

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Títol: Disseny i implementació d'un sistema amb aprenentatge supervisat per a la predicció de la rugositat en processos d'arrencament de ferritja

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Guillem Torrado Canada

Tutor: Joaquim de Ciurana Gay

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria dels processos de fabricació

Convocatòria (mes/any): Setembre 2017

ÍNDEX DE CONTINGUTS

Índex de continguts	i
Índex de figures	v
Índex de taules	viii
MEMÒRIA.....	x
1 INTRODUCCIÓ	1
1.1 Antecedents	1
1.2 Objecte	6
1.3 Especificacions.....	6
1.4 Abast	7
2 MAQUINÀRIA, EINES I INSTRUMENTACIÓ	9
2.1 Maquinària	9
2.1.1 Serra de cinta horitzontal.....	9
2.1.2 Centre de mecanitzat Deckel.....	10
2.1.3 Mola elèctrica DeWalt	11
2.2 Eines de tall.....	12
2.2.1 Plat de Ø20mm	12
2.2.2 Plat de Ø63mm	14
2.3 Instrumentació	16
2.3.1 Taula dinamomètrica Kistler	16
2.3.2 Sensors piezoelèctrics	19
2.3.3 Micròfon.....	20
2.3.4 Càmera termogràfica	21
2.3.5 Rellotge comparador.....	22
2.3.6 Rugosímetre.....	23
2.4 Computadors.....	25

3	METODOLOGIA.....	26
3.1	Planificació dels experiments	26
3.1.1	Plat de Ø20 mm (1 ^a sèrie)	27
3.1.2	Plat de Ø20 mm (2 ^a sèrie)	28
3.1.3	Plat de Ø63 mm.....	30
3.1.4	Organització dels planejaments	31
3.1.5	Programació amb G-Code.....	36
3.2	Experimentació.....	37
3.2.1	Tasques prèvies	37
3.2.2	Realització dels experiments	38
3.3	Tractament de dades i avaluació de la rugositat.....	39
3.3.1	Mesura de la rugositat.....	39
3.3.2	Extracció de forces	41
3.3.3	Extracció d'acceleracions	44
3.3.4	Extracció del soroll.....	45
4	ANÀLISI DE DADES	47
4.1	Relació de variables.....	47
4.2	Resum de resultats	48
4.3	Anàlisi correlacional dels paràmetres de tall	53
4.3.1	Profunditat axial de tall ap	53
4.3.2	Velocitat del fusell S.....	54
4.3.1	Velocitat d'avanç F	55
4.3.2	Profunditat radial de tall ae	56
4.4	Forces.....	57
4.5	Acceleracions	58
4.6	Chatter.....	59
4.7	Entrada i sortida de l'eina	60

5	SISTEMA DE PREDICCIÓ	62
5.1	Xarxa neuronal artificial	62
5.2	Feed-forward backpropagation	63
5.3	Configuració de la xarxa	64
5.4	Elecció de l'input del model	68
5.5	Models final	71
5.5.1	Model offline (predictiu)	71
5.5.2	Model online (monitorització)	72
6	INTERFÍCIE D'ÚS	74
6.1	Descripció	74
6.2	Demostració	75
7	RESUM DE PRESSUPOST	76
8	CONCLUSIONS I MILLORES	77
8.1	Conclusions	77
8.2	Millores i treballs futurs	79
9	RELACIÓ DE DOCUMENTS	Error! No s'ha definit el marcador.
10	BIBLIOGRAFIA	80
	CATÀLEGS	81
11	GLOSSARI	83
	ANNEXOS	84
	ANNEX A. CONDICIONS DE TREBALL DELS EXPERIMENTS	85
A.1	Plat de Ø63 mm	85
A.2	Plat de Ø20mm (1 ^a sèrie)	87
A.3	Plat de Ø20 mm (2 ^a sèrie)	89
	ANNEX B. RESULTATS DE L'EXPERIMENTACIÓ (Forces i acceleracions)	91
B.1	Plat de Ø63 mm	91
B.2	Plat de Ø20 mm (1 ^a sèrie)	93

B.3 Plat de Ø20 mm (2 ^a sèrie)	95
ANNEX C. RUGOSITATS MESURADES	97
C.1 Plat de Ø63 mm.....	97
C.2 Plat de Ø20 mm (1 ^a sèrie)	98
C.3 Plat de Ø20 mm (2 ^a sèrie)	99
ANNEX D. PROGRAMES GUI	100
D.1 Forces	100
D.2 Acceleracions	109
D.3 Àudio	117
D.4 Interfície d'ús.....	122
ANNEX E. PRESSUPOST	137

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1.1. Perfils primari, de rugositat i d'ondulació	3
Figura 1.2. Elements de la textura superficial.	3
Figura 1.3. Tipus d'ones presenciades en fresatge frontal.....	4
Figura 1.4. Factors causants de la rugositat superficial	4
Figura 2.1. Serra Cinta Elèctrica JET.....	9
Figura 2.2. Deckel Maho 64V Linear.....	10
Figura 2.3. Mola elèctrica DeWalt.....	11
Figura 2.4. Plat de fresar de Ø20mm.....	12
Figura 2.5. Plaqueta del plat de Ø20	13
Figura 2.6. Plànol de la plaqueta Dijet	13
Figura 2.7. Plat de Ø63 (alçat)	14
Figura 2.8. Plat de Ø63 (planta)	14
Figura 2.9. Plaqueta GARANT	15
Figura 2.10. Plànol plaqueta Garant	15
Figura 2.11. Croquis il·lustratiu d'una taula dinamomètrica.....	16
Figura 2.12. Muntatge de la taula dinamomètrica	17
Figura 2.13. Amplificador Kistler.....	18
Figura 2.14. Interfície del DaqView	18
Figura 2.15. Disposició dels acceleròmetres	19
Figura 2.16. Acceleròmetre unidireccional Kistler 8703A50M1	20
Figura 2.17. Conjunt DAQ portàtil.....	20
Figura 2.18. Micròfon instal·lat al centre de mecanitzat.....	21
Figura 2.19. Càmera termogràfica.....	22
Figura 2.20. Rellotge comparador	22
Figura 2.21. Rugosímetre Mitutoyo.....	23
Figura 3.1. Condicions de treball a baix avanç aconsellades	28
Figura 3.2. Taula d'aplicació per les plaquetes del plat de Ø63	30
Figura 3.3. Croquis de la peça de treball pel plat de Ø20	32
Figura 3.4. Desbast de la capa exterior de la peça bruta.....	32
Figura 3.5. Seqüència de tres experiments	33
Figura 3.6. Croquis del bloc amb tres experiments	33

Figura 3.7. Croquis del bloc amb sis experiments.....	34
Figura 3.8. Croquis del bloc amb dotze experiments.....	34
Figura 3.9. Croquis dels blocs utilitzats pels experiments amb el plat de Ø63.....	35
Figura 3.10. Croquis d'una peça mecanitzada amb el plat de Ø63.....	35
Figura 3.11. Serratge per a l'obtenció de les peces brutes	37
Figura 3.12. Blocs de 100x25x70 mm.....	37
Figura 3.13. Blocs de 150x25x70 mm.....	37
Figura 3.14. Identificació dels experiments a la peça	39
Figura 3.15. Elements característics del perfil de rugositat	40
Figura 3.16. Rugosímetre avaluant la rugositat superficial	40
Figura 3.17. Senyal del mostreig d'una component	42
Figura 3.18. Interfície de l'aplicació GUI per forces sense fitxer carregat.....	43
Figura 3.19. Interfície de l'aplicació per forces amb el senyal acotat	43
Figura 3.20. Aplicació GUI per extreure valors d'acceleracions	44
Figura 3.21. Senyal acústic abans d'acotar	45
Figura 3.22. Senyal acústic acotat.....	45
Figura 3.23. Espectre de freqüències del senyal de soroll ambiental	46
Figura 4.1. Gràfic de dispersió de Ra superposada.	49
Figura 4.2. Gràfic de dispersió de Ra	49
Figura 4.3. Distribució de Rnum global i individualment	50
Figura 4.4. Distribució de Ra pel plat de Ø63.....	51
Figura 4.5. Gràfic de dispersió S vs Ra (Ø63, ap = 0.16667 mm)	52
Figura 4.6. Gràfics de dispersió ap vs Ra.....	54
Figura 4.7. Mitjana de Ra respecte ap pel plat de Ø63.....	54
Figura 4.8. Gràfics de dispersió S vs Ra	55
Figura 4.9. Gràfics de dispersió F vs Ra	55
Figura 4.10. Gràfics de dispersió ae vs Ra.....	56
Figura 4.11. Gràfic de dispersió ae vs Ramig.....	56
Figura 4.12. Evolució de les tres components de força en valor eficaç (Ø63)	57
Figura 4.13. Evolució del valor eficaç de les acceleracions al llarg de la sèrie Ø63.	59
Figura 4.14. Espectre freqüencial d'un senyal d'acceleracions amb chatter.....	60
Figura 4.15. Zona de treball estable(esquerra) i zona inestable (dreta)	60
Figura 5.1. Estructura esquemàtica d'una neurona artificial.....	62

Figura 5.2. Xarxa tipus feed-forward backpropagation	63
Figura 5.3. Interfície de configuració de la xarxa	64
Figura 5.4. Errors obtinguts.....	67
Figura 5.5. Coeficients de regressió obtinguts	67
Figura 5.6. Resultats de la prova nº 5	68
Figura 5.7. Estructura de les xarxes A, B, C, D i E.....	69
Figura 5.8. Regressions de la xarxa A	70
Figura 5.9. Regressions de la xarxa B	70
Figura 6.1. Interfície d'usuari	74
Figura 6.2. Demostració de fiabilitat.....	75

ÍNDEX DE TAULES

Taula 2.1. Característiques tècniques de la serra de cinta	10
Taula 2.2. Característiques de la Deckel Maho	11
Taula 2.3. Especificacions principals de la mola elèctrica	11
Taula 2.4. Característiques físiques del plat de Ø20	13
Taula 2.5. Especificacions de les plaquetes del plat de Ø20	14
Taula 2.6. Característiques del plat de Ø63	14
Taula 2.7. Geometria i especificacions de la plaqueta Garant	15
Taula 2.8. Especificacions de la Kistler 9257B	17
Taula 2.9. Característiques dels acceleròmetres Kistler	19
Taula 2.10. Especificacions del DAQ NI-9234	20
Taula 2.11. Característiques principals del micròfon	21
Taula 2.12. Característiques del rellotge comparador	23
Taula 2.13. Característiques del rugosímetre	24
Taula 2.14. Determinació del cutoff	24
Taula 2.15. Ordinadors utilitzats en el projecte	25
Taula 3.1. Paràmetres de l'operació de tall	26
Taula 3.2. Variació $\pm 30\%$ a S i F (1 ^a sèrie de Ø20)	27
Taula 3.3. Nivell de S i F en la 1 ^a sèrie del plat de Ø20	27
Taula 3.4. Paràmetre a_p en la 1 ^a sèrie del plat de Ø20	28
Taula 3.5. Paràmetre a_p en la 1 ^a sèrie del plat de Ø20	28
Taula 3.6. Valors experimentals 1 ^a sèrie	28
Taula 3.7. Condicions de treball aconsellades a baix avanç	29
Taula 3.8. Valors S i F a la segona sèrie del plat de Ø20	29
Taula 3.9. Valors a_p a la segona sèrie del plat de Ø20	29
Taula 3.10. Valors a_e a la segona sèrie del plat de Ø20	29
Taula 3.11. Condicions de treball establertes per a la 2 ^a sèrie del plat de Ø20	29
Taula 3.12. Nombre de plaquetes i avanç per dent (plat Ø63)	30
Taula 3.13. Paràmetre S i F pel plat de Ø63	31
Taula 3.14. Paràmetre a_p pel plat de Ø63	31
Taula 3.15. Paràmetre a_e pel plat de Ø63	31
Taula 3.16. Categories de rugositat en funció de R_a	41

Taula 4.1. Desviació estàndard de les mostres de Ra.....	49
Taula 4.2. Comparativa de les condicions de treball (Sèries del plat Ø20).....	51
Taula 4.3. Mitjana de Ra vs S ($a_e = 0.16667$) pel plat Ø63.....	52
Taula 4.4. Diferents mostres observades de la tipologies d'arcs creuats	61
Taula 5.1. Propietats no alterades al llarg de les proves	65
Taula 5.2. Resultats de les proves de configuració de la xarxa	66
Taula 5.3. Models estudiats pel plat del Ø63.....	68
Taula 5.4. Configuració de les xarxes A, B, C, D i E	69
Taula 5.5. Resultats obtinguts en els models A, B, C, D i E.....	70
Taula 5.6. Entrenament de la xarxa offline	71
Taula 5.7. Entrenament de la xarxa online	72
Taula 6.1. Variables input i rugositats de l'experiment 1 (Ø63)	75

MEMÒRIA

1 INTRODUCCIÓ

En aquest capítol es concentra tota la informació bàsica per situar, dins l'extens camp de l'enginyeria, el projecte de fi de grau que es desenvolupa, i es plantegen el seguit d'objectius, especificacions i límits que engloba.

1.1 Antecedents

Els processos d'arrencament de ferritja són el conjunt d'operacions en les quals es dona una determinada forma geomètrica a la peça de treball mitjançant una eina que, gràcies a un o més fils de tall, separa partícules de material. Algunes d'aquestes operacions més destacables són el fresatge, el tornejat, el serrat, el trepanat, el llimat i el roscat. (Groover, 2004)

Amb la Revolució Industrial, a finals del segle XVIII, els processos d'arrencament de ferritja i, en general, les tècniques de fabricació van patir un gran salt evolutiu entès, en bona part, per l'aparició de les màquines-eina i la conseqüent industrialització del sector del mecanitzat. Des d'aleshores, els processos d'arrencament de ferritja, així com les màquines-eina, han anat millorant progressivament en sincronia amb els avenços tecnològics i els descobriments en materials. Aquest fet evidencia l'interès generalitzat de les indústries en el sector del mecanitzat i les seves possibilitats, ja que aquest actua, en gran part, com a proveïdor directe d'altres sectors industrials adjacents, com la indústria de l'automoció o la mecànica.

En les últimes dècades, els processos de mecanitzat han experimentat una segona revolució gràcies al desenvolupament de les màquines-eina amb CNC (Control Numèric per Computador), que, a més de ser més autònomes, comporten una reducció dels temps de producció i una major versatilitat en les operacions d'arrencament de ferritja. És normal, doncs, que la implantació d'aquest tipus de màquines s'hagi estès arreu del sector.

Actualment, el món està vivint els inicis d'una nova revolució industrial, coneguda com a *Indústria 4.0*. Aquesta pretén l'adaptació i la informatització dels processos d'una planta a partir de la interconnectivitat dels diferents elements de treball que formen la

planta, és a dir, vol fer un ús real del *IIoT* (Industrial Internet of Things). D'aquesta manera, es permet la constant monitorització dels processos de fabricació que s'estan duent a temps real i la utilització dels sistemes *cloud* -com *Data Mining* i *Machine Learning*- per optimitzar els processos i productes fabricats.

A banda de millorar en termes de productivitat, la competitivitat en el món industrial contemporani genera, també, grans exigències pel que fa a la qualitat del producte en tots els seus nivells, des del component més petit fins al producte final. Aquesta circumstància repercuteix directament al sector del mecanitzat, on, conseqüentment, es prenen línies de recerca i investigació destinades a la millora de les màquines-eina i les seves prestacions; interessa disposar de mecanismes de control dels diferents elements que intervenen en les operacions de tall per tal de garantir la qualitat final desitjada. Un d'aquests elements que es pretén controlar és la condició de la peça, que ve donada, principalment, pels següents aspectes:

- Integritat de la peça
- Toleràncies dimensionals
- Acabat superficial

Pel que concerneix a la superfície de la peça, les seves característiques i qualitat determinen, en gran part, com interactuarà la peça acabada amb el seu entorn de treball. És per aquest motiu que, malgrat la dificultat que representa, cal entendre les característiques que defineixen la superfície acabada. Aquestes poden resumir-se en quatre elements: rugositat, ondulació, direccionalitat i falles (Kalpakjian i Schmid, 2009).

La **rugositat** i la **ondulació** són els dos aspectes que defineixen el perfil primari de la superfície, que és el que s'obté quan es realitza la mesura mitjançant un palpador. El perfil primari es pot descompondre, doncs, en dues corbes: el perfil de rugositat i el d'ondulació. El primer presenta una longitud d'ona molt més petita que li dona un aspecte més sinuós i, majoritàriament, està determinat per les característiques del material i el procés. En canvi, la ondulació té un perfil amb llarga longitud d'ona i és resultat de desajustos, vibracions, temperatura i factors similars. El perfil primari,

doncs, és la superposició del perfil de rugositat al perfil d'ondulació. A la Figura 1.1 es mostren els perfils que s'acaben de descriure.

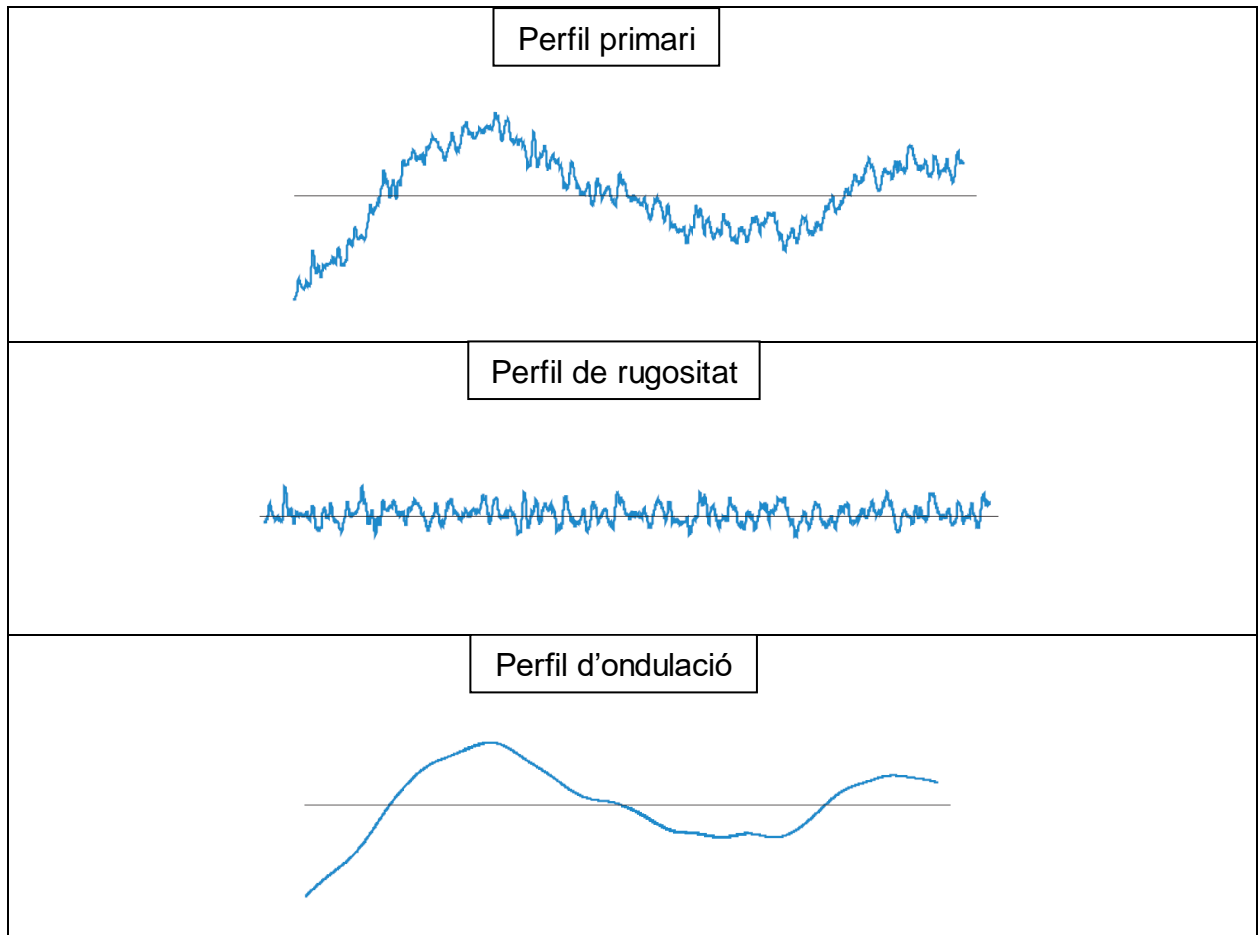


Figura 1.1. Perfils primari, de rugositat i d'ondulació Font: Mitutoyo. Quick Guide to Precision Measuring

Pel que fa a la **direccionalitat**, es defineix com la direcció o patró que dibuixa la textura superficial, com s'indica a la Figura 1.2 (*lay direction*). Aquesta ve determinada pel mètode de fabricació utilitzat en la creació de la superfície.

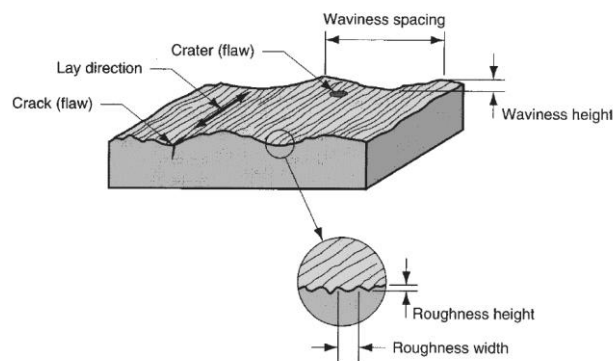


Figura 1.2. Elements de la textura superficial. Font: Groover, 2004

Finalment, les **falles** són irregularitats que es formen ocasionalment a la superfície, com fissures, rascades, petits cràters, desprendiments i defectes similars. Alguns d'aquests s'exemplifiquen a la Figura 1.2 etiquetats com a *flaw*.

En operacions de fresatge frontal es poden formar, principalment, els dos tipus d'ones que es mostren a la Figura 1.3.

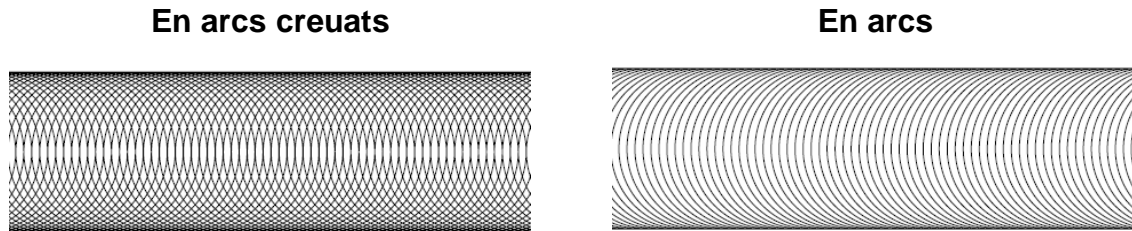


Figura 1.3. Tipus d'ones presenciades en fresatge frontal

La tipologia en arcs creuats és indicatiu d'un treball estable, mentre que la tipologia en arcs indica que l'eina treballava de manera inestable en aquella superfície.

Dels aspectes que descriuen la superfície d'una peça, el present projecte es focalitza en la rugositat, una característica difícil de controlar degut a la quantitat de factors que hi intervenen, tal com il·lustra el diagrama d'espina de peix de la Figura 1.4.

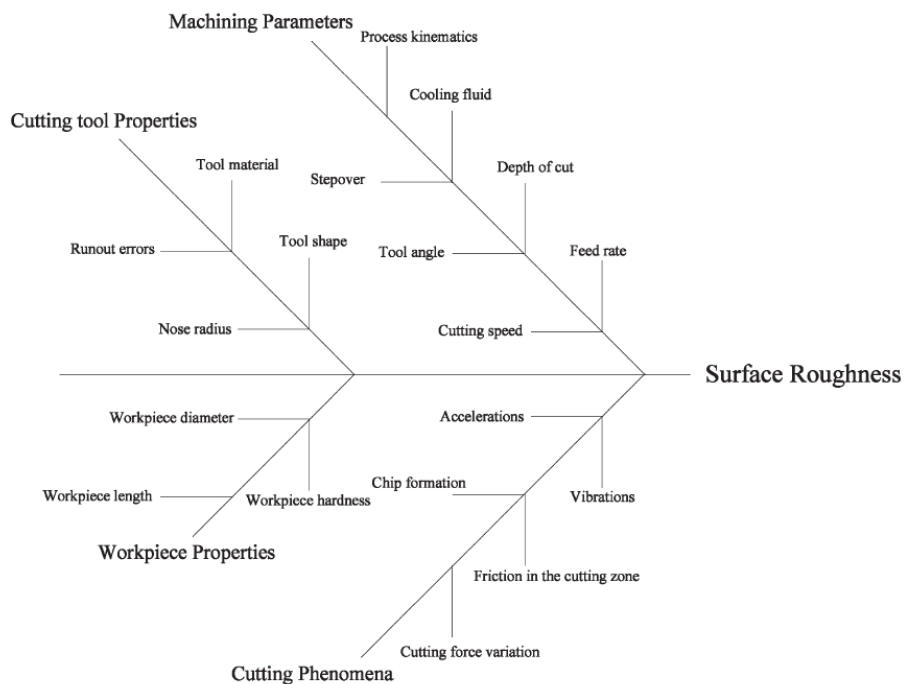


Figura 1.4. Factors causants de la rugositat superficial Font: Benardos i Vosniakos, 2003

Com s'observa a la Figura 1.4, la rugositat superficial no té un origen fàcilment definible, doncs és fruit de la combinació d'una varietat de factors classificables en:

- Propietats de l'eina de tall
- Propietats de la peça de treball
- Paràmetres de l'operació tall
- Fenòmens derivats del tall

Tanmateix, la rugositat superficial pren gran rellevància en el rendiment i funcionament del producte final per l'afectació que implica sobre diverses característiques, com ara (Groover, 2004):

- Fricció i desgast.
- Corrosió
- Precisió dimensional
- Resistència tèrmica
- Resistència elèctrica
- Reflexió de la llum
- Estètica

És natural, doncs, que l'acabat superficial de les peces sigui una preocupació per a la indústria del mecanitzat i les derivades d'aquesta. Apareixen, doncs, limitacions i exigències sobre la qualitat de la superfície, tan per part dels consumidors de mecanitzat com dels fabricants d'elles, que requereixen el control de la rugositat superficial.

