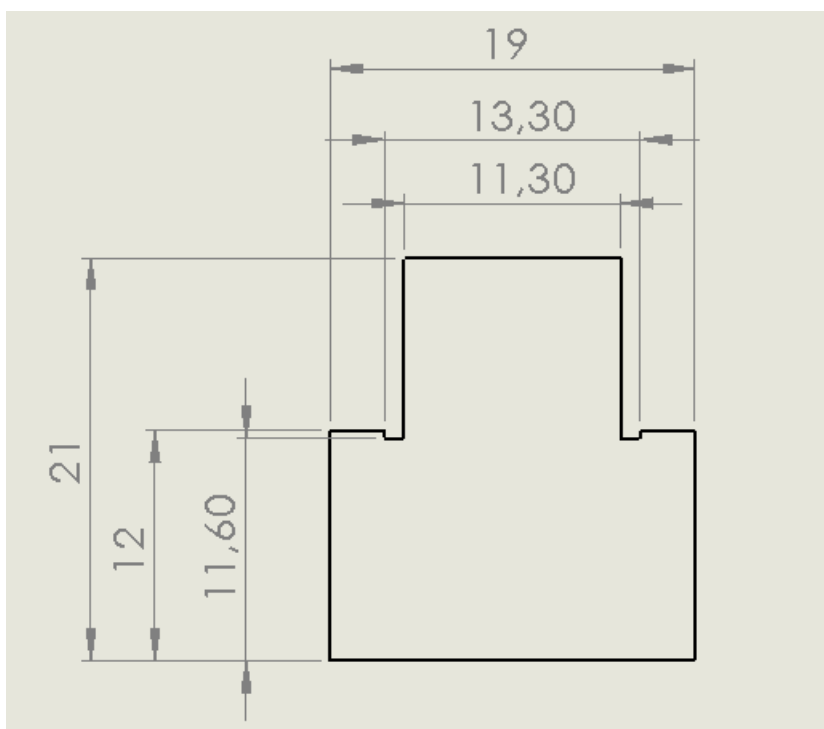


Figura 42 – Desenho 2D com cotas do mordente.

5.1.2 Fio de Molibdênio

Como é uma peça de encaixe justo, resolveu usar-se uma maquinagem de 3 passagens, visto que garante um melhor acabamento superficial e uma maior precisão dimensional.

Os parâmetros utilizados neste programa estão expostos na Figura 43, onde é possível observar que a máquina prevê uma rugosidade superficial de $1,8 \mu\text{m}$.

Times	allowance (mm)	Pon (us)	Poff	GPon	GPoff	IP	Wire	Volt	V-F	Max Speed
☒ First	0,04	45	8	1	0	4	0	Higl	0	300
☒ Second	0,02	15	8	1	0	3	1	Higl	0	200
☒ Third	0	4	8	1	0	2	2	Low	0	200
☐ Fourth	0	2	4	5	5	2	3	Low	0	0
☐ Fifth	0	2	4	5	5	2	3	Low	0	0
☐ Sixth	0	2	4	5	5	2	3	Low	0	0
☐ Seventh	0	2	4	5	5	2	3	Low	0	0

Technic number: 119

Factory Database ☒ User Database ☐

Technics No.: 119 (1-3000)

Wire Diameter(mm): 0.18 (0.05-0.5)

WorkpieceHeight(mm): 40 (0.1-2000)

Offset(mm): 0.08 (0.05-0.15)

☒ Outline ☐ Inner hole

Material: 45 steel

Eff.(mm2/min): 60

Roughness: 1.8

Figura 43 – Parâmetros de corte para mordente

Na realidade a rugosidade superficial é de $1,92 \mu\text{m}$, um valor próximo do tabelado.



Figura 44 – Fotografia do mordente após sair da máquina BAOMA DK7732

5.1.3 Fio de Latão

A data de entrega da presente dissertação não tinha sido desbloqueada uma situação que impediu a realização dos restantes ensaios na Escola Secundária Rocha Peixoto. Assim que possível os testes irão ser realizados e podem posteriormente ser apresentados.

5.1.4 Comparação dos resultados

Tabela 33 – Comparação dos resultados na maquinagem do mordente

Parâmetros	Molibdénio	Latão
Tempo de maquinagem	1:08:32h	
Precisão dimensional	+0,01 mm	
Ra	1,92 µm	
Custo fio	0,70€	
Custo Total Aproximado	35€	

Foi considera um custo hora de 30€ em cada uma das máquinas, ao que se juntou o fio gasto.

