

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Tècn. Ind. Mecànica. Pla 2002

Títol: Optimització dels paràmetres de procés de l'electroerosió de micro-canal·ls en acer inoxidable per aplicacions biomèdiques

Document: Memòria

Alumne: Joan Serra Compte

Director/Tutor: Guillem Quintana Badosa/Elisa Vázquez Lepe

Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria dels Processos de Fabricació

Convocatòria (mes/any): Juny/2013

DOCUMENT NÚMERO 1: MEMÒRIA

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ.....	6
1.1	Antecedents	6
1.2	Objecte.....	7
1.3	Especificacions i abast	8
2	EDM.....	9
2.1	Descripció del procés	9
2.2	Tipus de processos	11
2.2.1	Electroerosió per penetració	11
2.2.2	Electroerosió amb fil	11
2.3	Micro-EDM	12
2.3.1	Desgast de l'elèctrode.....	13
2.3.2	Precisió i qualitat superficial.....	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	Recursos a utilitzar.....	16
3.1.1	Maquinària i aparells.....	16
3.1.2	Programes.....	17
3.1.3	Material.....	17
3.1.4	Eina	18
3.2	Disseny d'experiments	19
3.3	Muntatge i preparació.....	21
3.3.1	Col·locació de l'elèctrode i fixació de la proveta	21
3.3.2	Col·locació dels zeros	22
3.4	Programa de mecanitzat	24
3.5	Mesura i adquisició de dades	24
3.5.1	Rugositats.....	24

3.5.2 Geometria.....	25
3.5.3 Temps de mecanització	25
4 ANÀLISI I DISCUSSIÓ DE RESULTATS.....	26
4.1 Anàlisi de la profunditat	27
4.2 Anàlisi de l'amplada.....	32
4.3 Anàlisi de la rugositat superficial.....	37
4.4 Anàlisi del temps de mecanització.....	39
5 RESUM DEL PRESSUPOST.....	42
6 CONCLUSIONS.....	43
7 LÍNIES FUTURES.....	45
8 RELACIÓ DE DOCUMENTS	46
9 BIBLIOGRAFIA	47
10 GLOSSARI	49
ANNEX A EXPERIMENTS PRELIMINARS.....	51
ANNEX B PROGRAMA	53
ANNEX C RUGOSITATS.....	54

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Circuit EDM de Lazarenko. (Jameson, 2001).....	6
Figura 2: Concepte de l'electroerosió. (S. Mahendran et al., 2009).....	9
Figura 3: Formació de la bombolla de gas i fusió del material. (CGA, 2011).	10
Figura 4: Explosió bombolla de gas i eliminació de les partícules. (CGA, 2011).	10
Figura 5: Electroerosió per penetració. (Kunieda et al., 2005).....	11
Figura 6: Electroerosió amb fil. (Kunieda et al., 2005).....	12
Figura 7: Evolució de la forma de l'elèctrode/forat durant el procés d'EDM utilitzant un elèctrode d'acer de \varnothing 170 μ m. (Pham et al., 2007).....	13
Figura 8: Diagrama d'espina de peix de la micro-electroerosió per als paràmetres de precisió i rugositat.	15
Figura 9: Electroerosionadora ONA DB300.....	16
Figura 10: Microscopi ZEISS Stereo Discovery V12.	16
Figura 11: Rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV-2000.	17
Figura 12: Probeta d'acer inoxidable 316 L.	17
Figura 13: a) Elèctrode a utilitzar. b) Desviació de l'elèctrode.	19
Figura 14: Croquis de la proveta dels experiments (sense escala).	20
Figura 15: a) Elèctrode abans del mecanitzat. b) Elèctrode després del mecanitzat. ...	21
Figura 16: Fixació de la proveta i l'elèctrode.	22
Figura 17: Procediment obtenció dels zeros.	23
Figura 18: Muntatge per a l'obtenció de les rugositats.	25
Figura 19: Perfil de rugositat a) sense filtrar b) filtrat.	25
Figura 20: Influència de la intensitat, el voltatge i el temps d'impuls en la qualitat dels micro-canals.	29
Figura 21: Efecte de la intensitat, el voltatge i el temps d'impuls en la profunditat de les micro-cavitats.....	29
Figura 22: Influència de la intensitat i el voltatge en la profunditat de les micro-cavitats.	30
Figura 23: Gràfica d'efectes principals per a la profunditat.....	31
Figura 24: Influència de la intensitat, el voltatge i el temps d'impuls en la qualitat de l'amplada dels micro-canals.....	33
Figura 25: Efecte del temps d'impuls, el voltatge i la intensitat en l'amplada de les micro-ranures.....	34
Figura 26: Efecte del temps d'impuls i el voltatge en l'amplada de les micro-ranures.	34
Figura 27: Mitjana amplada dels micro-canals al inici i al fons del canal.	35
Figura 28: Gràfica d'efectes principals per a l'amplada.	36

Figura 29: Influència de la intensitat, el voltatge i el temps d'impuls en la rugositat superficial dels micro-canals.	37
Figura 30: Gràfica d'efectes principals per la rugositat.	38
Figura 31: Efecte del temps d'impuls, el voltatge i la intensitat en el temps de mecanització dels micro-canals.	40
Figura 32: Gràfica d'efectes principals per al temps.	41

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: Especificacions del projecte.	8
Taula 2: Composició química de l'acer inoxidable 316 L.	18
Taula 3: Propietats acer inoxidable 316 L.	18
Taula 4: Paràmetres per a la mecanització de l'elèctrode.	18
Taula 5: Paràmetres fixes.	19
Taula 6: Factors a variar i nivells dels factors.	19
Taula 7: Resultats dels experiments.	26
Taula 8: Imatges de les seccions dels micro-canals.	28
Taula 9: ANOVA de la profunditat.	30
Taula 10: Paràmetres òptims per a la profunditat i forma dels micro-canals.	31
Taula 11: Imatges en planta dels micro-canals.	33
Taula 12: ANOVA de l'amplada.	36
Taula 13: Paràmetres òptims per a l'amplada i la forma dels micro-canals.	37
Taula 14: ANOVA de la rugositat superficial.	38
Taula 15: Paràmetres òptims per a la rugositat superficial dels micro-canals.	39
Taula 16: ANOVA del temps de mecanització.	40
Taula 17: Paràmetres òptims per aconseguir un menor temps de mecanització.	41
Taula 18: Comprovació de les especificacions.	44

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

L'electroerosió (*electrical discharge machining: EDM*) és el tipus de mecanitzat no tradicional més estès. És l'únic sistema que utilitza l'energia tèrmica per a mecanitzar materials conductors de qualsevol duresa. Aquest fet ha significat un gran avantatge en la fabricació de components per a l'automòbil, aeroespacials, quirúrgics, etc. En el procés d'EDM el material s'arrenca de la peça a l'aplicar una força electromotriu entre aquest i l'elèctrode, sense que hi hagi contacte directe entre ells, eliminant així tensions mecàniques i problemes de vibracions durant el mecanitzat. Tot el procés es realitza submergit en un líquid dielèctric (Ho and Newman, 2003).

Els inicis de l'electroerosió es remunten fins a finals del 1770, quan Joseph Priestly, científic anglès va descobrir l'efecte erosiu de les descàrregues elèctriques (De Wolf, Cardon and Balic, 2010). No va ser però fins l'any 1943 que es va inventar el procés d'EDM que coneixem avui en dia, quan els científics russos B.R. Lazarenko i N.I. Lazarenko van desenvolupar un procés controlat per mecanitzar materials difícils de mecanitzar a través de la vaporització de material de la superfície del metall. El sistema usat estava format per resistències i condensadors formant un circuit R-C (Jameson, 2001) tal com es pot observar a la Figura 1.

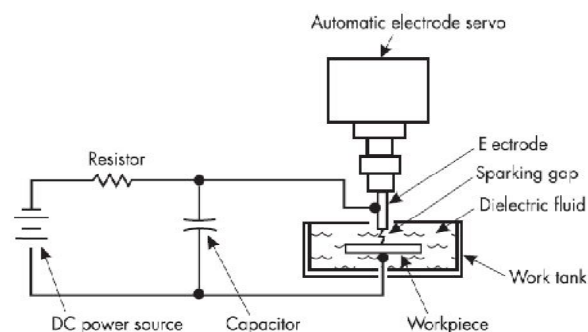


Figura 1: Circuit EDM de Lazarenko. (Jameson, 2001).

Va ser però a la dècada del 1980 amb l'aparició del control numèric (CNC) que l'electroerosió va obtenir importants avenços en la millora de l'eficiència del mecanitzat. El control numèric va facilitar tot el procés d'EDM, creant un procés automàtic. Des de llavors l'electroerosió s'ha anat implantant a la fabricació industrial generant elevats rendiments econòmics. Aquest fet ha provocat grans interessos de recerca en: optimitzar el paràmetres de procés, millorar l'arrencada de material, en el

desgast de l'elèctrode, la qualitat superficial i la precisió (Ho and Newman, 2003). El procés de l'electroerosió s'ha desenvolupat en diferents àrees, on una d'aquestes s'ha centrat en la fabricació a nivell micro (Rajurkar and Yu, 2000).

El present projecte està enfocat en la mecanització de micro-canals, on la fabricació a nivell micro s'entén per a mecanitzacions de menys de 1 mil·límetre, mitjançant l'electroerosió i s'emmarca dins el grup de recerca en enginyeria del producte procés i producció (GREP) de la universitat de Girona. Avui en dia la biomedicina és un sector que està creixent i representa una gran oportunitat per a aquest tipus de mecanitzat (Shih, A. J. 2008), ja que alguns productes són de mida micromètrica i es necessita una alternativa al mecanitzat tradicional per tal d'abaratir costos, guanyar precisió i qualitat superficial. La mecanització de micro-canals (geometria utilitzada en aquest sector) de gran precisió i elevat acabat superficial són requisits necessaris per donar respostes a les necessitats d'aquest camp. L'acer inoxidable 316L és un material molt utilitzat en biomedicina gràcies a la seva biocompatibilitat. Exemples de la seva aplicació poden ser els implants o les pròtesis (Shih, A. J. 2008).

1.2 Objecte

Estudiar els paràmetres del procés de l'electroerosió alhora de mecanitzar micro-canals en acer inoxidable 316L. A partir d'aquí observar quins paràmetres tenen un efecte significatiu en la qualitat final dels micro-canals, pel que fa a termes de precisió i qualitat superficial. Per això aquest projecte té com a objectius realitzar:

- Disseny d'experiments.
- Mecanització dels experiments.
- Medició de les rugositats dels micro-canals.
- Obtenció de les imatges dels micro-canals.

Amb l'anàlisi dels resultats obtinguts s'utilitzarà per obtenir una metodologia de treball i alhora també recomanacions i orientacions que facilitin l'elecció dels paràmetres de procés òptims.

1.3 Especificacions i abast

Les especificacions del projecte són les següents:

Tema	R/D	Especificació
Objectiu	R	Mecanitzar a través de l'electroerosió micro-canal en diferents condicions de mecanitzat en acer inoxidable.
Funció	R	Conèixer com afecten diferents condicions de mecanitzat en la geometria i la qualitat superficial dels micro-canal.
	D	Determinar el desgast de l'elèctrode.
Recursos	R	Electroerosionadora ONA DB300.
	R	Rugosímetre Mitutoyo Surfest SV-2000.
	R	Servei de microscòpia de la UdG.
Dimensions	R	Màximes dimensions de les provetes 25x25x12mm per poder observar les mostres al microscopi.
	R	Mecanitzar canal de 200µm d'amplada per 50µm de profunditat.
Material	R	Acer inoxidable 316L.
Eines	R	Elèctrode de coure.
Metodologia	D	Establir un procediment per a la correcta mecanització a nivell micromètric.
Experimentació	R	Diferents nivells per cadascun dels paràmetres escollits a variar.

Taula 1: Especificacions del projecte.

S'ha descrit a la Taula 1 com a R els requeriments d'aquest projecte mentre que amb la D els desitjos.

L'abast d'aquest projecte pretén donar conclusions i recomanacions sobre els paràmetres del procés d'electroerosió per a la realització de micro-canal en acer inoxidable tot oferint una selecció dels paràmetres més adients.

2 EDM

2.1 Descripció del procés

El fonament de l'electroerosió es troba en l'efecte tèrmic ocasionat per la descàrrega elèctrica al saltar una espurna entre l'elèctrode i la peça a mecanitzar, submergit en un fluid dielèctric (Molera, 1989). La peça i l'elèctrode estan separats per a una distància particular, anomenada "spark gap" (Mohd Abbas et al., 2007) tal com s'observa a la Figura 2.

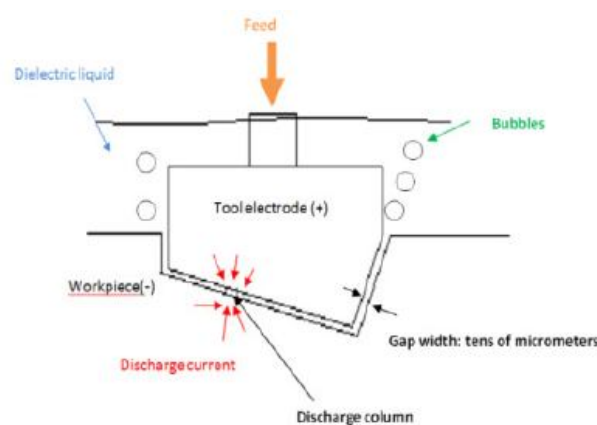


Figura 2: Concepte de l'electroerosió. (S. Mahendran et al., 2009).

El mecanitzat per electroerosió es realitza mitjançant el salt d'espurnes elèctriques entre dos elèctrodes sotmesos a una determinada tensió elèctrica i submergits en un fluid dielèctric. La tensió elèctrica que s'ha d'aplicar ha de ser suficient com per crear un camp elèctric major que la resistència dielèctrica del fluid dielèctric.

Sota l'acció d'aquest camp elèctric, ions lliures positius i electrons es trobaran accelerats creant un canal de descàrrega que es torna conductor, i és en aquest moment quan salta l'espurna. Aquest fet provoca col·lisions entre ions (+) i electrons (-). Es forma llavors un canal de plasma.

En el punt d'impacte de les descàrregues la densitat de corrent va augmentant i es generen enormes quantitats de calor de l'ordre de 8000 a 12000°C o fins a 20000°C extremadament localitzats (Molera, 1989). És en aquest moment on al voltant del canal de plasma es forma una bombolla de gas que comença a créixer. Per altra banda les altes temperatures van fonent i vaporitzant part del material de la peça a mecanitzar com de l'elèctrode, tal com es pot observar a la Figura 3.

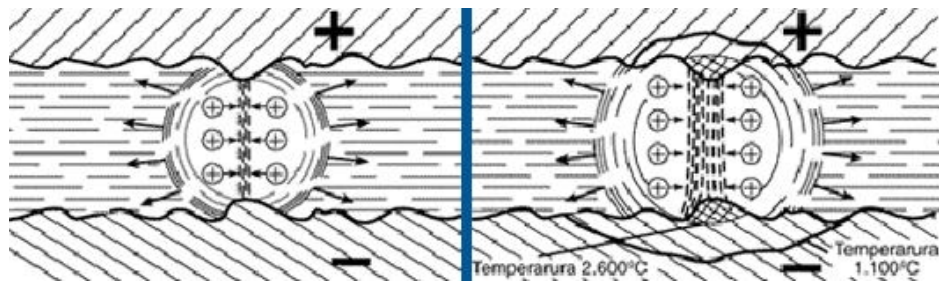


Figura 3: Formació de la bombolla de gas i fusió del material. (CGA, 2011).

En aquesta situació (bombolla de gas gran i material fos en els dos pols), es talla la corrent elèctrica i l'espuma desapareix (Jameson, 2001). Llavors el fluid dielèctric fa explotar cap a dins la bombolla de gas. En aquest moment les partícules de material fos es solidifiquen en forma de petites esferes, que seria la ferritja del procés d'electroerosió, i surt de les superfícies de la peça i l'elèctrode, formant dos cràters. El fluid dielèctric arrastra aquestes partícules netejant la zona on hi ha hagut la descàrrega. Aquest fet es mostra a la Figura 4.

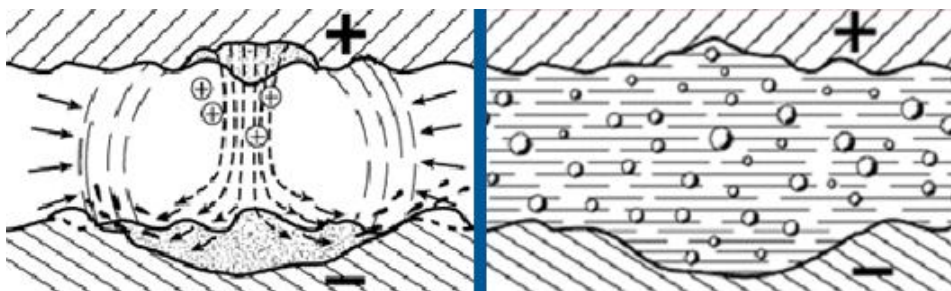


Figura 4: Explosió bombolla de gas i eliminació de les partícules. (CGA, 2011).

El fluid dielèctric és un element molt important dins el procés de EDM, ja que aquest ha de complir quatre funcions importants:

- Aïllant entre la peça i l'elèctrode
- Conductor de descàrregues
- Refrigerant
- Medi d'eliminació de les partícules (ferritja)

A més a més d'aquestes funcions, el fluid dielèctric, també té efectes sobre el desgast de l'elèctrode i l'eliminació de material.

La duració de cada descàrrega normalment es troba entre uns pocs micro-segons fins a centenars de micro-segons. El volum de material eliminat per descàrrega és de l'ordre de $10^{-6} - 10^{-4} \text{ mm}^3$ (Ho and Newman, 2003).

Per altra banda per obtenir condicions estables durant el procés, és important que el següent impuls de descàrrega tingui lloc amb un interval de temps (temps de pausa) suficientment llarg per tal que el líquid dielèctic tingui temps d'emportar-se les partícules erosionades del material (Kunieda et al., 2005).

2.2 Tipus de processos

2.2.1 Electroerosió per penetració

En aquest tipus de procés (Figura 5), l'elèctrode té la forma complementària de la forma final desitjada de la peça a mecanitzar.

El control numèric permet controlar les condicions de la zona de treball i en el mateix moment controla els eixos i el generador d'impulsos. El líquid dielèctic és filtrat per eliminar les diminutes partícules sorgides de l'electroerosió. Com a dielèctic normalment s'utilitzen hidrocarburs ja que la rugositat superficial de la peça és millor i el desgast de l'elèctrode és menor comparat amb aigua desionitzada.

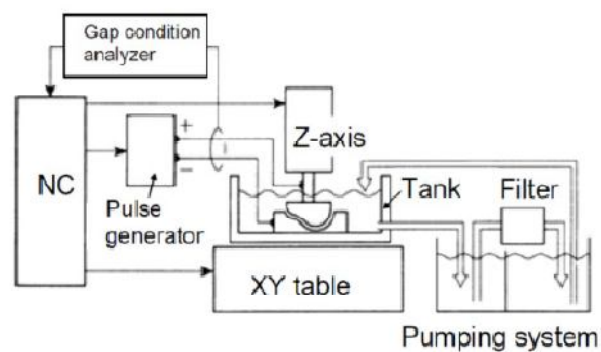


Figura 5: Electroerosió per penetració. (Kunieda et al., 2005).

2.2.2 Electroerosió amb fil

Aquest sistema, (Figura 6) consta d'un fil (elèctrode), normalment de llautó, acer recobert, tungstè o molibdè, tot i que també s'utilitzen altres tipus de materials per diferents aplicacions, de diàmetre que pot anar de 0.02 fins a 0.33mm, que està

subjectat a unes guies, on controlant la posició d'aquestes permet tallar peces complicades amb una alta precisió.

Les descàrregues tenen un elevat pic de corrent durant un petit temps. L'alimentació s'aplica tant per la bobina de dalt com per la bobina de baix per tal d'aconseguir un ràpid augment del corrent de descàrrega. Això es fa per evitar el trencament del fil degut a l'efecte joule (Kunieda et al., 2005).