La problemàtica en aquesta qüestió resideix en què, atès als nombrosos factors que intervenen, directa o indirectament, a la generació de la textura superficial durant l'operació d'arrencada de material, no es pot obtenir un sistema teòric capaç de determinar la rugositat superficial de la peça de treball previ al procés. Aquesta circumstància s'evita en alguns casos gràcies a un operari experimentat que, a base de "prova i error", adquireix l'experiència necessària amb la màquina-eina per saber quines són les condicions de tall adequades per obtenir la rugositat desitjada. Aquest mètode, però, no és efectiu per a les grans empreses i comporta un malbaratament

de material, temps i diners (Quintana, G., 2010). És per aquest motiu que en els últims anys s'han dut a terme diversos projectes de recerca enfocats a comprendre la generació de la rugositat superficial i s'han desenvolupat algunes metodologies que, amb certa precisió, permeten aproximar-la. Entre aquestes tasques d'investigació s'hi troben articles de recerca com *Surface roughness generation and material removal rate in ball end milling operations* (2010) o *Surface roughness monitoring application based on artificial networks* (2009), ambdós realitzats per Quintana, G., Ciurana J. i Ribatallada, J. Entre les metodologies desenvolupades en els darrers anys, destaquen, per sobre de la resta, les basades en intel·ligència artificial per la major precisió i realitat en els resultats dels models com apunten Benardos i Vosniakos (2009). El present projecte segueix les línies de recerca d'aquests precedents, insistint en la tecnologia *Machine Learning*, per abordar la problemàtica plantejada.

1.2 Objecte

Aquest projecte té com a objectiu fonamental el desenvolupament d'un sistema informàtic, basat en aprenentatge supervisat, que sigui capaç de predir, amb antelació al procés, la rugositat d'una superfície mecanitzada per planejament. D'aquesta manera es pretén explotar una via resolutiva per a la Indústria 4.0 en pro de la determinació de la rugositat superficial. Per a l'assoliment del projecte s'han dut a terme els següents treballs:

- Definició d'experiments
- Realització dels experiments
- Mesura i extracció de dades
- Anàlisi de les dades
- Desenvolupament del model de predicció
- Disseny de la interfície d'usuari

1.3 Especificacions

Tot seguit es llista el conjunt d'especificacions que regulen el recorregut del projecte:

- El sistema desenvolupat en aquest projecte ha de garantir una precisió mínimament acceptable en la predicció dels valors de rugositat.

- Es proporcionarà una interfície per fer ús del sistema predictiu.
- El model de predicció que integri el sistema es basarà en tècniques de *Machine Learning* i aprenentatge supervisat.
- Els experiments es duran a terme amb el centre de mecanitzat Deckel Maho DMC 64V Linear al taller del GREP.
- El sistema s'aplicarà a planejaments d'acabat superficial.

1.4 Abast

El projecte abasta des de l'obtenció de les peces brutes fins al disseny de la interfície d'usuari. Així doncs, les tasques que comprèn són:

- Obtenció de les peces brutes per realitzar els diferents experiments.
- Instrumentar el centre de mecanitzat amb sensors i instruments que permetin capturar les diferents variables que involucra el procés.
- Planificar i executar els experiments a realitzar.
- Depurar les dades recollides per crear una base de dades amb els paràmetres del procés.
- Mesurar la rugositat superficial de cada experiment per completar la base de dades.
- Analitzar les relacions entre variables del procés i rugositat de cares al desenvolupament del model de predicció.
- Desenvolupar i verificar el model.
- Dissenyar la interfície d'usuari.

Es distingeixen, doncs, una part més pràctica o de camp, que inclou les tasques d'experimentació i l'extracció de dades, i una vessant d'anàlisi i disseny, que es durà a terme amb ordinador.

D'altra banda, cal destacar algunes altres qüestions principals que defineixen les dimensions del projecte:

- El material amb què es treballa és Acer F1140, del qual es disposa en forma de passamà calibrat.

- Els experiments amb el centre de mecanitzat consisteixen en fresatges frontals de planejament.
- Les eines de tall escollides per aquesta operació són dos plats de fresar de Ø20mm i Ø63mm.
- La instrumentació de la màquina ha de permetre recollir les següents variables externes:
 - Forces produïdes
 - Acceleracions
 - So

2 MAQUINÀRIA, EINES I INSTRUMENTACIÓ

En aquest capítol s'exposen el conjunt d'elements físics que, en major o menor grau, participen en el desenvolupament del present projecte.

Aquests conjunt d'elements s'agrupen en quatre col·lectius: maquinària, eines de tall, instruments de mostreig i de mesura i, finalment, computadors. Tot seguit se'n descriuen, a grans trets, les característiques, les funcions i els usos que se'ls ha donat.

2.1 Maquinària

2.1.1 Serra de cinta horitzontal

Tal com s'ha esmentat a l'Abast del projecte (Apartat 1.4), la primera tasca a realitzar és l'obtenció de les peces brutes; partint dels passamans d'acer calibrat que es disposa, s'obté el conjunt de lingots sobre els quals s'han de realitzar els experiments. Aquesta operació es duu a terme amb la serra de cinta horitzontal elèctrica que es disposa al taller del GREP a l'EPS (Figura 2.1).

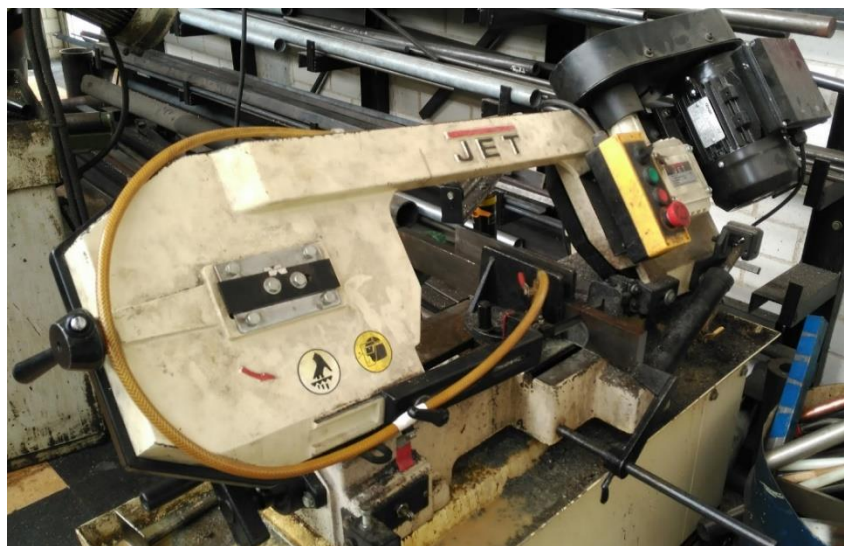


Figura 2.1. Serra Cinta Elèctrica JET

La serra és de fàcil manipulació i incorpora un sistema de posicionament hidràulic que li dóna autonomia durant l'operació de tall, podent-la considerar semiautomàtica; la velocitat d'avanç s'autoregula en funció de la duresa i la geometria de la peça. A més, disposa de quatre velocitats de fulla que permeten treballar amb una bona varietat de materials.

A la Taula 2.1 se'n resumeixen les principals característiques:

Marca	JET
Model	HVBS-812R
Potència [kW]	0.55
Velocitats de tall [m/min]	25 / 40 / 60 / 80
Longitud de la serra [mm]	2362
Gruix de la serra [mm]	0.9
Amplada de la serra [mm]	19-20
Dipòsit de taladrina	Sí

Taula 2.1. Característiques tècniques de la serra de cinta

2.1.2 Centre de mecanitzat Deckel

Al taller del GREP també es disposa del centre de mecanitzat Deckel Maho 64V Linear. Es tracta d'un centre de mecanitzat vertical de CN, amb alt rendiment, una estructura compacta i capaç de treballar a altes velocitats, o el que es coneix com a tecnologia HSM(*High Speed Machining*). És una màquina versàtil i potent.

Tots els experiments que es plantegen en el present projecte es duran a terme en aquest centre de mecanitzat. En aquest projecte no se'n explota tota la seva versatilitat ja que únicament es faran operacions de fresatge frontal per planejar superfícies.



Figura 2.2. Deckel Maho 64V Linear

A la Taula 2.2 es resumeixen les característiques principals de la màquina:

Recorreguts X / Y / Z [mm]	640 / 600 / 500
Velocitat del fusell [rpm]	12000
Avanç màxim [m/min]	40
Marxa ràpida X / Y / Z [m/min]	70 / 40 / 40
Sistema de control	FANUC 180i MB
Accionament principal (40/100% DC) [kW]	19 / 13

Taula 2.2. Característiques de la Deckel Maho

2.1.3 Mola elèctrica DeWalt

Es tracta del model DWE4157 de la gamma de moles elèctriques de la casa DeWalt. Té el capçal reduït per treballar en espais de dimensions reduïdes.

En aquest projecte, s'utilitza per eliminar les rebaves resultants del tall amb la serra de cinta i polir les arestes de les peces. Això agilitza el procés d'emmordassament, redueix la perillositat en la manipulació de les peces per arestes vives i elimina els obstacles que trobaria el plat en l'entrada i sortida de la peça (per ferritja aixecada als extrems).

A la Figura 2.3 es mostra una imatge de la màquina descrita.



Figura 2.3. Mola elèctrica DeWalt

Les especificacions principals de la mola s'inclouen a la següent taula:

Marca	DeWalt
Model	DWE4157
Potència	900 W
Velocitat sense càrrega	11800 rpm

Taula 2.3. Especificacions principals de la mola elèctrica

2.2 Eines de tall

Tal com s'esmenta a l'apartat 1.4, els planejaments superficials es realitzaran amb dos plats de fresar de 20 i 63 mm de diàmetre. Els plats de fresar són les eines generalment més utilitzades per realitzar operacions de planejament. Tanmateix, també es poden utilitzar en d'altres tipus d'operacions de tall com el contornejat o el fresat per penetració. Es caracteritzen per les plaquetes intercanviables de metall dur que integren al voltant del seu perímetre inferior. Aquestes plaquetes són les que estan en contacte amb la peça de treball en l'operació de tall i per tant són el component encarregat d'arrencar material. Conseqüentment, les plaquetes són elements que es desgasten a mesura que treballen i s'han d'anar canviant periòdicament per unes de noves, d'aquí la denominació "intercanviables". És natural, doncs, que les plaquetes es venguin en caixetes de múltiples unitats.

A l'hora d'escollir plats i plaquetes s'han utilitzat catàlegs. Aquests mateixos relacionen plats i plaquetes, indicant quins models de plaquetes poden aplicar-se a un determinat model de plat tenint en compte el material de mecanitzat, el tipus d'operació a practicar i el nivell d'acabat.

2.2.1 Plat de Ø20mm

Plat del fabricant Dijet i distribuït a través de IMCAR, empresa espanyola distribuïdora d'eines de tall. Forma part de la gamma QXP, és recomanat per acabats i indicat per treballar amb acers al carboni. Correspon al model QXP 3020-110-S20-SM, que es mostra tot seguit (Figura 2.4).



Figura 2.4. Plat de fresar de Ø20mm

A la Taula 2.4 se'n mostren les característiques:

Ø treball (mm)	nº dents	Ø canya (mm)	longitud eina (mm)
20	3	20	110

Taula 2.4. Característiques físiques del plat de Ø20

Tal i com s'observa a la Taula 2.4, el plat està integrat per 3 dents, és a dir, s'hi muntaran 3 plaquetes. Les plaquetes adquirides són del mateix fabricant que el plat(Dijet), i estan dissenyades per a operacions d'acabat en acer, tan en planejament com en contornejat. El catàleg les classifica com a *Mirror Insert* -per la seva estructura simètrica- i de tipologia F -corresponent a operacions amb velocitats d'avanç baixes. S'han fabricat amb un revestiment per PVD(*Physical Vapor Deposition* o Deposició física de vapor). Corresponen al model YPHW100308ZER-F (Figura 2.5), que presenta una classe de tolerància H¹.



Figura 2.5. Plaqueta del plat de Ø20

A la figura 2.6 es mostra l'estructura geomètrica d'aquestes plaquetes.

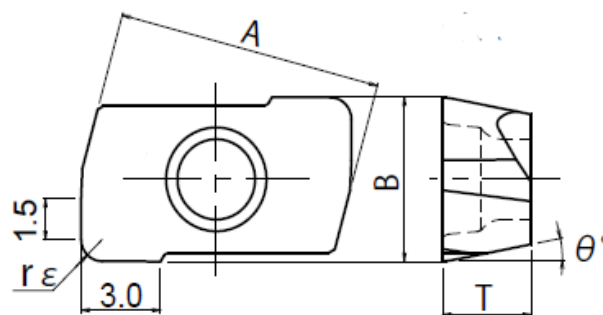


Figura 2.6. Plànol de la plaqueta Dijet Font: Catàleg DIJET

El paràmetre r_ϵ , que s'indica a la Figura 2.6, correspon al radi de la plaqueta en la seva zona d'impacte, en anglès *nose radius*. Tal com mostra la Figura 1.4, aquest és

¹ Corner Height ± 0.013 mm; Thickness ± 0.025 mm; Inscribed Circle ± 0.013 mm.

un paràmetre influent en la generació de la rugositat superficial i, per tant, constarà a la base de dades que es pretén construir. Del catàleg s'extreu la informació bàsica referent a les plaquetes, que es resumeix en la següent taula d'especificacions (Taula 2.5).

Vc (m/min)	fz (mm/dent)	r _ε (mm)	B (mm)	A (mm)	T (mm)	θ°
120 – 190	0.75 – 0.15	0.8	6	10	3.35	11°

Taula 2.5. Especificacions de les plaquetes del plat de Ø20

2.2.2 Plat de Ø63mm

Com l'anterior, el fabricant d'aquest plat és Dijet. Es tracta del model DDM-6063-27R-12 de la gamma *Diemaster Profile Type Facemills*, indicat, sobretot, per desbastats. Està constituït per 6 plaquetes circulars intercanviables, com s'observa a les següents imatges (Figures 2.7 i 2.8):

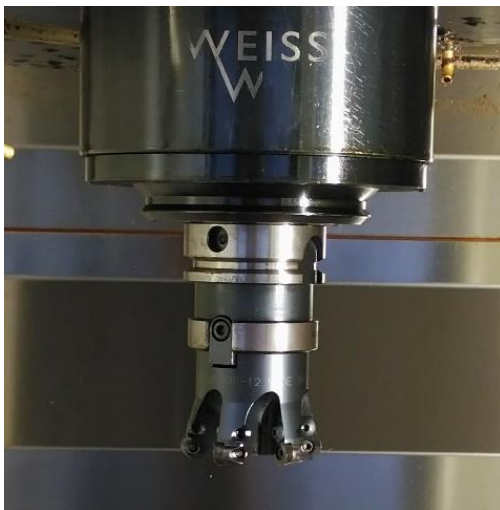


Figura 2.7. Plat de Ø63 (alçat)



Figura 2.8. Plat de Ø63 (planta)

La Taula 2.6 recull algunes de les característiques del plat de Ø63 que figuren al catàleg:

Ø treball (mm)	nº dents	h màx. de treball (mm)	Ø canya (mm)
63	6	50	50

Taula 2.6. Característiques del plat de Ø63

En aquest cas, les plaquetes no són de la casa Dijet, sinó que són de la marca Garant de Hoffmann Group. Aquestes s'han escollit del catàleg de Hoffmann Group partint del catàleg de Dijet, on s'indica la geometria estàndard de plaqueta aplicable al seu plat (RDHX 12T3 MOTN). Són de classe HB7525 i de tipus ST900, és a dir, d'una qualitat apte per treballar acers amb el millor acabat. Tot seguit se'n mostren una imatge (Figura 2.9) i un plànol (Figura 2.10).



Figura 2.9. Plaqueta GARANT Font: <https://www.hoffmann-group.com>

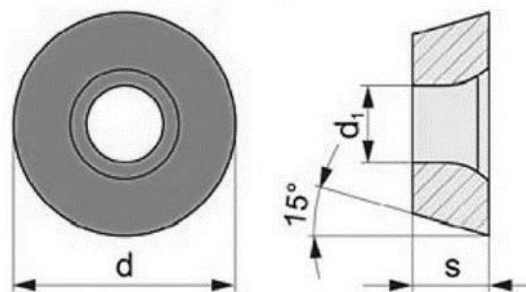


Figura 2.10. Plànol plaqueta Garant Font: Catàleg DIJET

A la Taula 2.7 es resumeixen les especificacions recomanades pel fabricant i característiques geomètriques de la plaqueta.

d (mm)	r (mm)	s (mm)	d ₁ (mm)	fz (mm/dent)	Vc (m/min)	ae (mm)	ap _{max} (mm)
12	6	3.97	3.9	0.22	115	0.3 (x ØD)	4

Taula 2.7. Geometria i especificacions de la plaqueta Garant

2.3 Instrumentació

L'objectiu principal dels experiments que es realitzen en aquest projecte és recollir la informació necessària de cares a construir la base de dades. Com s'ha esmentat a l'apartat 1.4, es pretén fer un seguiment de les forces, les acceleracions i el so que tenen lloc durant l'operació d'arrencament de ferritja. En aquest apartat es descriuen els diferents instruments amb què es capturen cadascun d'aquests paràmetres.

2.3.1 Taula dinamomètrica Kistler

Durant l'operació d'arrencament de ferritja es transmeten certes forces del conjunt màquina-eina a la peça i els elements que la subjecten que, en certa manera, són un reflex de la interacció eina-peça i, per tant, resulten una informació interessant a l'hora de comprendre la generació de la rugositat superficial.

Per tal de capturar aquestes forces es disposa d'una taula dinamomètrica. Aquest instrument està constituït per quatre sensors de força integrats al seu interior i equidistantment separats, tal com mostra la Figura 2.11.

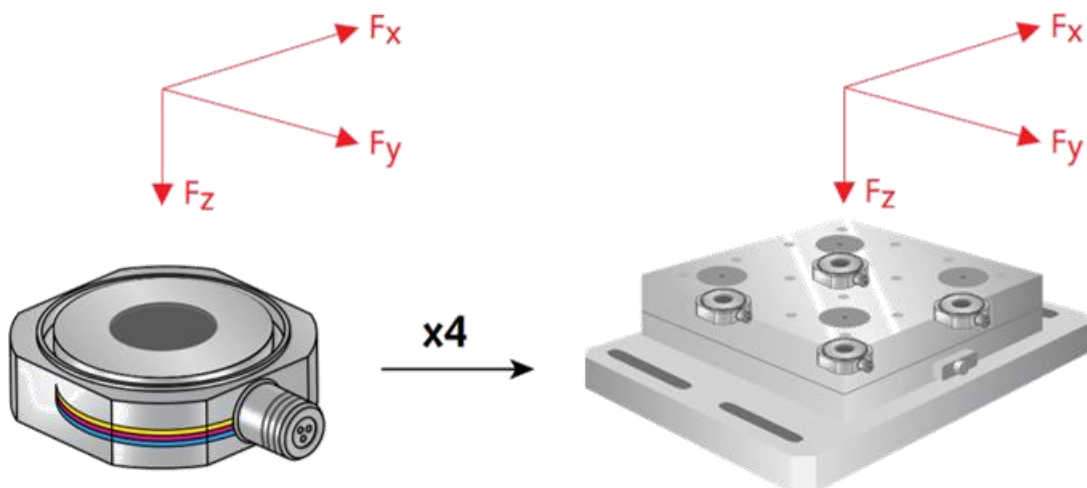


Figura 2.11. Croquis il·lustratiu d'una taula dinamomètrica Font: Catàleg Kistler

Cadascun d'aquests sensors que integra la taula captura les tres components de forces - F_x , F_y i F_z . (Figura 2.11).

En aquest projecte es fa ús de la taula dinamomètrica Kistler 9257B que disposa el GREP. L'instrument mesura les tres components de força i, a partir d'aquestes i la geometria de la taula, es calculen els moments M_x , M_y i M_z , que no es contemplen en el disseny de la solució final. A la Taula 2.8 es resumeixen les característiques principals de la taula dinamomètrica Kistler.

Marca	Kistler
Model	9257B
Superfície	100x170 mm
Pes	7.3 kg
Rang de mesura	-5 ... 10 kN
Freqüència d'adquisició	12048 Hz

Taula 2.8. Especificacions de la Kistler 9257B

En la realització dels experiments, la taula dinamomètrica s'acoba directament a la bancada del centre de mecanitzat i, damunt d'ella, s'hi col·loca la mordassa amb la peça de treball. La Figura 2.12 mostra el muntatge que s'acaba de descriure.

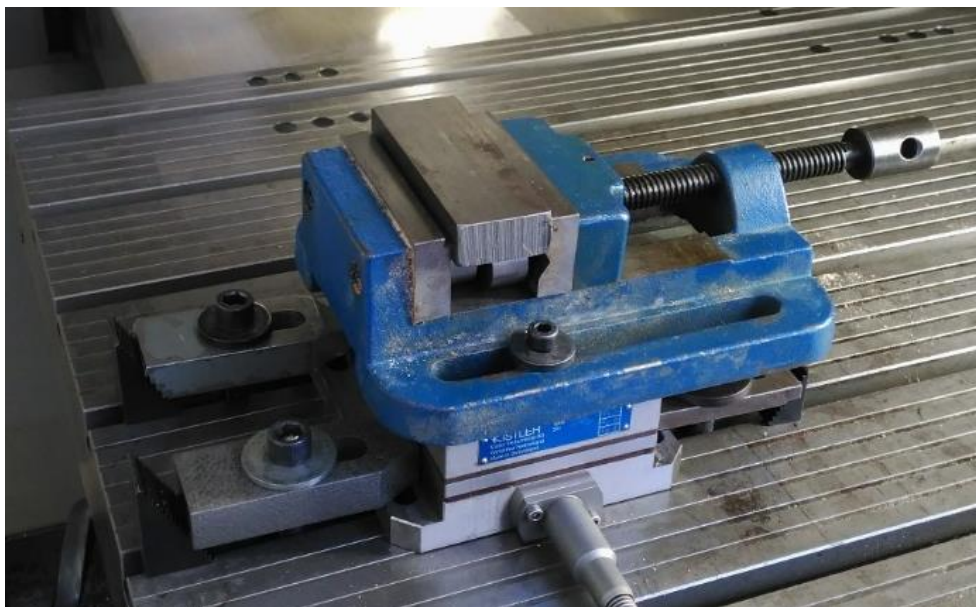


Figura 2.12. Muntatge de la taula dinamomètrica

A banda de la taula dinamomètrica, el sistema de captura de forces es compon d'un amplificador, un mòdul de connexió i un ordinador amb el programari DaqView. Aquests components també han estat cedits pel GREP.

Els valors mesurats per la taula dinamomètrica s'envien a l'amplificador (Figura 2.13), passen per un mòdul de connexió i arriben a l'ordinador, des d'on s'executa la captura.

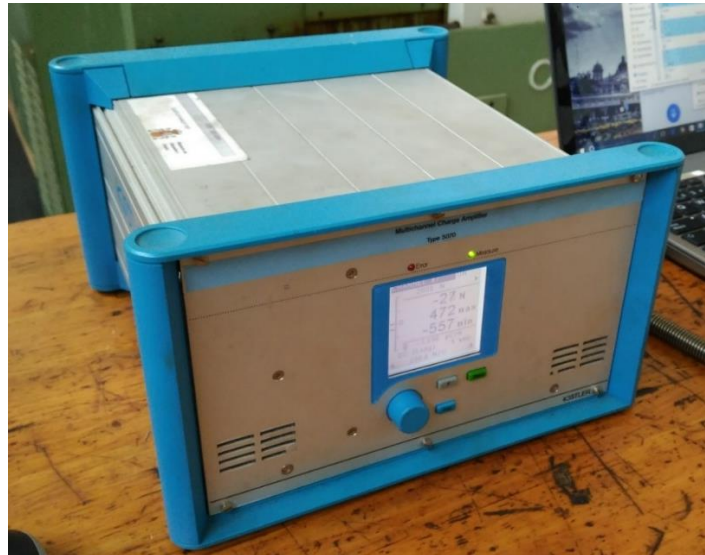


Figura 2.13. Amplificador Kistler

La interfície del DaqView es pot veure a la Figura 2.14, on també s'observen els 16 paràmetres capturats, identificats a la columna "Label". La columna "Units" indica les unitats de cada paràmetre capturat que, com es pot veure, són N per les forces i N·m pels moments.

File Edit Data Window Device Help

10 5 10 -0.1

Channel Setup Acquisition Setup Data Destination

Analog & Scanned Digital Inputs

CH	On	Type	Polarity	Label	Units	Reading
P1 0	Yes	x1	Bipolar	Fx1	N	
P1 1	Yes	x1	Bipolar	Fx2	N	
P1 2	Yes	x1	Bipolar	Fy1	N	
P1 3	Yes	x1	Bipolar	Fy2	N	
P1 4	Yes	x1	Bipolar	Fz1	N	
P1 5	Yes	x1	Bipolar	Fz2	N	
P1 6	Yes	x1	Bipolar	Fz3	N	
P1 7	Yes	x1	Bipolar	Fz4	N	
P1 8	Yes	x1	Bipolar	Gnd	N	
P1 9	Yes	x1	Bipolar	Sum Fx	N	
P1 10	Yes	x1	Bipolar	Sum Fy	N	
P1 11	Yes	x1	Bipolar	Sum Fz	N	
P1 12	Yes	x1	Bipolar	Sum Mx	Nm	
P1 13	Yes	x1	Bipolar	Sum My	Nm	
P1 14	Yes	x1	Bipolar	Sum Mz	Nm	
P1 15	Yes	x1	Bipolar	CH15	N	

Figura 2.14. Interfície del DaqView

En l'adquisició de forces les captures es duen a terme seguint els eixos de la mecanització, és a dir, en les mateixes direccions i coordenades que la màquina.

2.3.2 Sensors piezoelèctrics

Com el seu nom indica, els sensors piezoelèctrics es basen en el fenomen de la piezoelectricitat, és a dir, la capacitat de certs cristalls de generar una diferència de potencial elèctric en ser sotmesos a una deformació mecànica. Aprofitant aquest fenomen, existeixen, entre d'altres instruments, els acceleròmetres piezoelèctrics, que permeten mesurar les vibracions o acceleracions dels elements als que estan units. Per tal d'aconseguir una bona estabilitat que asseguri una mesura rigorosa, es subjecten a cares planes. En el cas que ens incumbeix, se'n col·loquen dos; un per mesurar les acceleracions en X i l'altre en Y, disposats com es mostra a la Figura 2.15.



Figura 2.15. Disposició dels acceleròmetres

No es mostregen les acceleracions en Z perquè, davant la manca d'un tercer acceleròmetre, s'han prioritzat els eixos X i Y, on més es noten les condicions de treball. De la mateixa manera que l'adquisició de forces, la captura d'acceleracions es fa d'acord amb els eixos de mecanitzat.

Ambdós acceleròmetres amb els que es treballa en el present projecte són de tipus unidireccional. La Taula 2.9 conté la informació més destacable d'aquests sensors.

Marca	Kistler
Model	8703A50M1
Alçada	20.3 mm
Rang de mesura	-490 ... 490 m/s ²
Freqüència d'adquisició	10240 Hz

Taula 2.9. Característiques dels acceleròmetres Kistler

La figura 2.16 mostra l'aspecte d'aquests acceleròmetres.