No caso do molibénio, tendo em conta que cada enrolamento dura em média 30h de trabalho e custa 20€, em termos de fio considerou-se um custo de fio de aproximadamente 0,70€.

5.1.5 Segunda peça

A peça escolhida para erodir neste teste foi um cone como demonstra a Figura 45 e Figura 46.

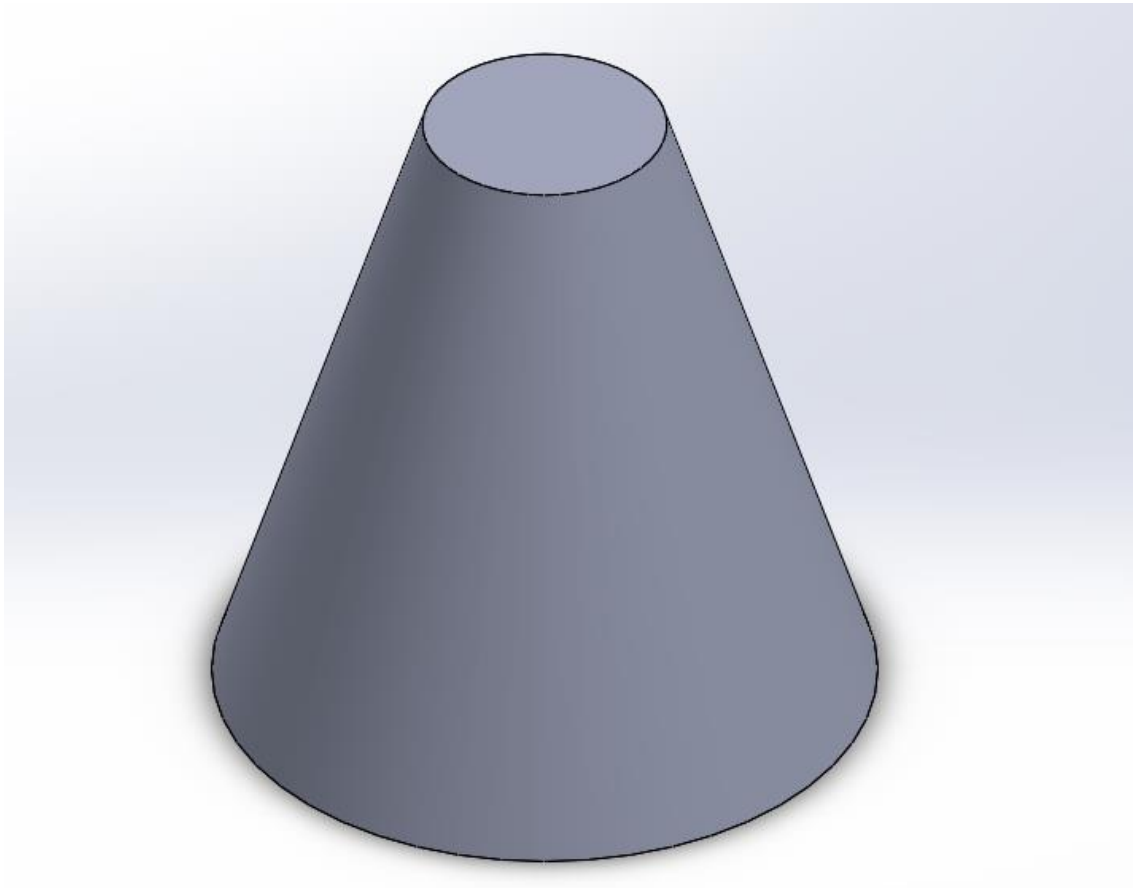


Figura 45 – Desenho 3D do cone

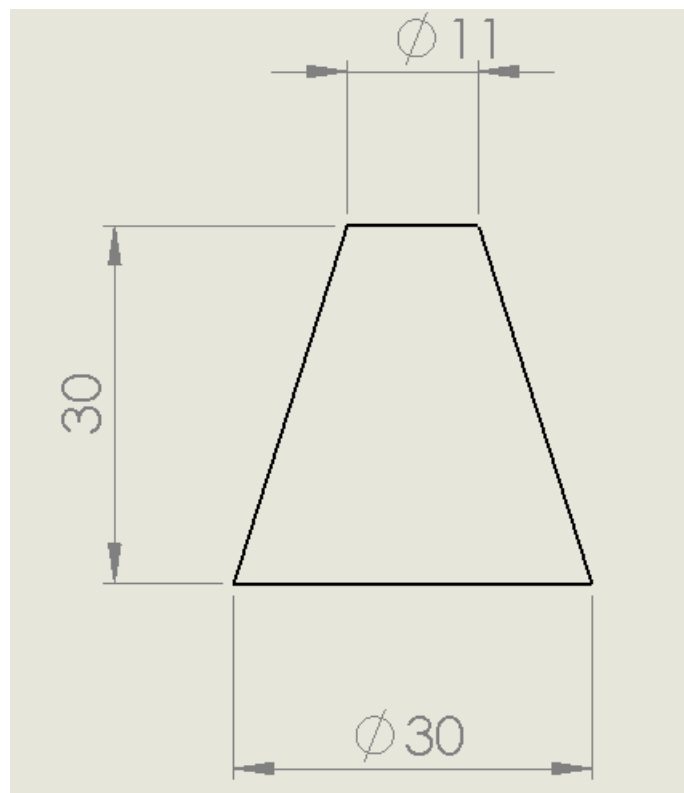


Figura 46 – Desenho 2D com cotagens do cone

5.1.6 Fio Molibdénio

Tabela 34 – Parâmetros de maquinagem para cone

Ensaio	Tensão	Pulse on	Pulse off	Grop On	Grop Off	Intensidade	VF
Cone	Alta	30	10	1	0	4	10



Figura 47 – Cone após erosão com fio de molibdénio

5.1.7 Fio latão

A máquina ONA AF25 tem uma limitação nas boquilhas de guiamento do fio que não permite realizar erosões inclinada com ângulos superiores a 8°, por isso não se conseguiu maquinar lá este cone devido as limitações técnicas.

5.1.8 Comparação de resultados

Tabela 35 – Comparação de resultados na maquinagem do cone

Parâmetros	Molibdénio	Latão
Tempo de maquinagem	2:56:00	-
Precisão dimensional	+0,01 mm	-
Ra	3,37	-
Custo fio aproximado	2,5€	-
Custo Total Aproximado	90€	-

6 Conclusão

A presente dissertação tinha como principal objetivo caracterizar e comparar duas tecnologias de electroerosão por fio, a mais usual, com fio de latão e uma recém-chegada ao mercado, fio de molibdénio.

Os resultados foram dentro daquilo que se previa, todo o processo de electroerosão com fio de latão está otimizado e mais do que estudado ao contrário do processo com o fio de molibdénio que está a dar os primeiros passos. É uma tecnologia à qual auguro bom futuro, por reunir boas características (a principal é a poupança ao nível da matéria prima da ferramenta), tem ainda um longo caminho a percorrer na otimização do processo para se tornar mais lucrativa do que a electroerosão com fio de latão.