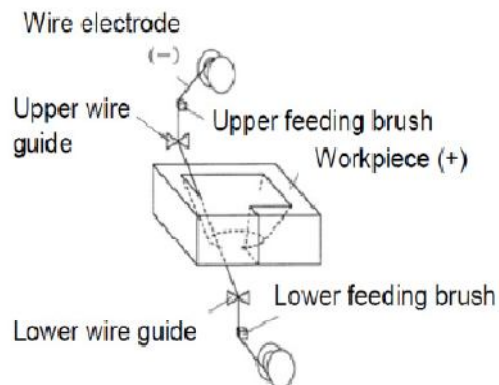


Figura 6: Electroerosió amb fil. (Kunieda et al., 2005).

2.3 Micro-EDM

La recent tendència a reduir l'escala dels productes ha donat a la micro-electroerosió un important interès de recerca. El procés d'electroerosió és utilitzat per a la micro-fabricació d'aplicacions com ara micro filtres, fileres de forats per a fibres sintètiques, dispositius electrònics i òptics i micro-eines per a la producció d'aquests dispositius. Actualment, la micro-electroerosió és capaç de mecanitzar micro-forats i micro-canals de unes poques micres de diàmetre i també pot mecanitzar complexes micro-cavitats (Rajurkar and Yu, 2000).

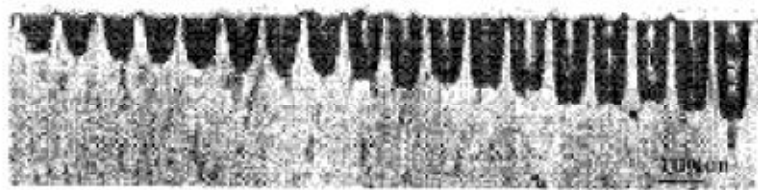
La diferència principal entre l'EDM convencional i la micro-EDM és la quantitat d'energia que s'aplica per impuls elèctric. En l'EDM convencional s'aplica energia de l'ordre de 0,05 a 1 Joule, mentre que en la μ -EDM les descàrregues d'energia es troben entre 10^{-9} i 10^{-5} Joule (S. P. Moylan et al., 2005).

La reducció de l'escala dels processos de fabricació requereix un nou enfocament en el disseny del procés d'electroerosió. Típicament la micro-electroerosió ha tendit a utilitzar màquines d'electroerosió convencionals adaptades per tal de garantir els

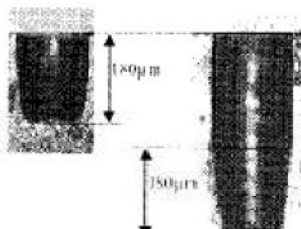
requeriments d'aquest tipus de fabricació. Tot i això durant el procés es manifesten alguns problemes (Vázquez, 2009). Un d'aquests problemes és el desgast de l'elèctrode. En l'electroerosió per penetració convencional el desgast de l'elèctrode durant el mecanitzat és prou conegut. La solució està en utilitzar varis elèctrodes per a produir una cavitat, l'error causat pel desgast de l'elèctrode sovint és insignificant en comparació amb la mida i les toleràncies requerides. En la micro-electroerosió on es mecanitzen forats de diàmetres de l'ordre de mil·lèsimes de mil·límetre i es necessita elevada precisió, converteix el desgast de l'elèctrode en un interessant tema de recerca.

2.3.1 Desgast de l'elèctrode

El desgast de l'elèctrode es pot dividir en dos aspectes, deformació de la forma de l'elèctrode i el desgast volumètric. En el primer aspecte el desgast només té lloc a l'eina (elèctrode), on distorsiona la forma de tal manera que no es pot ignorar. Pham et al. (Pham et al., 2007) van desenvolupar un estudi experimental per tal d'analitzar l'evolució de la forma de l'eina. Van concloure que el perfil de l'elèctrode canvia durant el mecanitzat. Un exemple d'aquest fet es pot observar a la Figura 7 on es mostra un elèctrode d'acer utilitzat en un procés d'electroerosió per penetració, demostrant que la forma de l'eina canvia durant les primeres 180 μm de profunditat, després l'elèctrode continua desgastant-se, però la forma roman constant.



Evolució de la forma de l'elèctrode durant la perforació.



Forma de l'elèctrode després de 180 μm de perforació.

Figura 7: Evolució de la forma de l'elèctrode/forat durant el procés d'EDM utilitzant un elèctrode d'acer de \varnothing 170 μm . (Pham et al., 2007).

El segon aspecte és el desgast volumètric que té lloc tan a l'elèctrode com a la peça a mecanitzar. Pham et al. (Pham et al., 2007) van proposar un mètode per tal de calcular el desgast volumètric, aquest està basat només en la informació geomètrica derivada del procés. La relació entre el volum eliminat pel desgast de l'elèctrode (v_e) i el volum eliminat de la peça a mecanitzar (v_p), és el criteri que van fer servir per estimar el desgast de l'elèctrode.

$$\sigma = \frac{v_e}{v_p} \quad \text{Eq. 1}$$

Els van concloure que entenent el procés de desgast de l'eina i l'efecte que hi tenen els paràmetres de procés és la clau per aconseguir una micro-electroerosió més precisa i fiable.

Una investigació sobre quins efectes tenen les propietats tèrmiques del material en el seu desgast en la micro-electroerosió, feta per Tsai and Masuzawa (Tsai, Y. and Masuzawa, T., 2004). Ells van trobar que el desgast de l'elèctrode disminuïa quan el seu material tenia un alt punt d'ebullició, alt punt de fusió i una alta conductivitat tèrmica.

2.3.2 Precisió i qualitat superficial

La precisió és un aspecte molt important en el micro-mecanitzat, ja que molts dels components fabricats requereixen d'una alta precisió, com és el cas del camp de la biomedicina.

D'acord amb Pham et al., (Pham et al., 2005) que van realitzar un estudi sobre quins són els factors que afecten la precisió durant el procés de micro-EDM per penetració. Ells van arribar a la conclusió que la màquina utilitzada ha d'estar en un local amb una temperatura controlada, i un cabal i temperatura del dielèctric constant.

Alguns investigadors han estudiat l'efecte dels paràmetres de procés per tal d'aconseguir una millor qualitat superficial. Ali i Mohammed (Ali i Mohammed, 2009), van utilitzar el procés d'EDM convencional per a realitzar micro-mecanitzats. Ells van desenvolupar una sèrie d'experiments utilitzant els valors mínims de paràmetres de procés. Van mesurar la rugositat superficial per tal d'optimitzar els paràmetres de procés. A partir dels resultats van concloure que per aconseguir una baixa rugositat superficial és necessari utilitzar una baixa corrent de descàrrega. A més a més el temps d'impuls ha de ser curt garantint així una baixa energia en la descàrrega,

mentre que el temps de pausa ha de ser llarg permetent així una millor neteja de les partícules erosionades. Amb aquests paràmetres van aconseguir una alta qualitat superficial de l'ordre de $0.60 \mu\text{m}$ de R_a i $2.90 \mu\text{m}$ de R_t .

De Wolf, D. et al. (De Wolf, D. et al., 2010) van arribar a la mateixa conclusió que Ali i Mohammed, que per obtenir alta precisió i bon acabat superficial és necessària una baixa corrent de descàrrega i que el temps d'impuls sigui curt, això juntament amb una alta freqüència assegura els millors resultats d'acabat.

Bigot et al. (Bigot et al., 2006) van treballar en un estudi per la optimització dels paràmetres de procés que afectaven a la rugositat. Ells van suggerir que la polaritat negativa (elèctrode terminal positiu i la peça a mecanitzar terminal negatiu) dona millor qualitat superficial que la polaritat positiva.

Per tal de mostrar d'una manera gràfica tots els factors que intervenen en la qualitat superficial final i en la precisió del procés de micro-EDM, s'han realitzat el següent diagrama d'espina de peix, Figura 8.

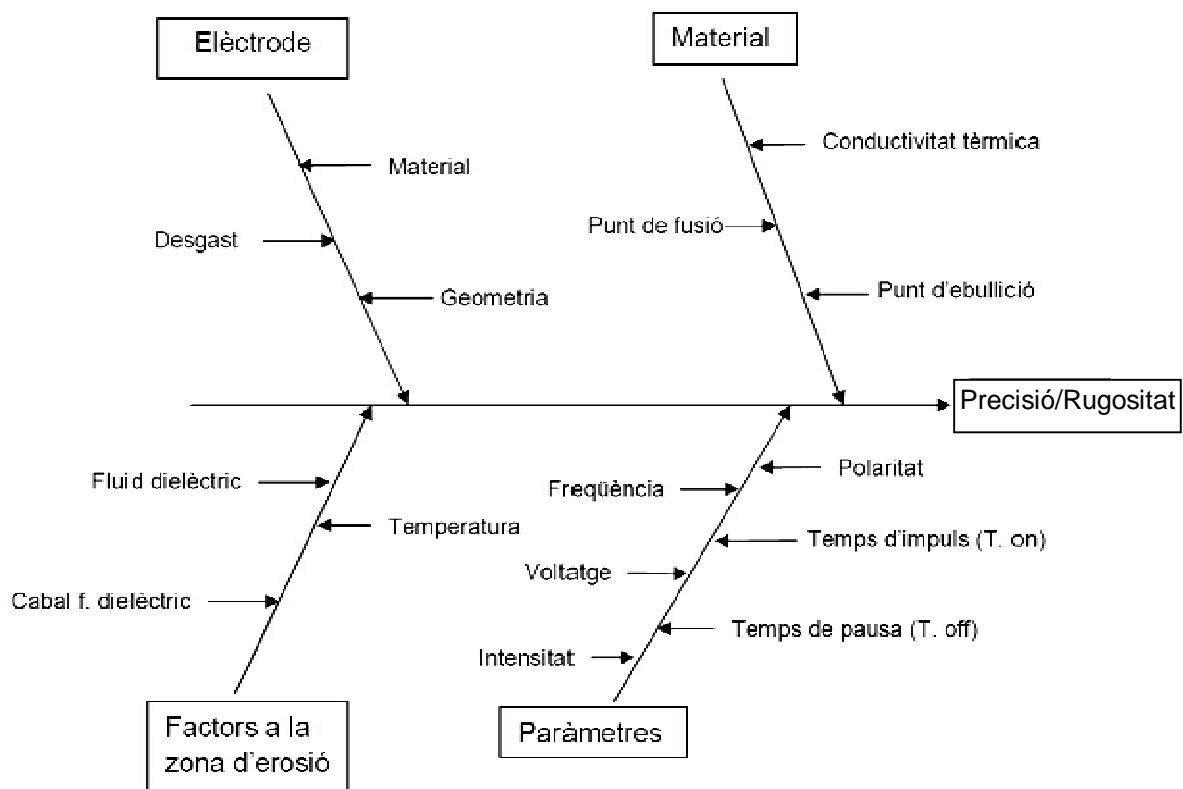


Figura 8: Diagrama d'espina de peix de la micro-electroerosió per als paràmetres de precisió i rugositat.

3 METODOLOGIA

3.1 Recursos a utilitzar

A continuació es mostren els recursos utilitzats per a la realització dels experiments i l'adquisició i anàlisi de les dades.

3.1.1 Maquinària i aparells

- Electroerosionadora ONA DB300. Màquina que realitza electroerosió per penetració. Incorpora un sistema de subjecció EROWA i fluid dielèctric DUBER ONA OIL, *Figura 9*.



Figura 9: Electroerosionadora ONA DB300.

- Microscopi ZEISS Stereo Discovery V12, *Figura 10*.



Figura 10: Microscopi ZEISS Stereo Discovery V12.

- Rugosímetre Mitutoyo Surftest SV-2000,
Figura 11.

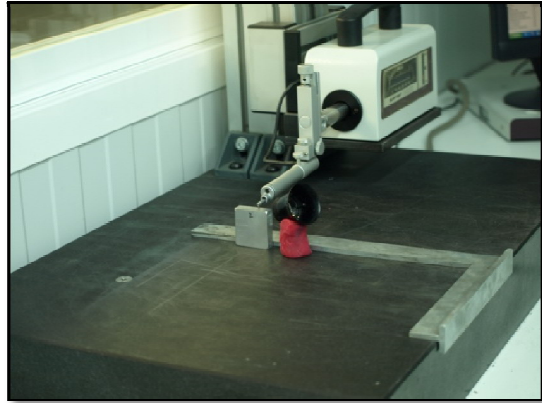


Figura 11: Rugosímetre Mitutoyo Surftest SV-2000.

3.1.2 Programes

- QUARTZ PCI, programa de tractament d'imatges utilitzat per a obtenir les mides, de forma precisa, dels micro-canals a través d'imatges.
- MINITAB, programa de realització de càlculs estadístics.

3.1.3 Material

- Acer inoxidable 316 L. És un acer inoxidable del tipus austenític (es classifiquen segons la seva microestructura). En l'actualitat és l'acer inoxidable més adequat per a la fabricació d'implants gràcies a les seves propietats de biocompatibilitat, resistència mecànica i fàcil esterilització entre altres . La proveta en què es realitzaran els experiments té unes dimensions de 25x12x25 mm i es mostra a la Figura 12.

A la Taula 2 es mostra la composició química de l'acer inoxidable 316 L i a la Taula 3 les seves propietats més importants.



Figura 12: Proveta d'acer inoxidable 316 L.

Composició (%)	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Fe
Acer inox. 316 L	<0,03	<2	<0,75	<0,045	<0,03	16-18	2-3	10-14	<0,1	Fins al 100%

Taula 2: Composició química de l'acer inoxidable 316 L.

Propietats	Resistència a la tracció [MPa]	Mòdul elàstic [GPa]	Duresa [HRB]	Densitat [kg/m ³]	Resistivitat elèctrica [$\mu\Omega\cdot m$]	Conductivitat tèrmica [W/m·K]	Coef. de dilatació 0-100°C/°C	Punt de fusió [°C]
Acer inox. 316 L	485	193	88	8000	0,74	16,3	15·10 ⁻⁶	1400

Taula 3: Propietats acer inoxidable 316 L.

3.1.4 Eina

L'eina utilitzada, és un elèctrode de coure de 200 μ m d'ample per 800 μ m d'alt per 8mm de llarg. S'ha triat el coure perquè és un metall molt conductor, té un desgast acceptable i una alta maquinabilitat. L'elèctrode s'ha mecanitzat en un centre de mecanitzat DECKEL MAHO 64V linear amb control Fanuc 180i, utilitzant una eina de 2mm Mitsubishi MS2SSD0200 amb les condicions de tall que es mostren a la Taula 4. Aquests paràmetres de mecanitzat han estat escollits per tal de minimitzar les forces durant el mecanitzat. Tot i això l'elèctrode presenta una petita desviació als extrems degut a aquestes forces (Figura 13).

Paràmetres	
Velocitat de rotació, N [rpm]	1518
Velocitat d'avanç, F [mm/min]	51

Taula 4: Paràmetres per a la mecanització de l'elèctrode.

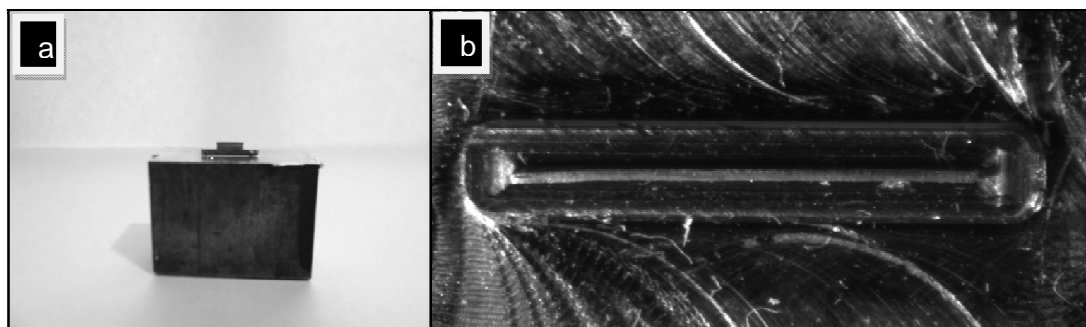


Figura 13: a) Elèctrode a utilitzar. b) Desviació de l'elèctrode.

3.2 Disseny d'experiments

Amb la informació recollida anteriorment i els recursos de que es disposa, s'han dissenyat els experiments. Cal destacar que s'analitzaran els paràmetres que afecten més a l'acabat superficial i la precisió, la resta es fixaran. A més a més també es mesurarà el temps de mecanització de cada micro-ranura.

Els paràmetres que es mantindran fixes es mostren a la Taula 5.

Paràmetres	Descripció
Polaritat	Negativa
Temps de pausa [μ s]	3,2
Temps de treball [s]	0,2
Temps de retrocés [s]	0,8
Servo [%]	65
Fluid dielèctric	ONA DUBER OIL
Material	Acer inoxidable 316L

Taula 5: Paràmetres fixes.

Els diferents factors a analitzar i les condicions amb què es faran es troben expressades a la Taula 6.

Factors	Nivell dels factors		
Voltatge (V), [V]	80	120	160
Temps d'impuls (T.on), [μ s]	0,8	1	1,6
Intensitat (I), [A]	0,5	1	2

Taula 6: Factors a variar i nivells dels factors.

La geometria a mecanitzar en els diferents experiments és un micro-canal de $200\mu\text{m}$ d'amplada per $50\mu\text{m}$ de profunditat per 7mm de llarg. A la Figura 14 es pot observar un croquis de la proveta que s'obtindrà.

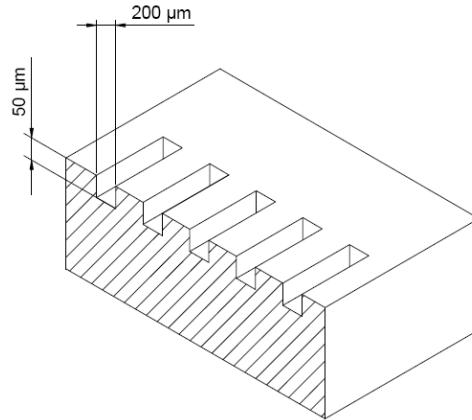


Figura 14: Croquis de la proveta dels experiments (sense escala).

Abans de començar amb els experiments dissenyats anteriorment, es realitzaran uns tests previs amb dos objectius diferents. Un primer serà per a familiaritzar-se amb el funcionament de la màquina i el mecanitzat per electroerosió a nivell micro. I un segon objectiu serà comprovar si el desgast de l'elèctrode és important o no i el seu estat després del mecanitzat. Per assolir aquests objectius es realitzaran cinc micro-canal amb cinc elèctrodes diferents. Tots els experiments preliminars es duran a terme amb els mateixos paràmetres de procés, per tal d'observar si hi ha repetibilitat en el desgast i en l'acabat superficial de l'elèctrode.

Un cop realitzats els experiments preliminars s'ha observat que el desgast de l'elèctrode és considerable i s'haurà de tenir en compte. A més a més després del mecanitzat l'elèctrode ha quedat amb alguns cràters que podrien afectar la mecanització del següent micro-canal. A la Figura 15 es pot observar l'elèctrode abans del mecanitzat i després. Els paràmetres utilitzats i els resultats dels experiments preliminars es mostren a l'annex A.

Per tal de compensar aquest desgast i que l'estat de l'elèctrode després del mecanitzat no afecti a la següent micro-ranura, es farà servir un elèctrode diferent per a cada mecanització.

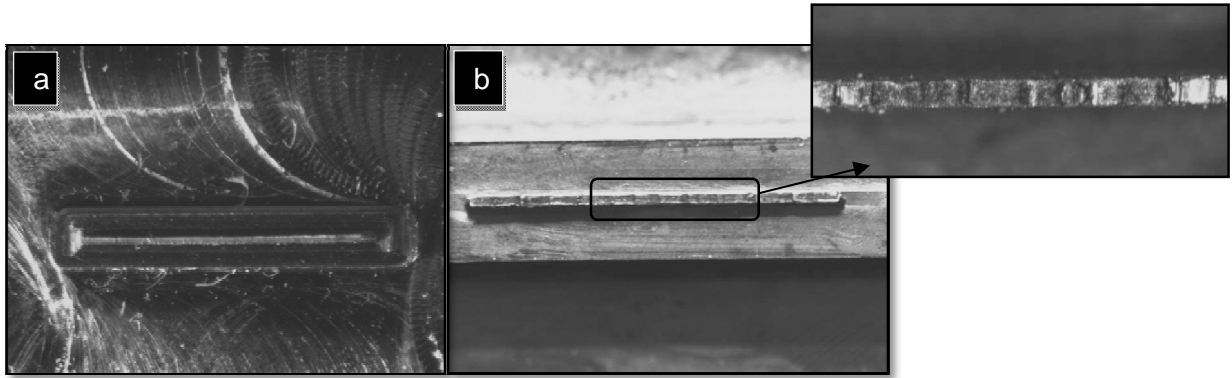


Figura 15: a) Elèctrode abans del mecanitzat. b) Elèctrode després del mecanitzat.