Figura 2.16. Acceleròmetre unidireccional Kistler 8703A50M1 Font: <http://www.helmar.com.pl/>

Per capturar les mesures dels acceleròmetres es fa servir el mòdul DAQ NI 9234 acoblat al sistema NI USB-9162, com es mostra a la Figura 2.17, que permet la connexió a un ordinador on, mitjançant el programari LabVIEW, es registren les dades en format *.vm*.



Figura 2.17. Conjunt DAQ portàtil

A la Taula 2.10 es resumeixen les característiques principals del DAQ.

Marca	National Instruments
Model	NI-9234 + USB-9162
Canals	4
Rang de senyal	± 5 V

Taula 2.10. Especificacions del DAQ NI-9234 <http://www.ni.com/>

2.3.3 Micròfon

El so produït durant el procés d'arrencament de ferritja depèn de les condicions de l'operació i altres factors relacionats amb el material, per tant, esdevé un paràmetre interessant ja que podria ser un bon reflex de la rugositat superficial generada.

En aquest projecte s'utilitza un micròfon instal·lat dins del centre de mecanitzat, tal com mostra la Figura 2.18.



Figura 2.18. Micròfon instal·lat al centre de mecanitzat

El micròfon es connecta directament a un ordinador amb un connector *Jack 3.5 stereo* i les dades s'emmagatzemen en format ".m4a" mitjançant l'enregistrador de *Windows*. A la Taula 2.11 es resumeixen les característiques principals d'aquest instrument.

Marca	Aukey
Model	GD-G1
Pes	1.5 kg
Rang de freqüència	20 Hz – 20 kHz

Taula 2.11. Característiques principals del micròfon

2.3.4 Càmera termogràfica

Aprofitant que el GREP disposa d'una càmera termogràfica, el projecte té la possibilitat d'incloure dades de temperatura de la zona d'impacte.

Així com el so generat, aquesta variable comparteix molts dels factors que generen la rugositat superficial i, per tant, seria interessant analitzar si existeix alguna correlació entre ella i els valors de rugositat. La càmera del GREP és la IRBIS 3 Professional(Figura 2.19), amb un rang de mesures de 20 a 100 °C.



Figura 2.19. Càmera termogràfica

Tanmateix, després de realitzar diversos experiments de prova, l'ús de la càmera termogràfica s'ha descartat perquè dificulta el procés d'experimentació per l'espai que ocupa i, a més, els resultats capturats presenten ambigüitat.

2.3.5 Relotge comparador

La planesa de la superfície de mecanitzat de la peça així com l'orientació correcta d'aquesta són dos factors rellevants que poden afectar tan a la qualitat de l'operació de tall com a l'exactitud de les dades capturades. Per tal de comprovar i garantir la correcció d'ambdues característiques s'ha fet ús d'un rellotge comparador, mostrat a la Figura 3.20.



Figura 2.20. Rellotge comparador

Aquest instrument consta d'una punta de contacte esfèrica desplaçable que li permet detectar diferències de cotes de manera ràpida i precisa. A la Taula 2.12 es resumeixen les principals característiques de l'instrument.

Marca	Mitutoyo
Model	2118S-10
Unitats de mesura	Mètriques
Graduacions	1 μm
Rang de mesura per revolució	0.2 mm
Rang de mesura	5 mm
Precisió	$\pm 10 \mu\text{m}$

Taula 2.12. Característiques del rellotge comparador

2.3.6 Rugosímetre

Per mesurar la rugositat superficial de les superfícies mecanitzades s'utilitza un rugosímetre. Aquest aparell permet obtenir una avaluació precisa i ràpida dels paràmetres representatius de la rugositat superficial. El model utilitzat és el *Surftest SV-2000* de *Mitutoyo*, controlat informàticament mitjançant el programari *Surfpak-SV 1.3*. A la Figura 2.20 es mostra una fotografia de l'instrument esmentat.



Figura 2.21. Rugosímetre Mitutoyo

A la Taula 2.13 es resumeixen les característiques principals d'aquest instrument .

Marca	Mitutoyo
Model	Surftest SV-2000
Programari	Surfpak-SV 1.3
Carrera del palpador	800 μm
Resolució	0.0001 μm
Avanç (Eix X)	50 mm
Mínim <i>cutoff</i>	0.025 mm
Desviació lineal	0.3 μm / 50 mm
Mesures	55 paràmetres (R_a , R_t , R_z ...)

Taula 2.13. Característiques del rugosímetre

El rugosímetre consta d'un eix amb una punta normalitzada en el seu extrem. Aquesta ha de romandre en tot moment en contacte amb la superfície avaluada perquè la mesura sigui correcta.

Les mesures es fan segons l'estàndard OLD MIX. Pel que fa als perfils superficials, s'extreu el perfil de rugositat del perfil primari mitjançant un filtre passa-alt amb un valor llindar o *cutoff* λ_c . D'aquesta manera s'elimina la component relativa a la ondulació, que presenta longituds d'ona més grans. El valor *cutoff* és equivalent a la longitud de mostreig l_c . Per escollir el *cutoff* es segueixen els següents passos:

1. Es calibra el rugosímetre amb una superfície patró de rugositat coneguda.
2. Es realitza una mesura prèvia de la rugositat a mesurar.
3. S'escull el *cutoff* λ_c i la longitud de mesura l_n corresponent en funció de la rugositat prèvia analitzada i utilitzant la Taula 2.14.
4. Es torna a avaluar la rugositat i es comprova si aquesta es troba dins l'interval que li pertoca segons se *cutoff* establert al punt 3.

R_a μm	Sampling length l_x mm	Evaluation length l_n mm
$(0.006) < R_a \leq 0.02$	0.08	0.4
$0.02 < R_a \leq 0.1$	0.25	1.25
$0.1 < R_a \leq 2$	0.8	4
$2 < R_a \leq 10$	2.5	12.5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Taula 2.14. Determinació del *cutoff*

2.4 Computadors

Els ordinadors utilitzats al llarg del projecte es detallen a la Taula 2.15:

Marca	Model	Memòria RAM	Sistema Operatiu	Processador
<i>Toshiba</i>	Satellite P50-A-12Z	16 GB	Windows 8	Intel i7 4400MQ
<i>HP</i>	Omen 15-ax201ns	8 GB	Windows 10	Intel i7 7700HQ
<i>PC Clònic</i>	-	3.25 GB	Windows XP	Intel Core 2 Quad

Taula 2.15. Ordinadors utilitzats en el projecte

Per a l'adquisició de forces s'utilitza l'ordinador *Toshiba*, mentre que el PC Clònic engloba l'enregistrament de so i la captura d'acceleracions.

L'ordinador de marca *HP* s'utilitza pel tractament de dades i el desenvolupament del model de predicció, ambdós tasques dutes a terme amb el *Matlab*.

3 METODOLOGIA

En aquest capítol es descriu la metodologia seguida en la realització de la part experimental d'aquest projecte. Es divideix en tres parts clarament diferenciades:

- Planificació: es defineixen les condicions d'operació de cada experiment i com s'organitzen aquests sobre les peces brutes per obtenir les provetes.
- Experimentació: comprèn la realització del conjunt d'experiments per capturar les variables del procés i generar la rugositat superficial.
- Extracció de les dades experimentals: és l'avaluació de la rugositat superficial mitjançant el rugosímetre i la depuració de les dades capturades per extreure'n els valors rellevants.

3.1 Planificació dels experiments

En primer lloc, és important precisar que cada experiment correspon a una sola passada d'acabat del plat de fresar en qüestió.

Per programar els experiments s'han considerat les variables operacionals resumides a la Taula 3.1.

	Unitats	Descripció
S	rev/min	Velocitat del fusell
F	mm/min	Velocitat d'avanç
ae	% (respecte D_{eina})	Profunditat de tall radial
ap	mm	Profunditat de tall axial

Taula 3.1. Paràmetres de l'operació de tall

Per cadascun d'aquests paràmetres s'ha decidit prendre'n tres valors o nivells diferents i experimentar amb un disseny de factorial complet, és a dir, considerant totes les combinacions possibles. Això permet disposar d'una mostra experimental extensa i heterogènia. A tall d'exemple, cada combinació possible de S , F i ae són 3 experiments, corresponents als tres nivells de ap . Així doncs, el nombre d'experiments realitzats amb cada eina seria:

$$n \text{ experiments per plat} = n \text{ combinacions} = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 3^4 = 81$$

Tanmateix, s'ha decidit que, amb el plat de Ø20, es realitzaran dos sèries experimentals; una treballant amb valors recomanats, o adequats, i una altra forçant-los considerablement per tal d'experimentar el sobre-treball. Pel que fa al plat de Ø63, se'n ha planificat una sola sèrie de 81 experiments. Així doncs, el projecte comprèn tres sèries de 81 experiments cadascuna, és a dir, 243 experiments.

A continuació es descriu la planificació de les tres sèries experimentals:

3.1.1 Plat de Ø20 mm (1ª sèrie)

Tal com s'acaba d'explicar, l'experimentació amb el plat de Ø20mm comprèn dos sèries de 81 experiments. La primera sèrie és aquella en la què es treballarà a alta velocitat d'avanç. Per a la velocitat del fusell es prendrà un valor recomanat al catàleg. Per a la velocitat d'avanç, F , es pren 7200 mm/min. Aquest valor és prou gran per considerar que es treballa a alta velocitat d'avanç i a la vegada és suportable per les plaquetes. Pel que fa a la velocitat del fusell S , i en base al catàleg, es prenen 3200 rpm. De cares a l'experimentació s'ha pres la decisió d'aplicar una variació d'un $\pm 30\%$ per obtenir els dos nivells restants, com s'indica a la Taula 3.2.

Paràmetre	+ 30%		- 30%
S [rpm]	4160	3200	2240
F [mm/min]	9360	7200	5040

Taula 3.2. Variació $\pm 30\%$ a S i F (1ª sèrie de Ø20)

Tanmateix, el centre de mecanitzat Deckel on s'han dut a terme els experiments no permet treballar amb velocitats d'avanç superiors a 6000 mm/min. Davant d'aquesta circumstància s'ha optat per reduir els tres nivells de S i F mitjançant un factor de reducció, que s'ha calculat de la següent manera:

$$\frac{F_{MAX}}{F_{+30\%}} = \frac{6000}{9360} = 0.64 \rightarrow \text{factor red.} = 0.6$$

Si s'aplica aquest factor reductor als diferents nivells de F i S s'obtenen els següents valors (Taula 3.3):

Paràmetre	+ 30%		- 30%
S [rpm]	2496	1920	1344
F [mm/min]	5616	4320	3024

Taula 3.3. Nivell de S i F en la 1ª sèrie del plat de Ø20

Pel que fa a la profunditat de tall, el fabricant recomana un valor màxim de 0.6 mm. Considerant aquesta condició, s'ha pres un 66% i un 33% d'aquest màxim:

% ap_{max}	100%	66%	33%
ap [mm]	0.6	0.4	0.2

Taula 3.4. Paràmetre ap en la 1ª sèrie del plat de Ø20

Finalment, pel que fa a la profunditat de tall radial ae , s'han definit tres nivells en relació al diàmetre de l'eina:

ae (% D)		
100%	50%	25%

Taula 3.5. Paràmetre ap en la 1ª sèrie del plat de Ø20

La taula 3.7 resumeix els valors que prenen els quatre paràmetres en aquesta sèrie experimental:

S (rpm)	2496	1920	1344
F (mm/min)	5616	4320	3024
ap (mm)	0.6	0.4	0.2
ae (%D)	100%	50%	25%

Taula 3.6. Valors experimentals 1ª sèrie

A l'ANNEX A s'adjunta la taula amb les 81 combinacions corresponents a aquesta primera sèrie de 81 experiments planificats pel plat de Ø20mm.

3.1.2 Plat de Ø20 mm (2ª sèrie)

La segona sèrie experimental del plat de Ø20 està regida per unes condicions de treball moderades en comparació a la primera sèrie. En aquest cas, es decideix prendre els nivells recomanats pel fabricant de les plaquetes per planejaments a baix avanç (*low feed*), que es mostren a la Figura 3.1 extreta del catàleg.

被削材 Work materials	チップ 材種 Grades	工具径 (mm) Tool dia.														
		16 / 17					20					20 / 21				
		刃数 No. of teeth 2N					刃数 No. of teeth 3N					刃数 No. of teeth 4N				
		ℓ (mm)	ap (mm)	ae (mm)	n (min ⁻¹)	V_f (mm/min)	ℓ (mm)	ap (mm)	ae (mm)	n (min ⁻¹)	V_f (mm/min)	ℓ (mm)	ap (mm)	ae (mm)	n (min ⁻¹)	V_f (mm/min)
炭素鋼 (S50C, S55C) 硬さ250HB以下 Carbon steel (C50, C55) Below 250HB	JC8015	~70	0.2	8~16	4,000	1,200	~70	0.2	10~20	3,180	1,430	~70	0.2	10~18	3,180	1,910
		120	0.2	8~16	3,000	720	120	0.2	10~20	2,390	860	120	0.2	10~18	2,390	1,150
		160	0.2	8~10	2,600	520	190	0.2	10~12	2,070	620	190	0.2	10~12	2,070	830

Figura 3.1. Condicions de treball a baix avanç aconsellades

La Taula 3.7 recull aquests valors extrets del catàleg de les plaquetes:

Paràmetre	Valor recomanat (low feed)
S [rpm]	3180
F [mm/min]	1430
ap [mm]	0.2
ae [mm]	10~20

Taula 3.7. Condicions de treball aconsellades a baix avanç

Procedint com en la primera sèrie experimental, s'aplica una variació de $\pm 30\%$ a la velocitat d'avanç, F , i la velocitat del fusell, S , per establir els altres nivells (Taula 3.8).

Paràmetre	+ 30%		- 30%
S [rpm]	4134	3180	2226
F [mm/min]	1859	1430	1001

Taula 3.8. Valors S i F a la segona sèrie del plat de Ø20

Pel que fa a la profunditat axial de tall, ap , s'aplica una variació de $\pm 50\%$ sobre el valor recomanat. A la Taula 3.9 es resumeixen els tres nivells d'aquest paràmetre.

% ap	+ 50%	ap _{nom}	- 50%
ap [mm]	0.3	0.2	0.1

Taula 3.9. Valors ap a la segona sèrie del plat de Ø20

Finalment, igual que en la primera sèrie, la profunditat de tall radial pren els següents nivells en relació al diàmetre de l'eina, que és de 20 mm (Taula 3.10).

ae (% D)		
100%	50%	25%

Taula 3.10. Valors ae a la segona sèrie del plat de Ø20

La segona sèrie del plat de Ø20 es resumeix a la Taula 3.11.











S (rpm)	4134	3180	2226
F (mm/min)	1859	1430	1001
ap (mm)	0.3	0.2	0.1
ae (%D)	100%	50%	25%

Taula 3.11. Condicions de treball establertes per a la 2^a sèrie del plat de Ø20

A l'ANNEX A s'adjunta la taula amb les 81 combinacions corresponents a la segona sèrie experimental pel plat de Ø20mm.

3.1.3 Plat de Ø63 mm

En aquest cas, el fabricant de les plaquetes que s'han muntat al plat de Ø63 mm indica les velocitats de tall v_c recomanades, en funció del material de treball, mitjançant la taula d'aplicació que es mostra a la Figura 3.2.

					INOX	INOX	GG(G)			
< 500 N	< 750 N	< 900 N	< 1100 N	< 1400 N	< 900 N	> 900 N				
P	P	P	P	P	M	M	K			
380	290	240	210	170	240	170	200	☑	☑	☑
										
☑	☑									

classe d'acers generals

v_c recomanada [m/min]

Figura 3.2. Taula d'aplicació per les plaquetes del plat de Ø63 Font: <https://www.hoffmann-group.com>

Com es pot veure a la Figura 3.1, per acers generals com l'utilitzat en el present projecte, la velocitat de tall fluctua entre 290 i 240 m/min. A fi d'obtenir un valor base de S i F , a partir dels quals poder aplicar les variacions desitjades, s'han realitzat un seguit de càlculs partint del valor mig de v_c :

$$\bar{v}_c = \frac{290 + 240}{2} = 265 \text{ m/min}$$

Amb la velocitat de tall v_c i a partir de l'Equació 1, s'obté la velocitat del fusell S .

$$S = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (rpm) \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$S = \frac{265 \cdot 1000}{\pi \cdot 63} \cong 1340 \text{ rpm}$$

De l'Apartat 2.2.2 coneixem que:

z (unitats)	6
fz (mm/dent)	0.22

Taula 3.12. Nombre de plaquetes i avanç per dent (plat Ø63)

Llavors, prenent $S = 1340 \text{ rpm}$, i a partir de l'Equació 2, s'obté la velocitat d'avanç F .

$$F = S \cdot z \cdot f_z \quad [\text{Eq. 2}]$$

$$F = 1340 \cdot 6 \cdot 0.22 \cong 1770 \text{ mm/min}$$

Partint d'aquests valors s'ha procedit de la mateixa manera que pel plat de Ø20mm, és a dir, aplicant una variació de $\pm 30\%$, com s'indica a la Taula 3.13.

Paràmetre	+ 30%	Valor nominal	- 30%
S [rpm]	1742	1340	938
F [mm/min]	2301	1770	1239

Taula 3.13. Paràmetre S i F pel plat de Ø63

Pel que fa a la profunditat de tall axial, a_p , s'han pres tres nivells amb valors similars als del plat de Ø20mm:

a_p (mm)		
0.5	0.25	0.1

Taula 3.14. Paràmetre a_p pel plat de Ø63

Per la profunditat de tall radial, a_e , els tres nivells considerats són:

a_e (% D)		
80%	50%	25%

Taula 3.15. Paràmetre a_e pel plat de Ø63

A l'ANNEX A s'inclou la taula amb les condicions de treball pels 81 experiments amb el plat de Ø63mm.

3.1.4 Organització dels planejaments

En aquest apartat s'explica com s'han organitzat el conjunt d'experiments sobre l'espai material disponible. S'ha pensat en dos mides diferents de blocs d'acer on executar els experiments, una pels 162 experiments amb el plat de Ø20 mm i una altra pels 81 experiments amb el plat de Ø63 mm. S'ha procurat, en la mesura del possible, aprofitar al màxim el material disponible.

A continuació es descriu com s'han distribuït els experiments de cada sèrie sobre les peces d'acer:

Plat de Ø20

Per aquesta sèrie experimental s'ha decidit treballar amb peces brutes de 100 mm de llargada i, aproximadament, 25x70mm de secció, tal com s'il·lustra a la Figura 3.3.

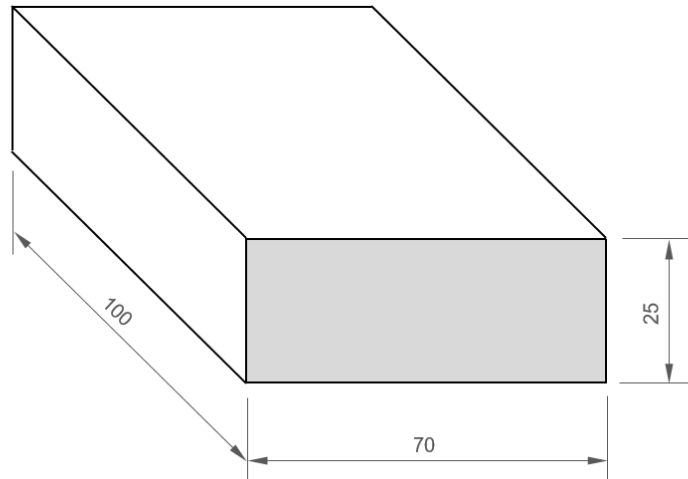


Figura 3.3. Croquis de la peça de treball pel plat de Ø20

Aquesta peça bruta inicial, degut al procés de laminació per corrons en la conformació de la barra, pot presentar una duresa major a les capes exteriors respecte la part interna. Aquesta circumstància podria afectar al rigor dels resultats perquè alguns experiments mecanitzarien en dureses significativament superiors a la resta. Per evitar aquesta problemàtica, s'ha optat per aplicar una operació de desbast, prèvia als experiments, a la superfície de treball, tal com mostra l'esquema de Figura 3.4.

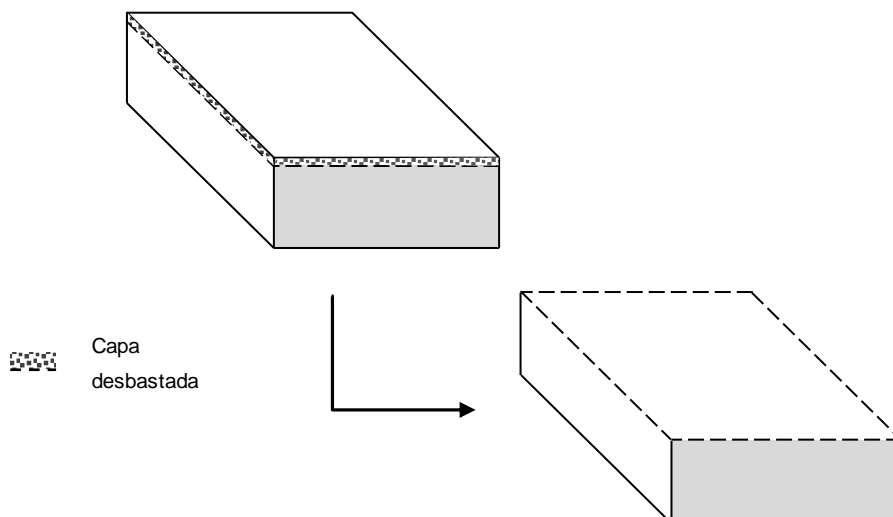


Figura 3.4. Desbast de la capa exterior de la peça bruta

D'aquesta manera la superfície es troba estandarditzada i preparada pels experiments.

Els planejaments s'han organitzat partint de la consideració que en experiments successius el paràmetre ae -profunditat de tall radial- sempre varia seguint la seqüència $100\%D, 50\%D, 25\%D, 100\%D, 50\%D, 25\%D, 100\%D, \dots$. D'aquesta manera, s'aprofita part de l'amplada mecanitzada en el primer experiment per realitzar el segon i, posteriorment, part de l'amplada d'aquest segon per realitzar el tercer. Els següents croquis descriuen l'esmentat procediment:

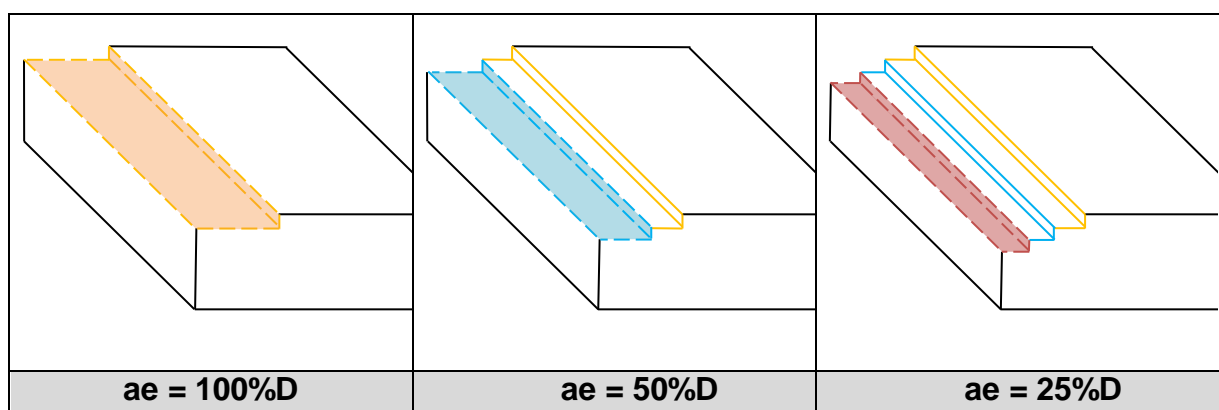


Figura 3.5. Seqüència de tres experiments

Com s'observa a la Figura 3.4, agrupant el conjunt d'experiments de tres en tres amb una ae decreixent, s'aconsegueix una forma esglaonada on cada esglaó presenta l'acabat superficial corresponent a un experiment. Els colors taronja, blau cel i vermell representen, respectivament, les passades amb profunditat de tall radial de $100\%D$, $50\%D$ i $25\%D$. La forma final obtinguda seria la que es mostra a la Figura 3.6

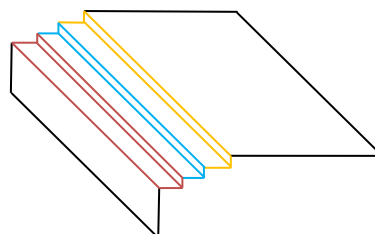


Figura 3.6. Croquis del bloc amb tres experiments

Tanmateix, com es pot comprovar a la figura 3.5, la peça podria aprofitar-se encara més sense la necessitat de retirar-la de la mordassa, tot duent a terme el següent grup de tres experiments a l'altra banda, tal com s'il·lustra a la Figura 3.7.

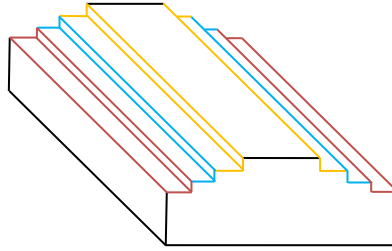


Figura 3.7. Croquis del bloc amb sis experiments

A més d'estalviar temps, aquesta optimització del material també és beneficiosa a l'hora de programar els planejaments, podent disposar d'un sol codi per cada sis experiments i, així, estalviar memòria.

Tot el procediment descrit anteriorment per a una cara de la peça bruta és aplicable d'igual manera a la cara oposada. Així s'estalvia, al màxim, el material disponible. La forma final de les provetes, doncs, és la que mostra la Figura 3.8.

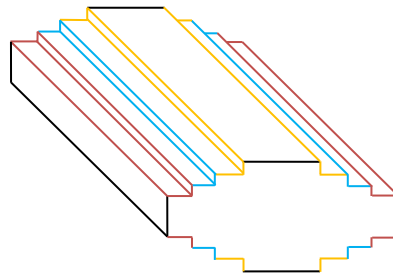


Figura 3.8. Croquis del bloc amb dotze experiments

Per un total de 81 experiments i agrupant dotze experiments a cada peça bruta, es calcula la quantitat de blocs d'acer necessaris per realitzar la sèrie d'experiments del plat de Ø20mm com:

$$\frac{162 \text{ experiments}}{12 \text{ experiments/bloc}} = 13.5 \rightarrow 14 \text{ blocs d'acer}$$

Donat que cada bloc mesura 100 mm de llargada, són necessaris 1.4 metres del passamà d'acer de secció 25x70 mm.