Com este trabalho foi possível provar isso mesmo, que a máquina de electroerosão por fio de molibdénio é neste momento um segmento “low cost” entre as máquinas de electroerosão por fio, onde, até se consegue um bom acabamento superficial mas para tal necessita de mais tempo de maquinagem do que a tecnologia de latão para atingir a mesma gama de valores. Para grande parte das utilizações necessárias as empresas de metalomecânica a tecnologia de molibdénio pode ser vista como uma alternativa às tecnologias convencionais, tendo em base o seu baixo custo (de processo e de aquisição da máquina). Mas se for necessário uma utilização muito específica onde a rugosidade ou a precisão dimensional seja fator preponderante no processo a tecnologia de molibdénio ainda está longe de garantir os resultados que a tecnologia de latão garante.

7 Recomendações para trabalhos futuros

- Estudar o efeito dos diferentes fios (latão, molibdénio, cobre, tungsténio, etc) na microestrutura da face erodida e comparar os resultados obtidos usando os diferentes fios;
- Estudo estatístico do processo de electroerosão usando fio de molibdénio de modo a aferir os efeitos positivos e negativos dos diferentes parametros;
- Estudar o efeito dos diferentes fios nas propriedades mecânicas da peça;
- Estudar a durabilidade do fio de molibdénio;
- Estudar o efeito do líquido refrigerante BM-06 da BAOMA no processo de electroerosão e comprovar a sua influência no processo;
- Desenvolvimento de dispositivos que permitam a fixação de peças de diferentes dimensões nas mesas de trabalho e que facilite a sua posterior comparação.