3.3 Muntatge i preparació

Per tal de poder realitzar adequadament els experiments cal un correcte muntatge de les diferents parts que intervenen. Durant la realització dels experiments preliminars s'ha observat que en el micro-mecanitzat el procediment de preparació i muntatge és molt important, ja que qualsevol error provoca una mala mecanització. Per minimitzar al màxim qualsevol error s'ha de seguir un procediment adequat que ens permeti poder treballar a nivell micro, ja que la màquina no està específicament dissenyada per treballar a aquesta escala.

3.3.1 Col·locació de l'elèctrode i fixació de la proveta

La col·locació de l'elèctrode a la màquina s'ha fet mitjançant el sistema EROWA. On el capçal de l'electroerosionadora permet acoblar aquest sistema mitjançant aire comprimit. Un aspecte a tenir en compte a l'hora de subjectar l'elèctrode amb el suport EROWA, és que l'elèctrode ha de trobar-se totalment planer, ja que una petita inclinació, a aquesta escala de treball, provocaria un error important a la mecanització. El sistema EROWA garanteix una correcta col·locació de l'element a subjectar, però per assegurar que l'elèctrode es troba ben col·locat, es fa servir un nivell, on en els experiments preliminars s'ha observat que és un mètode bastant fiable.

La proveta ha estat fixada amb el mateix sistema que l'elèctrode (sistema EROWA) i també s'ha tingut amb compte que es trobi planera. A la Figura 16 es mostra el muntatge.

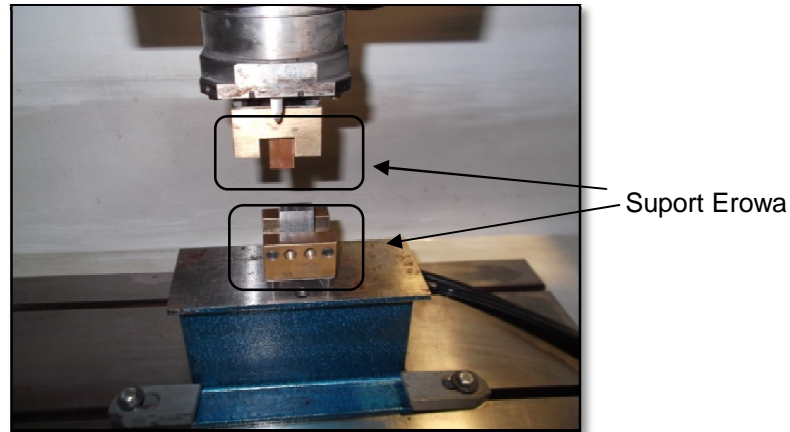


Figura 16: Fixació de la proveta i l'elèctrode.

3.3.2 Col·locació dels zeros

Una de les dificultats alhora de mecanitzar, ha estat la correcta col·locació dels zeros dels diferents eixos (X, Y, Z). La màquina disposa d'un detector de contacte, quan detecta que l'elèctrode impacte amb la proveta s'atura. El problema és que no es pot veure amb quina part de l'elèctrode toca a la proveta (rectangle gran, rectangle petit o l'elèctrode), figura 13 a, ja que hi ha el fluid dielèctric que cobreix tota la proveta.

Per tant és necessari trobar un procediment que ens permeti assegurar que la part que impacte amb la proveta és l'elèctrode i no qualsevol altra part. A la Figura 17 es mostra gràficament el procediment que s'ha seguit per trobar els diferents zeros.

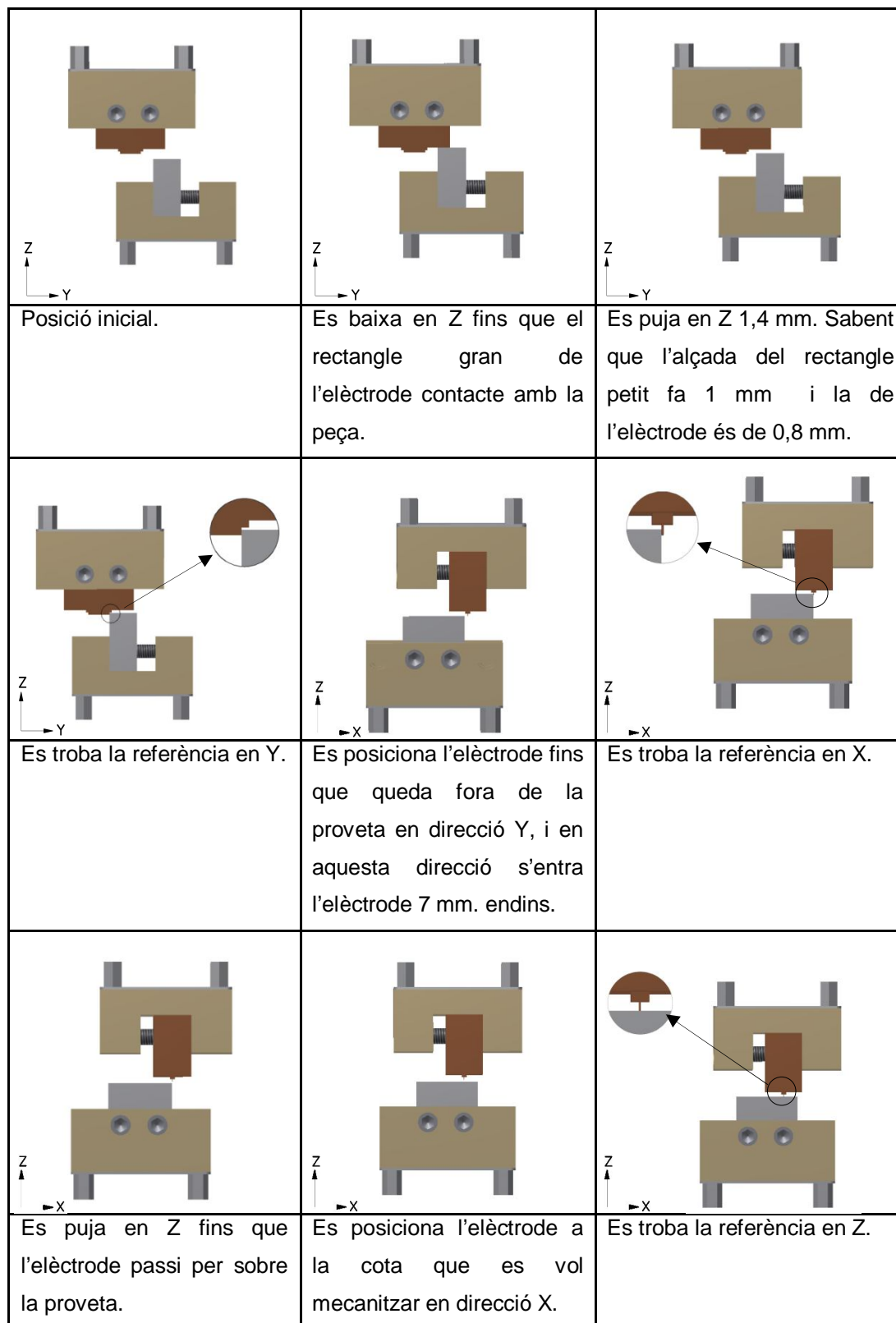


Figura 17: Procediment obtenció dels zeros.

3.4 Programa de mecanitzat

El programa dissenyat per a la realització de les micro-cavitats només mecanitza una ranura ja que com s'ha dit anteriorment per a cada micro-canal es farà servir un elèctrode diferent, això fa que el programa s'hagi d'aturar en cada mecanitzat. Per tant el programa consta d'una col·locació de l'elèctrode a la posició d'erosió, tot seguit es posa en marxa el rellotge per a comptar el temps de mecanitzat i comença a erosionar la peça. Finalment para el rellotge i finalitza el programa.

La programació del programa és senzilla, i es fa mitjançant un assessor que mostra les diferents sentències que es poden programar. A l'annex B es pot observar el programa de mecanització dels micro-canal·ls.

3.5 Mesura i adquisició de dades

Les dades que s'han adquirit de les mecanitzacions es poden dividir en tres apartats diferents: l'obtenció de les rugositats, l'adquisició de la geometria i el temps de mecanització de cada micro-canal.

3.5.1 Rugositats

Per a obtenir les rugositats de les diferents micro-ranures s'ha utilitzat el rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV-2000. El problema ha estat la correcta col·locació del perfilòmetre dins la ranura, ja que l'amplada del micro-canal és de 200 μm i és complicat de fer a simple vista. Per a solucionar-ho s'ha utilitzat un monocle per poder veure de manera més precisa on està situat el palpador del rugosímetre (dins o fora del micro-canal). Per a cada ranura s'ha mesurat la rugositat dues vegades, on la rugositat final ha estat la mitjana de les dues mesures. A la Figura 18 es mostra el muntatge.

L'adquisició de la mesura es fa amb els paràmetres següents: longitud d'avaluació 0,025 mm, longitud de mostreig 1 mm i utilitzant un filtre gaussià, que ens permet atenuar longituds d'ona que estiguin fora de l'interval d'interès. A la Figura 19 es pot observar un exemple d'un perfil de rugositat sense filtrar i un altre filtrat.

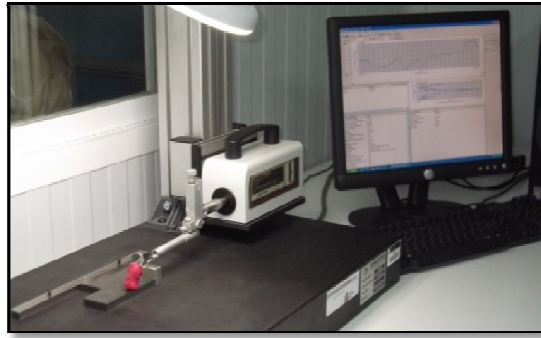


Figura 18: Muntatge per a l'obtenció de les rugositats.

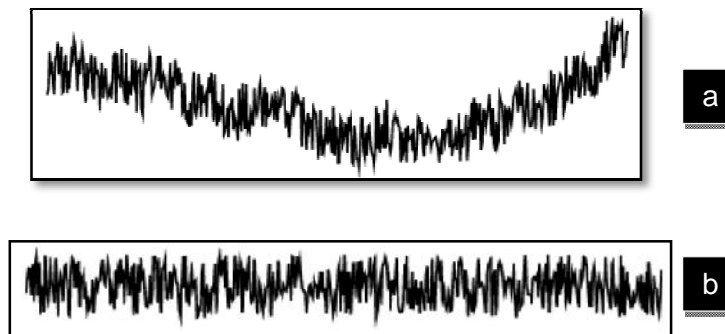


Figura 19: Perfil de rugositat a) sense filtrar b) filtrat.

3.5.2 Geometria

Utilitzant el microscopi ZEISS Stereo Discovery V12 amb càmera digital DeltaPix de 3,75 MB, s'han aconseguit les imatges de les seccions dels diferents canals. Prèviament s'ha polit la proveta per a poder veure correctament els micro-canal·ls. A més a més també s'han obtingut imatges en planta de les ranures per observar si l'amplada és constant al llarg de tota la longitud del micro-canal. Un cop obtingudes les imatges s'han analitzat mitjançant el programa Quartz PCI, on aquest ens permet mesurar amb exactitud les dimensions dels canals.

3.5.3 Temps de mecanització

Per a obtenir el temps de mecanització, es farà a través del programa de mecanitzat, on la màquina electroerosionadora disposa de varis rellotges per poder mesurar el temps de treball.

4 ANÀLISI I DISCUSSIÓ DE RESULTATS

Els resultats que s'han obtingut dels experiments es mostren a la Taula 7.



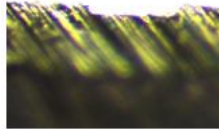


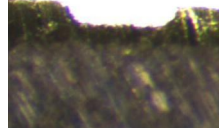




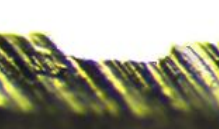

Voltatge (V) [V]	Temps impuls (Ton) [µs]	Intensitat (I) [A]	Rugositat (Ra) [µm]	Profunditat (P) [µm]	Amplada inici del canal (A _i) [µm]	Amplada al fons del canal (A _f) [µm]	Temps (T) [']
80	0,8	0,5	0,157	53,3	184	182	27' 18"
80	0,8	1,0	0,097	49,2	175	170	59' 37"
80	0,8	2,0	0,146	20,9	185	175	79' 13"
80	1,6	0,5	0,109	43,3	195	179	19' 40"
80	1,6	1,0	0,136	44,6	194	191	25' 33"
80	1,6	2,0	0,135	50,4	196	178	38' 12"
80	3,2	0,5	0,136	56,0	213	181	20' 57"
80	3,2	1,0	0,120	30,7	220	194	19' 38"
80	3,2	2,0	0,178	56,1	222	187	47' 25"
120	0,8	0,5	0,175	41,7	190	171	36' 18"
120	0,8	1,0	0,139	44,6	203	191	23' 06"
120	0,8	2,0	0,171	44,7	202	178	50' 21"
120	1,6	0,5	0,090	21,5	204	182	22' 50"
120	1,6	1,0	0,085	38,9	213	198	27' 00"
120	1,6	2,0	0,138	33,3	202	176	48' 47"
120	3,2	0,5	0,110	44,9	208	174	36' 34"
120	3,2	1,0	0,086	21,7	202	168	16' 25"
120	3,2	2,0	0,132	50,3	202	165	24' 20"
160	0,8	0,5	0,162	41,7	220	192	13' 17"
160	0,8	1,0	0,108	47,4	201	194	22' 58"
160	0,8	2,0	0,146	47,5	201	182	10' 36"
160	1,6	0,5	0,187	47,4	198	194	24' 26"
160	1,6	1,0	0,108	30,3	225	201	11' 01"
160	1,6	2,0	0,134	67,4	226	177	9' 07"
160	3,2	0,5	0,167	56,0	224	202	8' 30"
160	3,2	1,0	0,109	44,6	210	160	16' 52"
160	3,2	2,0	0,230	31,7	210	192	17' 07"




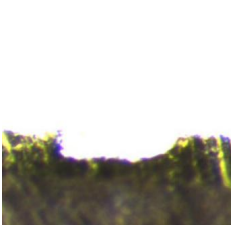
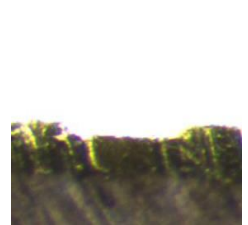
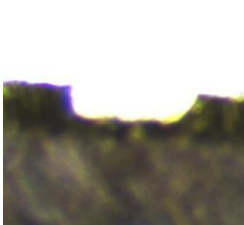
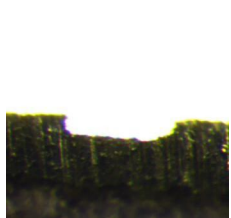
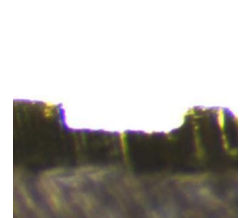
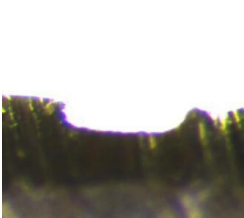

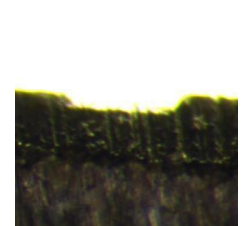

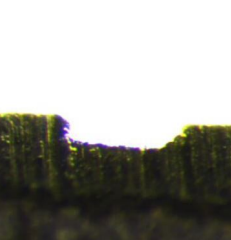
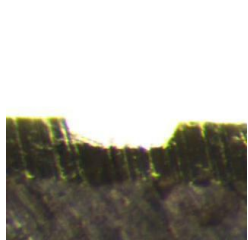
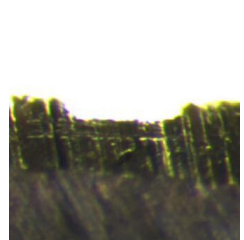
Taula 7: Resultats dels experiments.

4.1 Anàlisi de la profunditat

A la Taula 8 es mostren les imatges de les seccions de les micro-cavitats realitzades amb els diferents paràmetres de procés.

A cada micro-canal se l'hi ha fet un anàlisi qualitatiu de la forma, utilitzant una escala de 1 a 5, de pitjor a millor. Els aspectes que es tenen en compte alhora de valorar la qualitat de la forma són: si les parets del canal són rectes o no, si la superfície de la cavitat és llisa o presenta petites deformacions, si els angles entre parets són rectes o tenen un arrodoniment, si s'ha mecanitzat a la profunditat desitjada.

	I=0,5 A	I=1 A	I=2 A	
V=80V				Ton=0.8 μs
	4	5	2	Qualitat
				Ton=1.6 μs
	4	4	3	Qualitat
				Ton=3.2 μs
	5	2	4	Qualitat
V=120V				Ton=0.8 μs
	2	3	3	Qualitat

				Ton=1.6 μs
	2	1	2	Qualitat
				Ton=3.2 μs
	2	1	3	Qualitat
V=160V				Ton=0.8 μs
	2	4	3	Qualitat
				Ton=1.6 μs
	4	2	4	Qualitat
				Ton=3.2 μs
3	3	2	Qualitat	

Taula 8: Imatges de les seccions dels micro-canal·ls.

Els resultats de l'anàlisi qualitatiu de la forma de les micro-cavitats es mostra a la gràfica de la Figura 20, on es veu que la qualitat dels micro-canal·ls es troba afectada segons el voltatge utilitzat. Així doncs, utilitzant un voltatge de 80V és quan s'obtenen els canal·ls amb la forma més pròxima a la de disseny, mentre que amb un voltatge de 120V les cavitats perden la forma rectangular assolint una forma més arrodonida. I

quan el voltatge és de 160V s'observa que les micro-ranures tenen una aparença trapezoïdal. Aquest fet ens il·lustra que utilitzant un voltatge reduït, s'aconsegueix més precisió en la forma que fent servir un voltatge elevat. De forma semblant succeeix amb la resta de paràmetres de procés.

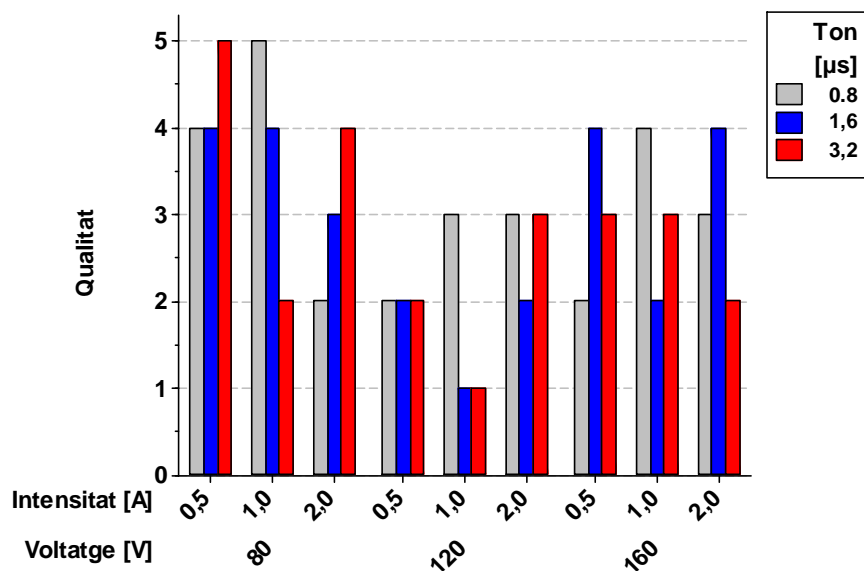


Figura 20: Influència de la intensitat, el voltatge i el temps d'impuls en la qualitat dels micro-canal·ls.