Plat de Ø63

En aquets cas s'ha decidit utilitzar blocs de dimensions més grans ja que les dimensions de l'eina són, també, majors. Concretament, els experiments s'han dut a

terme sobre blocs de 150 mm de llargada i secció aproximada de 35x70mm, com s'il·lustra a la Figura 3.9.

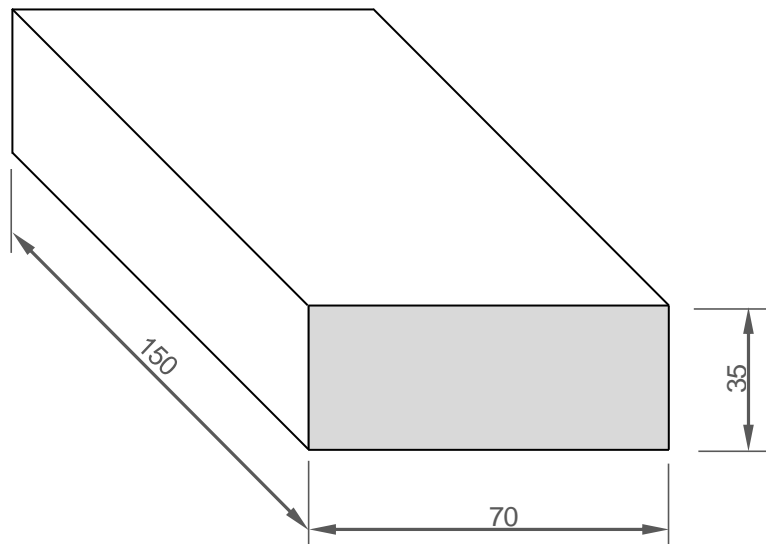


Figura 3.9. Croquis dels blocs utilitzats pels experiments amb el plat de Ø63

Com en la sèrie experimental del plat de Ø20mm, s'aplica una operació de desbast per eliminar la capa exterior que pot presentar una duresa significativament més elevada.

Pel que fa a la distribució dels experiments en el material, s'ha procedit seguint la mateixa idea que pel plat de Ø20mm. És a dir, s'han agrupat els planejaments en grups de tres on la profunditat de tall radial a_e varia d'un experiment al següent seguint la sèrie $80\%D, 50\%D, 25\%D, 80\%D, 50\%D, 25\%D, 80\%D...$

En aquest cas, però, donades les dimensions de l'eina, s'han realitzat tres experiments a cadascuna de les dos superfícies de treball de la peça bruta, tal com s'observa a la Figura 3.10.

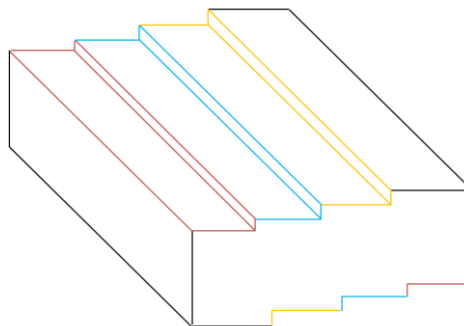


Figura 3.10. Croquis d'una peça mecanitzada amb el plat de Ø63

Els colors taronja, blau cel i vermell(Figura 3.10) representen, respectivament, experiments amb una a_e de 80%D, 50%D i 25%D.

Així, si a cada bloc s'hi realitzen sis experiments, el nombre de peces brutes necessàries per dur a terme la sèrie experimental del plat de Ø63mm es calcula com:

$$\frac{81 \text{ experiments}}{6 \text{ experiments/bloc}} = 13,5 \rightarrow 14 \text{ blocs d'acer}$$

Per tant, els metres de barra d'acer utilitzats són:

$$14 \text{ blocs} \cdot 150 \frac{\text{mm}}{\text{bloc}} = 2100 \text{ mm} = 2.1 \text{ metres}$$

3.1.5 Programació amb G-Code

El centre de mecanitzat Deckel Maho on es desenvolupen els experiments del present projecte és una màquina CNC. Això permet que la màquina operi de manera automàtica mitjançant codis d'execució que és capaç de llegir. El llenguatge de programació de control numèric amb què treballa el controlador FANUC de la nostra màquina s'anomena G-Code; aquest és, també, el més extensament utilitzat arreu del sector.

Tenint en compte la organització material dels experiments descrita en l'anterior apartat, es defineix, per cadascuna de les cares de treball, un programa amb el codi corresponent a la seqüència d'operacions a dur a terme a la cara en qüestió. En el cas de les dues sèries experimentals del plat de Ø20, cada programa correspon a sis experiments, és a dir, sis passades. Pel que fa al plat de Ø63, cada programa conté el codi d'execució dels tres experiments que es practiquen a cada cara de treball. Per obtenir aquests codis d'execució s'utilitza un programari de CAD/CAM, que permet un disseny virtual complet de les operacions desitjades i per a la màquina indicada. Posteriorment, un postprocessador genera el codi en llenguatge G-Code corresponent a aquest disseny.

Per tal de sincronitzar l'adquisició de dades amb l'operació de tall s'ha fet ús de la funció M1, parada opcional, que interromp l'execució del procés a l'espera que, manualment, es premi el botó per reprendre-la.

3.2 Experimentació

3.2.1 Tasques prèvies

Abans de dur a terme els experiments s'ha realitzat el serratge dels passamans calibrats per a l'obtenció de les peces de treball. S'ha decidit utilitzar passamà calibrat perquè, en tenir una superfície més ben acabada que el passamà brut, permet un millor emmordassament i s'assegura el màxim contacte possible entre la peça mecanitzada i la mordassa. Pel serratge dels blocs, mostrat a la Figura 3.11, s'ha utilitzat la serra de cinta horitzontal descrita a l'Apartat 2.1.1. s'han obtingut:

- 14 blocs de 100 mm de llarg a partir d'un passamà d'acer F1140 de secció 25x70 mm.
- 14 blocs de 150 mm de llarg a partir d'un passamà d'acer F1140 de secció 35x70 mm.

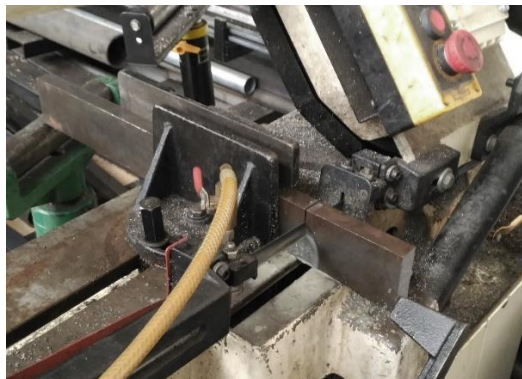


Figura 3.11. Serratge per a l'obtenció de les peces brutes

Les peces obtingudes es mostren a les Figures 3.12 i 3.13.



Figura 3.12. Blocs de 100x25x70 mm



Figura 3.13. Blocs de 150x25x70 mm

Seguidament, per tal d'eliminar les rebaves resultants del serratge i evitar possibles ferides en la manipulació, s'ha utilitzat la mola elèctrica, introduïda a l'apartat 2.1.3, per llimar els cantells de les peces brutes.

3.2.2 Realització dels experiments

Amb el centre de mecanitzat Deckel Maho degudament instrumentat, com s'indica a l'Apartat 2.3, i els utilatges de subjecció de la peça de treball col·locats, el procés experimental genèric és el següent:

1. Es col·loca la peça bruta a la mordassa, alçada amb paral·leles calibrades i colpejant-la suaument amb un martell de sorra perquè quedi ben fixada.
2. Es tanca la porta corredissa de la màquina i s'executa el programa amb el codi corresponent a la tirada d'experiments actual.
3. El capçal "agafa" un plat estàndard per eliminar la capa superficial i resta en estat de "parada programada" (funció M01).
4. S'executa la captura de dades als ordinadors a través dels diferents programaris: DaqView, LabVIEW i l'enregistrador d'àudio per capturar, respectivament, forces, acceleracions i soroll.
5. Es reprèn l'execució del programa prement el botó "cycle start" del controlador. Llavors, el capçal "agafa" el plat de treball i fa la passada corresponent a l'experiment actual.
6. Feta la passada, la màquina es para, romanent en estat de "parada programada", i s'aturen les captures de dades.
7. Els ordinadors processen la informació i generen arxius .mat, .lvm i .m4a respectivament per forces, acceleracions i àudio.
8. Si l'experiment actual ha estat el darrer del programa, es gira la peça -sempre i quan no s'hi hagi ja experimentat- o es reemplaça per una de verge, i es retorna al punt 1. Altrament, si no ha estat el darrer experiment del programa, es retorna al punt 4.

Seguint aquesta mecànica experimental s'han pogut realitzar els 243 experiments -81 pel plat de Ø63 i 162 pel plat de Ø20- sense destinar-hi un temps excessiu. Cal destacar que, en contra del que hom podria pensar, no són les tasques realitzades per la màquina les que requereixen més temps, sinó que són el processat de dades i la gestió d'arxius a l'ordinador.

Després de realitzar els experiments programats sobre cada banda de la peça bruta, s'ha marcat amb retolador permanent cada passada per identificar de quin experiment es tracta, tal com es pot observar a la Figura 3.14.



Figura 3.14. Identificació dels experiments a la peça

Posteriorment, les referències s'han gravat amb punxons sobre l'acer per major seguretat.

3.3 Tractament de dades i avaluació de la rugositat

En aquest apartat es descriu, d'una banda, el procediment emprat en la mesura de la rugositat superficial mitjançant el rugosímetre. Per altra banda, s'explica com s'han tractat les dades adquirides durant els experiments per extreure'n els valors que interessen.

3.3.1 Mesura de la rugositat

La mesura de la rugositat superficial s'ha dut a terme amb el rugosímetre *Mitutoyo SurfTest SV-2000*, instrument introduït a l'Apartat 2.3.6 que, a través del programa informàtic *SurfPak*, permet obtenir una avaluació precisa d'aquesta característica.

Per quantificar la rugositat superficial s'han extret dos paràmetres representatius: Ra i Rq . En relació a la Figura 3.15, Ra és la mitjana aritmètica de les desviacions verticals (y_i) i Rq és la mitjana quadràtica de les esmentades desviacions.

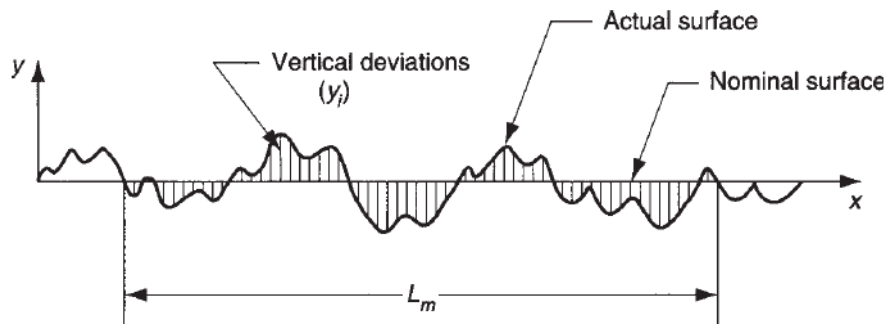


Figura 3.15. Elements característics del perfil de rugositat

D'aquests dos paràmetres Ra és el més extensament utilitzat arreu del planeta per motius històrics, ja que els primers rugosímetres només podien mesurar aquest valor.

Abans de procedir amb el seguit de mesures s'ha calibrat l'aparell i s'ha escollit el valor de *cutoff* λ_c seguint el procediment descrit a l'apartat 2.3.6. El *cutoff* s'ha establert en 0.8 mm i, per tant, la longitud d'avaluació és de 4 mm segons la Taula 2.14.

De cada experiment s'han fet tres mesures a diferents alçades longitudinals de la franja mecanitzada i s'ha pres el valor mig. La Figura 3.16 mostra el rugosímetre efectuant una avaluació de la rugositat superficial.



Figura 3.16. Rugosímetre avaluant la rugositat superficial

Un altre mètode per indicar la rugositat superficial consisteix en classificar les mostres en diferents categories en funció del seu valor Ra . Aquesta alternativa classificatòria

es pot trobar a la ISO 1302:1992. Les categories van de l'1 al 12, on 1 representa una rugositat molt petita i 12 una rugositat molt elevada, com indica la Taula 3.17.

Roughness value R_a		Roughness grade numbers (given in the previous edition of ISO 1302)
μm	μin	
50	2 000	N 12
25	1 000	N 11
12,5	500	N 10
6,3	250	N 9
3,2	125	N 8
1,6	63	N 7
0,8	32	N 6
0,4	16	N 5
0,2	8	N 4
0,1	4	N 3
0,05	2	N 2
0,025	1	N 1

Taula 3.16. Categories de rugositat en funció de R_a

Els valors R_a i R_q mesurats amb el rugosímetre es recullen a l'ANNEX C.

3.3.2 Extracció de forces

Les forces mesurades per la taula dinamomètrica s'han capturat gràcies al sistema DAQ que l'acompanya i s'han emmagatzemat a l'ordinador en fitxers *.mat*. Cada experiment es captura en un fitxer *.mat* i consta d'una taula amb 16 columnes, corresponents als 16 paràmetres mesurats i calculats per la taula dinamomètrica (Figura 2.14). Pel que fa a les files, són el conjunt de captures registrades al llarg de l'experiment. El total de captures depèn de la freqüència de mostreig i del temps que passa entre l'engegada i l'aturada de l'adquisició. En aquest cas, les dades han estat capturades amb una freqüència de mostreig de 12.048 Hz, per la qual cosa, una mostreig de 10 segons de duració donaria lloc a una taula amb 120.480 registres.

Del global de dades mostrejades, tan sols interessa recollir la suma de forces en X, Y i Z en l'interval de temps que comprèn el planejament en fase de treball estable, és a dir, excloent l'entrada i la sortida de l'eina, tal com mostra la Figura 3.17.

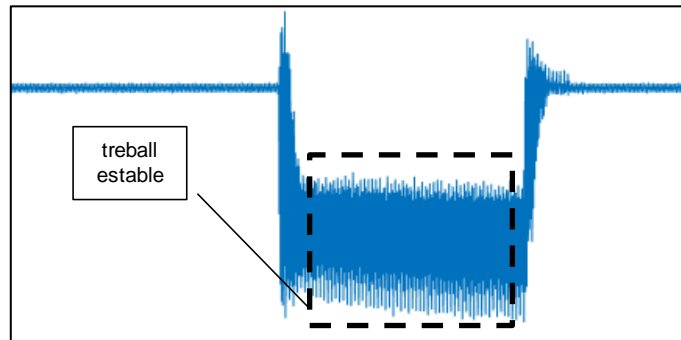


Figura 3.17. Senyal del mostreig d'una component

De la fase estable es vol extreure, per cadascuna de les tres components de força, el valor eficaç (en N) i, addicionalment, és interessant generar-ne l'espectre de freqüències per identificar fenòmens com el *chatter*².

Per poder realitzar aquestes funcions s'ha desenvolupat una petita aplicació amb *GUI*(Graphical User Interface) de *Matlab* que permet visualitzar els tres senyals de forces(SumFx, SumFy i SumFz), acotar l'interval desitjat, avaluar el valor eficaç del senyal acotat i visualitzar-ne l'espectre de freqüències.

La GUI que ofereix el *Matlab* és una eina còmode i pràctica perquè no requereix altes nocions de programació per tal d'elaborar una aplicació útil; a mesura que l'usuari dissenya la interfície, el codi que hi ha darrere l'aplicació es va generant de manera automàtica(ANNEX D).

Sense aprofundir en els detalls de l'aplicació, el funcionament i la metodologia seguida s'indiquen tot seguit:

1. Amb la *GUI* executada(Figura 3.18), es clica el botó "Push Button" de la cantonada superior esquerra i s'escull el fitxer .mat que conté les dades.
2. Mitjançant el punter en mode *Data Cursor* s'examina el senyal per identificar l'interval de treball estable.
3. S'entra l'interval a les parelles de caselles de la dreta i s'acota el senyal clicant el botó "Push Button" situat sota de les esmentades caselles, el qual executa el càlcul dels valors eficaços i genera l'espectre mitjançant la transformada de Fourier³.

² Vibracions no desitjades produïdes a conseqüència de la interacció eina-material. (veure Apartat 4.6)

³ Eina matemàtica que descompon un senyal en les freqüències que el constitueixen.

4. S'anoten els valors eficaços de cada component, que apareixen damunt de cada senyal i s'analitza l'espectre de freqüències, tot anotant les freqüències més significatives.

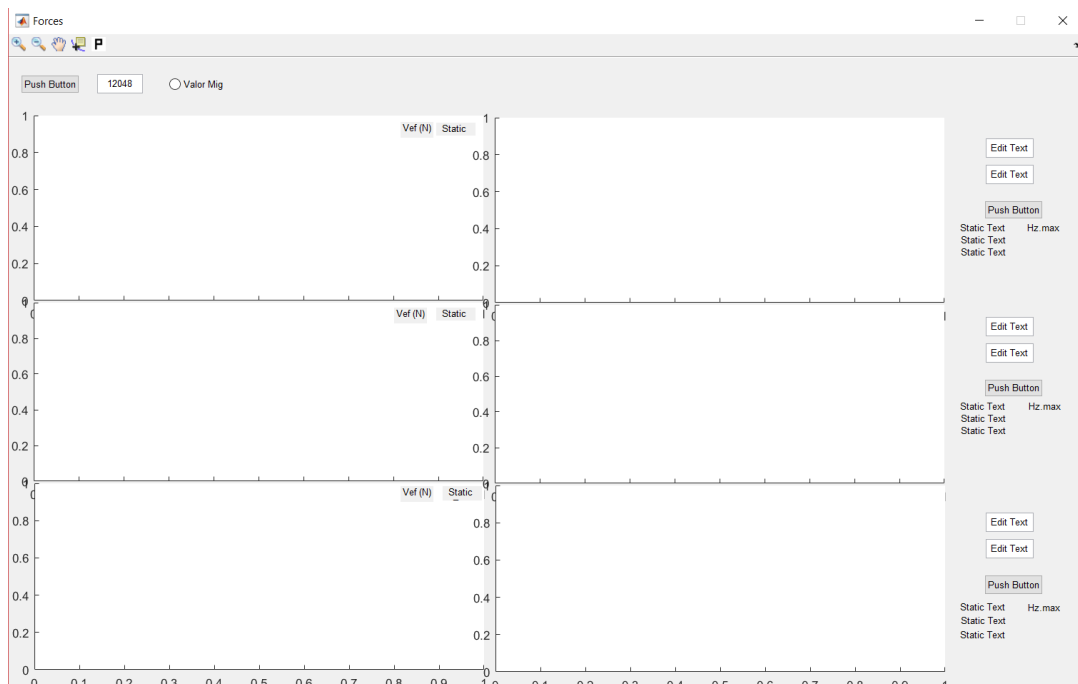


Figura 3.18. Interfície de l'aplicació GUI per forces sense fitxer carregat

L'aspecte que mostra l'aplicació després d'acotar el senyal es mostra a la Figura 3.19.

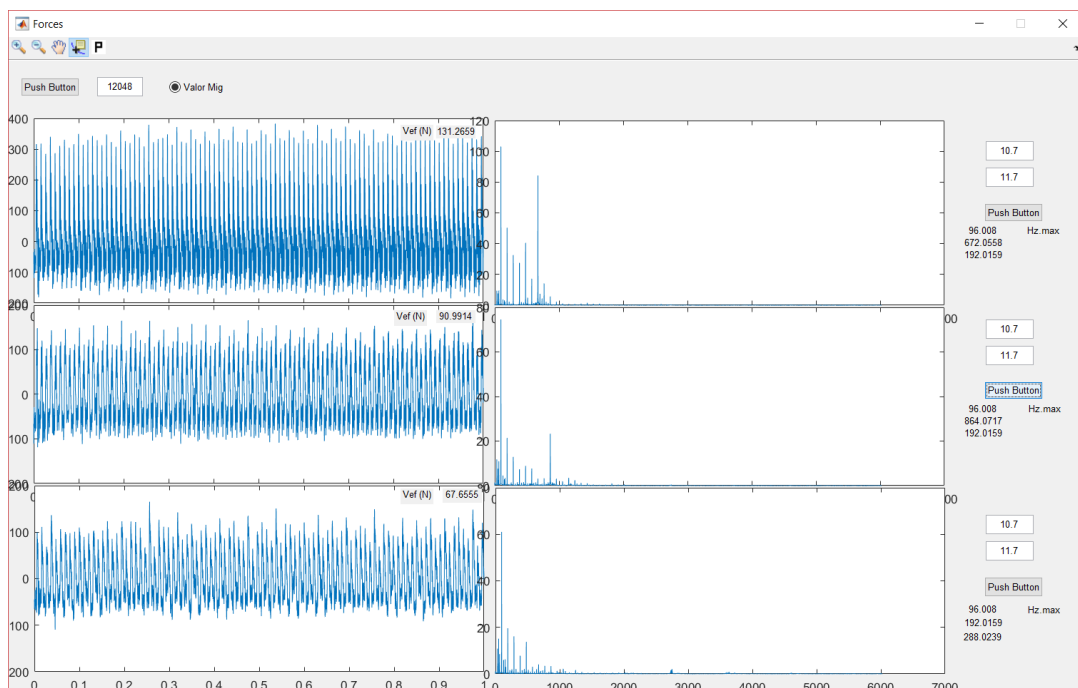


Figura 3.19. Interfície de l'aplicació per forces amb el senyal acotat

Com es pot veure a la Figura 3.19, cada espectre està acompanyat, a la seva dreta, per un llistat de freqüències que, en ordre descendent, corresponen als tres valors màxims d'amplitud.

Per cada experiment s'han anotat els valors eficaços en X, Y i Z, així com les freqüències amb més gran amplitud. Així, s'ha anat configurant una taula de resultats per cada plat de fresar, amb els valors dels 81 experiments.

3.3.3 Extracció d'acceleracions

En aquest cas, les acceleracions mesurades pels sensors piezoelèctrics s'han capturat mitjançant el sistema DAQ portàtil i, a través d'un programa en LabVIEW, s'ha aplicat un filtre passa baix per tal d'eliminar els valors continus del senyal. Cada experiment s'ha emmagatzemat a l'ordinador en un fitxer *.lvm*.

De manera semblant a les forces, s'ha desenvolupat una aplicació GUI de Matlab(ANNEX D) per retallar els senyals de les acceleracions en X i en Y i obtenir-ne tan els valors eficaços així com un espectre de freqüències. La interfície d'aquesta aplicació es mostra tot seguit(Figura 3.19).

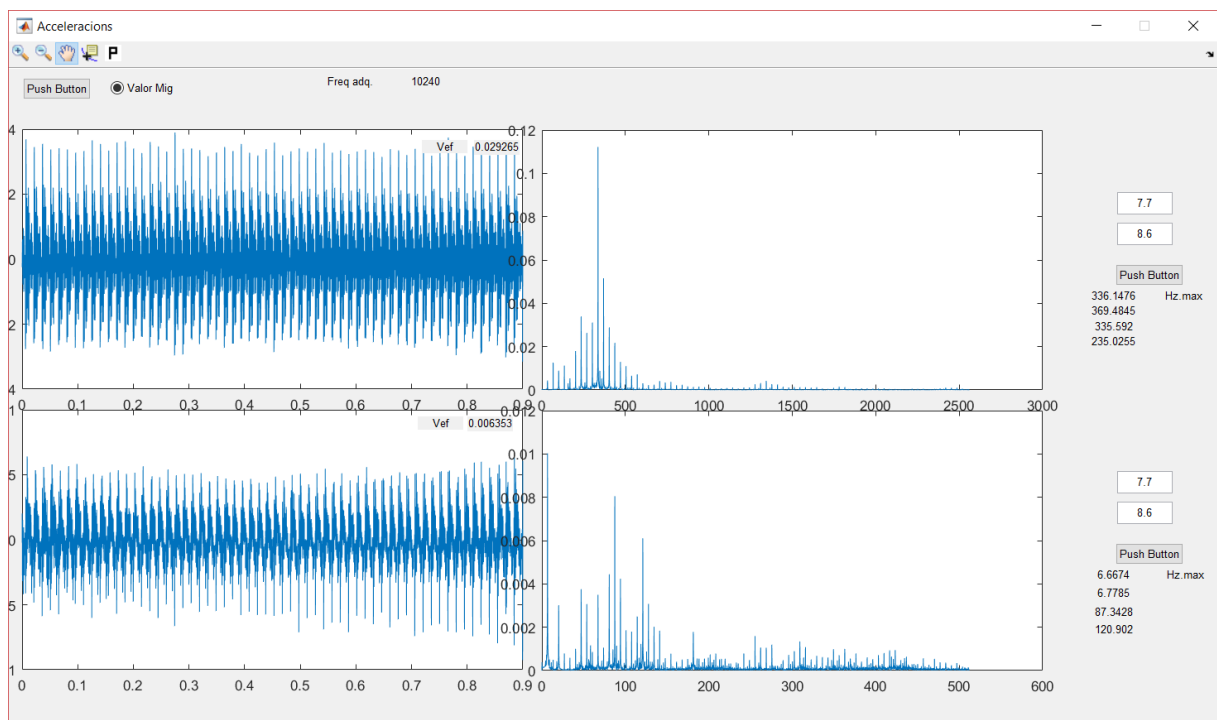


Figura 3.20. Aplicació GUI per extreure valors d'acceleracions

El funcionament és el mateix que el descrit en l'anterior apartat per a les forces.

De cada experiment s'han extret els valors eficaços dels senyals en X i Y, i les freqüències amb major pic.

3.3.4 Extracció del soroll

Tal com s'ha esmentat a l'apartat 2.3.3 a dalt, el soroll generat durant cada experiment s'ha enregistrat en format “.m4a” mitjançant l'enregistrador de Windows. Per tal de poder observar aquests senyals i extreure'n els valors significatius, s'ha dissenyat, novament, una aplicació *GUI* de *Matlab* (ANNEX D) que permet acotar el senyal a l'interval de temps desitjat. Així, s'obtenen els valors eficaços i les freqüències que presenten els nivells de so més elevats. Les Figures 3.21 i 3.22 mostren, respectivament, l'aspecte de la interfície desenvolupada amb un senyal de so abans i després de ser acotat.