Referências

1. Mohammadi, A., et al., *Statistical analysis of wire electrical discharge turning on material removal rate*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. 205.
2. Semon, G., *A practical guide to Electro-Discharge Machining*. Ateliers des Charmilles, 1980. 2ª Edição.
3. ENGEMAQ, *Máquinas de eletroerosão. Manual de operação*. 1986.
4. AGIE, *Agie Commercial Handbook*. 1992.
5. Marafona, J.D., *Tecnologia e aplicações da Electroerosão*. 2012.
6. Priestley, J., *Experiments on the circular spots made on pieces of metal by large electrical explosions*. The history and present state of electricity with original experiments, 1775. II.
7. http://www.bmwedm.com/sdp/1213758/4/pd-5498931/15918456-2793105/High_Speed_Good_Surface_Wire_Cut_EDM_Machine.html. 2016-01-02.
8. Lazarenko, B.R., *About the inversion of metal erosion and methods to fight ravage of electric contacts*. WEI-Institut, 1943.
9. Hespanhol, H.D.C., *Eletroerosão por fio em metal duro para ferramentas de estampagem de lâminas de motores elétricos* 2009.
10. <http://edmttechman.com/about.cfm?pg=2&chap=1>. 2015.
11. Schumacher, B.M., R. Krampitz, and J.-P. Kruth, *Historical phases of EDM development driven by the dual influence of "Market Pull" and "Science Push"*. 2013.
12. Marafona, J.D. *The influence of migrated materials on Tool wear ratio*. [Master Thesis] 2002.
13. http://www.gfms.com/content/gfac/country_UK/en/Products/EDM/die-sinking-edm/super-finish/form-20.html,
http://www.gfms.com/content/gfac/country_UK/en/Products/EDM/die-sinking-edm/super-finish/form-20.html 2015.
14. Moulton, D.B., *Wire EDM - The Fundamentals*.
15. <http://www.ebay.com/itm/-/291504956803?roken=cUgayN>,
<http://www.ebay.com/itm/-/291504956803?roken=cUgayN>. 2016.

16. Singh, B., D.B.S. Pabla, and M. Saroha, *Investigating the effects of process parameters on MRR in WEDM using Molybdenum wire*. International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications, 2014.
17. Ivano Beltrami, Axel Bertholds, and D. Dauw, *A simplified post process for wire cut EDM*. Journal of Materials Processing Technology, 1996. **58**.
18. <http://www.sodick.com/products/wireedm/ag600lh.htm>,
<http://www.sodick.com/products/wireedm/ag600lh.htm>. 2016.
19. Crawford, G.A., *Process Characterization of Electrical Discharge Machining of Highly Doped Silicon*. 2012.
20. Descoeudres, A., *Characterization of electrical discharge machining plasmas*. 2006.
21. Ho, K.H., et al., *State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2004.
22. <http://www.new.manufacturinget.com/wp-content/uploads/2009/04/picture7.jpg>. 2015.
23. Sommer, C., *Complete EDM Handbook*. 2005.
24. <http://molybdenum-alloy.com/portuguese/molybdenum-alloy-physical-properties.html>,
<http://molybdenum-alloy.com/portuguese/molybdenum-alloy-physical-properties.html>.
25. http://bmedm.en.alibaba.com/product/60321708010-800197833/BAOMA_Molybdenum_Wire_Molybdenum_Wire_For_Cnc_Wire_Cut_EDM.html. 2016-01-03.
26. Technologies, C.G.
27. <http://www.bmnc.ru/en/about/BAOMA%20Control%20System.htm>, 2016-01-27.
28. Fowlkes, W.Y. and C.M. Creveling, *Engineering Methods for Robust Product Design*. 1995, Addison-Wesley.