A la Figura 21 es mostra l'efecte que tenen el voltatge, la intensitat i el temps d'impuls en la profunditat de les micro-ranures. En ella es pot observar com el t.on no és un factor que afecti de manera clara la profunditat.

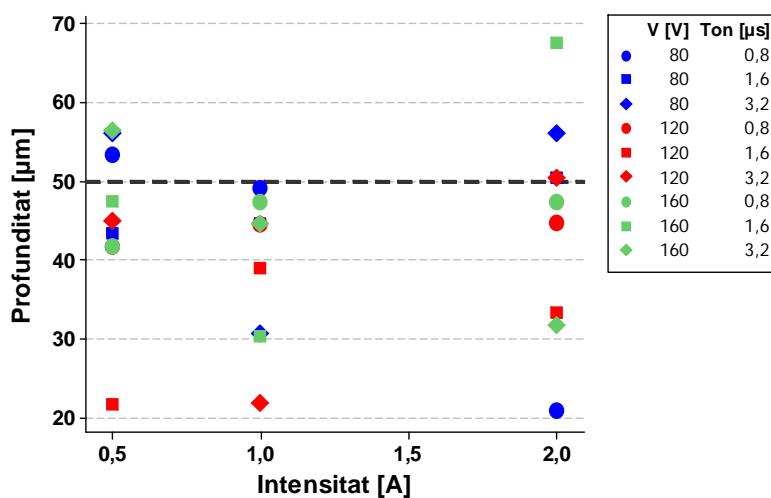


Figura 21: Efecte de la intensitat, el voltatge i el temps d'impuls en la profunditat de les micro-cavitats.

A la Figura 22 es veu la influència que tenen la intensitat i el voltatge en la profunditat. Encara que la gràfica no mostra una tendència clara, es pot observar que quan s'utilitza una intensitat de 0,5A hi ha menys dispersió en la profunditat obtinguda. Per altra banda també es pot veure que s'obtenen bons resultats quan s'utilitza el voltatge més reduït (80V).

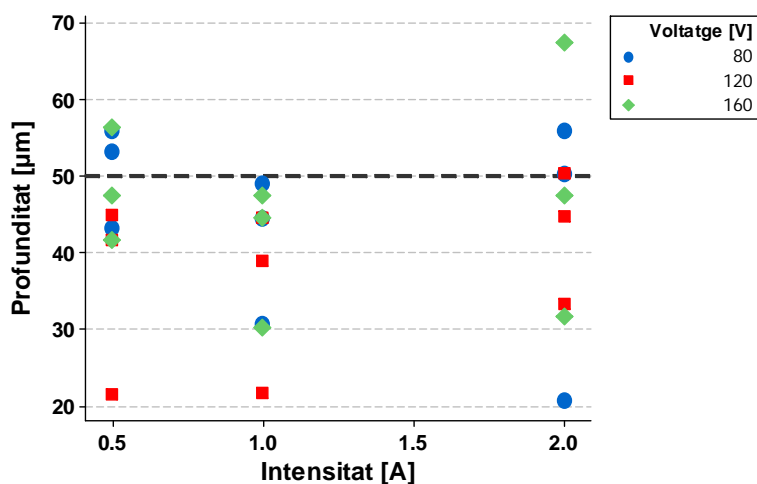


Figura 22: Influència de la intensitat i el voltatge en la profunditat de les micro-cavitats.

S'ha realitzat un estudi ANOVA, que ens mostra els paràmetres que més influeixen en la profunditat dels micro-canal. Cal remarcar que aquest anàlisi només té en compte el valor de la profunditat, la qualitat d'aquesta no es té en consideració.

Es vol tenir un 95% de confiança en el resultat ($\alpha=0,05$), per tant es considerarà la Prova F valors $p < 0,05$. Observant el resultat de l'anàlisi, Taula 9, es pot observar com no hi ha cap paràmetre que tingui una p menor a 0,05. Així doncs es pot dir que no hi ha evidència estadística que el voltatge, la intensitat i el temps d'impuls tinguin efecte decisiu en la profunditat dels micro-canal.

Factor	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
Voltatge	2	343,1	343,1	171,6	1,21	0,319
Temps impuls	2	15,6	15,6	7,8	0,06	0,946
Intensitat	2	201,9	201,9	100,9	0,71	0,502
Error	20	2833,0	2833,0	141,7		
Total	26	3393,7				

Taula 9: ANOVA de la profunditat.

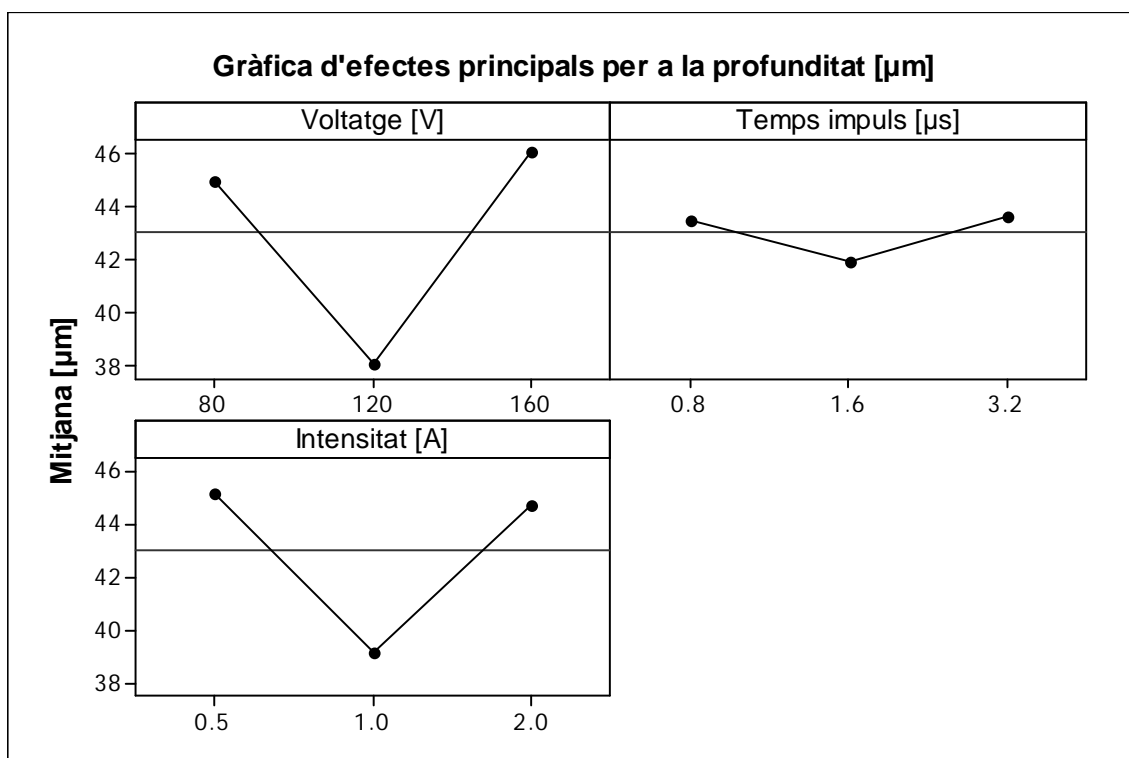


Figura 23: Gràfica d'efectes principals per a la profunditat.

La Figura 23 confirma que cap dels paràmetres afecta significativament a la profunditat i no presenten cap tendència clara.

A mode de resum, es pot dir que per a aconseguir una profunditat el més pròxima possible a la de disseny i una bona qualitat d'acabat, els paràmetres a utilitzar són els més baixos possible, ja que així s'aconsegueix més control en el mecanitzat. La selecció de paràmetres de procés òptims a utilitzar són els que es mostren a la Taula 10.

Paràmetres	Valor
Voltatge [V]	80
Intensitat [A]	0,5
Temps d'impuls [μs]	0,8

Taula 10: Paràmetres òptims per a la profunditat i forma dels micro-canal·ls.

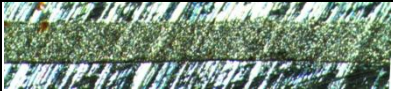

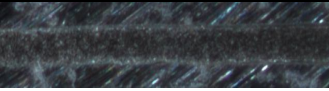
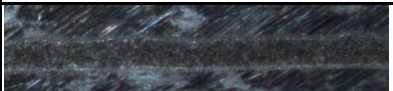
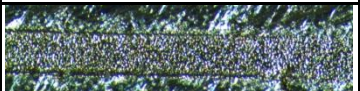
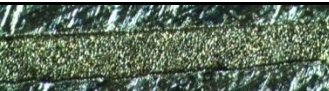
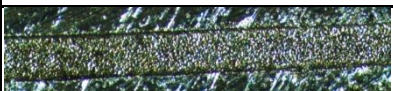
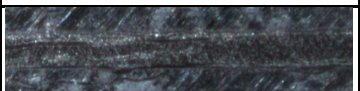

4.2 Anàlisi de l'amplada

A la Taula 11 es mostren les imatges en planta dels micro-canal·ls realitzats amb els diferents paràmetres de procés.

Igual que en el cas de la profunditat, s'ha fet un anàlisi de la qualitat de la forma de les micro-cavitats a través d'una escala de 1 a 5 de pitjor a millor. Per a fer-ho es té en compte si es mecanitza tot el canal, si l'amplada és constant, si les parets del canal són rectes o van fent petites ondulacions...

Destacar també, que si un canal no es mecanitza en tota la seva llargada, a més a més de la influència dels paràmetres de procés, un aspecte molt important, tal i com s'ha explicat a l'apartat 3.3.1, és la correcta col·locació de l'elèctrode. Es pot deduir si el problema és degut a una mala col·locació de l'elèctrode, quan en una banda de la ranura queda ben mecanitzada i progressivament va quedant sense mecanitzar. En la resta de casos la influència és dels paràmetres de procés.

	I=0,5 A	I=1 A	I=2 A	
V=80 V				Ton=0.8 µs
	2	1	4	Qualitat
				Ton=1.6 µs
	5	1	3	Qualitat
				Ton=3.2 µs
	4	4	3	Qualitat
V=120 V				Ton=0.8 µs
	2	4	4	Qualitat
				Ton=1.6 µs
	5	3	3	Qualitat
				Ton=3.2 µs
	4	4	1	Qualitat

V=160 V				Ton=0.8 μs
	4	5	3	Qualitat
				Ton=1.6 μs
	4	3	2	Qualitat
				Ton=3.2 μs
	4	2	2	Qualitat

Taula 11: Imatges en planta dels micro-canal·ls.

Els resultats de l'anàlisi de qualitat es mostren a la gràfica de la Figura 24, on es pot observar que majoritàriament les micro-cavitats tenen bona forma. Utilitzant una intensitat de 0,5 o 1 ampere independentment del voltatge i del temps d'impuls és quan s'aconsegueixen els millors resultats.

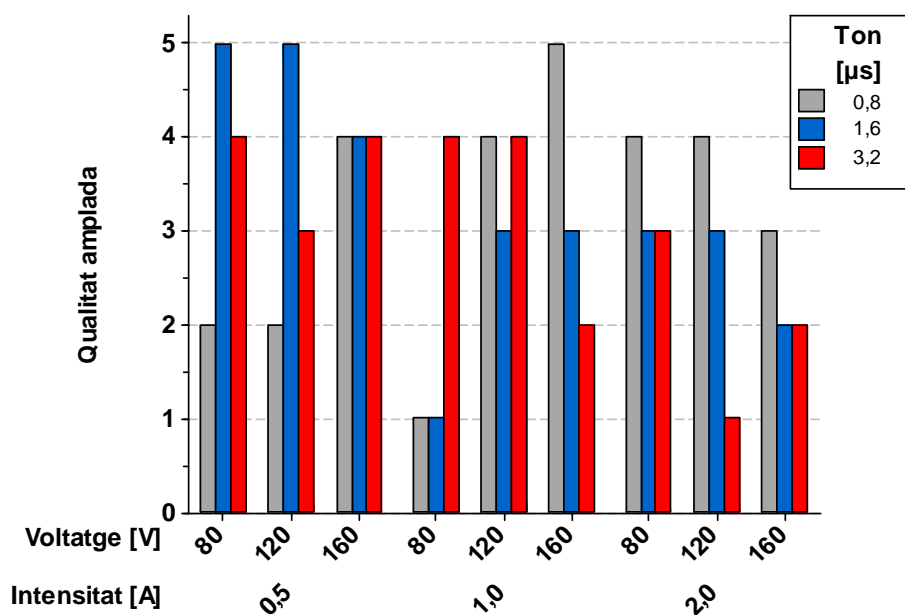


Figura 24: Influència de la intensitat, el voltatge i el temps d'impuls en la qualitat de l'amplada dels micro-canal·ls.

Pel que fa a la influència que tenen el voltatge, la intensitat i el temps d'impuls en la mesura de l'amplada, es veu a la Figura 25, on s'observa que els paràmetres que més pes tenen alhora d'aconseguir una amplada més propera a les 200 μm són el voltatge i el temps d'impuls. En aquest cas la intensitat no presenta molta importància.

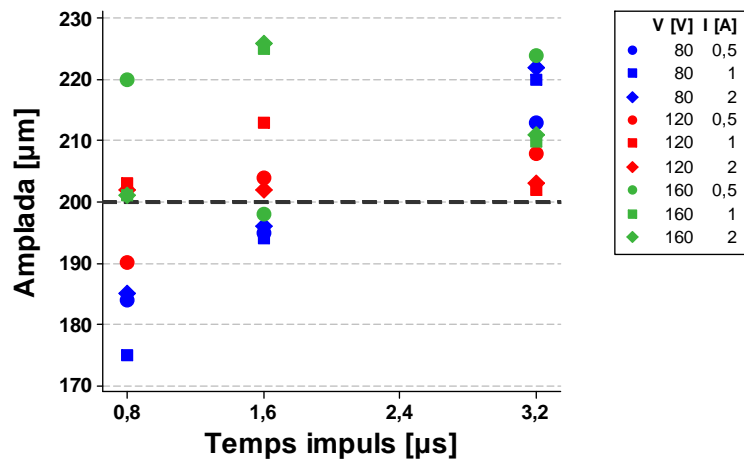


Figura 25: Efecte del temps d'impuls, el voltatge i la intensitat en l'amplada de les micro-ranures.

S'ha realitzat una segona gràfica (Figura 26) per analitzar amb més detall l'efecte que tenen el voltatge i el temps d'impuls en la mesura de l'amplada. En aquesta s'observa que, a mida que els paràmetres de procés es van incrementant la mida de l'amplada del canal també s'incrementa.

En general utilitzant un voltatge de 120V i per a qualsevol temps, l'amplada dels canals s'aproxima a l'amplada de disseny amb un error de $\pm 10\mu\text{m}$ ($\pm 5\%$). Per altra banda, si s'utilitza la combinació de un voltatge de 80V amb un temps d'impuls de $1,6\mu\text{s}$, l'amplada resultant també és molt pròxima a les $200\mu\text{m}$.

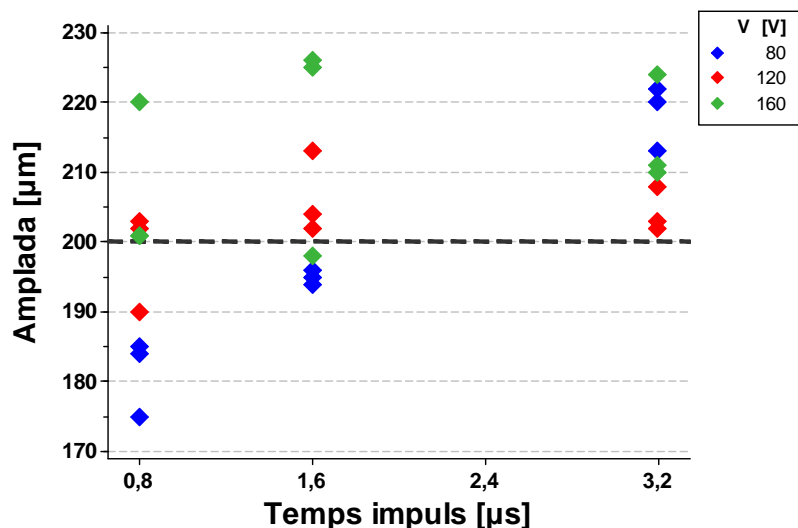


Figura 26: Efecte del temps d'impuls i el voltatge en l'amplada de les micro-ranures.

Tal i com es pot observar a l'anterior Taula 8, tots els micro-canals perden amplada a mesura que va augmentant la profunditat. Aquest fet és degut al desgast que pateix l'elèctrode mentre va erosionant la peça, on aquest desgast es veu influenciat pels paràmetres de procés utilitzats. A la Figura 27 s'ha analitzat aquest fet on es mostra la mitjana de l'amplada al inici i al fons de la ranura. S'han realitzat tres gràfiques diferents, una amb cada paràmetre a analitzar. Observant les tres gràfiques es pot veure com quan s'utilitzen els valors dels paràmetres de procés més baixos és quan hi ha menys pèrdua d'amplada, per tant més precisió. En elles també s'observa com, el voltatge i el temps d'impuls són els dos paràmetres que més influeixen en aquest fet.

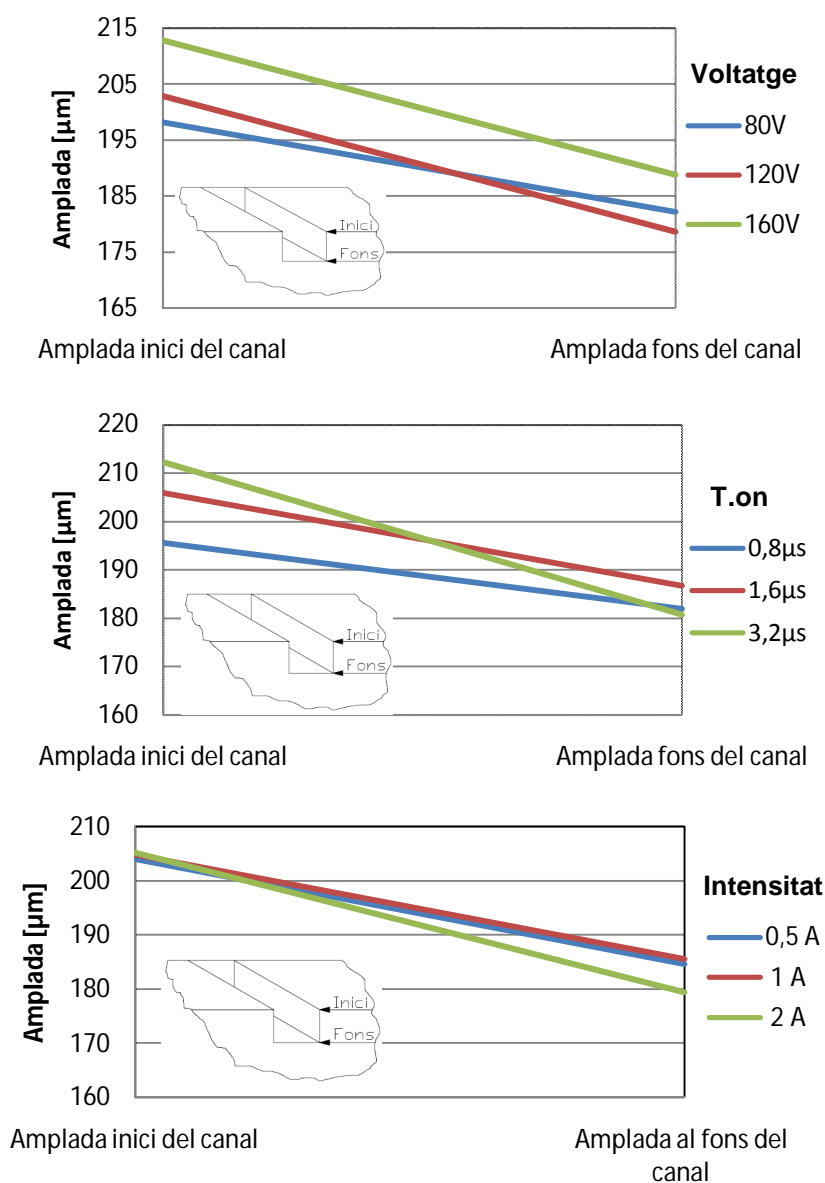


Figura 27: Mitjana amplada dels micro-canals al inici i al fons del canal.