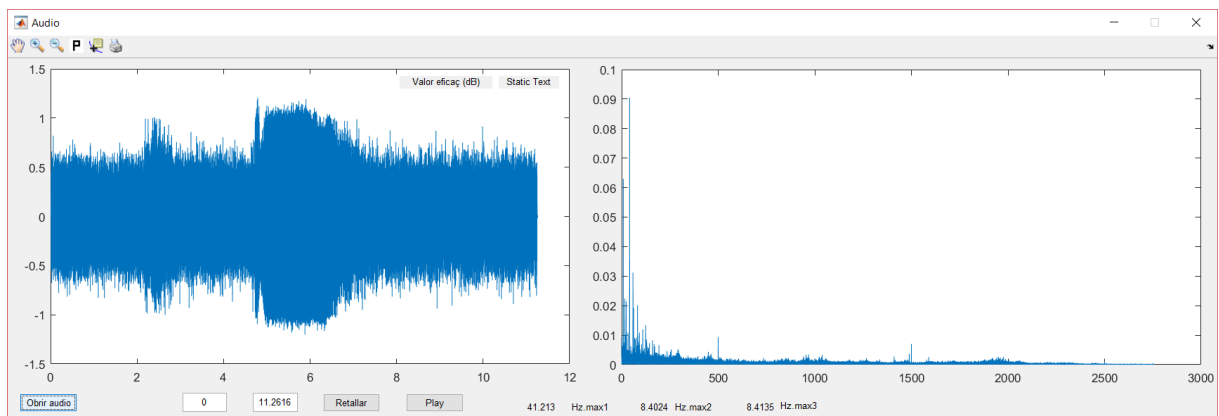


Figura 3.21. Senyal acústic abans d'acotar

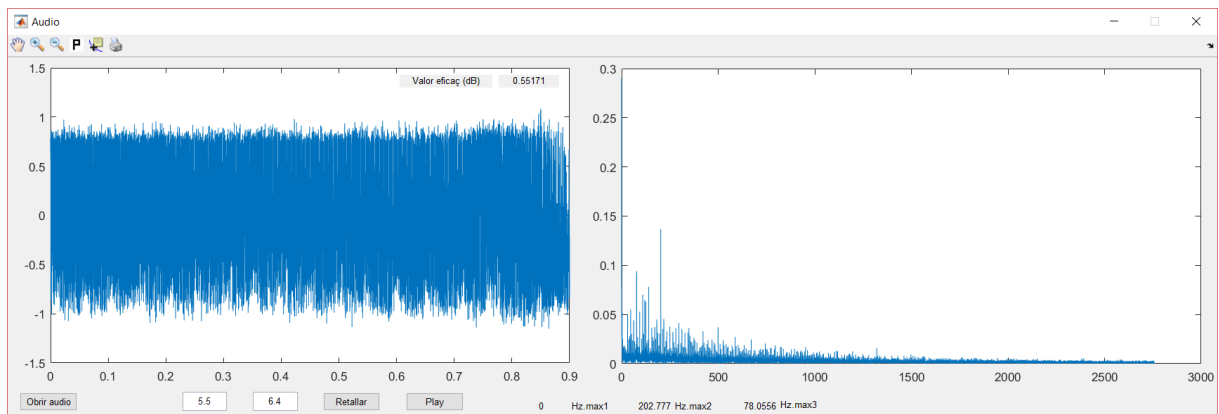


Figura 3.22. Senyal acústic acotat

El procediment per analitzar els senyals és semblant als casos de forces i acceleracions. Pas a pas, consisteix en:

1. Carregar l'arxiu de so mitjançant el botó "Obrir àudio".
2. Acotar el senyal a la zona estable de la passada establint l'inici i el final d'aquest interval.
3. En clicar "Retallar" s'executen un seguit de càlculs interns que proporcionen el valor eficaç del tram acotat, actualitzen l'espectre de freqüències i proporcionen els tres pics màxims d'aquest.

La interfície proposada també ofereix la possibilitat d'escoltar l'enregistrament de l'experiment per facilitar la detecció de la zona estable.

En l'anàlisi del soroll enregistrat, és important tenir en compte que no tot el soroll capturat pel micròfon és conseqüència directa de l'operació de tall. Si bé s'ha procurat aïllar el sistema experimental de soroll exterior, el taller on s'han realitzat els experiments presenta, inevitablement, cert soroll ambiental degut a les màquines, les instal·lacions elèctriques, l'activitat humana, etc. A més, el propi centre de mecanitzat genera, també, un soroll constant a conseqüència dels circuits pneumàtics, elèctrics i hidràulics que integra. Aquest soroll ambient s'ha enregistrat amb una gravació lliure d'experiments per tal de detectar amb quines freqüències es relaciona i, així, poder ignorar-les en l'anàlisi de l'espectre de freqüències de cada experiment.

Tal com s'observa a la Figura 3.23, l'espectre de freqüències presenta dos pics destacables: a 41.13 Hz i 500 Hz. Aquestes són les freqüències que s'identifiquen al soroll ambiental.

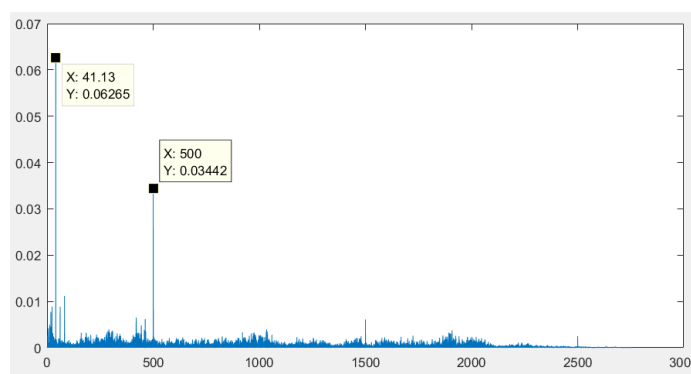


Figura 3.23. Espectre de freqüències del senyal de soroll ambiental

4 ANÀLISI DE DADES

Amb l'experimentació realitzada i totes les variables capturades o mesurades, el primer pas és dur a terme un estudi d'aquestes i, així, observar el seu comportament en el procés, identificar relacions rellevants entre variables i simplificar, si és possible, el futur model predictiu.

4.1 Relació de variables

Agrupades d'acord amb l'esquema de la Figura 1.4, el conjunt de variables de les que es disposa per a la recerca i el desenvolupament del sistema de predicció són:

- Propietats de l'eina
 - ***D*** diàmetre de l'eina
 - ***n*** nombre de dents
 - ***r*** radi de tall de la dent
- Paràmetres de procés
 - ***h*** alçada de treball de l'eina
 - ***ap*** profunditat axial de tall
 - ***S*** velocitat del fusell
 - ***F*** velocitat d'avanç de l'eina
 - ***ae*** profunditat radial de tall
- Dades capturades
 - Forces en X, Y i Z (freqüències i valors eficaços)
 - ***fx1*** primera freqüència amb major amplitud en X
 - ***fx2*** segona freqüència amb major amplitud en X
 - ***fy1*** primera freqüència amb major amplitud en Y
 - ***fy2*** segona freqüència amb major amplitud en Y
 - ***fz1*** primera freqüència amb major amplitud en Z
 - ***fz2*** segona freqüència amb major amplitud en Z
 - ***vx_f*** valor eficaç del senyal en X
 - ***vy_f*** valor eficaç del senyal en Y
 - ***vz_f*** valor eficaç del senyal en Z
 - Acceleracions en X i Y (freqüències i valors eficaços)

- **ax1** primera freqüència amb major amplitud en X
- **ax2** segona freqüència amb major amplitud en X
- **ay1** primera freqüència amb major amplitud en Y
- **ay2** segona freqüència amb major amplitud en Y
- **vxa** valor eficaç del senyal en X
- **vya** valor eficaç del senyal en Y
- Soroll del procés
 - **fs1** primera freqüència amb major amplitud
 - **fs2** segona freqüència amb major amplitud
 - **vs** valor eficaç del senyal d'àudio

Aquestes anteriors conformen el conjunt de variables independents o *inputs* del procés, mentre que els paràmetres de rugositat extrets amb el rugosímetre conformen els *outputs* o variables dependents. Aquestes són:

- **Ra** rugositat en mitjana aritmètica
- **Rq** rugositat en mitjana quadràtica
- **Rnum** classe de rugositat

Donada aquesta quantitat de variables és interessant realitzar, previ al desenvolupament del sistema de predicció, un estudi correlacional a fi d'identificar quina influència presenten les diverses variables independents sobre la rugositat mesurada. D'aquesta manera se'n podrien descartar algunes i simplificar el model a dissenyar.

4.2 Resum de resultats

En aquest apartat es presenten breument les rugositats resultants de cada experiment, mitjançant el paràmetre *Ra* i agrupades segons la seva sèrie experimental, i s'examinen els possibles comportaments rellevants en la seva distribució.

Tal com es pot comprovar a la Figura 4.1, considerant el global de l'experimentació, es poden arribar a observar diferències de fins a, aproximadament, $3.5\mu\text{m}$ entre diferents valors de *Ra*.

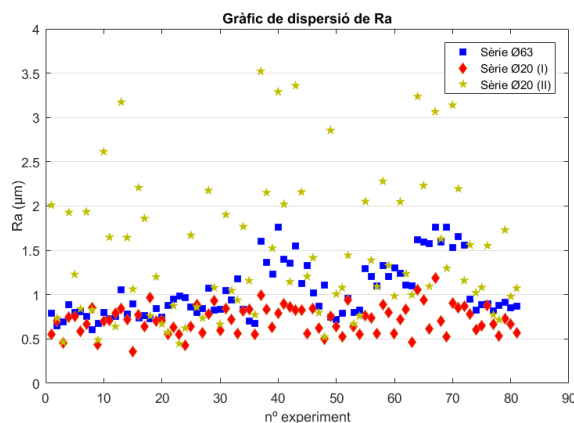


Figura 4.1. Gràfic de dispersió de Ra superposada.

Tanmateix, observant cada sèrie per separat, s'identifica una clara diferència pel que fa al grau de dispersió propi de cada sèrie experimental. Aquest fet es visualitza de manera més evident a la Figura 4.2.

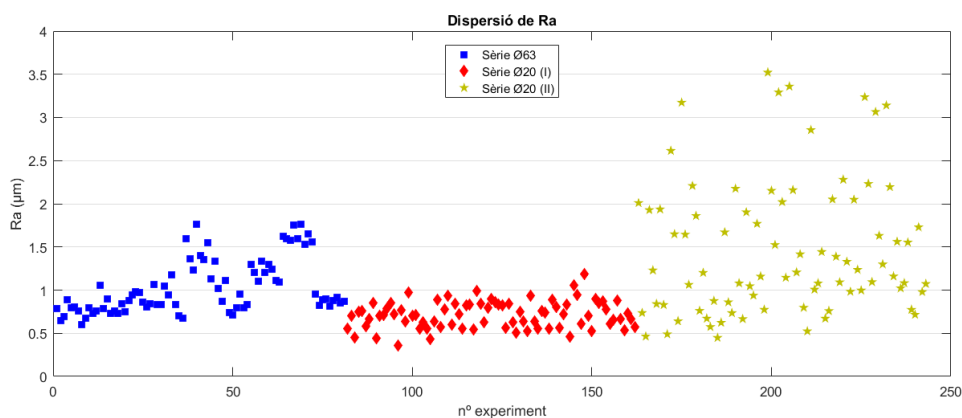


Figura 4.2. Gràfic de dispersió de Ra

Si bé la sèrie del plat de Ø63 i, en especial, la primera sèrie del plat de Ø20 han donat lloc a uns valors de rugositat clarament concentrats, la segona sèrie del plat de Ø20 mostra una dispersió molt més notable. La Taula 4.1 confirma aquestes diferències a partir de la desviació estàndard (σ), mesura estadística que quantifica la dispersió d'una mostra respecte la mitjana.

Sèrie experimental	σ
Plat de Ø63	0.31
Plat de Ø20 (I)	0.16
Plat de Ø20 (II)	0.78

Taula 4.1. Desviació estàndard de les mostres de Ra

La distribució de les categories de rugositat (*Rnum*) és una evidència més del contrast que existeix, entre les diferents sèries experimentals, en la dispersió de resultats. La Figura 4.3 detalla l'esmentada distribució per classes.

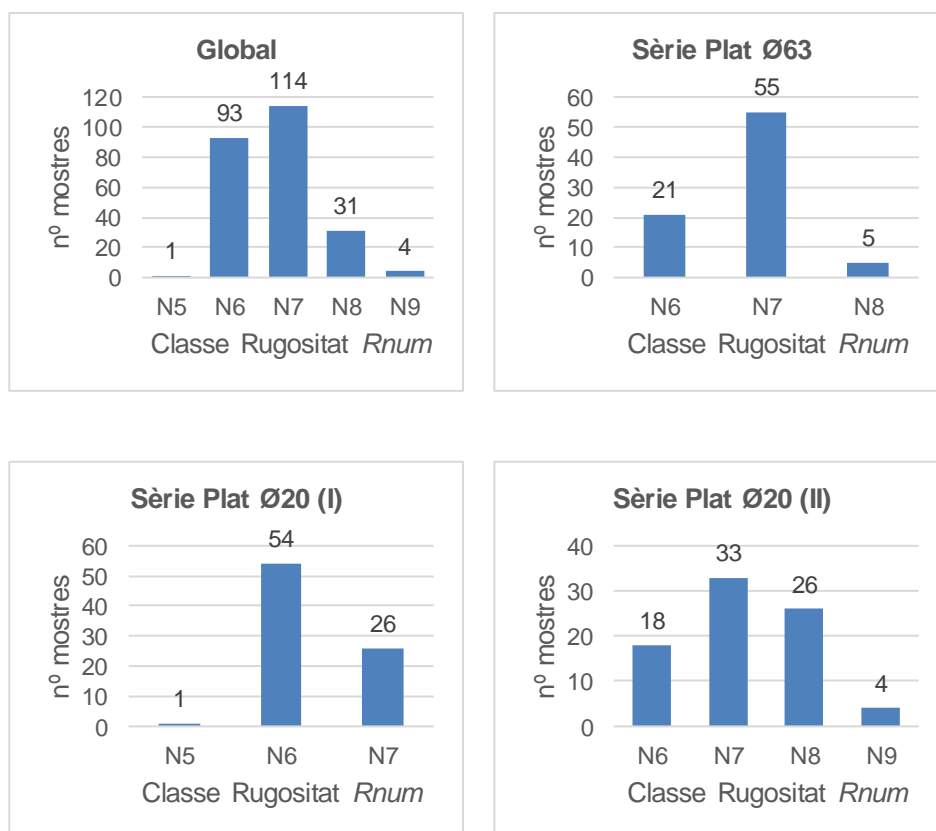


Figura 4.3. Distribució de *Rnum* global i individualment

La Figura 4.3 exposa una clara concentració de rugositats en les categories N7 i N6, respectivament, per la sèrie del plat de Ø63 i la primera sèrie del plat de Ø20. D'altra banda, es comprova l'heterogeneïtat de rugositats generades en la segona sèrie experimental del plat de Ø20. Pel que fa al conjunt global de l'experimentació, les categories N7 i N6 contenen la gran majoria de resultats.

Malgrat no poder assegurar-ho fermament, aquesta gran diferència en la distribució dels valors *Ra* entre ambdues sèries experimentals del plat de Ø20, seria un reflex de les diferències existents, entre ambdues sèries, en la configuració dels experiments, és a dir, les condicions de treball utilitzades en una i altra sèrie. Aquestes es resumeixen, a tall de recordatori, a la Taula 4.2.

Paràmetre		Sèrie Ø20 (I)	Sèrie Ø20 (II)
	ap [mm]	0.2 / 0.4 / 0.6	0.1 / 0.2 / 0.3
	S [rpm]	1344 / 1920 / 2496	2226 / 3180 / 4134
	F [mm/min]	3024 / 4320 / 5616	1001 / 1430 / 1859
	ae [mm]	5 / 10 / 20	5 / 10 / 20
	h [mm]	67.42	55.46

Taula 4.2. Comparativa de les condicions de treball (Sèries del plat Ø20)

Destaquen, per damunt la resta, dos paràmetres que presenten diferències considerables entre una sèrie i l'altra: la velocitat del fusell, S , i la velocitat d'avanç, F . Pel que fa al primer, pren valors notòriament més alts en la segona sèrie d'experiments. En canvi, les velocitat d'avanç amb què s'ha treballat en la segona sèrie són, en relació a la primera, molt més reduïdes. Així doncs, s'entendria, en tant que s'observen valors Ra més grans a la segona sèrie experimental, que la visible diferència en el grau de dispersió d'una i altra sèrie es deu o bé al salt de valors del paràmetre S o bé a la diferència en F .

Pel que fa a ap i a l'alçada de treball, h , les diferències no es consideren prou rellevants com per donar lloc al contrast de desviació estàndard.

A banda del contrast evident, entre les sèries experimentals, en el grau de dispersió del paràmetre Ra , també s'observa, atenent a la Figura 4.2, un altre fenomen destacable: l'agrupació, en tres grups clarament diferenciats, de la mostra de Ra corresponent al tercer terç dels experiments amb el plat de Ø63, és a dir, corresponent a un ap de 0.16667 mm. La Figura 4.4 mostra amb més claredat aquesta circumstància.

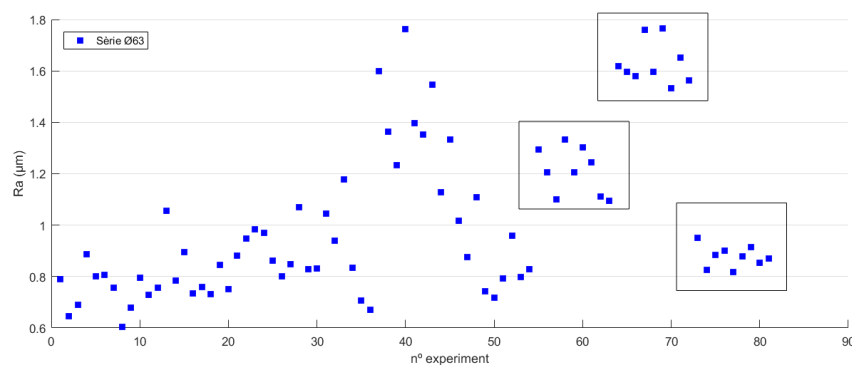


Figura 4.4. Distribució de Ra pel plat de Ø63

Cadascun d'aquests tres grups, indicats amb requadres a la Figura 4.4, conté 9 mostres de Ra i es correspon a un dels tres diferents valors de S amb els que s'ha treballat en la sèrie d'experiments del plat de Ø63. Seguint l'eix horitzontal, és a dir, l'ordre cronològic de l'experimentació, el primer grup correspon a $S = 1340$ rpm, el segon a $S = 938$ rpm i el tercer a $S = 1742$ rpm. A la Taula 4.3 es relacionen cadascun d'aquests aquests nivells amb la mitjana de Ra de cada grup.

$ap = 0.16667$ mm	
S [rpm]	Mitjana Ra [μ m]
1340	1.211
938	1.629
1742	0.878

Taula 4.3. Mitjana de Ra vs S ($ae = 0.16667$) pel plat Ø63

Parant atenció a la Taula 4.3 s'insinua una certa dependència inversa entre S i Ra . A través del gràfic de dispersió de la Figura 4.5 es fa evident la forta relació entre S i Ra quan es treballa amb una profunditat axial de tall de 0.16667 mm.

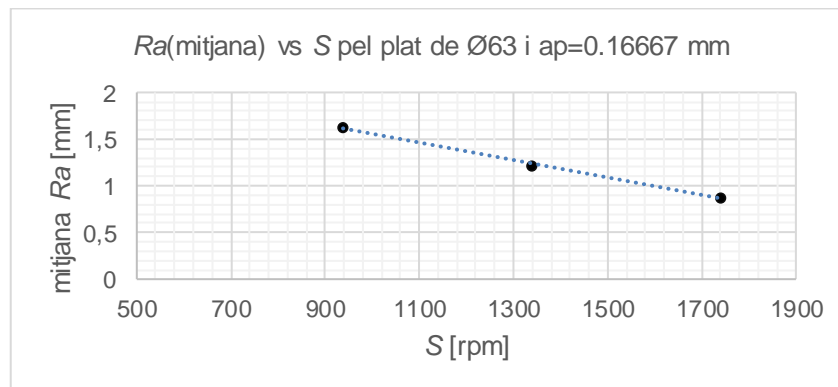


Figura 4.5. Gràfic de dispersió S vs Ra (Ø63, $ap = 0.16667$ mm)

Retornant a la Figura 4.4, el comportament observat en el tercer terç de la sèrie experimental, on les mostres de Ra s'agrupen en tres visibles grups segons la velocitat del fusell, S , de la operació, també es pot identificar, malgrat menys nítidament, en el segon terç de la sèrie, al llarg del qual el valor ap és 0.3333 i S pren els mateixos valors -i en el mateix ordre- que en el tercer terç. En aquest interval els punts descriuen una corba similar a la del tercer terç, denotant una relació S - Ra equiparable, de manera aproximada, a la relació identificada en aquest últim tram. Per tant, es pot concloure que, pel plat de Ø63, a menys ap més s'estreny la relació directa entre S i Ra .

D'altra banda, i sense abandonar la sèrie del plat de Ø63, cal destacar que el primer terç d'aquest conjunt d'experiments, corresponent a una ap de 0.5 mm, concentra els valors de Ra en l'interval $[0.605, 1.056]$ μm , és a dir, la diferència màxima és de 0.451 μm . Això contrasta amb la resta de la sèrie experimental, on la cota superior s'enfila a 1.765 μm i la inferior es manté rondant els 0.6 μm . Així doncs, pel plat de Ø63, una ap més gran resulta en uns valors Ra més petits i acotats.

4.3 Anàlisi correlacional dels paràmetres de tall

Aquest apartat es centra en l'examinació de les dades, intentant establir possibles relacions entre els paràmetres de procés - ap , S , F i ae - i la rugositat superficial mesurada amb el paràmetre Ra .

Com s'ha explicat al primer capítol de la present memòria, la generació de la rugositat superficial és una qüestió difícilment controlable per la quantitat de factors que hi intervenen. Així doncs, no s'espera obtenir coeficients de correlació propers a 1 degut a aquesta diversitat d'influències que hi participen. Tanmateix, un petit estudi correlacional permetrà identificar si existeix alguna variable que hi tingui una influència més destacada que la resta.

4.3.1 Profunditat axial de tall ap

Com s'observa a la Figura 4.6, amb l'increment de la profunditat de tall axial, ap , hi ha una visible tendència a la baixa de Ra en els quatre gràfics de dispersió. Això fa pensar que, probablement, existeixi una certa dependència inversa entre ap i Ra .

D'altra banda, seguint a la Figura 4.6, el coeficient de correlació R^2 és insignificant en les sèries experimentals corresponents al plat de Ø20, mentre que en la sèrie del plat de Ø63 destaca amb un valor de 0.3201, que indica una influència més notable en aquest conjunt d'experiments.

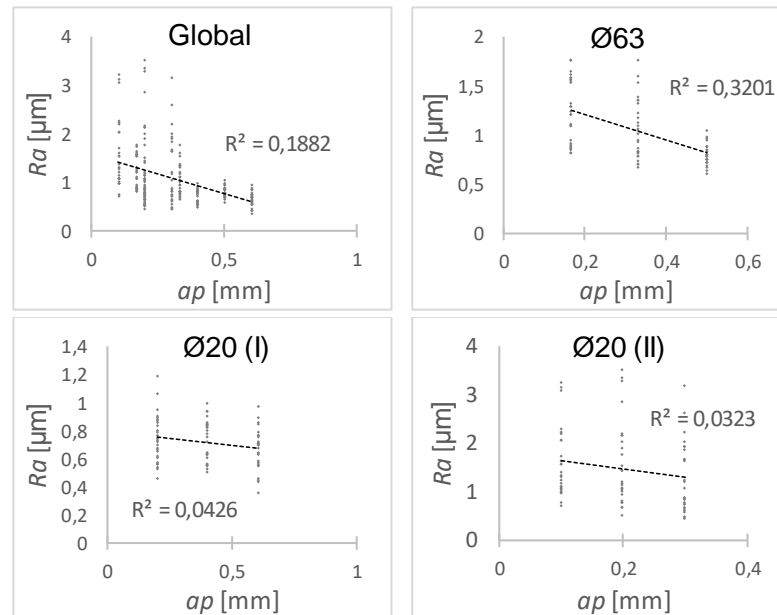


Figura 4.6. Gràfics de dispersió ap vs Ra

A la Figura 4.7, on es mostra la mitjana de Ra per cadascun dels tres nivells de ap de la sèrie Ø63, es detecta amb més claredat la tendència esmentada anteriorment.

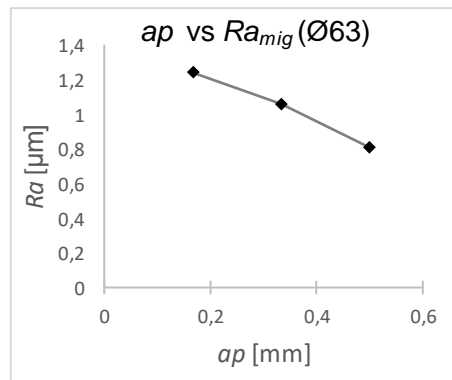


Figura 4.7. Mitjana de Ra respecte ap pel plat de Ø63

4.3.2 Velocitat del fusell S

Pel que fa a la relació S - Ra , no es distingeix cap mena de dependència analitzant el global de l'experimentació, tal com es pot veure a la Figura 4.8. Tanmateix, en l'anàlisi particular de cada sèrie sí que es detecta una certa influència de la velocitat del fusell, S , sobre Ra . En els tres casos la línia de tendència indica menys rugositat superficial generada a més alta velocitat del fusell.

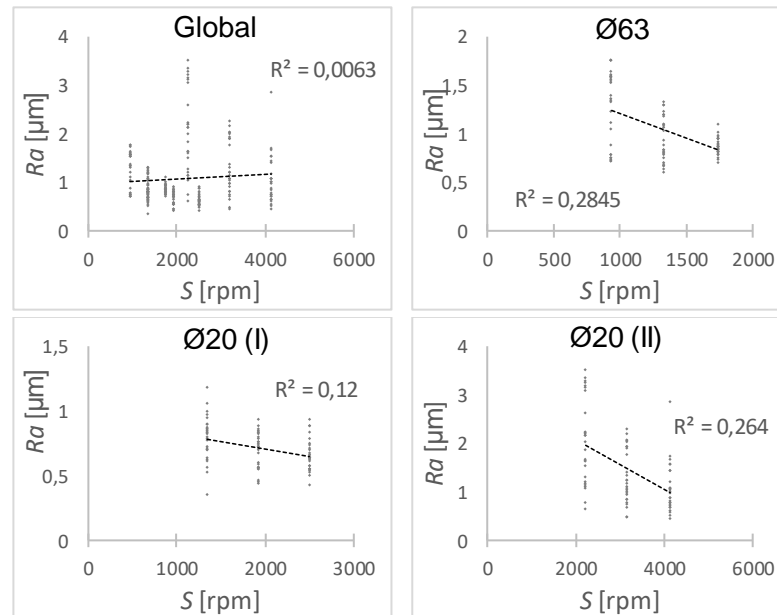


Figura 4.8. Gràfics de dispersió S vs Ra

4.3.1 Velocitat d'avanç F

Clarament, com es pot comprovar a la Figura 4.9 no es pot associar cap relació entre la velocitat d'avanç de l'eina, F , i la rugositat superficial, Ra . Els coeficients de correlació són pràcticament zero i tampoc s'observa cap comportament destacable en els gràfics de dispersió, com ara concentracions de mostres. Els coeficients de correlació R^2 són pràcticament zero.