ANEXOS

ANEXO B: Resultados das medições do *Kerf*

Ensaio	Kerf média	1º Medição	2º medição	3º medição	4º medição	5º medição	6º medição	7º medição
M1	285,328	314,08	304,02	281,59	281,59	259,93	270,76	
M2	328,548	303,25	335,74	303,25	335,74	335,91	357,4	
M3	362,815	379,06	346,57	368,23	368,23	346,57	368,23	
M4	323,105	324,91	281,59	346,57	324,91	335,74	324,91	
M5								
M6	328,520	314,08	335,74	314,08	314,08	357,4	335,74	
M7	335,740	357,4	324,91	335,74	324,91	324,91	346,57	
M8	339,350	314,08	368,23	335,74	324,91	357,4	335,74	476,53
M9	350,180	389,89	368,23	346,57	314,08	324,91	357,4	
M10	305,055	314,08	314,08	292,42	324,91	303,25	281,59	
M11	323,105	314,08	314,08	324,91	335,74	335,74	314,08	
M12	416,965	389,89	444,04	400,72	411,55	422,38	433,21	
M13	362,897	357,4	389,89	379,22	379,22	335,74	335,91	
M14	306,860	324,91	281,59	292,42	314,08	292,42	335,74	
M15	404,380	400,72	444,18	422,38	379,22	389,89	389,89	
M16								
M17								
M18	413,355	411,55	433,21	422,38	433,21	389,89	389,89	

Rejeitei a última medição no ensaio M8 por ser bastante superior as restantes.

Ensaio	Kerf média	1º medição	2º medição	3º medição	4º medição	5º medição	6º medição	7º medição
L1	449,478	454,87	433,21	476,53	454,87	422,52	454,87	
L2	489,526	498,19	498,19	476,53	476,53	498,19	530,69	519,97
L3	561,375	574,01	584,84	574,01	563,18	552,35	519,86	
L4	476,530	487,36	476,53	476,53	487,36	444,04	487,36	
L5	485,198	509,03	444,04	476,53	509,03	487,36		
L6	507,298	519,86	487,36	530,69	509,03	487,36	509,49	
L7	523,470	519,86	519,86	519,86	519,86	519,86	541,52	
L8	552,350	563,18	563,18	563,18	530,69	552,35	541,52	595,67
L9								
L10	507,222	476,53	519,86	541,52	509,03	509,03	487,36	
L11	555,960	563,18	552,35	541,52	541,52	584,84	552,35	
L12								
L13	467,505	476,53	476,53	465,7	476,53	454,87	454,87	
L14	471,115	487,36	476,53	487,36	444,04	476,53	454,87	
L15								
L16	504,694	509,03	519,86	509,03	487,36	498,19		
L17	505,417	509,03	519,86	498,19	509,03	509,03	487,36	
L18	567,512	574,01	574,01	541,52	584,84	563,18		

Rejeição das medições 6 e 7 do ensaio L2 e a medição 7 do ensaio L8 devido ao facto dos valores se distanciarem bastantes das restantes medições.