Igual que en el cas de la profunditat, s'ha realitzat un estudi ANOVA, que mostra els paràmetres que més influeixen en l'amplada dels micro-canals. Cal remarcar que aquest anàlisi només té en compte el valor de l'amplada, la qualitat d'aquesta no es té en consideració.

Observant el resultat de l'anàlisi, Taula 12, es veu com clarament el voltatge i el temps d'impuls tenen una influència directa en el valor l'amplada de les micro-ranures.

Factor	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
Voltatge	2	994,3	994,3	497,1	4,43	0,025
Temps impuls	2	1271,4	1271,4	635,7	5,67	0,011
Intensitat	2	5,9	5,9	2,9	0,03	0,974
Error	20	2242,7	2242,7	112,1		
Total	26	4514,3				

Taula 12: ANOVA de l'amplada.

D'acord amb la Figura 28 on es mostren els efectes principals de l'amplada, es confirma que a mesura que el voltatge i el temps d'impuls s'incrementen la mida del canal també augmenta.

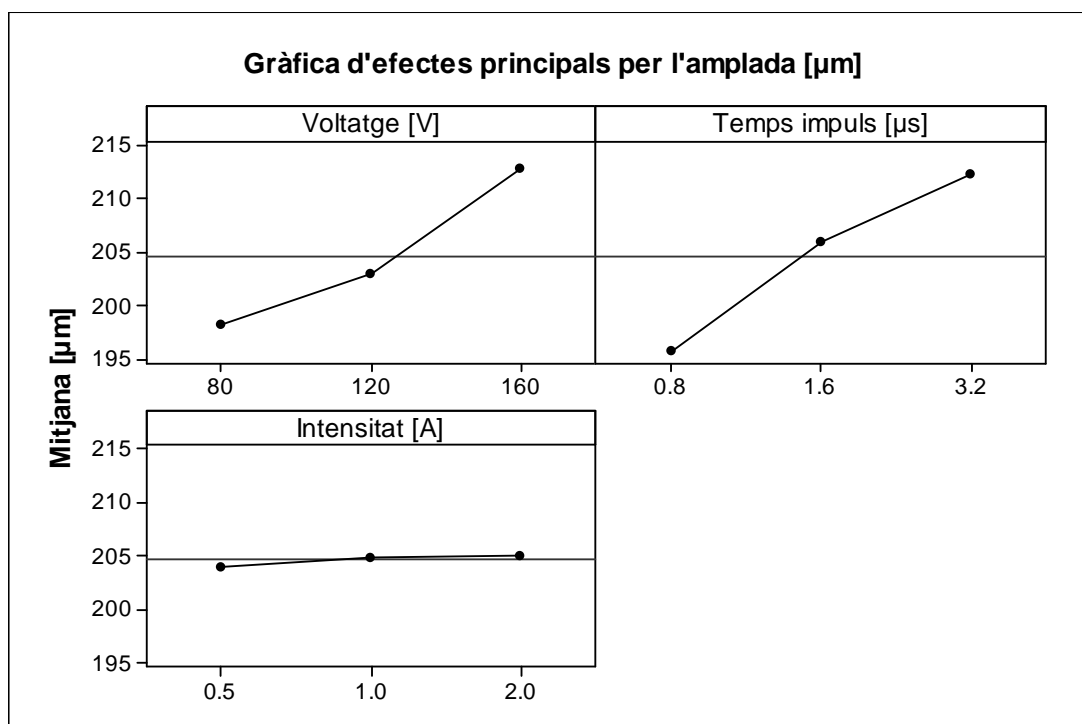


Figura 28: Gràfica d'efectes principals per a l'amplada.

En resum, per a poder aconseguir una amplada el més pròxima possible a les 200 μm (amplada de disseny), i la màxima qualitat possible d'acabat, els paràmetres òptims a utilitzar són els que es mostren a la Taula 13.

Paràmetres	Valor
Voltatge [V]	120
Intensitat [A]	1
Temps d'impuls [μs]	0,8

Taula 13: Paràmetres òptims per a l'amplada i la forma dels micro-canals.

4.3 Anàlisi de la rugositat superficial

La rugositat superficial (R_a) dels micro-canals es mostra a la Figura 29, on es pot observar que tots els valors són bastant baixos i que no hi ha cap valor que sigui molt diferent dels altres, sinó que tots es troben agrupats en un interval de 0.08 a 0.23 μm . Però s'observa també que, generalment quan s'utilitza una intensitat de 1 Ampere els valors de la rugositat superficial són més baixos. Pel que fa al voltatge, quan aquest és de 120V i combinat amb un temps d'impuls de 1,6 o 3,2 μs s'aconsegueix disminuir la rugositat. El valor més elevat es troba quan els paràmetres també són els més elevats ($V=160\text{V}$, $I=2\text{A}$, $T_{on}=3,2\mu\text{s}$).

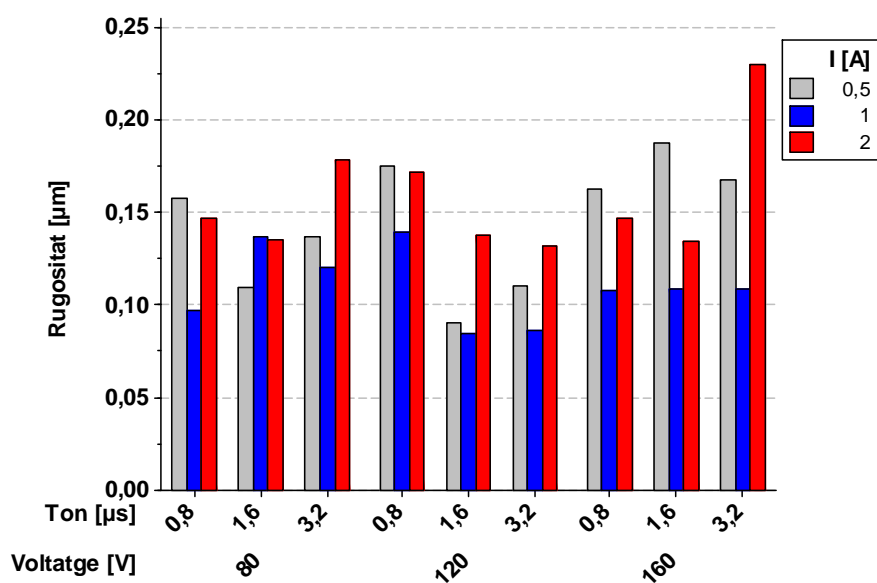


Figura 29: Influència de la intensitat, el voltatge i el temps d'impuls en la rugositat superficial dels micro-canals.

Igual que en els apartats anteriors, s'ha fet un anàlisi ANOVA, Taula 14, per veure quins paràmetres de procés (voltatge, intensitat, temps d'impuls) tenen més influència en la rugositat superficial. Observant els resultats es veu com la rugositat superficial es troba clarament influenciada per la intensitat.

Factor	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
Voltatge	2	0,0028651	0,0028651	0,0014325	1,84	0,185
Temps impuls	2	0,0020244	0,0020244	0,0010122	1,30	0,294
Intensitat	2	0,0105422	0,0105422	0,0052711	6,77	0,006
Error	20	0,0155624	0,0155624	0,0007781		
Total	26	0,0309940				

Taula 14: ANOVA de la rugositat superficial.

Segons les gràfiques de la Figura 30 on es poden observar els efectes principals dels paràmetres de procés en la rugositat superficial, es veu com utilitzant els valors mitjans de voltatge, t.on, i intensitat és quan la rugositat superficial és més baixa, essent el paràmetre amb més influència: la intensitat.

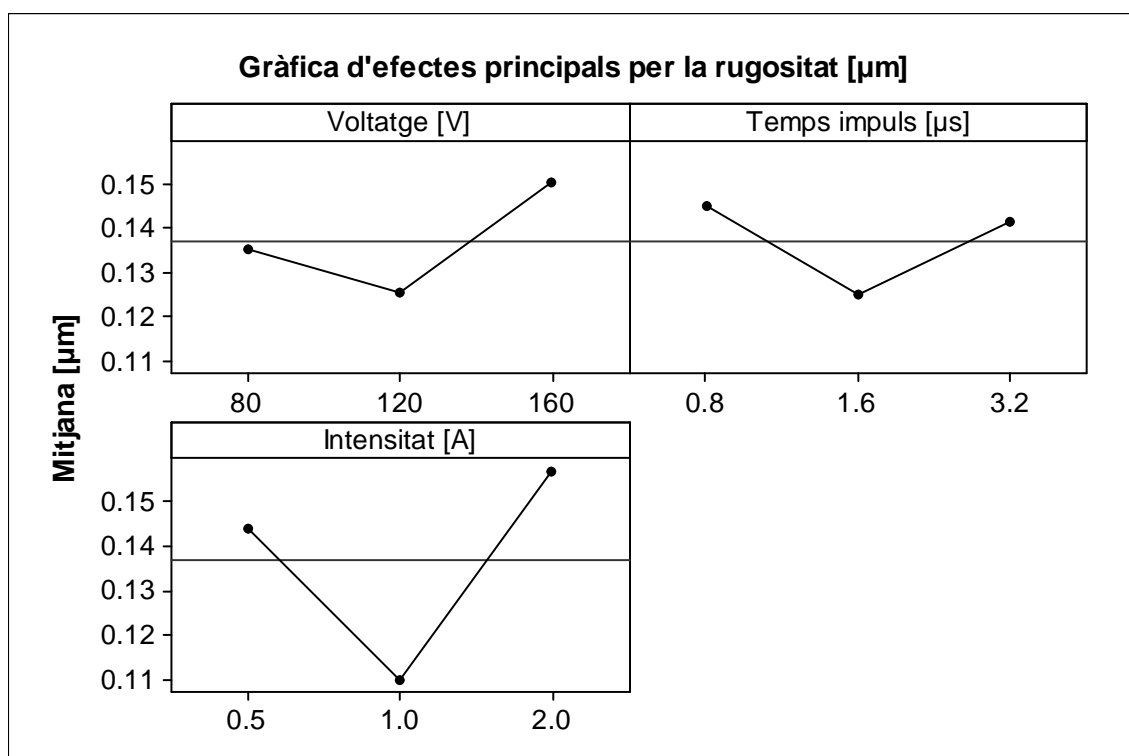


Figura 30: Gràfica d'efectes principals per la rugositat.

D'acord amb la informació analitzada anteriorment, es pot dir que els paràmetres de procés òptims per aconseguir una baixa rugositat superficial són els que es mostren a la Taula 15.

Paràmetres	Valor
Voltatge [V]	120
Intensitat [A]	1
Temps d'impuls [μ s]	1,6

Taula 15: Paràmetres òptims per a la rugositat superficial dels micro-canal.

4.4 Anàlisi del temps de mecanització

A la Figura 31 es mostra quina és la influència que tenen el voltatge, la intensitat i el temps d'impuls en el temps que dura la mecanització d'una micro-ranura.

De forma general, s'observa que el temps de mecanització és elevat en tots els casos. Tot i això també es veu que aquest varia molt depenent dels paràmetres que s'utilitzen, ja que la diferència entre el mecanitzat que dura més (79 min) amb el que dura menys (8,5 min) és de 70,5 minuts. A la gràfica també s'observa que quan el temps de mecanització és més baix, és quan s'utilitza el voltatge més elevat (160V).

Si s'analitza el temps de mecanització utilitzant els paràmetres de procés que, vist en els apartats anteriors, més qualitat geomètrica i dimensional s'aconsegueix. La mitjana d'aquest temps es troba entre 30 i 40 minuts.

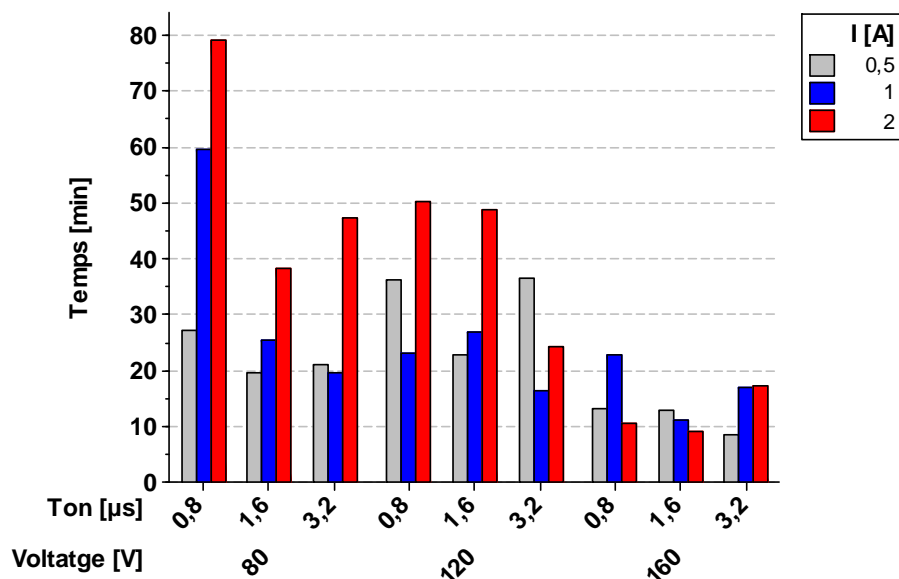


Figura 31: Efecte del temps d'impuls, el voltatge i la intensitat en el temps de mecanització dels micro-canal.

Per al temps de mecanització també s'ha realitzat un model ANOVA amb les mateixes opcions que els apartats anteriors ($p < 0,05$), i ens mostra quins són els paràmetres més influents pel que fa a temps de mecanització. A la Taula 16 es pot observar el resultat de l'ANOVA, on es veu com el voltatge té molta influència en el temps de mecanització.

Factor	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
Voltatge	2	2488,9	2488,9	1244,4	7,84	0,003
Temps impuls	2	844,6	844,6	422,3	2,66	0,094
Intensitat	2	890,77	890,7	445,4	2,81	0,084
Error	20	3173,6	3173,6	158,7		
Total	26	7397,8				

Taula 16: ANOVA del temps de mecanització.

Observant la Figura 32, es veu clarament que a mesura que el voltatge augmenta el temps de mecanització es redueix. El mateix passa, encara que de manera menys exagerada, amb el temps d'impuls. En canvi en la intensitat succeeix l'efecte contrari, a mesura que aquesta augmenta el temps de mecanització també augmenta.

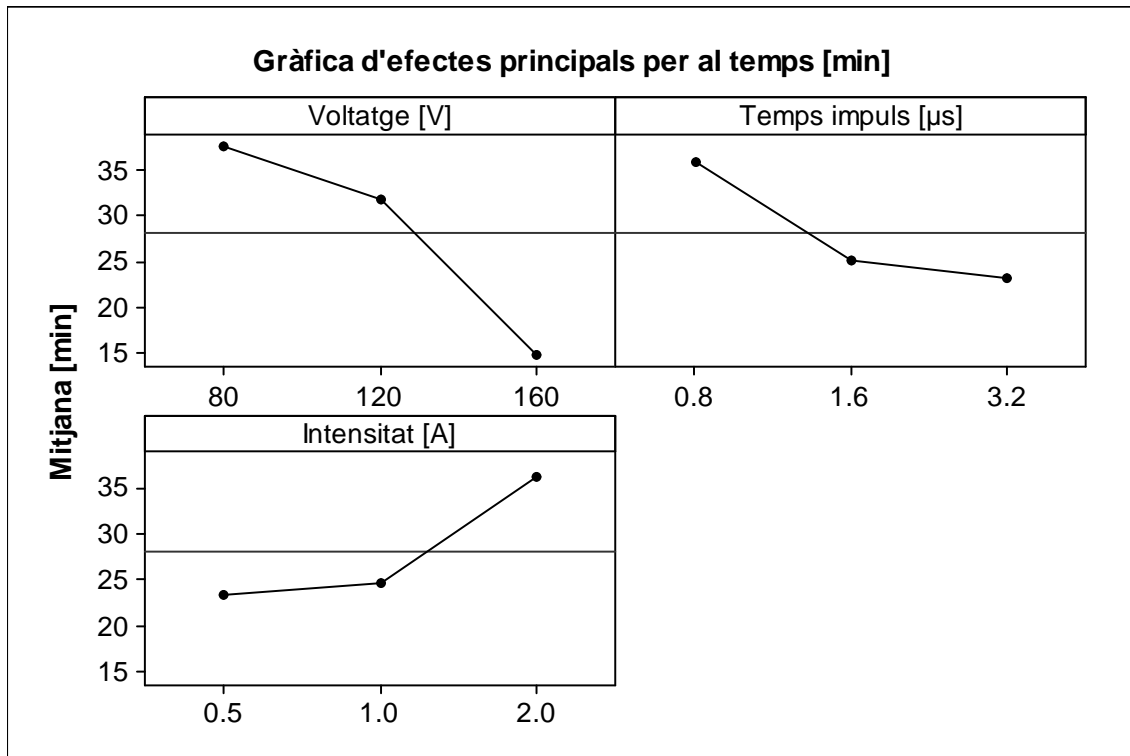


Figura 32: Gràfica d'efectes principals per al temps.

Finalment a la Taula 17 es mostren els paràmetres de procés més adients per a la mecanització d'un micro-canal amb el menor temps possible.

Paràmetres	Valor
Voltatge [V]	160
Intensitat [A]	0,5
Temps d'impuls [μ s]	3,2

Taula 17: Paràmetres òptims per aconseguir un menor temps de mecanització.

5 RESUM DEL PRESSUPOST

En el present projecte no hi ha pressupost, ja que no hi ha una possible futura fabricació. Si que es mostren els costos de la realització de l'experimentació com: la preparació del taller, obtenció del material i eines, adquisició de dades i el posterior anàlisi, incloses les despeses generals. El cost total de l'experimentació és de:

Vuit mil set-cents trenta Euros amb vint-i-sis cèntims(8.730,26€).

6 CONCLUSIONS

En aquest projecte s'han realitzat micro-canal·ls en acer inoxidable 316L mitjançant l'electroerosió. Per fer-ho s'ha utilitzat la màquina electroerosionadora ONA DB300. Degut a la dificultat de mecanitzar a nivell micro, els resultats que s'han obtingut demostren que seguint una metodologia concreta, sobretot a l'hora de la col·locació de l'elèctrode i la peça a mecanitzar dins el sistema de subjecció i la posterior col·locació dels zeros, es poden aconseguir micro-ranures amb una precisió i qualitat superficial acceptables.

Per a aconseguir uns micro-canal·ls amb una bona qualitat geomètrica i dimensional, s'ha demostrat que els valors dels paràmetres de procés a utilitzar, han de ser valors baixos, descartant d'aquesta manera els més elevats.

En la profunditat, s'ha observat que per tal d'aconseguir una bona qualitat geomètrica, s'ha d'utilitzar un voltatge reduït. Ja que a mesura que s'augmenta el voltatge els micro-canal·ls van perdre la forma rectangular de disseny i assoleixen una forma més arrodonada o en forma de V. Pel que fa al valor de la profunditat, s'ha demostrat que es poden aconseguir valors propers a les 50µm desitjades. Utilitzant els paràmetres de procés més reduïts, és quan s'han obtingut millors resultats. Remarcar també la importància de la correcta col·locació de l'elèctrode, ja que aquest fet, pot fer variar el valor de la profunditat que es vol aconseguir.

Els valors de l'amplada que s'han aconseguit en els experiments, en general es troben bastant a prop de l'amplada de disseny. De la manera que s'ha aconseguit més precisió, és quan s'han utilitzat els valors de voltatge i la intensitat mitjans, 120V i 1A respectivament. Destacar que totes les ranures perden amplada a mesura que va augmentant la profunditat degut al desgast que té l'elèctrode. Utilitzant un temps d'impuls curt (0,8 o 1,6µs), ha estat quan els canal·ls perdien menys amplada, entre un 1 i un 8%.

L'acabat superficial que tenen les micro-ranures, és semblant en totes elles. Tot i això el paràmetre que afecta més a la rugositat ha estat la intensitat. S'ha observat que quan s'utilitza el seu nivell intermedi (1A), la rugositat superficial disminueix.