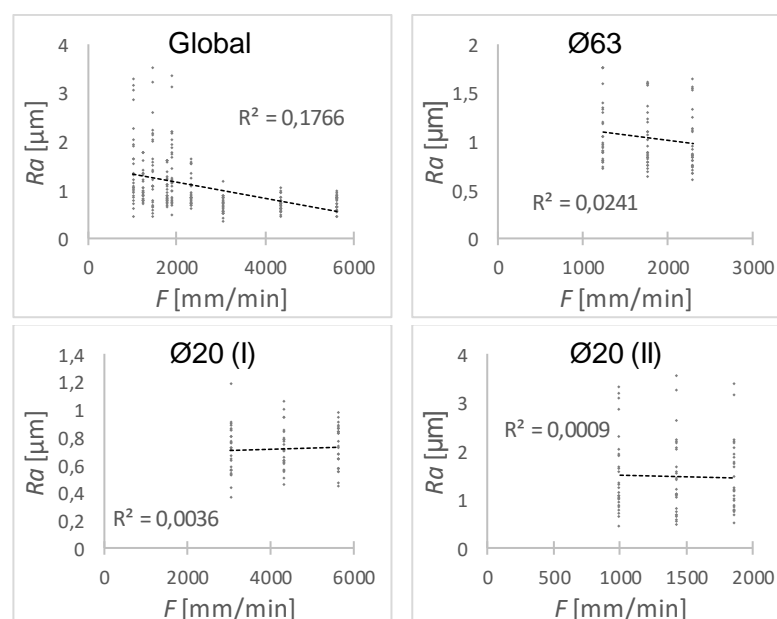


Figura 4.9. Gràfics de dispersió F vs Ra

4.3.2 Profunditat radial de tall ae

En aquest cas la resposta de la rugositat superficial, Ra , a la variació de la profunditat radial de tall, ae , ha estat diferent per cadascuna de les tres sèries experimentals, tal com es pot comprovar a la Figura 4.10. Si bé en la sèrie del plat de Ø63 la dependència es pot considerar totalment inexistente, en les sèries del plat de Ø20 s'identifica una tendència a obtenir majors valors de rugositat a més profunditat radial de tall. És a dir, quant més ample del plat s'ha utilitzat en la passada d'acabat més gran ha estat la rugositat superficial generada.

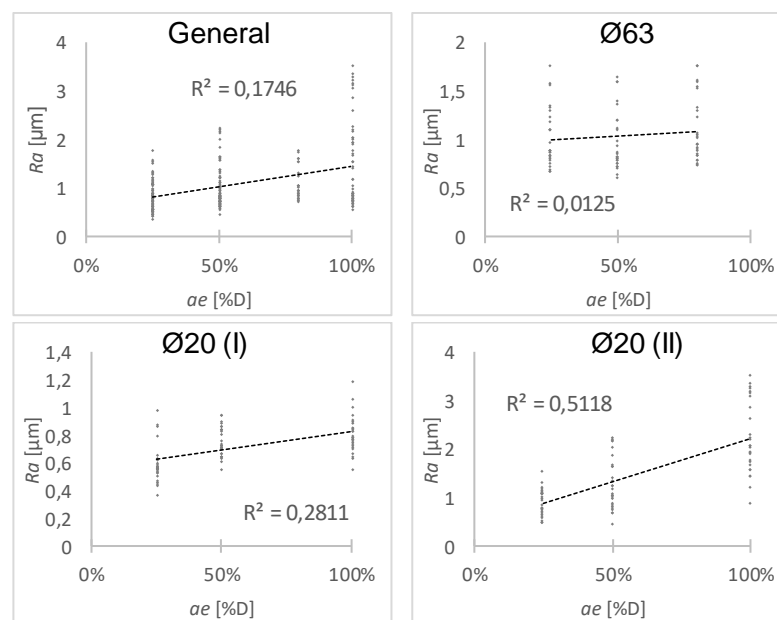


Figura 4.10. Gràfics de dispersió ae vs Ra

Analitzant particularment la relació ae - Ra en la segona sèrie experimental del plat de Ø20, s'observa un coeficient de correlació de 0.5118, el més gran vist en l'estudi amb diferència. La Figura 4.11 corrobora la dependència explicada.

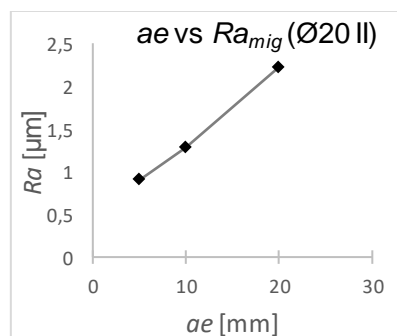


Figura 4.11. Gràfic de dispersió ae vs Ra_{mig}

Una possible explicació d'aquesta circumstància seria la reducció d'estabilitat, o augment de les vibracions, a conseqüència de l'increment de forces generades en voler arrencar més quantitat de material.

4.4 Forces

Per analitzar el comportament de les forces mesurades en l'experimentació, s'ha pres, com a mostra, les dades de la sèrie experimental del plat de Ø63. Com es pot observar a la Figura 4.12, en primer lloc, X i Z comparteixen la mateixa corba mitjana, mentre que la corba de la component Y es mou diferenciadament per sota. D'altra banda, si es divideix l'eix d'abscisses en tres trams iguals, corresponents als tres nivells de profunditat axial de tall ap , es detecta clarament un esglaonament decreixent. Aquesta circumstància és lògica ja que el primer terç es correspon a una ap de 0.5 mm, el segon de 0.3333 mm i el tercer de 0.16667 mm. És a dir, la quantitat de material que arranca l'eina és menor en cada terç i, per tant, les forces també.

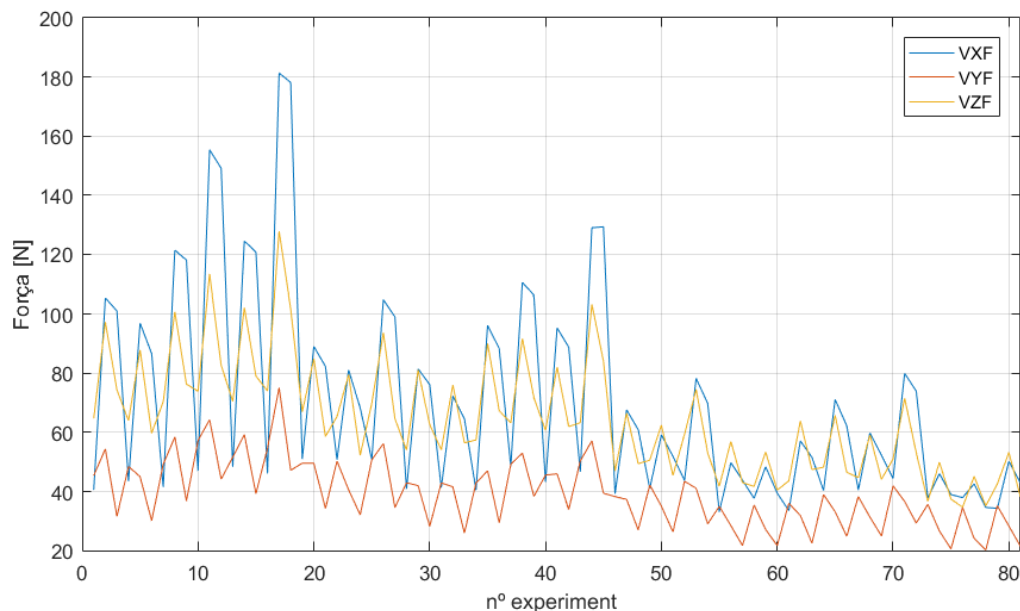


Figura 4.12. Evolució de les tres components de força en valor eficaç (Ø63)

La Figura 4.12 també permet distingir un patró que es repeteix al llarg d'aquesta sèrie experimental i que es fa clarament visible a la corba de la component X. Com es pot observar des del primer punt, o primer experiment, la seqüència repetida està formada per tres mostres i, en la seva proporció, segueix els següent passos: parteix d'una vall (primera mostra), fa un gran salt incremental (segona mostra), decreix subtilment

(tercera mostra) i torna a disminuir notòriament formant una altra vall (inici de la següent seqüència). Aquest fet està en directa sincronia amb la profunditat axial de tall, ae , ja que aquesta segueix, també, una seqüència cíclica que engloba tres experiments (veure ANNEX A). Concretament, els nivells respectius de ae són: 80%D, 50%D i 25%D. Això indica que, pel que fa a la component X, les forces generades o mesurades quan s'utilitza el plat en un 80% són molt més reduïdes en relació a les obtingudes amb un 50 i 25% de diàmetre de treball.

De manera no tan evident, es detecta un altre patró cada nou mostres, on el tercer terç pren els valors més elevats, seguit pel primer i, en darrer lloc, el segon terç. Això, tenint en compte la planificació del experiments(veure ANNEX A), es relaciona amb la velocitat d'avanç, F , que altera el seu valor cada tres experiments seguint la seqüència [1770,1239,2301]. Aquest fet indica, doncs, que a més velocitat d'avanç, majors són les forces generades en el procés de tall.

De la mateixa manera, s'observa que dins de cada terç de la sèrie experimental es poden distingir tres trams, corresponents als tres diferents valors que pren la velocitat del fusell, S . Llavors, si la seqüència de S en els experiments ha estat [1340, 938, 1742] i tenint en compte la Figura 4.12, es pot dir que a menor velocitat del fusell, majors forces es produeixen.

Com s'ha vist, doncs, els quatre paràmetres de treball (ap , S , F i ae) tenen una visible influència en les forces generades en el procés. Atenent a la Figura 2.12, les corbes de forces estan formades, en gran part, per la superposició d'aquests quatre patrons detectats.

4.5 Acceleracions

En el cas de les acceleracions es destaca, en primer lloc i a partir de la Figura 4.13, que la component X té molta més activitat que la component Y. D'altra banda, examinant la corba particular de la component X s'identifiquen els mateixos patrons detectats en les corbes de forces; d'una banda es torna a veure la forma esglaonada conseqüència dels tres nivells d' ap amb què es treballa. També es distingeixen la forta influència de la profunditat radial de tall ae , culpable de la silueta sinuosa que presenta el perfil graficat a la Figura 4.13, i l'efecte de la velocitat d'avanç. Finalment, separant

les mostres en grups de nou, es constata de nou una relació inversa entra S i les acceleracions captades.

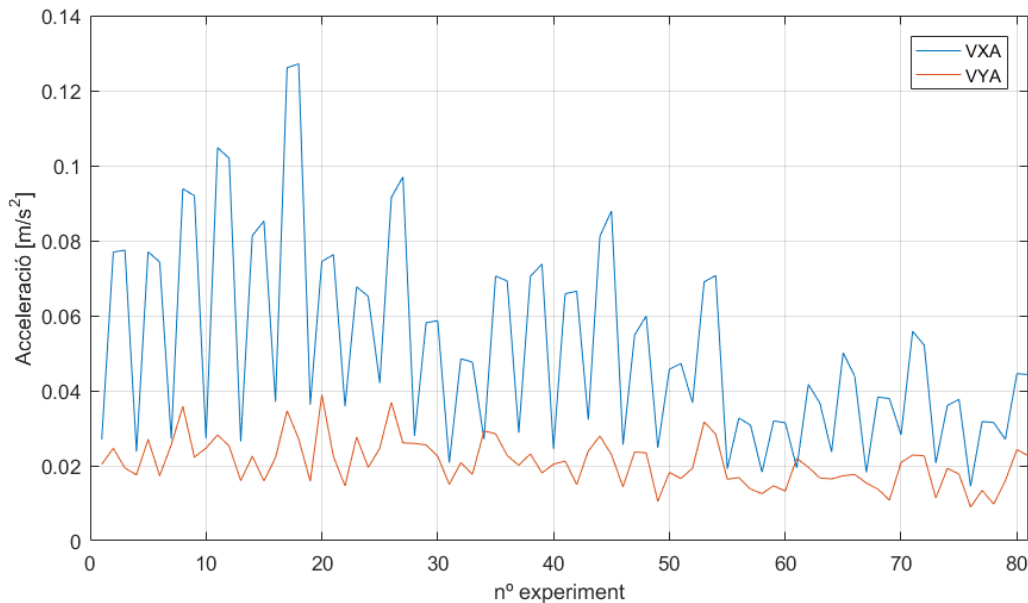


Figura 4.13. Evolució del valor eficaç de les acceleracions al llarg de la sèrie Ø63

Aquesta simetria entre el perfil d'acceleracions i el de forces és comprensible atès que, com es sap, la força és el producte de massa i acceleració.

4.6 Chatter

Es coneix per *chatter* com aquelles vibracions que apareixen degut al comportament dinàmic del sistema eina-material. Aquest fenomen és present en típics processos de mecanització com el tornejat, el foradat o el mateix fresatge, i segueix essent a dia d'avui una limitació per a la qualitat i la productivitat de les peces. És generalment inevitable a menys que es prenguin paràmetres de treball conservadors, però aquests comporten una reducció de la productivitat.

Alguns dels efectes negatius que comporta el *chatter* són (Quintana, G., 2010):

- Pèrdua de qualitat en l'acabat superficial
- Toleràncies inacceptables
- Excés de soroll
- Malbaratament de temps, material i energia

- Increment de costos
- Perjudici per la màquina-eina.

Així doncs, és un fenomen que cal tenir en compte en el present projecte per l'afectació que té sobre la rugositat superficial. Analitzant les dades capturades es constata la presència de *chatter* en diversos experiments, indetificable a través de l'espectre freqüencial per la presència d'un pic destacat (vermell) a freqüència significativament més elevada que la freqüència natural de l'eina (verd), com es mostra a la Figura 4.14.

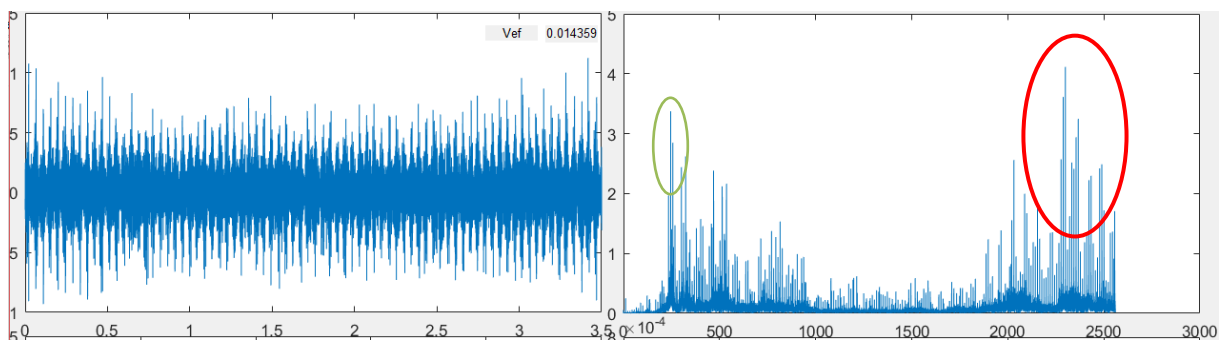


Figura 4.14. Espectre freqüencial d'un senyal d'acceleracions amb *chatter*

Quan apareix, es produeix un soroll distingible per qualsevol operari de mecanitzat amb experiència, qui coneixerà els passos a seguir per reduir o eliminar aquestes vibracions. A més, el *chatter* pot resultar en una ondulació més pronunciada en la superfície treballada.

4.7 Entrada i sortida de l'eina



Amb les peces mecanitzades s'ha pogut observar que tan l'entrada de l'eina -moment en què el plat entra en contacte amb la peça i comença a arrancar material- com la sortida de l'eina -quan el plat abandona la peça-, no només mostren la seva inestabilitat en els senyals de forces, acceleracions i soroll, sinó que aquesta també queda plasmada a la superfície mecanitzada. A la Figura 4.15 es pot veure una comparativa entre la superfície en una zona de treball estable i una zona inestable (entrada/sortida).



Figura 4.15. Zona de treball estable(esquerra) i zona inestable (dreta)

És per aquest motiu que els extrems de les peces s'han desestimat a l'hora de mesurar la rugositat superficial mitjançant el rugosímetre.

Finalment, es vol destacar una altra circumstància en relació a la forma d'ona apreciable a la superfície mecanitzada en zona de treball estable, o tipologia d'arcs creuats. A la Taula 4.4 se'n mostren dos exemples clarament diferenciables; la mostra superior corresponen a la combinació d'una elevada velocitat del fusell, S , i una reduïda velocitat d'avanç, F , donant lloc a la textura més granulada que s'observa. La mostra inferior, en canvi, presenta una separació entre arcs més exagerada, que indica una menor S i major F .

	S alta F baixa
	S baixa F alta

Taula 4.4. Diferents mostres observades de la tipologies d'arcs creuats

5 SISTEMA DE PREDICCIÓ

Com s'ha explicat a la Introducció de la present memòria, en els darrers anys s'han dut a terme nombrosos estudis encarats a donar una solució pràctica a la problemàtica que planteja voler controlar la rugositat superficial en la indústria contemporània. Benardos i Vosniakos(2009) conclouen que els sistemes basats en la Intel·ligència Artificial són els que donen lloc a millors resultats per la alta precisió i la bona adaptació al sistema. Dins el camp de la Intel·ligència Artificial, la xarxa neuronal artificial és l'eina més utilitzada darrerament per desenvolupar models de predicció en l'àmbit del mecanitzat com són els casos de Benardos i Vosniakos(2002), Quintana et al.(2009) o Koura i Sayed(2015), on es donen resultats molt interessants. Seguint aquests precedents, en el present projecte es treballa amb xarxes neuronals artificials per modelar el sistema predictiu que permeti estimar, amb bona precisió, la rugositat superficial generada en un procés de planejament amb fresatge frontal. Per desenvolupar la xarxa neuronal artificial s'ha fet ús de la *Neural Network Toolbox 9.0*, una eina de *The MathWorks, Inc.* integrada a *Matlab*.

En aquest capítol es descriuen els passos seguits fins arribar al model predictiu desitjat. Abans, però, per entendre millor com s'ha assolit, es creu interessant fer una breu introducció a la matèria.

5.1 Xarxa neuronal artificial

L'estructura d'una xarxa neuronal està composta per diferents unitats de processament, equivalents a les neurones, organitzades de diferents formes i interconnectades entre elles mitjançant enllaços. La Figura 5.1 representa l'estructura típica d'una unitat o una neurona artificial.

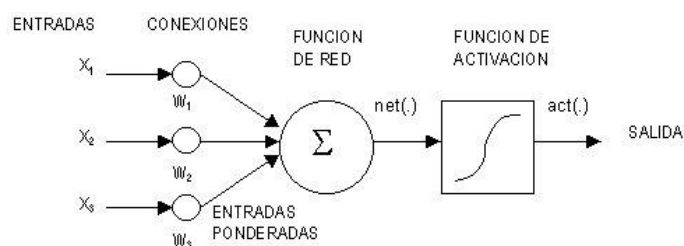


Figura 5.1. Estructura esquemàtica d'una neurona artificial Font: www.taringa.net

La informació d'entrada es sotmet a una ponderació, donat que cada enllaç té un pes sinàptic associat. A continuació s'uneixen les entrades i la informació resultant passa per una funció de transferència o funció d'activació.

Generalment, les neurones s'organitzen en capes. Per la seva banda, les xarxes poden contenir una o múltiples capes interiors, anomenades ocultes, a banda de les capes d'entrada i de sortida. A la Figura 5.2 es mostra l'estructura d'una xarxa neuronal *feed-forward backpropagation* amb dues capes ocultes.

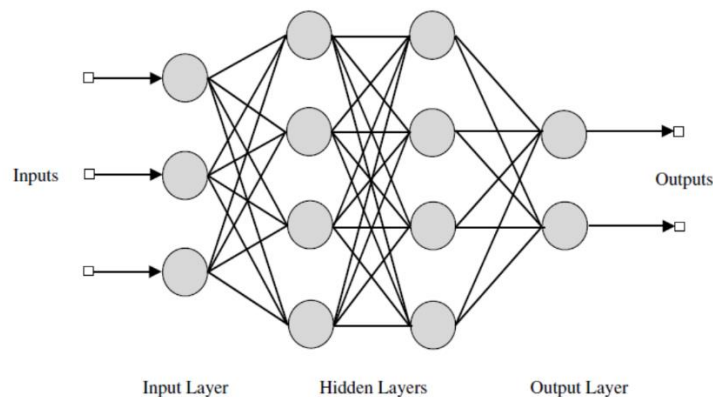


Figura 5.2. Xarxa tipus *feed-forward backpropagation*

Font: <http://cse22iiith.vlabs.ac.in/>

5.2 *Feed-forward backpropagation*

Existeixen nombroses tipologies de xarxes neuronals amb usos i aplicacions ben diverses. Pel cas que es planteja en aquest projecte, el més adient és utilitzar el tipus conegut com a *feed-forward backpropagation*, que en català es pot traduir com de tipus prealimentada (o unidireccional) i de propagació cap enrere (o retro-propagació). D'una banda, la classe *feed-forward* implica que les connexions entre unitats no formen cap cicle o bucle, sinó que, en aquest tipus de xarxes, la informació es mou en una sola direcció, endavant, dels nodes d'entrada als nodes de sortida tot passant per les unitats internes. D'altra banda, la opció *backpropagation* fa referència a un algorisme d'aprenentatge supervisat que, a partir de l'error calculat entre la sortida del model i una sortida patró, recorre la xarxa de fi a principi actualitzant els pesos en funció de la seva corresponent contribució a l'error total.

Així doncs, aquest tipus de xarxes inclouen dos fases:

1. Propagació endavant, on es calculen les sortides.
2. Propagació enrere, on es calculen els errors i s'actualitzen els pesos.

Establida la tipologia de xarxa neuronal que s'utilitzarà, s'ha procedit a estudiar-ne la configuració més adient.

5.3 Configuració de la xarxa

Tal com s'ha esmentat, el desenvolupament de la xarxa neuronal es porta a terme mitjançant la *Neural Network Toolbox* de *Matlab*. Aquesta eina és molt útil per a consumidors poc avesats a treballar amb comandes ja que ofereix una interfície còmode i fàcil d'usar. Per començar a entrenar una xarxa és necessari, primerament, establir els paràmetres que en definiran l'estructura i el funcionament. A més, cal escollir els algorismes i les funcions que regiran el procés d'entrenament. Per fer-ho, la *toolbox* disposa d'un quadre de diàleg com el que es mostra a la Figura 5.3.

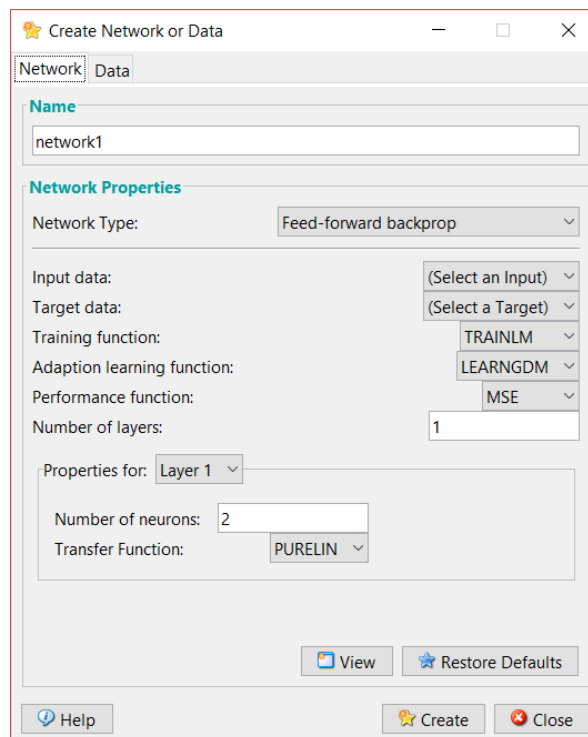


Figura 5.3. Interfície de configuració de la xarxa

Les propietats identificables al quadre de diàleg de la Figura 5.3 són:

- Tipus de xarxa – *Network Type*
- Funció d'entrenament – *Training function*

- Funció d'aprenentatge – *Adaptation learning function*
- Funció d'assoliment – *Performance function*
- Nombre de capes ocultes – *Number of layers*
- Nombre de neurones a les capes ocultes – *Number of neurons*
- Funció de transferència de les capes ocultes – *Transfer Function*
- Funció de transferència de la capa de sortida – *Transfer Function*

A més, també cal indicar la informació d'entrada (*input data*) i la sortida de referència (*target data*). Per defecte les mostres que es proporcionen a la xarxa per entrenar el model es divideixen aleatòriament en tres grups:

- Entrenament (70%). Ajustament de la xarxa en funció dels errors.
- Validació (15%). Comprovar l'evolució dels errors i aturar l'entrenament quan els resultats deixen de millorar.
- Test (15%). No té cap efecte sobre l'entrenament. Dóna una mesura independent de la resposta del model durant i després de l'entrenament.

A fi de determinar la millor configuració possible de la xarxa pel cas que atén a aquest projecte, s'han pres les dades relatives al plat de Ø63 i s'han realitzat diversos assajos. Al llarg de les proves s'han mantingut constants alguns paràmetres amb la seva opció per defecte. Aquests es resumeixen a la Taula 5.1:

Paràmetre	Configuració
Funció d'entrenament <i>Training Function</i>	<i>TRAINLM</i>
Funció d'aprenentatge <i>Learning Function</i>	<i>LEARNGDM</i>
Funció d'assoliment <i>Performance Function</i>	<i>MSE</i>
Nombre de capes <i>Number of layers</i>	2
Funció de Transferència (Capes Oculta) <i>Transfer Function (Hidden Layer)</i>	<i>TANSIG</i>

Taula 5.1. Propietats no alterades al llarg de les proves

TRAINLM és un algorisme de *backpropagation* que actualitza els pesos i llindars d'acord amb la optimització de Levenberg-Marquardt. És altament recomanat per a sistemes supervisats i sol ser l'algorisme més ràpid de *backpropagation*. El model

desenvolupat per Quintana et al.(2009) està configurat amb aquest algorisme i presenta molt bons resultats. La *toolbox* dona dos alternatives possibles per a la funció d'aprenentatge: *LEARNGD* i *LEARNGDM*. S'estableix, per defecte, la segona, que és una extensió de la primera. Pel que fa a la funció d'assoliment, s'ha configurat amb *MSE*, és a dir, *Mean Squared Error* o Error Quadràtic Mig, que permetrà avaluar la precisió del model. Es mantenen també les opcions per defecte en el nombre de capes (2) i la funció de transferència a les capes ocultes (*TANSIG*).