ANEXO C: Resultados das medições da rugosidade superficial

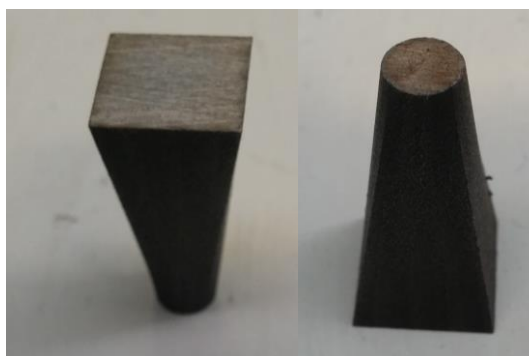
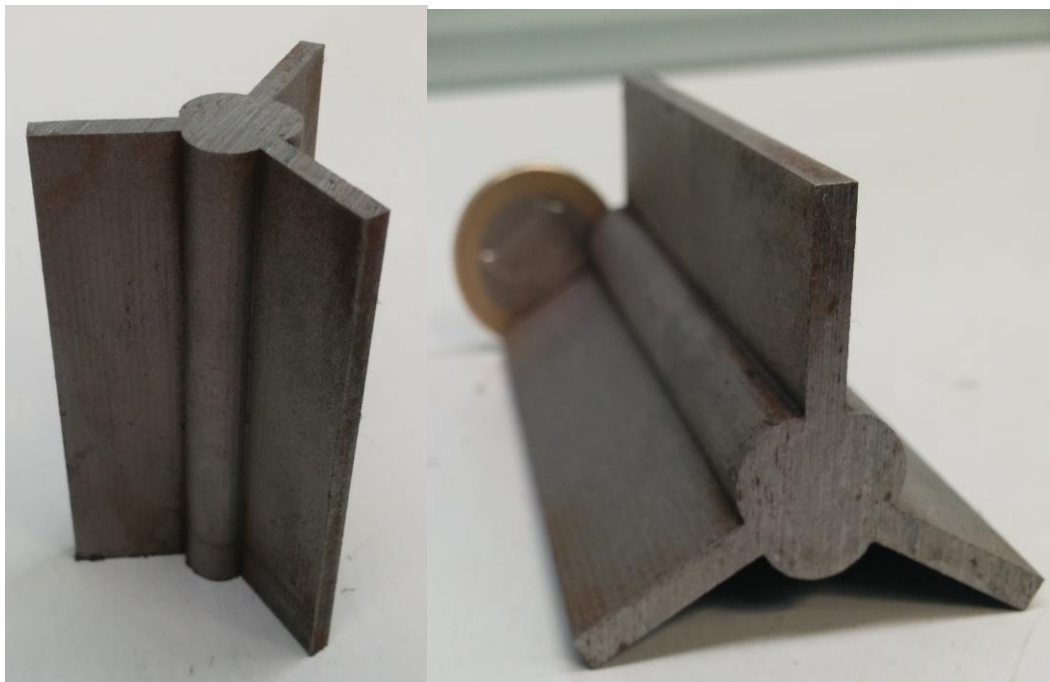
Ensaio	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
1ª medição	2,44	4,17	4,95	2,81		4,38	3,46	4,59	3,45	3,48	4,40	3,85	3,39	3,59	5,44			5,52
2ª medição	2,22	3,84	4,46	2,59		4,30	3,06	4,33	3,69	3,49	4,41	3,87	3,77	4,79	4,89			6,08
3ª medição	2,02	3,71	3,97	2,59		3,98	3,14	4,35	3,25	3,29	4,00	3,49	3,57	5,27	4,80			5,36
4ª medição	2,60	4,47	6,40	3,64		5,04	3,43	4,46	4,87	4,15	4,34	4,50	4,49	4,00	4,82			4,79
5ª medição	2,90	4,17	5,34	3,35		3,44	3,53	6,19	4,69	4,52	4,62	3,67	9,34	3,86	4,07			5,03
6ª medição	1,75	3,66	4,34	2,49		4,27	3,84	8,87	3,14	3,29	3,29	3,19	3,55	3,52	4,35			5,40

Ensaio	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18
1ª medição	2,68	3,63	3,24	2,82	2,49	2,83	4,27	3,68		2,87	3,42		2,64	2,85		3,27	3,63	3,01
2ª medição	2,25	3,04	2,98	2,88	2,63	2,51	2,75	4,54		3,04	2,98		2,72	2,57		3,00	3,35	2,92
3ª medição	2,29	3,39	3,30	3,19	2,45	2,09	2,21	4,99		2,71	2,77		2,35	2,47		2,65	2,72	2,57
4ª medição	2,51	3,99	2,99	2,54	2,60	2,82	2,27	4,00		3,16	3,18		2,32	2,65		2,73	3,01	2,19
5ª medição	2,71	3,56	3,25	2,53	2,34	2,57	2,46	3,54		3,06	3,14		2,59	3,03		3,19	3,29	2,65
6ª medição	2,74	3,19	2,99	2,71	3,11	2,92	2,66	3,02		2,98	3,12		2,92	2,45		2,69	2,55	2,72
7ª medição				2,63														