En quan el temps de mecanització de les ranures, es pot dir que és un temps molt elevat. El paràmetre de procés que més incidència té en el temps és el voltatge, com més elevat sigui, més curt és el temps de mecanització, tot i això és un temps elevat. Si s'observa el temps que triga a mecanitzar utilitzant els paràmetres de procés que donen millor qualitat geomètrica i dimensional, es veu que la mitjana de temps és de 35 minuts.

A mode de resum, en aquest projecte, s'han aconseguit mecanitzar canals a nivell micro a l'acer inoxidable 316L, a través de l'electroerosió, amb bastant bona qualitat geomètrica, dimensional i bon acabat superficial, seguint una metodologia concreta, explicada a l'apartat 3.3. El principal problema ha estat el temps de mecanització que és molt elevat, i això fa que aquesta tècnica de mecanitzat sigui econòmicament inviable per a la realització de micro-canal·ls en sèrie. Tot i això, com que aquests micro-canal·ls estan destinats per a aplicacions de biomedicina, i moltes d'aquestes són personalitzades, fetes a mida de la necessitat, si que pot ser molt útil, ja que la precisió és molt més important que el temps que triga a realitzar el mecanitzat. Finalment a la Taula 18 es mostren les especificacions del projecte que s'han completat.

Tema	R/D	Especificació	Completat
Objectiu	R	Mecanitzar a través de l'electroerosió micro-canal·ls en diferents condicions de mecanitzat en acer inoxidable.	Si
Funció	R	Conèixer com afecten diferents condicions de mecanitzat en la geometria i la qualitat superficial dels micro-canal·ls.	Si
	D	Determinar el desgast de l'elèctrode.	No
Recursos	R	Electroerosionadora ONA DB300.	Si
	R	Rugosímetre Mitutoyo Surfest SV-2000.	Si
	R	Servei de microscòpia de la UdG.	Si
Dimensions	R	Màximes dimensions de les provetes 25x25x12mm per poder observar les mostres al microscopi.	Si
	R	Mecanitzar canals de 200µm d'amplada per 50µm de profunditat.	Si
Material	R	Acer inoxidable 316L.	Si
Eines	R	Elèctrode de coure.	Si
Metodologia	D	Establir un procediment per a la correcta mecanització a nivell micromètric.	Si
Experimentació	R	Diferents nivells per cadascun dels paràmetres escollits a variar.	Si

Taula 18: Comprovació de les especificacions.

7 LÍNIES FUTURES

Hi ha tres grans línies futures a estudiar.

La primera seria realitzar els experiments variant algun paràmetre de procés que en aquest projecte s'han mantingut fixes, per tal de fer que el temps de mecanització disminueixi.

En segon terme, estudiar el desgast de l'elèctrode, analitzar-lo en diferents materials (per exemple grafit) i condicions, i veure amb quin s'aconsegueixen els millors acabats dimensionals.

Per últim seria realitzar els experiments utilitzant altres materials també utilitzats al sector de la biomedicina com pot ser el titani o l'aliatge de crom-cobalt per veure si la seva mecanització mitjançant l'electroerosió és factible en quant a qualitat d'acabats i rentable econòmicament.

El redactor,

Joan Serra Compte

Girona, 10 de desembre de 2012.

8 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document 1: Memòria.

Document 2: Pressupost.

9 BIBLIOGRAFIA

Ali, M. Y., and Mohammad, A. S. Effect of Conventional EDM Parameters on the Micromachined Surface Roughness and Fabrication of a Hot Embossing Master Microtool. *Mater. Manuf. Process.*, 24(4), 454-458. 2009

Bigot, S., Valentinčič, J., Blatnik, O., Junkar, M. Micro EDM parameters optimisation. *Proc., 4M2006 Conference on Multi-Material Micro Manufacture, Grenoble, France, 20-22. 2006.*

CGA. Compañia general de aceros S.A. (http://www.cga.com.co/index.php?option=com_content&task=view&id=237&Itemid=26 2, 4 de juny de 2011).

De Wolf, D., Cardon, L. & Balic, J. Parameters affecting the quality of electrical discharge machining process. *Advances in Production Engineering & Management.* 2010.

Ho, K. H., and Newman, S. T. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM). *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 43(13), 1287-1300. 2003.

Jameson Elman, C. *Electrical discharge machining.* United States of America: SME. 2001.

Kunieda, M., and Yoshida, M. Electrical Discharge Machining in Gas. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 46(1), 143-146. 1997.

Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K. P., Schumacher, B. M. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54(2), 64-87. 2005.

Molera Solà, P. *Electromecanizado :Electroerosión y mecanizado electroquímico.* Barcelona: Marcombo Boixareu. 1989.

Pham, D. T., Dimov, S., Bigot, S., Ivanov, A., Popov, K. Micro EDM Drilling: Accuracy Study. *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, 281-294. 2005.

Pham, D. T., Ivanov, A., Bigot, S., Popov, K., Dimov, S. A Study of Micro-Electro Discharge Machining Electrode Wear. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C*, 221(5), 605-612. 2007.

Rajurkar, K. P., and Yu, Z. Y. 3D Micro-EDM using CAD/CAM. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 49(1), 127-130. 2000.

S. Mahendran, R. Devarajan, T. Nagarajan and A. Majdi. A review of Micro-EDM. *University Malaysia Pahang*. 2009.

Shih, A. J. Biomedical Manufacturing: A New Frontier of Manufacturing Research. *ASME*, 130(2), 1-8. 2008.

S. P. Moylan, S. Chandrasekar, G. L. Benavides. High-Speed Micro-Electro-Discharge Machining, *Sandia National Laboratories*. 2005.

Tsai, Y. and Masuzawa, T. An index to Evaluate the Wear Resistance of the Electrode in Micro-EDM. *Journal of Materials Processing Tech.*, 149(1-3), 304-309. 2004.

Vázquez, E. The state-of-the-art micro-manufacturing processes. *Business Innovation and Technology Management*. 2009.

10 GLOSSARI

Nomenclatura i abreviacions:

A_f : Amplada al fons del canal.

A_i : Amplada al inici del canal.

ANOVA: Anàlisi de la variància.

EDM: Electroerosió.

F: Velocitat d'avanç.

HRB: Duresa rockwell B.

I: Intensitat.

μ -EDM: Micro-electroerosió.

N: Velocitat de rotació.

P: Profunditat.

Ra: Rugositat.

T: Temps de mecanització.

T.off: Temps de pausa.

T.on: Temps d'impuls.

V: Voltatge.

V_e : Volum eliminat pel desgast de l'elèctrode.

V_p : Volum eliminat de la peça a mecanitzar.

σ : Desgast de l'elèctrode.

α : Nivell de significança.

Elements químics:

C: Carbó.

Cr: Crom.

Fe: Ferro.

Mn: Manganès.

Mo: Molibdè.

Ni: Niquel.

P: Fòsfor.

S: Sofre.

Si: Silici.

ANNEX

ANNEX A EXPERIMENTS PRELIMINARS

Els paràmetres de procés que s'han fet servir per a la realització dels experiments preliminars es mostren a la taula A.1

Paràmetres	Descripció
Polaritat	Negativa
Intensitat (I), [A]	1
Voltatge (V), [V]	80
Temps d' impuls (Ton), [μ s]	0,8
Servo (%)	65
Temps de pausa [μ s]	3,2
Temps de treball [s]	0,3
Temps de retrocés [s]	0,5
Fluid dielèctric	ONA DUBER OIL

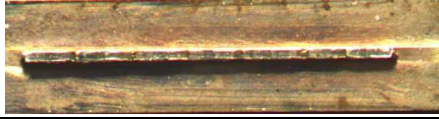


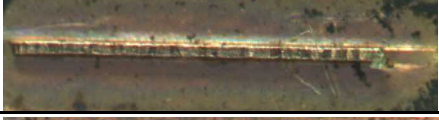
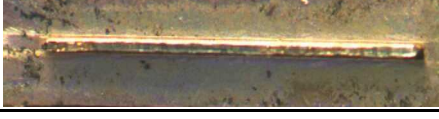
Taula A.1: Paràmetres de procés.

Objectiu 1: Es pretén estudiar si el desgast de l'elèctrode és considerable o no. Per a realitzar-ho s'han agafat 5 elèctrodes diferents i una proveta d'acer, on aquesta ha estat rectificada per així aconseguir que les cares siguin ben planes. El procés següent ha estat el següent: s'agafa un elèctrode i es munta a màquina. En un punt determinat de la proveta es col·loca el zero peça, aquest punt sempre serà el mateix ja que encara que les cares de la proveta siguin planes poden variar unes micres i així es minimitza error. En un altre punt es mecanitza una micro-cavitat amb els paràmetres de procés descrits anteriorment. Acabat el mecanitzat es torna a col·locar el zero peça al mateix punt on s'ha mesurat abans, la diferència de cotes ens dóna el desgast de l'elèctrode. Aquest procediment es repeteix per a cadascun dels elèctrodes. Els resultats es mostren a la taula A.2.

Elèctrode	Profunditat final [μ s]	Desgast elèctrode [μ s]	Temps [']
1	50	26	18' 23"
2	50	27	17' 15"
3	50	30	16' 50"
4	50	27	18' 04"
5	50	24	10' 43"

Taula A.2: Resultats experiments preliminars.

Objectiu 2: Observar l'estat de l'elèctrode després del mecanitzat. A la taula A.3 es mostren les imatges dels elèctrodes després de la mecanització d'un micro-canal.

Elèctrode	
1	
2	
3	
4	
5	

Taula A.3: Imatges dels elèctrodes després d'un mecanitzat.

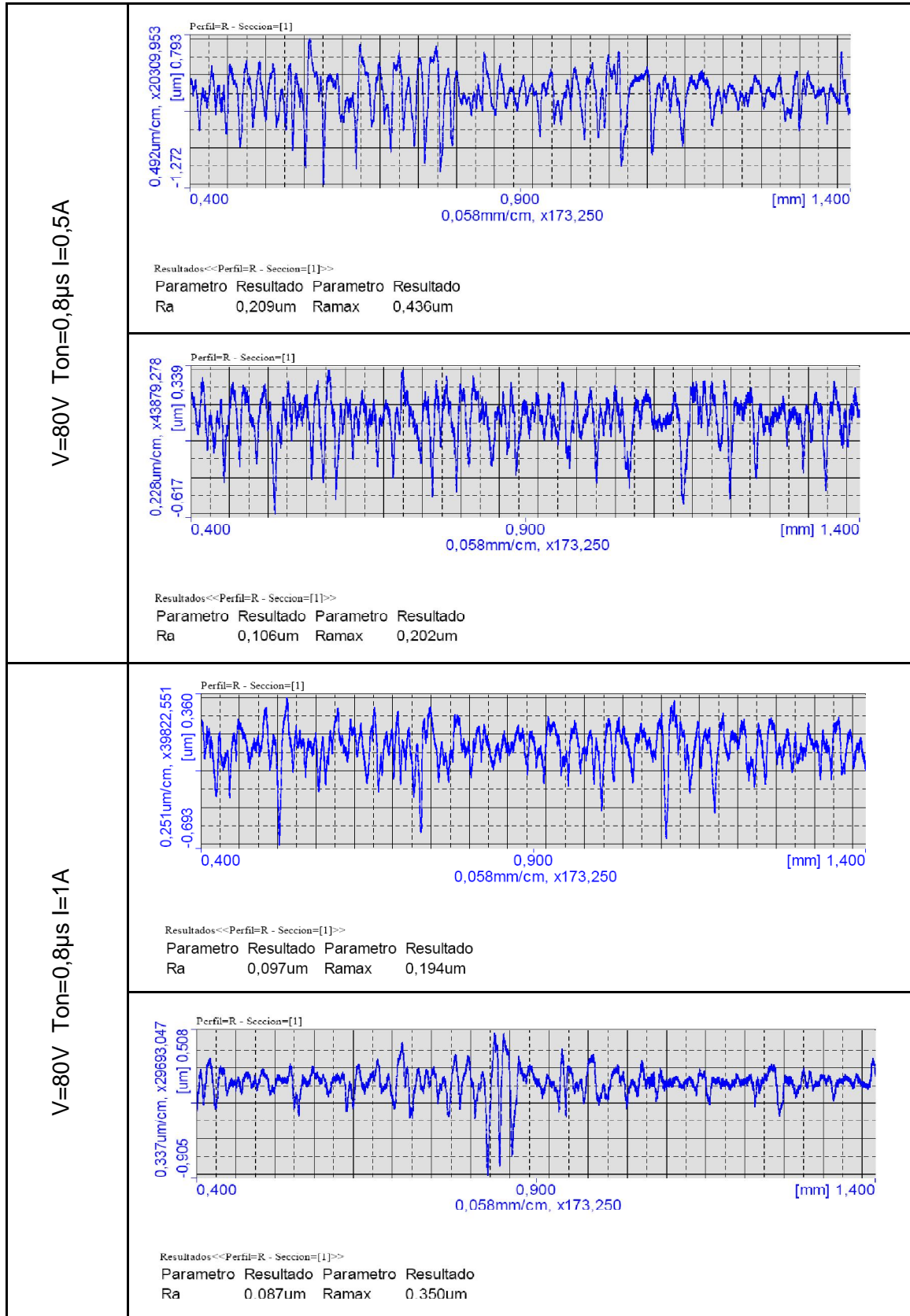
ANNEX B PROGRAMA

A continuació, taula A.4, es mostra el programa que s'ha fet servir per a la mecanització de les micro-ranures.

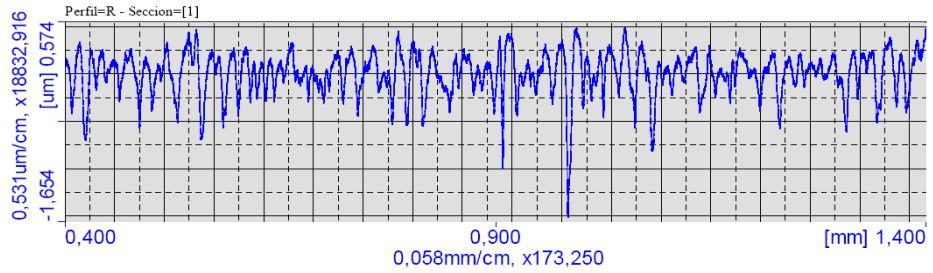
Instrucció	Significat
N0001 G17	Eix principal Z
N0002 M88	Omplir el tanc
N0003 M49 X25	Cabal 25
N0004 M59 X1	Posar a zero rellotge número 1
N0005 M56 X1	Arrencar el rellotge número 1
N0006 M64	Neteja continua
N0007 G00 X0 Y0	Travessia ràpida fins a X0 Y0
N0008 G00 Z0,2	Travessia ràpida fins a Z0,2
N0009 G11 X-0,05	Erosió fins a X-0,05
N0010 M57 X1	Parar el rellotge número 1
N0011 G74	Retorn automàtic al començament
N0012 M02	Fi de programa

Taula A.4: Programa per a la realització d'un micro-canal.

ANNEX C RUGOSITATS

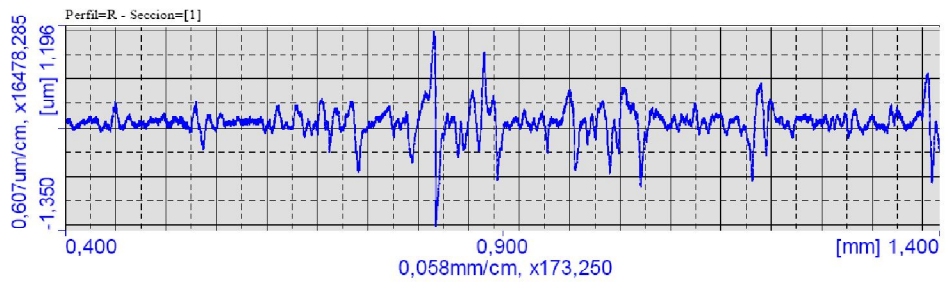


V=80V Ton=0,8µs I=2A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

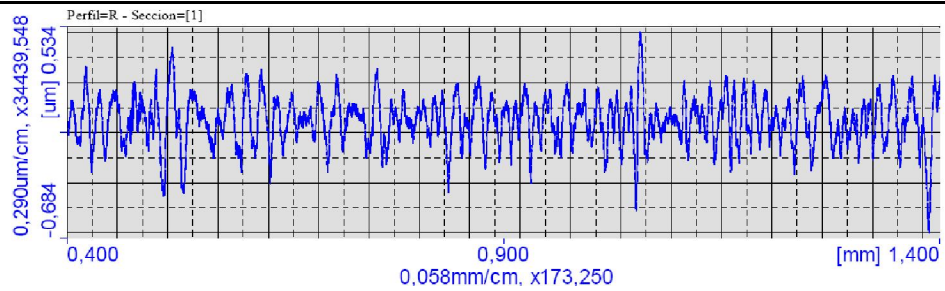
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,177µm	Ramax	0,480µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

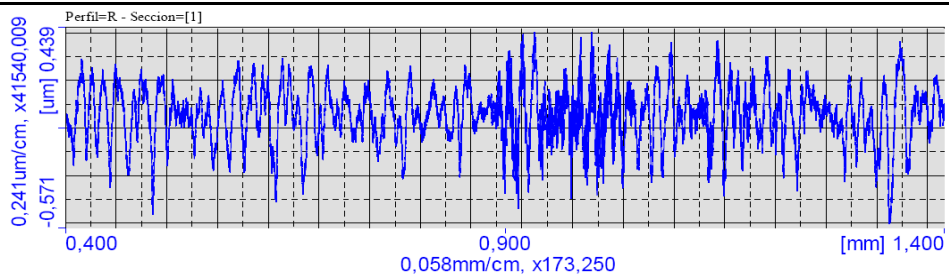
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,116µm	Ramax	0,405µm

V=80V Ton=1,6µs I=0,5A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

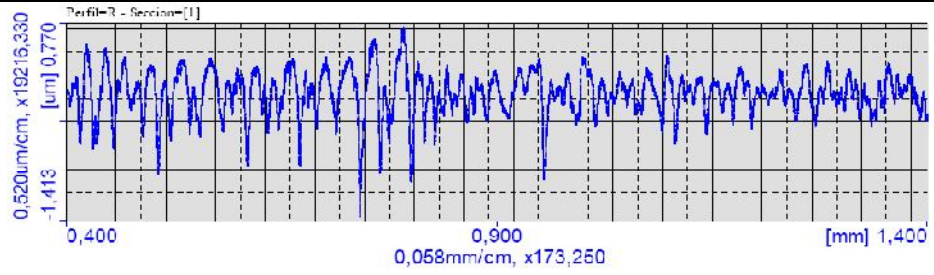
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,107µm	Ramax	0,227µm



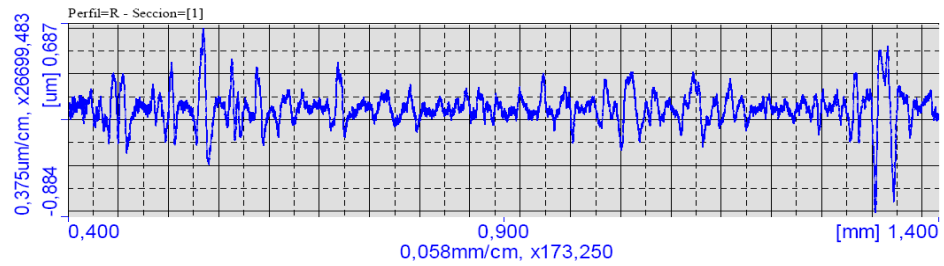
Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,112µm	Ramax	0,219µm