Els paràmetres que s'alteren són, doncs:

- Funció de transferència a la capa de sortida.
- Nombre de neurones a la capa oculta.

S'estudia quina combinació d'aquests dos elements dona millors resultats treballant, en aquest conjunt d'assajos, amb les següents variables *input* i *output*:

- *Input*: *S*, *F*, *ap*, *ae*.
- *Output*: *Ra*, *Rq*.

La Taula 5.2 resumeix la configuració i els resultats de les proves.

<i>nº prova</i>	<i>funció c. oculta</i>	<i>funció c. sortida</i>	<i>neurones</i>	<i>MSE</i>	<i>època_{MSE}</i>	<i>R_e</i>	<i>R_v</i>	<i>R_t</i>	<i>R_τ</i>
1	TANSIG	TANSIG	10	0,021037	6	0,97246	0,90635	0,95021	0,96217
2	TANSIG	TANSIG	20	0,070023	2	0,76734	0,80793	0,8193	0,77816
3	TANSIG	TANSIG	30	0,059341	4	0,94326	0,75455	0,89675	0,9061
4	TANSIG	PURELIN	10	0,011886	6	0,99096	0,96277	0,90132	0,96776
5	TANSIG	PURELIN	20	0,009521	5	0,98159	0,96271	0,99349	0,98135
6	TANSIG	PURELIN	30	0,042864	4	0,99318	0,85009	0,36076	0,92793
7	TANSIG	LOGSIG	10	0,096592	5	0,82404	0,8341	0,7994	0,8214
8	TANSIG	LOGSIG	20	0,09594	2	0,7769	0,53146	0,64832	0,73983
9	TANSIG	LOGSIG	30	0,12552	10	0,85852	0,65791	0,85564	0,82919

Taula 5.2. Resultats de les proves de configuració de la xarxa

A la Taula 5.2, *època_{MSE}* és l'època en què s'ha assolit el mínim MSE (error quadràtic mig). Pel que fa als valors *R_i*, mesuren el grau de correlació entre els resultats calculats

o *outputs* i els reals o *targets*. Aquest coeficient es calcula per les fases d'entrenament, validació i test i se'n fa una mitjana representada per R_T .

Les Figures 5.4 i 5.5 representen de manera gràfica els resultats obtinguts en aquest conjunt d'assajos en funció del tipus de funció de transferència establerta a la capa de sortida i el nombre de neurones que componen la capa oculta.

D'una banda s'observa que, en comparació a les altres, la funció de transferència *LOGSIN* a la capa de sortida presenta els pitjors resultats tan en error com en coeficient de correlació R .

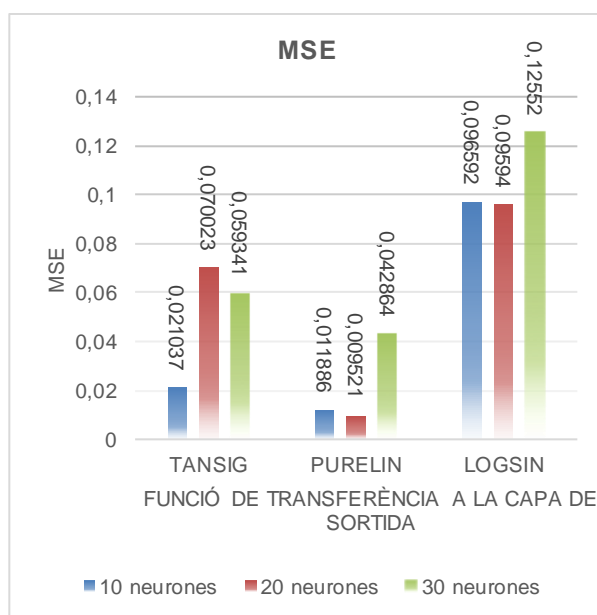


Figura 5.4. Errors obtinguts



Figura 5.5. Coeficients de regressió obtinguts

Encara a les Figures 5.4 i 5.5, es fa palès que el disseny amb funció *PURELIN* a la capa de sortida i 20 neurones a la capa oculta és el que mostra uns resultats més bons. Aquest disseny correspon a la prova número 5 de la Taula 5.2. A la Figura 5.6 es presenten gràficament els resultats concrets d'aquest model.

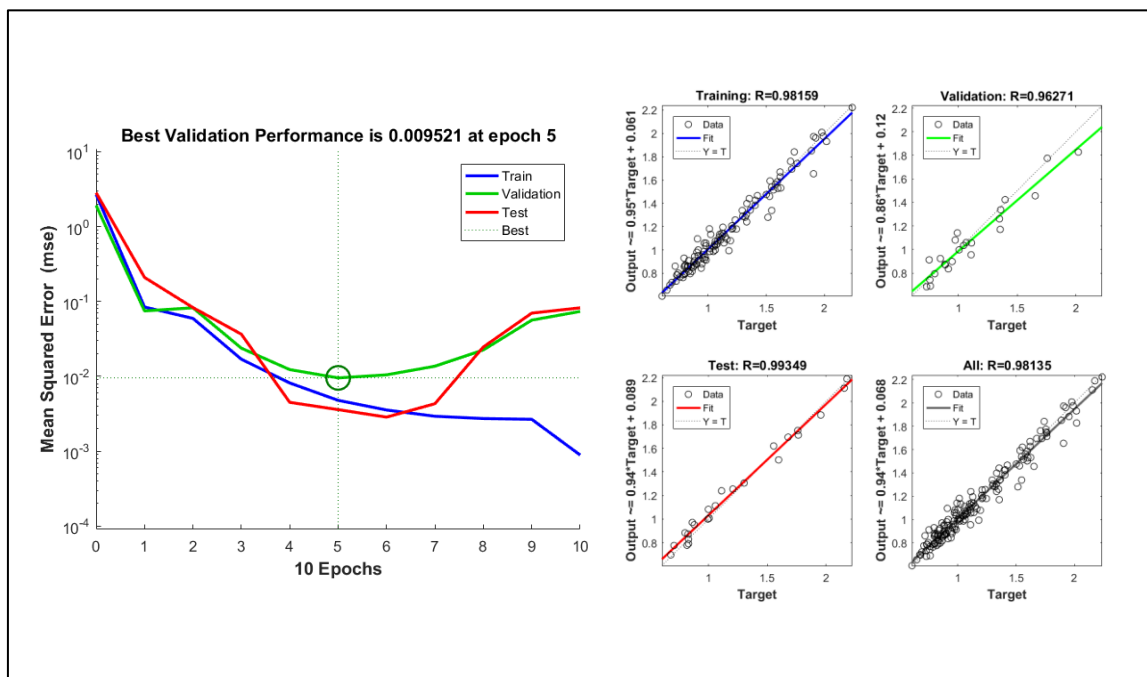


Figura 5.6. Resultats de la prova nº 5

D'altra banda, com es veu a les Figures 5.4 i 5.5, les opcions *TANSIG* i *PURELIN* com a funció d'activació de la capa de sortida en combinació amb 10 neurones a la capa oculta també han donat lloc a resultats interessants amb l'avantatge, a més a més, que requereixen l'ús de menys neurones.

5.4 Elecció de l'*input* del model

El següent pas ha estat entrenar diverses xarxes amb la mateixa configuració però variant la informació d'entrada, o *input*, per identificar amb quin conjunt de variables s'obtenen millors resultats. Els models plantejats es resumeixen a la Taula 5.3.

XARXA	INPUT	OUTPUT
A	S, F, ae, ap	Ra
B	S, F, ae, ap, vxf, vyf, vzf, vxa, vya	
C	S, F, ae, ap, vxf, vyf, vzf, vxa, vya, fx1, fy1, fz1, ax1, ay1	
D	S, F, ae, ap, vxf, vyf, vzf, vxa, vya, fx1, fy1, fz1, ax1, ay1, fx2, fy2, fz2, ax2, ay2	
E	S, F, ae, ap, vxf, vyf, vzf, vxa, vya, vs	

Taula 5.3. Models estudiats pel plat del Ø63

Aquestes cinc xarxes tenen la mateixa configuració, descrita a la Taula 5.4.

Tipus de xarxa	<i>feed-forward backpropagation</i>
Funció d'entrenament	<i>TRAINLM</i>
Funció d'aprenentatge	<i>LEARNGDM</i>
Funció d'assoliment	<i>MSE</i>
Funció a la capa oculta	<i>TANSIG</i>
nº neurones a la capa oculta	10
Funció a la capa de sortida	<i>TANSIG</i>

Taula 5.4. Configuració de les xarxes A, B, C, D i E

A la Figura 5.7 es mostra de manera esquemàtica l'estructura d'aquestes xarxes.

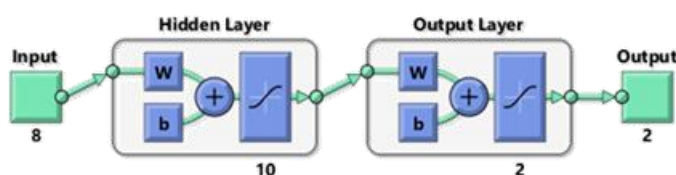


Figura 5.7. Estructura de les xarxes A, B, C, D i E.

En funció de les variables *input* que integri la xarxa es poden distingir dos tipologies de model: un amb aplicació en línia o *online* – cas de les xarxes B, C, D i E –, i l'altre amb aplicació *offline* - xarxa A. Un model *online*, a més de les propietats de l'eina i els paràmetres del procés, inclouria variables mesurades en viu, com valors de forces i acceleracions, i permetria tenir una aproximació en directe i contínua de la rugositat que s'està generant en aquell instant del procés. D'aquesta manera, el model *online* consistiria en un model de monitorització. Per la seva banda, la opció *offline*, més senzilla que l'altra, s'usaria per obtenir una estimació de la rugositat abans de produir-se el procés de tall, ja que l'*input* el formarien aquelles variables inalterables al llarg del procés i conegudes prèviament, com les propietats de l'eina i/o els paràmetres de l'operació. Així doncs, quan es parla d'un model *offline* s'entén com un model predictiu.

Malgrat la intenció d'aquest projecte sigui desenvolupar un sistema *offline* de predicció, i a fi d'aprofitar les dades recollides, es proposarà, també, un model *online* que, amb un flux de dades en viu provinent del procés, donaria la possibilitat de controlar la rugositat en tot moment. D'aquesta manera, es podria desenvolupar un

sistema que aturés el procés en cas que la rugositat calculada superés un llindar o valor límit establert.

Després d'entrenar les cinc xarxes plantejades, els resultats obtinguts són els que es mostren a la Taula 5.5. Com es pot veure, els models A i B han comportat resultats molt més interessants respecte els models C, D i E.

Xarxa	MSE	R			
		Entrenament	Validació	Test	Total
A	0.0046573	0.960073	0.97536	0.98335	0.97052
B	0.0079324	0.98767	0.97007	0.94852	0.97497
C	0.017799	0.96861	0.8962	0.78838	0.93667
D	0.020788	0.98789	0.84685	0.4281	0.86163
E	0.018375	0.78139	0.93349	0.10932	0.78889

Taula 5.5. Resultats obtinguts en els models A, B, C, D i E

Tal com indica la Taula 5.5, els millors resultats s'observen a la xarxa A i a la xarxa B, amb un error quadràtic mig de 0.0046573 i 0.0079324 respectivament. A les Figures 5.8 i 5.9 es representen les regressions obtingudes per cada model.

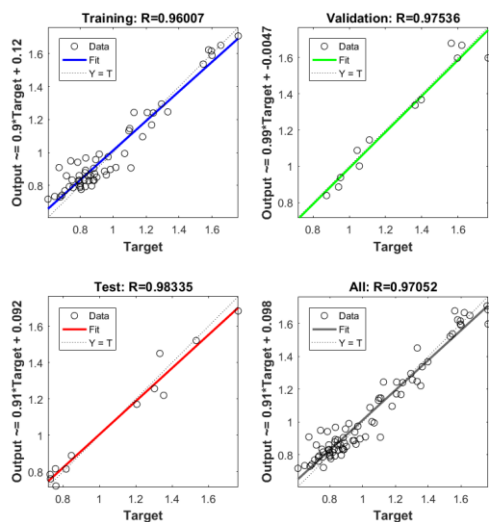


Figura 5.8. Regressions de la xarxa A

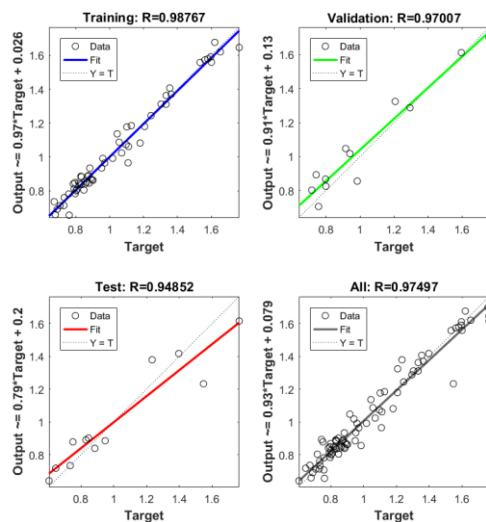


Figura 5.9. Regressions de la xarxa B

Els altres tres models amb aplicació *online*, corresponents a C, D i E, presenten pitjors resultats i, per tant, es descarten de cares al disseny del sistema predictiu final. És interessant destacar que amb el model E es fa palesa la poca significació que té el

soroll del procés (*vs*) en l'estimació de la rugositat superficial ja que, com s'ha vist a la Taula 5.3, l'*input* d'aquest model és el mateix que el de la xarxa B amb l'addició de la variable *vs*.

D'acord amb els resultats observats, les opcions plantejades per les xarxes A i B es prendran com a pauta per a la construcció dels respectius models *offline* i *online*.

5.5 Models final

Com s'ha conclòs als apartats anteriors, els models finals consistiran en xarxes tipus feed-forward backpropagation composades per dos capes: la capa oculta i la de sortida. Les funcions d'entrenament i aprenentatge seran, respectivament, TRAINLM i LEARNGDM. La funció de transferència de les unitats a la capa oculta serà una sigmoide (TANSIG). Pel que fa a la funció de transferència de la capa de sortida i el nombre de neurones a la capa oculta, es comprovarà per cada cas quina és la configuració més adient. Ambdós models oferiran una estimació de la rugositat superficial amb els paràmetres R_a i R_q .

5.5.1 Model *offline* (predictiu)

Com s'ha vist a l'apartat 5.4, un *input* format pels paràmetres de procés dóna una bona resposta en el marc d'estudi del plat de Ø63. En l'entrenament de la xarxa neuronal global, però, s'inclouen les dades del plat de Ø20 i, per tant, cal afegir les propietats de l'eina per tal que el model final sigui aplicable a diferents plats de fresar. Així doncs, les variables que conformen l'*input* són: D , n , r , h , ap , S , F i ae . El model *offline*, després d'haver realitzat diverses comprovacions, tindrà 10 neurones a la capa oculta i la funció de transferència sigmoide a la capa de sortida, com apunta la Taula 5.6.

Model Offline				neurones capa oculta func. capa sortida		10 TANSIG	
entrenament	iteracions	MSE	època _{MSE}	R_e	R_v	R_t	R_T
1	18	0.012449	12	0.97125	0.96514	0.92048	0.95586
2	6	0.007382	0	0.95978	0.97318	0.91486	0.95586
3	6	0.008783	0	0.96331	0.95795	0.88678	0.95586
4	6	0.0073	0	0.94696	0.96807	0.98349	0.95586

Taula 5.6. Entrenament de la xarxa *offline*

A la Taula 5.6 també es reflecteix el procés d'entrenament de la xarxa, en el qual s'ha re-entrenat tres vegades assolint un error quadràtic mig de 0.0073 i un coeficient de regressió en test de 0.98349. En aquest punt la xarxa es considera suficientment entrenada i preparada per actuar en el sistema de predicció.

5.5.2 Model *online* (monitorització)

Les variables que conformen l'*input* de la xarxa *online* són les corresponents al model B estudiat a l'apartat 5.4 amb la inclusió, igual que en la xarxa *offline*, de les propietats de l'eina perquè la xarxa s'adapti a diferents plats de fresar. L'*input* està format, doncs, per: $D, n, r, h, S, F, ae, ap, vxf, vyf, vzf, vxa$ i vya . Com s'ha explicat anteriorment, doncs, el model *online* permet una monitorització en directe de la rugositat que s'està generant durant la mecanització a partir de les variables dinàmiques del procés – acceleracions i forces.

Després d'estudiar diferents configuracions, s'ha optat per definir 10 neurones a la capa oculta i establir la funció de transferència sigmoide a la capa de sortida. A la Taula 5.7 es mostra el procés d'entrenament d'aquesta xarxa, amb el qual s'ha assolit un error quadràtic mig de 0.006804 i un coeficient de regressió de 0.96362.

Model <i>Online</i>				neurones capa oculta func. capa sortida		10 TANSIG	
entrenament	iteracions	MSE	èpocaMSE	R_e	R_v	R_t	R_T
1	23	0.006085	17	0.97741	0.97649	0.88908	0.96362
2	6	0.008513	0	0.96004	0.97687	0.97247	0.96362
3	6	0.006804	0	0.95927	0.9718	0.97421	0.96362

Taula 5.7. Entrenament de la xarxa *online*

Les xarxes neuronals artificials construïdes s'han desat com a *Offline.mat* i *Online.mat*. Aquestes, treballant en l'entorn de *Matlab* i ubicats a la carpeta que les conté, es podran cridar per efectuar una predicció mitjançant la comanda *sim*. Per exemple:

```
xarxa = importdata('Offline.mat');
rugositat = sim(xarxa, [D, z, r, h, ap, S, F, ae]);
```

Amb aquestes dos línies es carrega la xarxa a l'entorn de treball de *Matlab* i es realitza una simulació, és a dir, una predicció en funció de les variables d'entrada que s'introdueixin.

Per facilitar aquesta operació es decideix desenvolupar una interfície d'usuari amb l'eina GUI de *Matlab*.

6 INTERFÍCIE D'ÚS

En aquest capítol es descriu l'aplicació dissenyada per utilitzar els models de predicció desenvolupats.

6.1 Descripció

Per dissenyar la interfície d'usuari s'ha tornat a fer ús de l'eina *GUI* que proporciona *Matlab* per la seva facilitat d'ús i la comoditat que aporta poder seguir treballant dins l'entorn de *Matlab*. A l'ANNEX D s'inclou el codi del programa *GUI* dissenyat.

A la Figura 6.1 es mostra la interfície construïda amb el *GUI*.

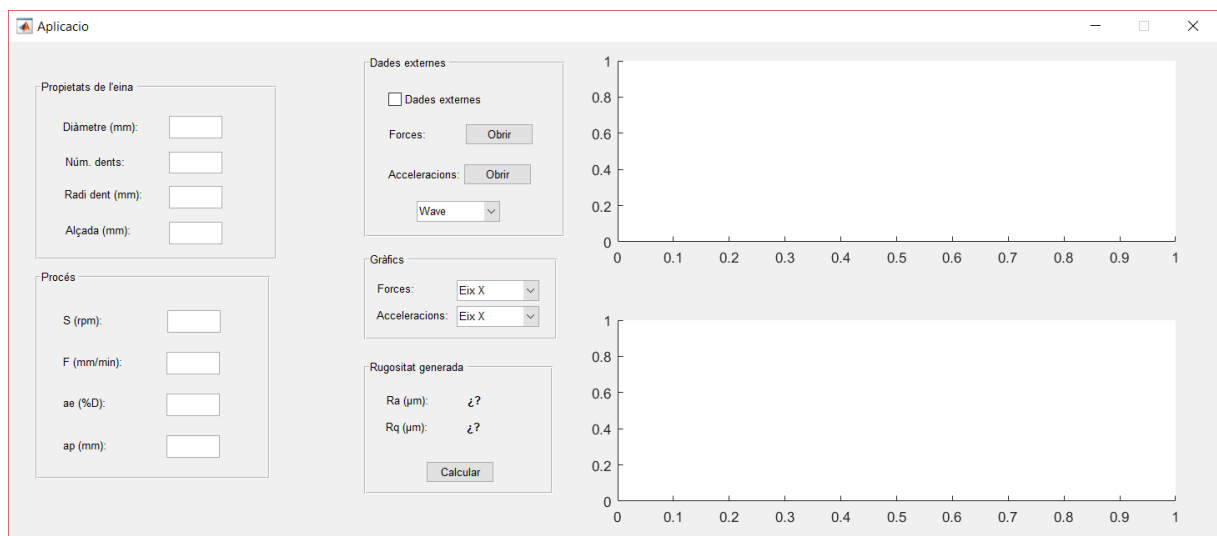


Figura 6.1. Interfície d'usuari

A la interfície es distingeixen diverses parts:

- Introducció de variables estàtiques: s'han habilitat vuit espais d'introducció de text on l'usuari ha d'escriure els paràmetres de procés i les propietats de l'eina.
- Connexió de dades externes: mitjançant una casella de verificació s'habilita l'ús de dades externes – forces i acceleracions – per a realitzar una estimació *online*. D'aquesta manera es deixa llesta una interfície i un model per si es vol dur a terme una monitorització de la rugositat mecanitzada.
- Quadre de resultats: és on apareixen els valors *Ra* i *Rq* estimats.

- Gràfiques: de manera complementària s'han inclòs dos espais de gràfics on es representarien les forces i les acceleracions. Mitjançant els desplegable s'escull si es vol visualitzar l'espectre de freqüències o el senyal i la component – X ,Y,Z – que s'hi representarà.

Amb totes les dades introduïdes, quan es prem el botó “Calcular” el programa crida la xarxa *Offline* – o *Online* si la casella de verificació “Dades Externes” està activada – i s'executa la comanda *sim*, retornant un valor per *Ra* i un altre per *Rq*.

6.2 Demostració

Per concloure aquest capítol es proposa una demostració de fiabilitat del sistema desenvolupat. Prenent, per exemple, el primer experiment realitzat amb el plat de Ø63 es comparará la rugositat estimada pel sistema amb la rugositat real mesurada amb el rugosímetre. Els paràmetres de procés, les propietats de l'eina i els valors de rugositats corresponents a aquest primer experiment es recullen a la Taula 6.1.

<i>D</i> (mm)	<i>z</i>	<i>r</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>S</i> (rpm)	<i>F</i> (mm/min)	<i>ap</i> (mm)	<i>ae</i> (% <i>D</i>)	<i>Ra</i> (μm)	<i>Rq</i> (μm)
63	6	6	50	1340	1770	0.5	80%	0.79	0.966

Taula 6.1. Variables *input* i rugositats de l'experiment 1 (Ø63)

Introduint els *inputs* a l'aplicació s'obtenen els resultat estimats, mostrats a la Figura 6.2. Com es pot veure, els valors predits s'acosten amb bona precisió als reals.

Figura 6.2. Demostració de fiabilitat

7 RESUM DE PRESSUPOST

El total del pressupost corresponent al present projecte ascendeix a 6.376,20 € (SIS MIL TRES-CENTS SETANTA-SIS EUROS amb VINT CÈNTIMS).

A l'ANNEX E es desglossa detalladament el pressupost del projecte.

Guillem Torrado Canada

4 de Setembre de 2017

8 CONCLUSIONS I MILLORES

En aquest apartat s'exposen el conjunt de conclusions assolides durant i després del desenvolupament d'aquest projecte. A més, també s'inclouen un seguit de reflexions sobre els treballs futurs i millores que podrien derivar-se del present projecte.

8.1 Conclusions

En primer lloc, cal matisar que el model predictiu assolit en aquest projecte és únicament aplicable a operacions de planejament frontal amb plat de fresar, doncs la base de dades utilitzada per desenvolupar-lo ha estat generada a partir d'aquest tipus d'operacions. De la mateixa manera, és important destacar que el material de treball utilitzat és acer F1140, un tipus d'acer al carboni de bon mecanitzat, i que, per tant, l'eficàcia del model està subjecte al material amb què es treballi; amb acer F1140 o similars s'haurien d'observar bons resultats.

Respecte l'adquisició de dades, si bé no s'ha pretès ignorar la temperatura com un dels múltiples factors que originen la rugositat superficial, finalment s'ha descartat la mesura d'aquesta amb càmera termogràfica ja que, després d'un seguit de proves, els valors mesurats no s'han considerat significatius. Addicionalment, l'espai de treball que requeria l'ús de la càmera termogràfica dificultava el desenvolupament de les altres tasques.

En l'anàlisi de dades s'han assolit diverses conclusions respecte els valors de rugositat mesurats així com les relacions que s'esdevenen entre aquests i les variables considerades:

- L'experimentació corresponent al plat de Ø63 ha permès detectar una intensificació, a mesura que s'incrementa la profunditat axial de tall, de la relació directe entre la velocitat del fusell i la rugositat superficial generada.
- Addicionalment, en la sèrie experimental del plat de Ø63, s'ha observat clarament que una ap més gran – sempre dins d'un rang lògic – dona lloc a rugositats més petites, mostrant una certa dependència inversa entre ap i Ra .
- Pel que fa a la velocitat del fusell S , en les tres sèries experimentals s'ha constatat una tendència a obtenir valors lleugerament menors de Ra a major S .

- La velocitat d'avanç F no ha influït, aparentment, en la rugositat generada.
- La profunditat radial de tall ae denota una influència destacable sobre la rugositat superficial generada en les sèries del plat de Ø20, donant lloc a valors més grans de Ra per majors nivells de ae . Així, s'entén que l'estabilitat del tall disminueix en pretendre mecanitzar més material en una sola passada, causant un perfil de rugositat més abrupte.

Pel que fa a les forces i acceleracions derivades del procés, s'ha constatat que són un reflex evident de les condicions de tall – ap , S , F , ae – establertes. S'han identificat quatre relacions evidents en la seva evolució al llarg dels experiments:

- Una menor profunditat axial de tall ap dona lloc a forces més reduïdes.
- A més amplada del plat utilitzat ae , menys forces es generen.
- Les forces generades són majors a major velocitat d'avanç F .
- Una major velocitat del fusell S resulta amb forces més petites.

Sobre el sistema de predicció, s'ha comprovat que la intel·ligència interfacial i, en concret, les xarxes neuronals, són un mètode eficaç a l'hora de modelitzar processos complexes i de múltiples factors com el que s'aborda en aquest projecte. Així, s'ha entrenat una xarxa neuronal de tipus *feed-forward backpropagation* amb una capa oculta formada per 10 neurones. La resposta del model format per aquesta xarxa és significativament bona, amb un error quadràtic mig de 0.0073 i un coeficient de regressió de 0.95586.

Paral·lelament, s'ha entrenat una xarxa neuronal destinada a un model de monitorització de la rugositat, on el vector d'entrada inclou variables dinàmiques, és a dir, forces i acceleracions produïdes. Aquest model que es proposa, permetria una monitorització “en viu” de la rugositat que s'està generant durant el procés.