ANEXO D: Fotos de trabalhos na BAOMA DK7732







ANEXO E: Resultados Experimentais

Ensaio	Tensão	Espessura	Pon	Poff	Grp On	Grp Off	Intensidade	VF	TRM (mm ² /min)	TRM S/N (dB)	Kerf percentual	Kerf percentual S/N (dB)	Ra (μm)	Ra S/N(dB)
M1	Low Voltage	20	15	5	1	0	1	0	24,65	27,84	58,52	-35,35	2,32	-7,31
M2	Low Voltage	20	30	10	2	1	3	5	22,41	27,01	82,53	-38,33	4	-12,04
M3	Low Voltage	20	45	15	3	2	6	10	10,96	20,8	101,56	-40,13	4,91	-13,82
M4	Low Voltage	40	15	5	2	1	6	10	53,39	34,55	79,50	-38,01	2,91	-9,28
M5	Low Voltage	40	30	10	3	2	1	0	0,1	-20	200	20	50	-33,98
M6	Low Voltage	40	45	15	1	0	3	5	36,38	31,22	82,51	-38,33	4,24	-12,55
M7	Low Voltage	60	15	10	1	2	3	10	12,61	22,01	86,52	-38,74	3,41	-10,66
M8	Low Voltage	60	30	15	2	0	6	0	53,73	34,6	88,53	-38,94	5,47	-14,76
M9	Low Voltage	60	45	5	3	1	1	5	18,01	25,11	94,54	-39,51	3,85	-11,71
M10	High Voltage	20	15	15	3	1	3	0	17,03	24,62	69,48	-36,84	3,7	-11,36
M11	High Voltage	20	30	5	1	2	6	5	45,64	33,19	79,50	-38,01	4,18	-12,42
M12	High Voltage	20	45	10	2	0	1	10	22,06	26,87	131,65	-42,39	3,76	-11,5
M13	High Voltage	40	15	10	3	0	6	5	72,89	37,25	101,61	-40,14	4,69	-13,42
M14	High Voltage	40	30	15	1	1	1	10	8,32	18,4	70,48	-36,96	4,17	-12,4
M15	High Voltage	40	45	5	2	2	3	0	48,66	33,74	124,66	-41,91	4,73	-13,5
M16	High Voltage	60	15	15	2	2	1	5	0,1	-20	200	-46,02	50	-33,98
M17	High Voltage	60	30	5	3	0	3	10	0,1	-20	200	-46,02	50	-33,98
M18	High Voltage	60	45	10	1	1	6	0	75,28	37,53	129,64	-42,26	5,36	-14,58

Ensaio	Tensão	Espessura	Potência	Tempo Pausa	Intensidade	Polaridade	Servo	Dielétrico	TRM (mm ² / min)	TRM S/N (dB)	Kerf Percentual	Kerf percentual S/N (dB)	Ra (μm)	Ra S/N (dB)
L1	60	20	7	18	4	0	30	25	79,84	38,04	79,791	-38,04	2,53	-8,06
L2	60	20	8	21	5	1	40	28	57,68	35,22	95,810	-39,63	3,47	-10,81
L3	60	20	9	24	6	2	50	31	71,94	37,14	124,550	-41,91	3,13	-9,91
L4	60	40	7	18	5	1	50	31	75,19	37,52	90,612	-39,14	2,76	-8,82
L5	60	40	8	21	6	2	30	25	83,99	38,48	94,079	-39,47	2,61	-8,33
L6	60	40	9	24	4	0	40	28	90,91	39,17	102,919	-40,25	2,62	-8,37
L7	60	60	7	21	4	2	40	31	61,59	35,79	109,388	-40,78	2,77	-8,85
L8	60	60	8	24	5	0	50	25	66,98	36,52	120,940	-41,65	3,96	-11,95
L9	60	60	9	18	6	1	30	28	0,10	-20	200,000	-46,02	50	-33,98
L10	80	20	7	24	6	1	40	25	54,79	34,77	102,889	-40,25	2,97	-9,46
L11	80	20	8	18	4	2	50	28	47,96	33,62	122,384	-41,75	3,1	-8,53
L12	80	20	9	21	5	0	30	31	0,10	-20	200,000	-46,02	50	-33,98
L13	80	40	7	21	6	0	50	28	59,22	35,45	87,002	-38,79	2,59	-8,27
L14	80	40	8	24	4	1	30	31	37,31	31,44	88,446	-38,93	2,67	-9,53
L15	80	40	9	18	5	2	40	25	0,10	-20	200,000	-46,02	50	-33,98
L16	80	60	7	24	5	2	30	28	70,38	36,95	101,878	-40,16	2,92	-9,31
L17	80	60	8	18	6	0	40	31	57,44	35,18	102,167	-40,16	3,09	-9,8
L18	80	60	9	21	4	1	50	25	79,68	38,03	127,005	-42,08	2,68	-8,56