V=80V Ton=1,6µs I=1A

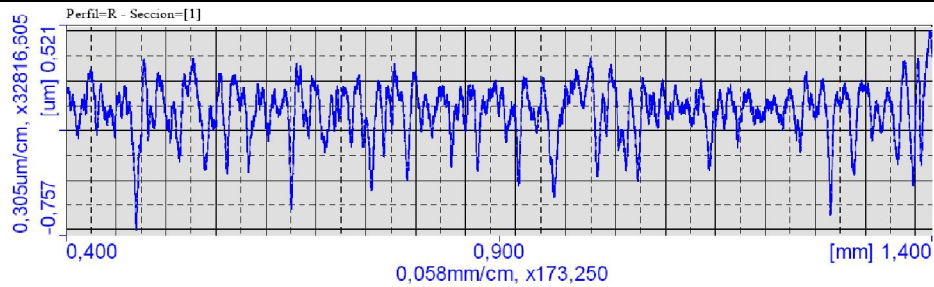


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,182µm Ramax 0,383µm

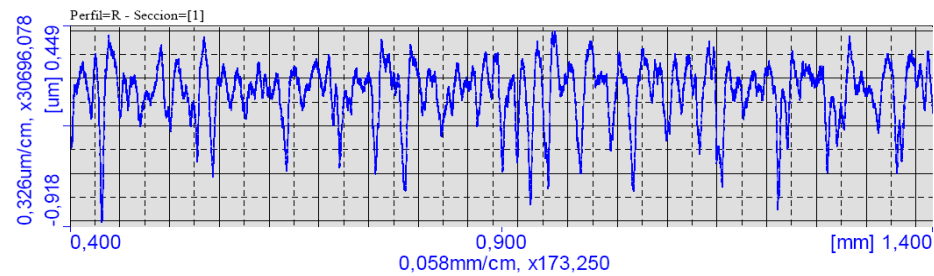


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,091µm Ramax 0,399µm

V=80V Ton=1,6µs I=2A

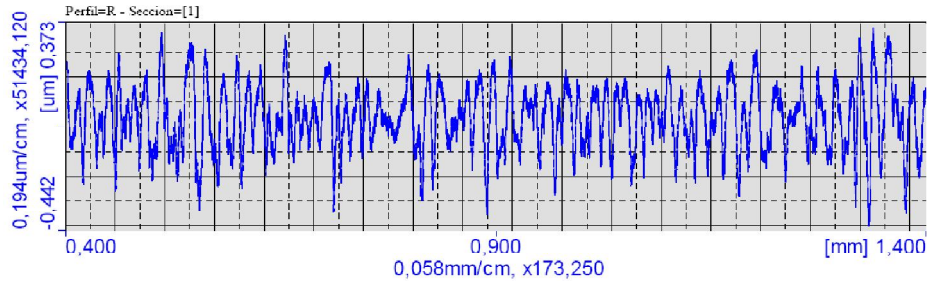


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,120µm Ramax 0,272µm

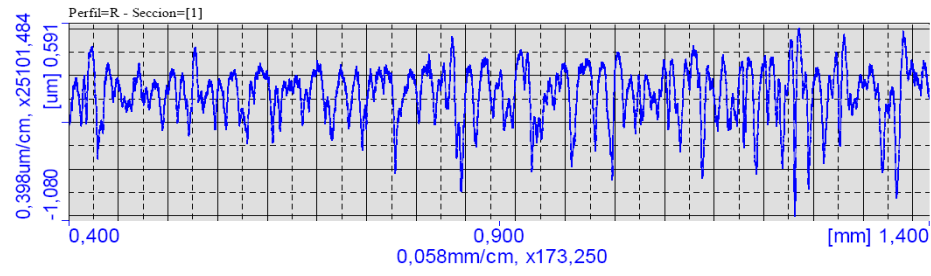


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,150µm Ramax 0,274µm

V=80V Ton=3,2µs I=0,5A

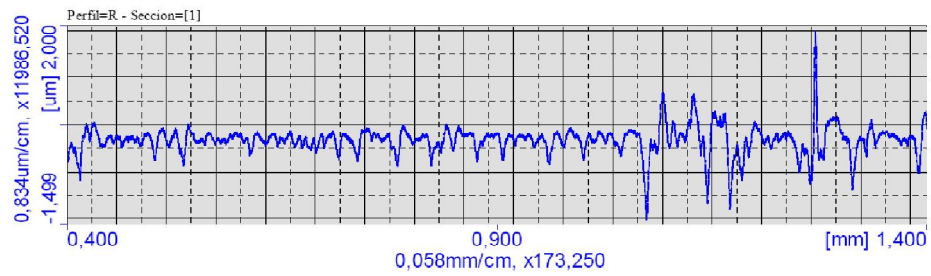


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,100µm Ramax 0,162µm

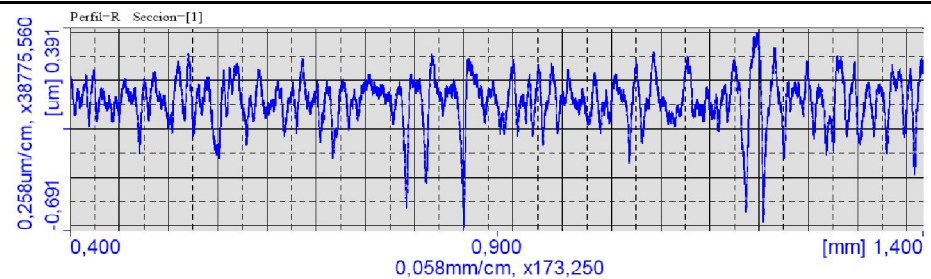


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,173µm Ramax 0,334µm

V=80V Ton=3,2µs I=1A

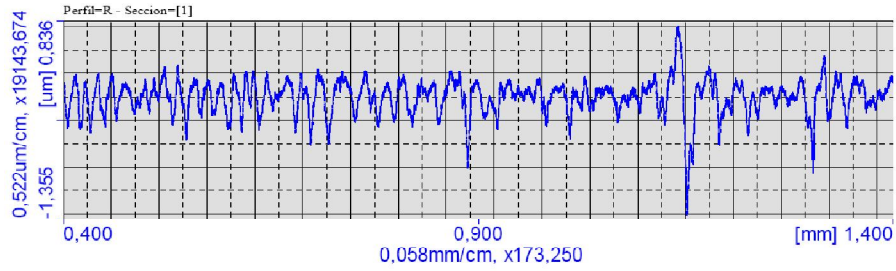


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,149µm Ramax 0,484µm



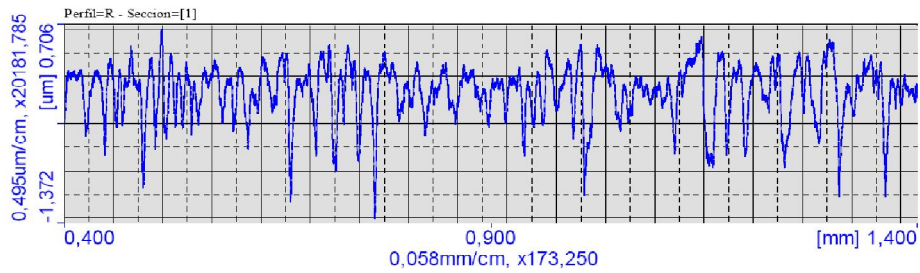
Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,092µm Ramax 0,224µm

V=80V Ton=3,2µs I=2A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

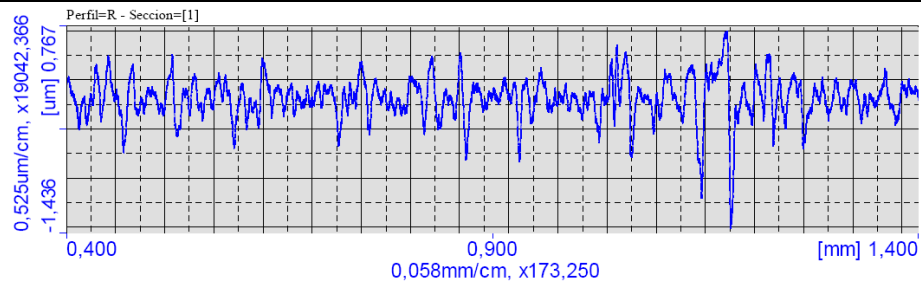
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,139µm	Ramax	0,382µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

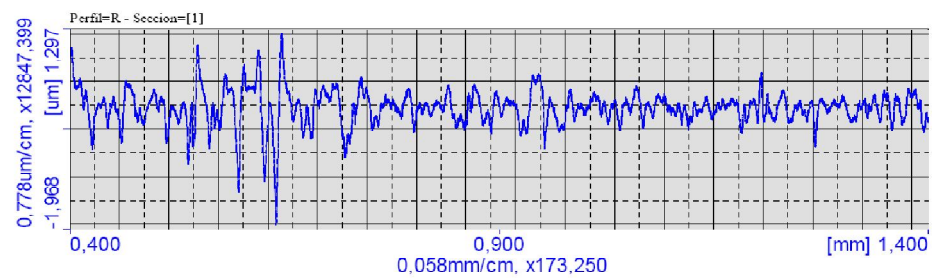
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,218µm	Ramax	0,443µm

V=120V Ton=0,8µs I=0,5A



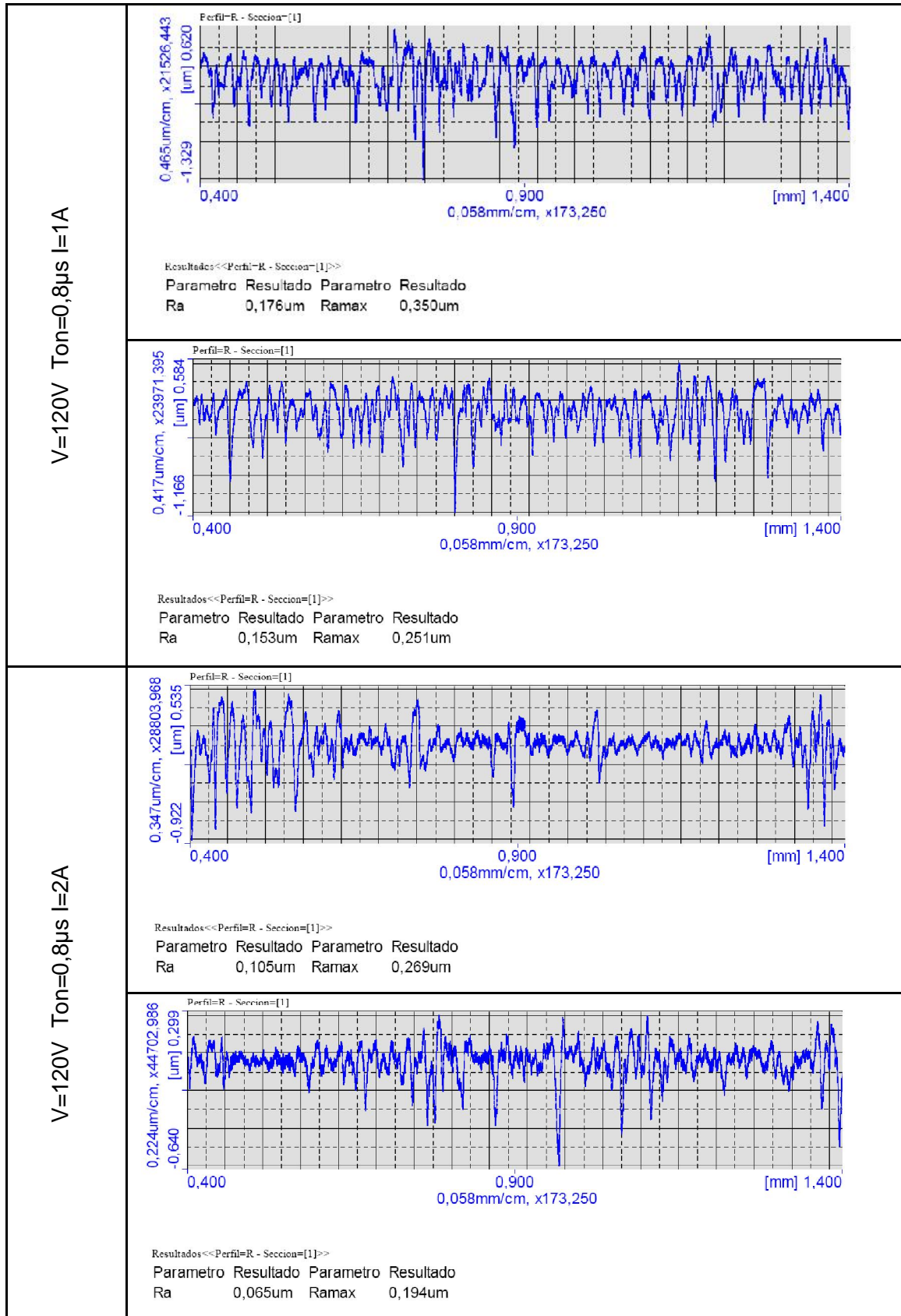
Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,152µm	Ramax	0,378µm

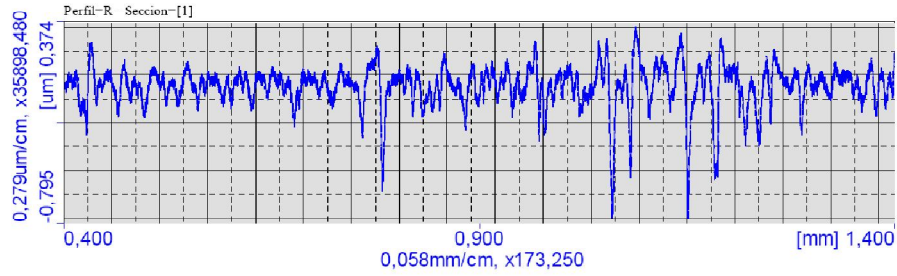


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

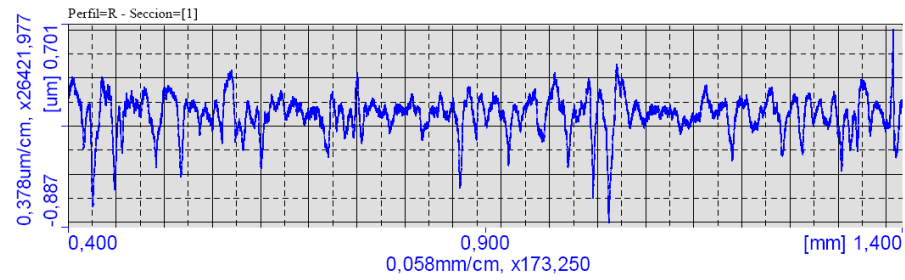
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,198µm	Ramax	0,726µm



V=120V Ton=1,6µs I=0,5A

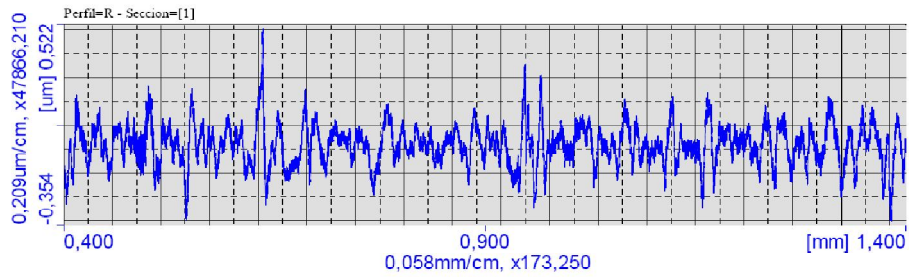


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,080µm Ramax 0,200µm

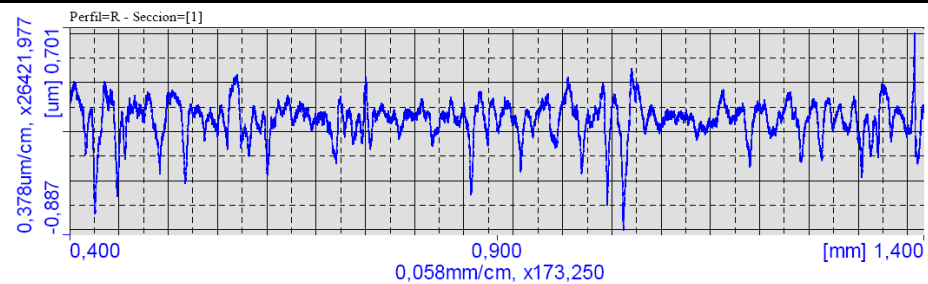


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,105µm Ramax 0,244µm

V=120V Ton=1,6µs I=1A

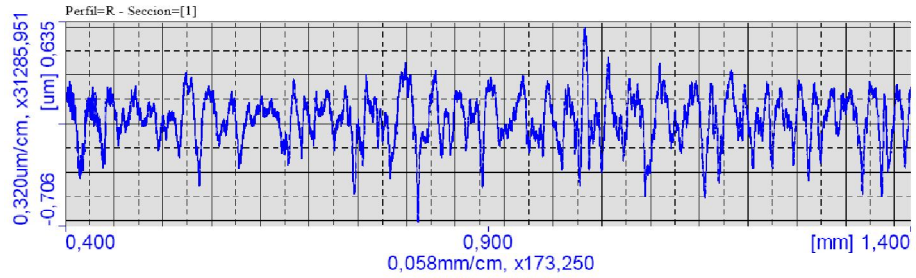


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,068µm Ramax 0,140µm



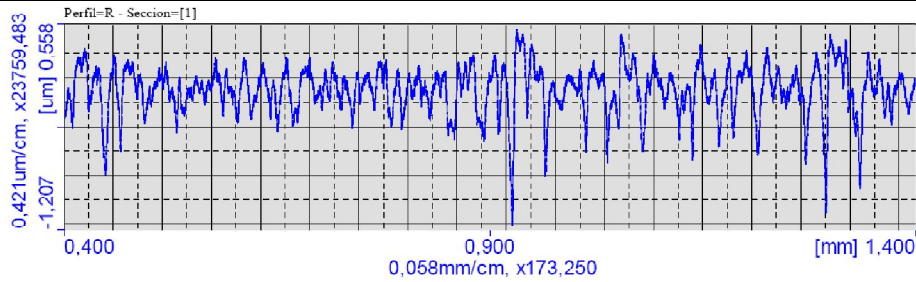
Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,105µm Ramax 0,244µm

V=120V Ton=1,6µs I=2A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

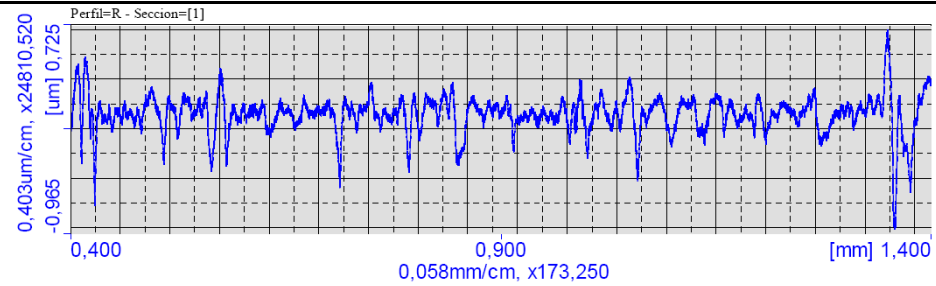
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,125µm	Ramax	0,219µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

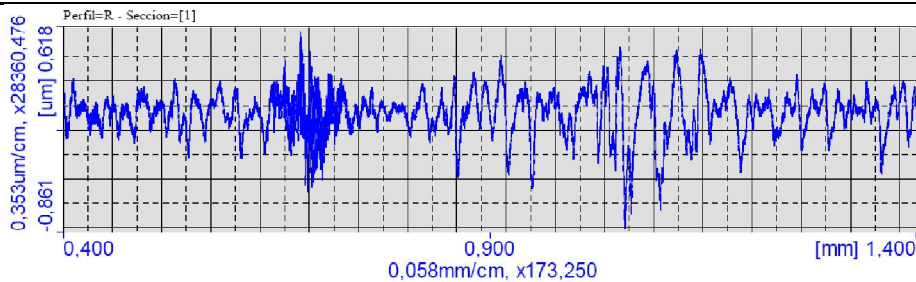
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,151µm	Ramax	0,374µm

V=120V Ton=3,2µs I=0,5A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

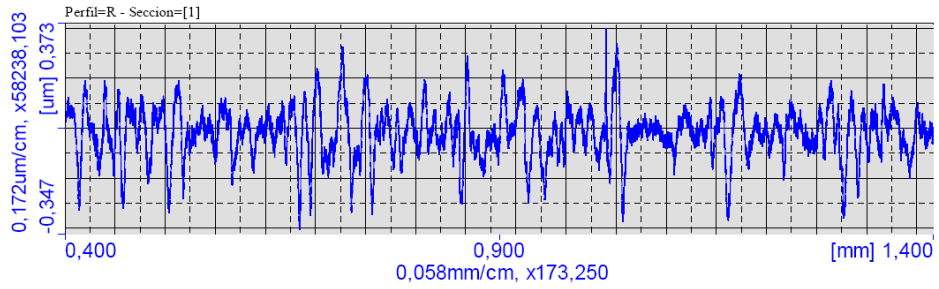
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,101µm	Ramax	0,341µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

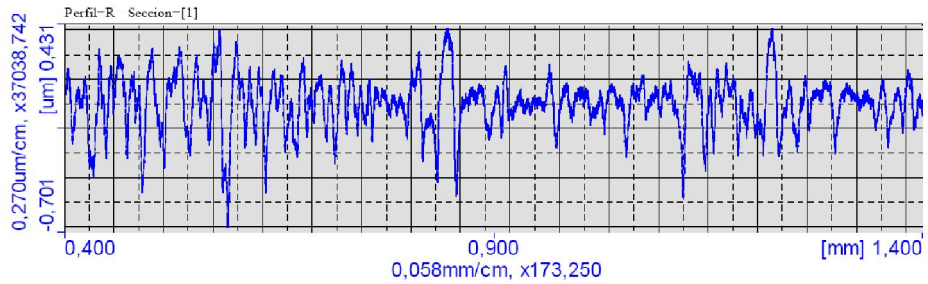
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,119µm	Ramax	0,317µm

V=120V Ton=3,2µs I=1A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

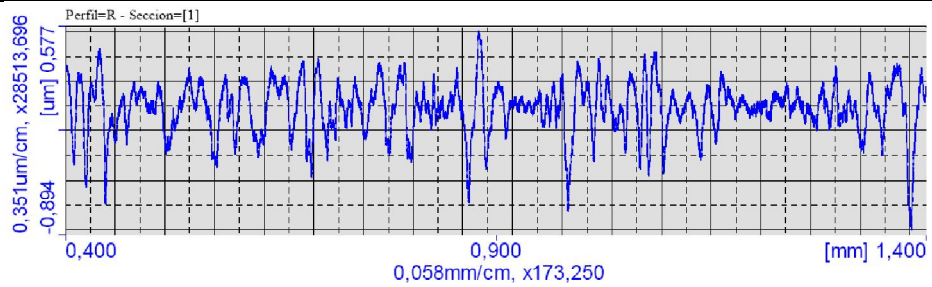
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,066µm	Ramax	0,140µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

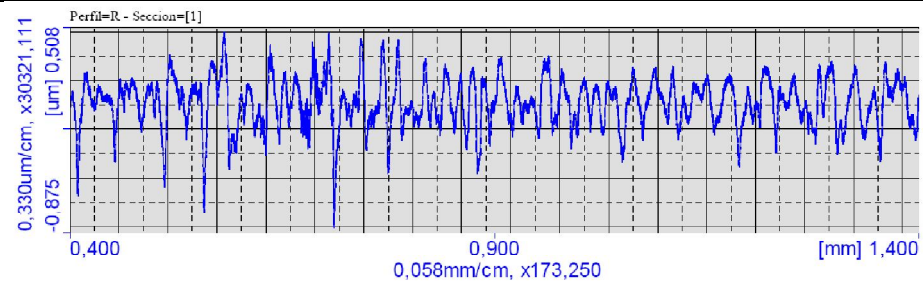
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,107µm	Ramax	0,301µm

V=120V Ton=3,2µs I=2A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

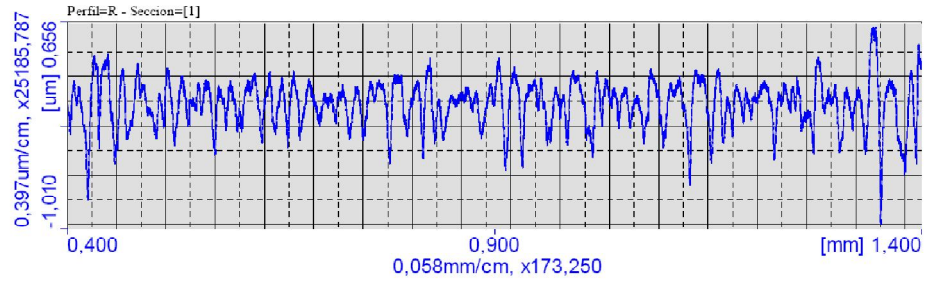
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,136µm	Ramax	0,297µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

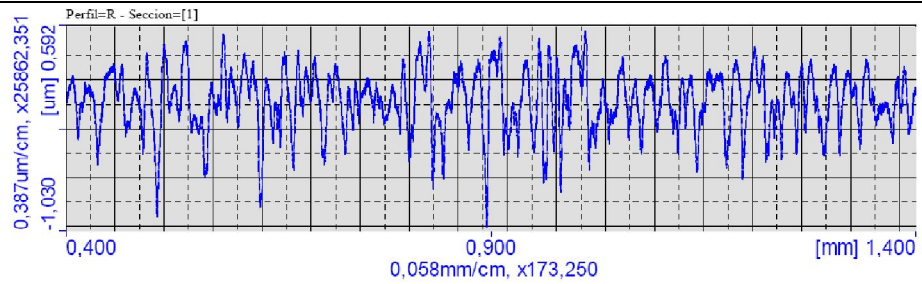
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,128µm	Ramax	0,258µm

V=160V Ton=0,8µs I=0,5A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

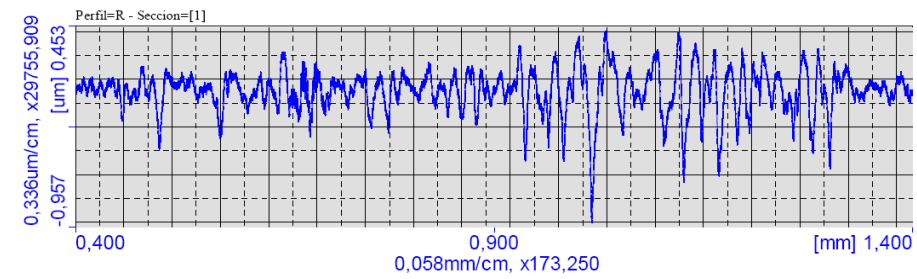
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0 141µm	Ramax	0 288µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

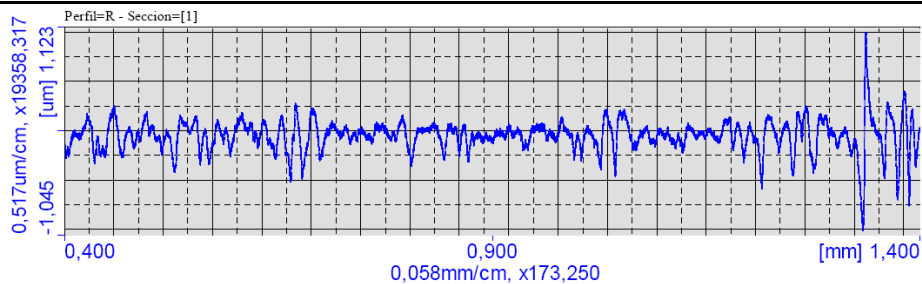
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,184µm	Ramax	0,315µm

V=160V Ton=0,8µs I=1A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

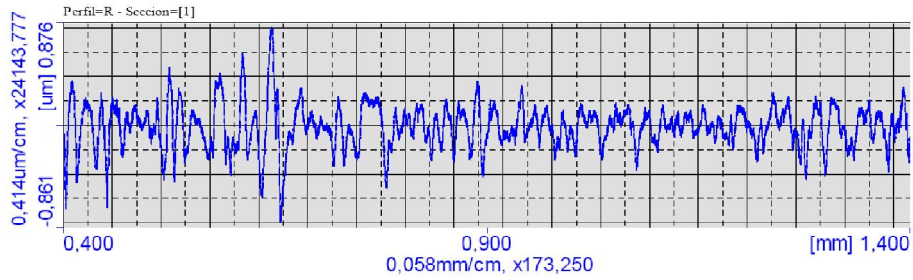
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,107µm	Ramax	0,287µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

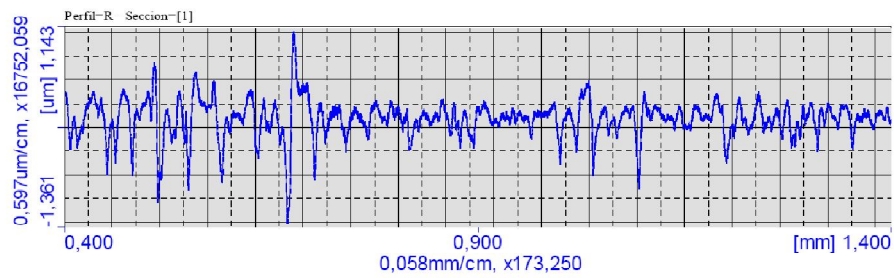
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,109µm	Ramax	0,410µm

V=160V Ton=0,8µs I=2A



Resultados <<Perfil=R - Seccion=[1]>>

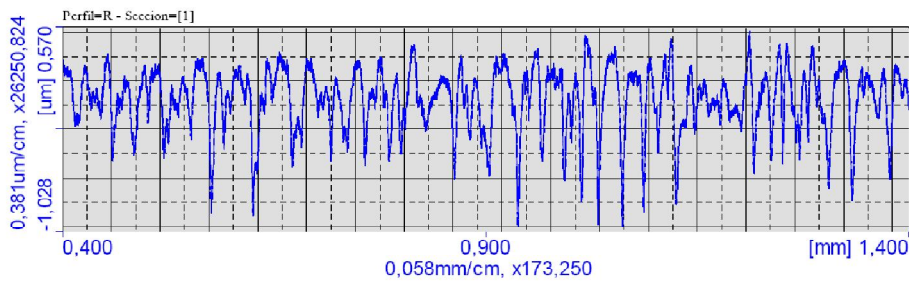
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,134µm	Ramax	0,366µm



Resultados <<Perfil=R - Seccion=[1]>>

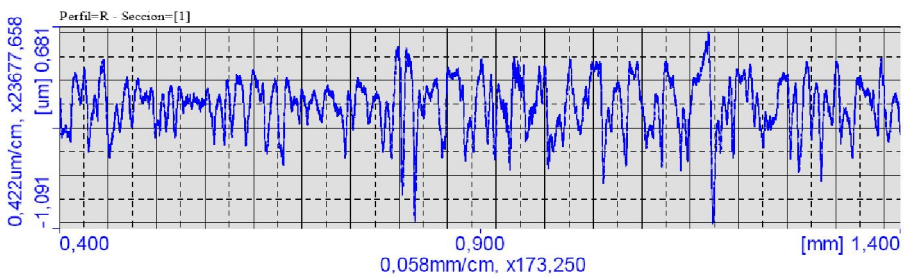
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,159µm	Ramax	0,432µm

V=160V Ton=1,6µs I=0,5A



Resultados <<Perfil=R - Seccion=[1]>>

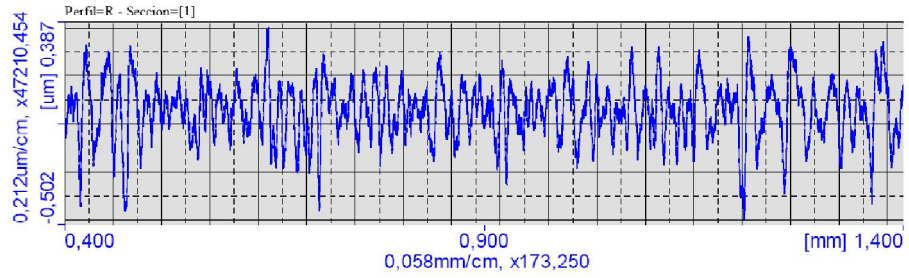
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,192µm	Ramax	0,299µm



Resultados <<Perfil=R - Seccion=[1]>>

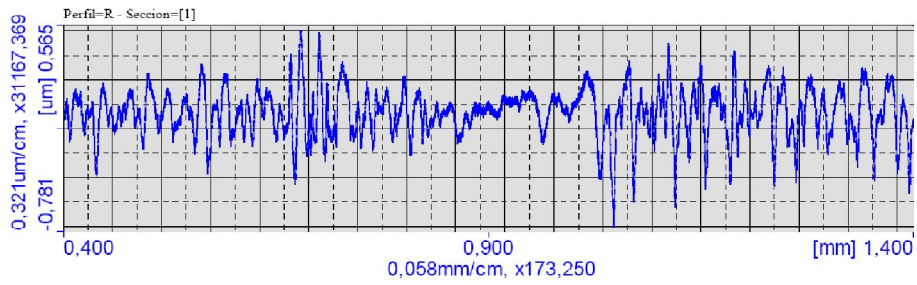
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,183µm	Ramax	0,424µm

V=160V Ton=1,6µs I=1A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

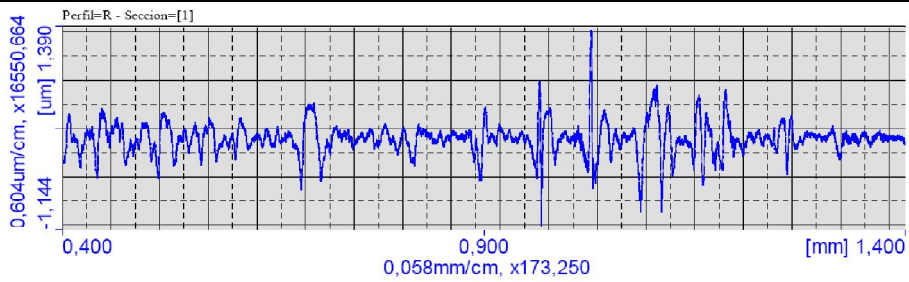
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,098µm	Ramax	0,209µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

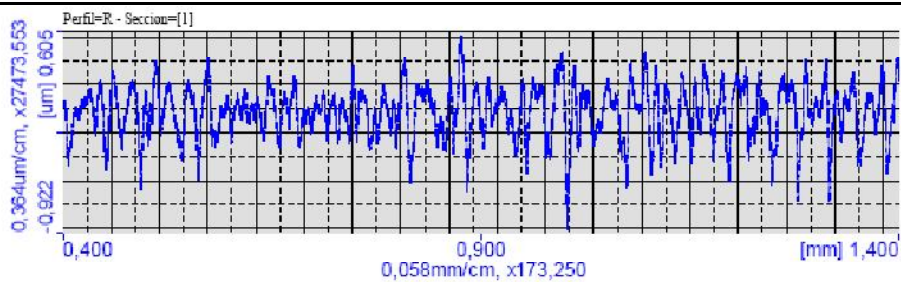
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,119µm	Ramax	0,243µm

V=160V Ton=1,6µs I=2A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

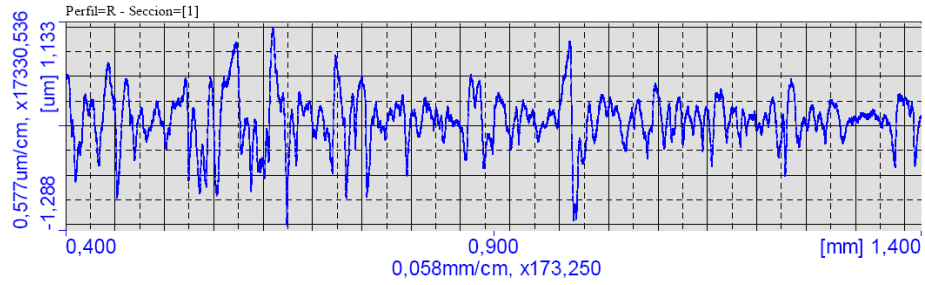
Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,128µm	Ramax	0,357µm



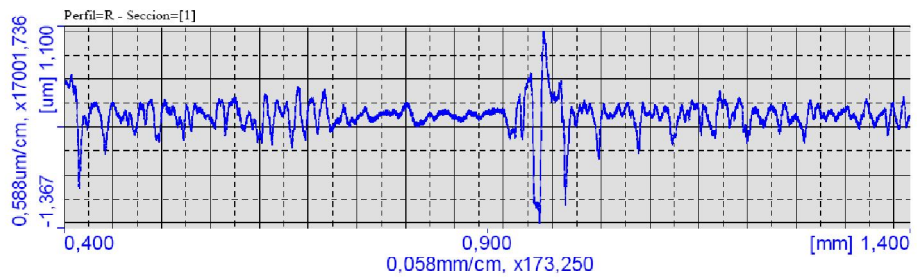
Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,155µm	Ramax	0,246µm

V=160V Ton=3,2µs I=0,5A

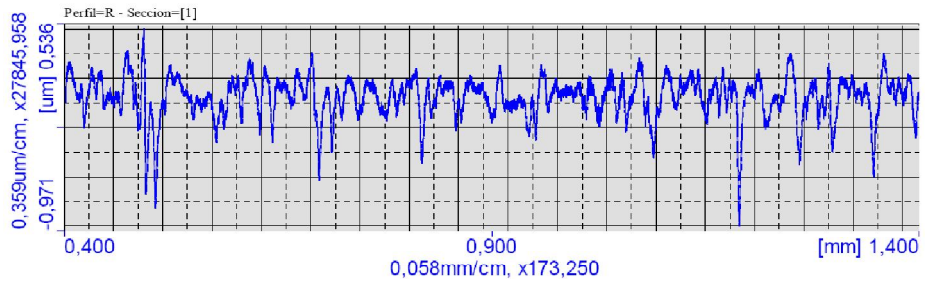


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,215µm Ramax 0,589µm

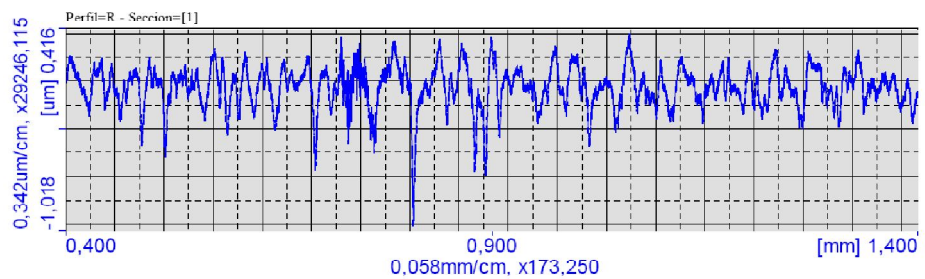


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,120µm Ramax 0,710µm

V=160V Ton=3,2µs I=1A

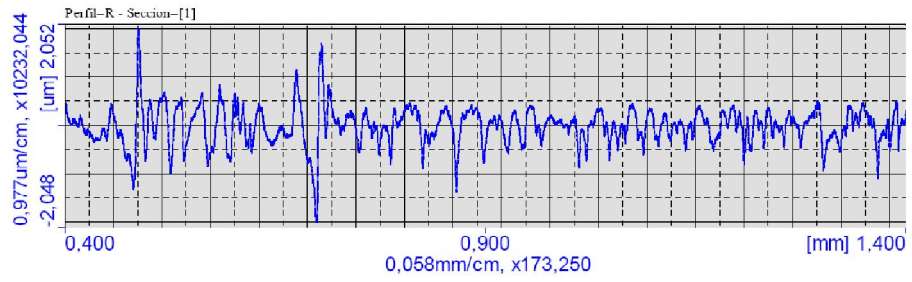


Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,109µm Ramax 0,226µm



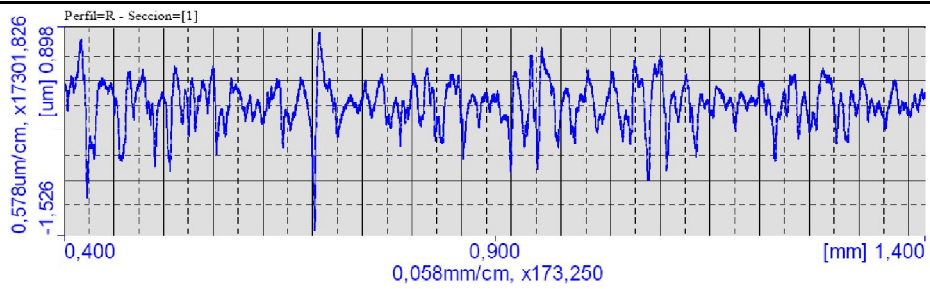
Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>
 Parametro Resultado Parametro Resultado
 Ra 0,109µm Ramax 0,244µm

V=160V Ton=3,2µs I=2A



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,267µm	Ramax	0,775µm



Resultados<<Perfil=R - Seccion=[1]>>

Parametro	Resultado	Parametro	Resultado
Ra	0,193µm	Ramax	0,438µm