Finalment, es vol remarcar que el present projecte de final de grau aborda una part d'un camp d'estudi complex com és l'acabat superficial de peces mecanitzades i, en aquest sentit, són molts els projectes de recerca i investigació que podrien derivar-se'n.

8.2 Milllores i treballs futurs

En aquest apartat s'exposen les diverses millores que podrien introduir-se al present projecte així com els futurs treballs que el podrien seguir.

En primer lloc, el projecte es podria completar amb la implementació d'un sistema que permeti l'ús del model *online*. És a dir, caldria connectar la captura de forces i acceleracions a l'ordinador per tal que, amb un flux continu de dades, el model monitoritzés la rugositat superficial que s'està generant durant el procés.

Referent a la base de dades, és evident que de disposar de més temps i pressupost es podrien incloure més materials, diferents eines de tall i una diversitat d'operacions molt més gran. Fins i tot, es podria treballar amb diferents centres de mecanitzat. Tot això resultaria en un model molt més flexible i aplicable a un gran ventall de possibilitats dins la indústria del mecanitzat.

Pel que fa a la captura del soroll produït en l'operació, seria interessant evitar la presència de contaminació acústica exterior. D'aquesta manera, es recomana que l'experimentació es porti a terme en un recinte ben acústicament aïllat.

Guillem Torrado Canada

4 de Setembre de 2017

9 BIBLIOGRAFIA

AB. RASHID M.F.F., GAN S.Y. I MUHAMMAD N.Y. Mathematical Modeling to Predict Surface Roughness in CNC Milling. *World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. Vol: 3. Núm. 5. 2009.

BENARDOS, P.G., VOSNIAKOS, G.C. Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 18(5-6), 343-354. 2002.

BENARDOS, P. G., I VOSNIAKOS, G. C. Predicting Surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 833–844. 2003

CHALAL, M., SINGH, V., GARG, R., KUMAR S. *Surface Roughness Optimization Techinques of CNC Milling: A review* (<https://www.ijser.org/paper/Surface-Roughness-Optimization-Techniques-of-CNC-Milling-A-Review.html> , 23 de Juliol de 2017)

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA. *Mecánica del corte*. Universidad del País Vasco (http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/1182_ca.pdf , 26 d'Agost de 2017)

GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*. Society of Manufacturing Engineers. John Wiley & Sons. 4a edició. Nova York. 2004

IBM. *Estructura de red neuronal*.

(https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSLVMB_24.0.0/spss/neural_net_work/nnet_structure.html , 24 d'Agost del 2017)

INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA. *Teoría del Mecanizado Convencional*. (http://isa.umh.es/asignaturas/tf/3-teoria_mec.pdf , 24 de Juliol de 2017)

KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. R. *Manufacturing engineering and technology* (4a edició) New Jersey, EEUU. Prentice Hall. 2001.

KOURA, O. M., SAYED, T. H. Prediction of Surface Roughness and Feed Force in Milling for Some Materials at High Speeds. *American Journal of Mechanical Engineering*, 3 (1), 1-6. 2015.

LARRAÑAGA, P., INZA, I., MOUJAHID, A. *Tema 8. Redes Neuronales*. Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial. Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea.

MITCHELL, TOM M. *Machine Learning*. Ed. McGraw-Hill. 1a edició. 1997.

PELLICER, N. *Implementació i validació d'un sistema assistit aplicat a la planificació del procés de peces de mecanitzat*. Projecte Fi de Carrera. Enginyeria Industrial. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Juny 2017.

QUINTANA, G., CIURANA, J., AND RIBATALLADA, J. Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks. *Proceedings of the 12Th CIRP Conference on Modelling of Machining Operation, San Sebastián-Donosti, Spain*. 2009.

QUINTANA, G., *Stability lobes diagram identification and Surface roughness monitoring in milling processes*. Tesi Doctoral. Projectes d'Innovació Tecnològica en l'Enginyeria del Producte i Procés. Universitat de Girona. 2010

SANDVIK COROMANT. *Planeado General*. (http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/application_overview/face_milling/general_face_milling , 20 de Juny de 2017)

CATÀLEGS

DIJET INDUSTRIAL CO., LTD. *Tooling for Professionals. ISO & Dijet Milling Inserts*. Anglaterra

DIJET INDUSTRIAL CO., LTD. *Tooling by DIJET. Modular Head Series*.

GREP (EPS). *Manual Kistler i DaqView*. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Girona.

GREP (EPS). *Manual d'operari. DMC 64V Linear | FANUC 180iMB*. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Girona.

INTERNATIONAL STANDARD. *ISO 1302:2002. Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of Surface texture in technical product documentation*. Suïssa. 2002.

KISTLER INSTRUMENT CORPORATION. *PiezoStar Accelerometer*. Estats Units. 2006.

KISTLER INSTRUMENT CORPORATION. *Test & Measurement Force and Strain*. Suïssa. 2016.

MITUTOYO AMERICA CORPORATION. *Quick Guide to Surface Roughness Measurement*. Estats Units. 2016.

MITUTOYO CORPORATION. *Quick Guide to Precision Measuring Instruments*. Japó. 2012.

10 GLOSSARI

BD	<i>Base de Dades</i>
CN	<i>Control Numèric</i>
CNC	<i>Control Numèric per Computador</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
EPS	<i>Escola Politècnica Superior</i>
GREP	<i>Grup de Recerca en Enginyeria de Producte, Procés i Producció</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HSM	<i>High Speed Machining</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
NI	<i>National Instruments</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>

ANNEXOS

ANNEX A. CONDICIONS DE TREBALL DELS EXPERIMENTS

A.1 Plat de Ø63 mm

Núm. exp.	<i>ap</i> (mm)	<i>S</i> (rpm)	<i>F</i> (mm/min)	<i>ae</i> (%D)
1	0,5	1340	1770	0,80
2	0,5	1340	1770	0,50
3	0,5	1340	1770	0,25
4	0,5	1340	1239	0,80
5	0,5	1340	1239	0,50
6	0,5	1340	1239	0,25
7	0,5	1340	2301	0,80
8	0,5	1340	2301	0,50
9	0,5	1340	2301	0,25
10	0,5	938	1770	0,80
11	0,5	938	1770	0,50
12	0,5	938	1770	0,25
13	0,5	938	1239	0,80
14	0,5	938	1239	0,50
15	0,5	938	1239	0,25
16	0,5	938	2301	0,80
17	0,5	938	2301	0,50
18	0,5	938	2301	0,25
19	0,5	1742	1770	0,80
20	0,5	1742	1770	0,50
21	0,5	1742	1770	0,25
22	0,5	1742	1239	0,80
23	0,5	1742	1239	0,50
24	0,5	1742	1239	0,25
25	0,5	1742	2301	0,80
26	0,5	1742	2301	0,50
27	0,5	1742	2301	0,25
28	0,33333333	1340	1770	0,80
29	0,33333333	1340	1770	0,50
30	0,33333333	1340	1770	0,25
31	0,33333333	1340	1239	0,80
32	0,33333333	1340	1239	0,50
33	0,33333333	1340	1239	0,25
34	0,33333333	1340	2301	0,80
35	0,33333333	1340	2301	0,50
36	0,33333333	1340	2301	0,25
37	0,33333333	938	1770	0,80
38	0,33333333	938	1770	0,50
39	0,33333333	938	1770	0,25
40	0,33333333	938	1239	0,80
41	0,33333333	938	1239	0,50

42	0,333333333	938	1239	0,25
43	0,333333333	938	2301	0,80
44	0,333333333	938	2301	0,50
45	0,333333333	938	2301	0,25
46	0,333333333	1742	1770	0,80
47	0,333333333	1742	1770	0,50
48	0,333333333	1742	1770	0,25
49	0,333333333	1742	1239	0,80
50	0,333333333	1742	1239	0,50
51	0,333333333	1742	1239	0,25
52	0,333333333	1742	2301	0,80
53	0,333333333	1742	2301	0,50
54	0,333333333	1742	2301	0,25
55	0,166666667	1340	1770	0,80
56	0,166666667	1340	1770	0,50
57	0,166666667	1340	1770	0,25
58	0,166666667	1340	1239	0,80
59	0,166666667	1340	1239	0,50
60	0,166666667	1340	1239	0,25
61	0,166666667	1340	2301	0,80
62	0,166666667	1340	2301	0,50
63	0,166666667	1340	2301	0,25
64	0,166666667	938	1770	0,80
65	0,166666667	938	1770	0,50
66	0,166666667	938	1770	0,25
67	0,166666667	938	1239	0,80
68	0,166666667	938	1239	0,50
69	0,166666667	938	1239	0,25
70	0,166666667	938	2301	0,80
71	0,166666667	938	2301	0,50
72	0,166666667	938	2301	0,25
73	0,166666667	1742	1770	0,80
74	0,166666667	1742	1770	0,50
75	0,166666667	1742	1770	0,25
76	0,166666667	1742	1239	0,80
77	0,166666667	1742	1239	0,50
78	0,166666667	1742	1239	0,25
79	0,166666667	1742	2301	0,80
80	0,166666667	1742	2301	0,50
81	0,166666667	1742	2301	0,25

A.2 Plat de Ø20mm (1ª sèrie)

Núm. exp.	ap (mm)	S (rpm)	F (mm/min)	ae (%D)
82	0,6	1920	4320	100%
83	0,6	1920	4320	50%
84	0,6	1920	4320	25%
85	0,6	1920	3024	100%
86	0,6	1920	3024	50%
87	0,6	1920	3024	25%
88	0,6	1920	5616	100%
89	0,6	1920	5616	50%
90	0,6	1920	5616	25%
91	0,6	1344	4320	100%
92	0,6	1344	4320	50%
93	0,6	1344	4320	25%
94	0,6	1344	3024	100%
95	0,6	1344	3024	50%
96	0,6	1344	3024	25%
97	0,6	1344	5616	100%
98	0,6	1344	5616	50%
99	0,6	1344	5616	25%
100	0,6	2496	4320	100%
101	0,6	2496	4320	50%
102	0,6	2496	4320	25%
103	0,6	2496	3024	100%
104	0,6	2496	3024	50%
105	0,6	2496	3024	25%
106	0,6	2496	5616	100%
107	0,6	2496	5616	50%
108	0,6	2496	5616	25%
109	0,4	1920	4320	100%
110	0,4	1920	4320	50%
111	0,4	1920	4320	25%
112	0,4	1920	3024	100%
113	0,4	1920	3024	50%
114	0,4	1920	3024	25%
115	0,4	1920	5616	100%
116	0,4	1920	5616	50%
117	0,4	1920	5616	25%
118	0,4	1344	4320	100%
119	0,4	1344	4320	50%
120	0,4	1344	4320	25%
121	0,4	1344	3024	100%
122	0,4	1344	3024	50%
123	0,4	1344	3024	25%
124	0,4	1344	5616	100%
125	0,4	1344	5616	50%

126	0,4	1344	5616	25%
127	0,4	2496	4320	100%
128	0,4	2496	4320	50%
129	0,4	2496	4320	25%
130	0,4	2496	3024	100%
131	0,4	2496	3024	50%
132	0,4	2496	3024	25%
133	0,4	2496	5616	100%
134	0,4	2496	5616	50%
135	0,4	2496	5616	25%
136	0,2	1920	4320	100%
137	0,2	1920	4320	50%
138	0,2	1920	4320	25%
139	0,2	1920	3024	100%
140	0,2	1920	3024	50%
141	0,2	1920	3024	25%
142	0,2	1920	5616	100%
143	0,2	1920	5616	50%
144	0,2	1920	5616	25%
145	0,2	1344	4320	100%
146	0,2	1344	4320	50%
147	0,2	1344	4320	25%
148	0,2	1344	3024	100%
149	0,2	1344	3024	50%
150	0,2	1344	3024	25%
151	0,2	1344	5616	100%
152	0,2	1344	5616	50%
153	0,2	1344	5616	25%
154	0,2	2496	4320	100%
155	0,2	2496	4320	50%
156	0,2	2496	4320	25%
157	0,2	2496	3024	100%
158	0,2	2496	3024	50%
159	0,2	2496	3024	25%
160	0,2	2496	5616	100%
161	0,2	2496	5616	50%
162	0,2	2496	5616	25%

A.3 Plat de Ø20 mm (2ª sèrie)

Núm. exp.	<i>ap</i> (mm)	<i>S</i> (rpm)	<i>F</i> (mm/min)	<i>ae</i> (%D)
163	0,3	3180	1430	100%
164	0,3	3180	1430	50%
165	0,3	3180	1430	25%
166	0,3	3180	1001	100%
167	0,3	3180	1001	50%
168	0,3	3180	1001	25%
169	0,3	3180	1859	100%
170	0,3	3180	1859	50%
171	0,3	3180	1859	25%
172	0,3	2226	1430	100%
173	0,3	2226	1430	50%
174	0,3	2226	1430	25%
175	0,3	2226	1001	100%
176	0,3	2226	1001	50%
177	0,3	2226	1001	25%
178	0,3	2226	1859	100%
179	0,3	2226	1859	50%
180	0,3	2226	1859	25%
181	0,3	4134	1430	100%
182	0,3	4134	1430	50%
183	0,3	4134	1430	25%
184	0,3	4134	1001	100%
185	0,3	4134	1001	50%
186	0,3	4134	1001	25%
187	0,3	4134	1859	100%
188	0,3	4134	1859	50%
189	0,3	4134	1859	25%
190	0,2	3180	1430	100%
191	0,2	3180	1430	50%
192	0,2	3180	1430	25%
193	0,2	3180	1001	100%
194	0,2	3180	1001	50%
195	0,2	3180	1001	25%
196	0,2	3180	1859	100%
197	0,2	3180	1859	50%
198	0,2	3180	1859	25%
199	0,2	2226	1430	100%
200	0,2	2226	1430	50%
201	0,2	2226	1430	25%

202	0,2	2226	1001	100%
203	0,2	2226	1001	50%
204	0,2	2226	1001	25%
205	0,2	2226	1859	100%
206	0,2	2226	1859	50%
207	0,2	2226	1859	25%
208	0,2	4134	1430	100%
209	0,2	4134	1430	50%
210	0,2	4134	1430	25%
211	0,2	4134	1001	100%
212	0,2	4134	1001	50%
213	0,2	4134	1001	25%
214	0,2	4134	1859	100%
215	0,2	4134	1859	50%
216	0,2	4134	1859	25%
217	0,1	3180	1430	100%
218	0,1	3180	1430	50%
219	0,1	3180	1430	25%
220	0,1	3180	1001	100%
221	0,1	3180	1001	50%
222	0,1	3180	1001	25%
223	0,1	3180	1859	100%
224	0,1	3180	1859	50%
225	0,1	3180	1859	25%
226	0,1	2226	1430	100%
227	0,1	2226	1430	50%
228	0,1	2226	1430	25%
229	0,1	2226	1001	100%
230	0,1	2226	1001	50%
231	0,1	2226	1001	25%
232	0,1	2226	1859	100%
233	0,1	2226	1859	50%
234	0,1	2226	1859	25%
235	0,1	4134	1430	100%
236	0,1	4134	1430	50%
237	0,1	4134	1430	25%
238	0,1	4134	1001	100%
239	0,1	4134	1001	50%
240	0,1	4134	1001	25%
241	0,1	4134	1859	100%
242	0,1	4134	1859	50%
243	0,1	4134	1859	25%

ANNEX B. RESULTATS DE L'EXPERIMENTACIÓ (Forces i acceleracions)

B.1 Plat de Ø63 mm

Núm. exp.	v_{xf} (N)	v_{yf} (N)	v_{zf} (N)	v_{xa} (N)	v_{ya} (N)
1	460,7394	68,889	548,9151	0,018536	0,012738
2	346,8808	127,869	370,8633	0,077613	0,025092
3	203,6892	139,5896	229,322	0,077974	0,019905
4	378,7817	61,0165	480,2158	0,023963	0,016839
5	284,6328	106,8331	323,0225	0,079028	0,032424
6	166,3354	115,0034	199,6771	0,075019	0,019156
7	555,8143	77,6644	635,3801	0,026073	0,029594
8	411,7483	155,9102	426,2095	0,094881	0,039351
9	238,3795	166,6305	271,5962	0,09329	0,025895
10	614,2569	73,0478	655,9498	0,02727	0,024707
11	459,9028	180,41	450,8422	0,10564	0,030704
12	266,0825	190,291	274,1349	0,10388	0,021734
13	493,5171	77,0836	583,1255	0,030252	0,019146
14	384,5014	143,8444	405,8438	0,082501	0,025428,
15	228,4252	157,4861	257,7359	0,085794	0,016746
16	739,6589	90,6279	803,2162	0,035647	0,027981
17	554,3754	212,7449	522,7167	0,12827	0,035564
18	323,3135	228,3514	325,6207	0,12959	0,026011
19	390,9895	71,1153	491,5454	0,037168	0,01521
20	294,7728	107,0728	336,1399	0,074452	0,038946
21	172,934	117,1521	218,5818	0,077009	0,027671
22	316,8362	62,8408	418,6369	0,035817	0,014635
23	238,3145	98,4728	282,0274	0,068747	0,034303
24	137,7189	94,454	175,101	0,064679	0,022996
25	459,2077	77,466	551,9903	0,041498	0,023833
26	342,6086	127,2095	374,7543	0,092545	0,043287
27	199,724	136,7262	240,8884	0,098181	0,033486
28	341,9416	53,648	451,8552	0,028268	0,026095
29	256,8317	106,6038	302,3135	0,059485	0,028428
30	150,2521	112,6398	192,5151	0,058937	0,023932
31	287,4615	52,4431	406,6352	0,02118	0,015807
32	215,2322	89,5245	273,8986	0,049901	0,024559
33	126,2708	94,2461	180,8507	0,048346	0,019856
34	390,6528	51,5671	477,5666	0,027308	0,02872
35	293,3709	126,7952	329,4967	0,076579	0,032489
36	169,3671	130,8381	206,3129	0,069774	0,02401
37	442,3848	61,0746	543,5334	0,028972	0,019933
38	437,7313	61,1277	545,6764	0,071503	0,024986

39	196,0304	152,2787	248,9808	0,076186	0,015055
40	363,5229	56,1418	460,3899	0,024783	0,019689
41	274,0863	114,4349	313,8017	0,066693	0,022781
42	162,1099	120,9335	199,4611	0,067823	0,015248
43	515,2446	63,4175	610,2591	0,031587	0,02473
44	390,8004	170,8028	425,5166	0,082131	0,030495
45	230,9885	178,5716	270,9847	0,089718	0,022067
46	277,921	43,1108	370,0433	0,02624	0,014222
47	208,6589	84,1888	252,8007	0,057003	0,029231
48	123,5588	90,74	166,8697	0,060153	0,02053
49	233,7696	50,7732	338,945	0,025748	0,010726
50	176,186	71,2031	234,3639	0,048069	0,026886
51	104,1066	76,6231	156,1636	0,048425	0,020536
52	305,279	53,0978	426,6085	0,036646	0,022463
53	241,9987	100,2093	288,0083	0,071026	0,037291
54	139,8644	105,9002	182,58	0,071812	0,03245
55	192,493	37,6087	312,4354	0,019294	0,016525
56	143,1595	73,35	208,1876	0,034189	0,020109
57	82,405	74,3947	128,5326	0,031058	0,014786
58	166,9735	36,3848	282,5015	0,018765	0,012985
59	124,6069	62,7036	187,2069	0,033358	0,01856
60	71,0266	62,4289	116,6636	0,031646	0,013982
61	225,525	37,5601	346,8908	0,031283	0,014632
62	165,2242	85,5514	238,327	0,041503	0,022483
63	95,8582	84,8052	151,3792	0,036802	0,018198
64	247,2801	38,069	357,5654	0,023225	0,017492
65	183,5579	99,407	243,9224	0,049969	0,018877
66	104,6511	97,4521	146,4507	0,044022	0,015121
67	218,8895	39,6327	330,5357	0,019005	0,015376
68	160,709	83,8019	222,454	0,03814	0,015645
69	94,1312	85,8857	142,6138	0,038456	0,011441
70	280,3227	41,7357	401,6119	0,028981	0,020363
71	214,904	117,4161	281,8633	0,053239	0,018017
72	123,5332	115,0158	170,4142	0,053258	0,018837
73	168,367	37,5376	273,9569	0,021037	0,012012
74	124,1327	62,9978	190,7713	0,037602	0,025674
75	72,788	64,5869	126,623	0,038472	0,022167
76	137,833	36,0698	231,1938	0,014354	0,009122
77	104,5647	51,2616	158,1932	0,033601	0,020559
78	62,1311	52,4249	101,1005	0,032344	0,01705
79	186,6925	36,57	303,7903	0,027771	0,017103
80	139,3543	71,2829	208,6645	0,046138	0,029133
81	80,3271	71,4987	132,8233	0,044271	0,022649

B.2 Plat de Ø20 mm (1ª sèrie)

Núm. exp.	vxf (N)	vyf (N)	vzf (N)	vxa (N)	vya (N)
82	631,4118	223,3337	354,584	0,021429	0,022823
83	476,9135	218,0155	146,2299	0,21307	0,044581
84	288,0542	209,4461	123,1303	0,15808	0,030446
85	466,2231	245,3575	202,9114	0,017407	0,018564
86	338,6502	85,3093	102,8413	0,13739	0,038859
87	200,7984	87,8744	120,5663	0,1154	0,025602
88	800,0489	237,901	499,8827	0,023832	0,027358
89	603,2821	301,845	225,4712	0,25722	0,052583
90	369,2558	280,3208	141,8548	0,18976	0,036442
91	857,1201	368,2111	610,6684	0,019503	0,021557
92	589,8953	213,107	245,915	0,19802	0,035391
93	300,5004	196,2885	115,4746	0,11657	0,023841
94	599,2656	256,3468	415,9266	0,021193	0,015549
95	467,9836	201,6696	199,541	0,19457	0,030111
96	269,1505	192,3816	103,365	0,11127	0,018667
97	996,9601	380,6382	674,0735	0,024328	0,02404
98	713,1029	320,0337	300,7756	0,2734	0,035454
99	335,0362	270,49	126,8261	0,12669	0,024138
100	463,1723	204,5794	298,1953	0,026784	0,015896
101	383,6245	132,87	159,4652	0,19708	0,048293
102	235,0163	126,6761	95,8773	0,14069	0,027853
103	242,8674	128,735	149,4638	0,019348	0,014205
104	187,4857	67,1053	70,8883	0,090779	0,02418
105	112,2962	66,0557	43,6609	0,076442	0,022878
106	584,6545	235,8112	364,4222	0,031509	0,017661
107	466,901	174,9848	196,9036	0,23713	0,054187
108	287,241	163,9609	122,418	0,17795	0,032601
109	376,965	139,0584	302,5292	0,018724	0,014148
110	288,9727	121,3504	151,2473	0,15377	0,027567
111	155,3524	105,997	81,9072	0,10525	0,020482
112	293,9799	115,9605	225,5263	0,015683	0,012789
113	247,7209	92,5555	127,003	0,14783	0,037995
114	141,8761	83,2309	75,3519	0,081707	0,015797
115	468,2906	163,8482	347,7544	0,021739	0,019612
116	340,5563	152,3026	177,3656	0,16718	0,033982
117	181,0729	131,5217	94,333	0,10759	0,02524
118	535,6539	195,2466	425,0838	0,020932	0,014281
119	416,4873	203,0619	236,2799	0,18553	0,02597
120	229,0581	175,116	136,4756	0,099204	0,014477
121	381,8499	155,3101	321,5467	0,0196	0,011426

122	274,9631	135,5387	162,4957	0,1066	0,018266
123	141,0452	115,5052	84,2572	0,067118	0,013162
124	676,7103	232,7573	537,2124	0,023812	0,016835
125	526,8584	268,1514	295,1261	0,22305	0,029264
126	279,8594	227,1495	162,4818	0,11356	0,017695
127	302,7354	125,5013	227,5062	0,020755	0,010882
128	236,9947	94,4294	116,7742	0,12009	0,02334
129	129,635	86,8571	65,128	0,083238	0,017868
130	230,7323	97,7029	121,9768	0,01456	0,008826
131	198,6035	73,8388	67,6426	0,10622	0,030711
132	121,0143	71,4504	42,9339	0,068785	0,01338
133	388,0032	154,313	207,6142	0,016566	0,010892
134	296,4991	116,2208	97,995	0,14405	0,023909
135	164,9228	104,2024	50,3034	0,10185	0,02027
136	191,7017	117,2683	245,194	0,018639	0,010922
137	298,0618	197,6094	325,3453	0,1352	0,024661
138	342,6903	187,224	366,7865	0,058267	0,012094
139	529,1869	163,4935	297,8469	0,011408	0,008252
140	472,0235	99,0996	362,3269	0,063388	0,012619
141	418,1765	112,7331	394,3762	0,04082	0,01024
142	256,4452	81,594	194,9789	0,024342	0,013496
143	234,4925	105,5264	110,6351	0,1697	0,031728
144	131,6185	91,2955	67,8654	0,089418	0,015535
145	261,2028	99,1856	197,9206	0,025232	0,010694
146	202,4558	113,1072	112,0325	0,09475	0,015557
147	101,3272	93,9103	57,124	0,055011	0,010923
148	99,3248	132,8098	48,8285	0,016859	0,009044
149	137,7923	64,1783	131,1422	0,12176	0,01725
150	98,8223	63,0345	170,2578	0,038524	0,007835
151	443,1831	119,2791	54,31	0,019482	0,012162
152	343,9845	219,573	121,1628	0,10621	0,021087
153	206,3936	181,9311	171,8878	0,051119	0,010851
154	167,0585	71,2536	133,5872	0,013478	0,009638
155	150,9208	51,9553	90,6689	0,089466	0,023683
156	87,4151	46,7087	59,5391	0,053254	0,012605
157	114,7027	41,0256	99,5991	0,009403	0,006213
158	99,1314	55,8341	63,1912	0,054187	0,011708
159	58,0536	52,533	41,1782	0,041374	0,010289
160	206,9029	71,8195	152,4476	0,018462	0,011186
161	179,6603	81,8847	96,608	0,10029	0,028554
162	104,7112	74,058	59,5867	0,062251	0,013849

B.3 Plat de Ø20 mm (2ª sèrie)

Núm. exp.	vxf (N)	vyf (N)	vzf (N)	vxa (N)	vya (N)
163	22,20643	28,34126	19,17972	0,010524	0,018164
164	57,69438	31,00862	35,70184	0,05332	0,050321
165	48,14275	24,27673	31,34748	0,040727	0,031421
166	19,37678	24,2322	18,89386	0,01149	0,012042
167	45,47698	22,78799	28,9179	0,041627	0,027158
168	37,94494	22,37533	26,199	0,033277	0,018245
169	22,98815	31,66991	18,832	0,010029	0,019819
170	68,14943	35,67673	42,26214	0,063437	0,057623
171	58,70142	28,50518	36,29933	0,050526	0,0369
172	25,65674	32,61684	18,28253	0,011221	0,013951
173	68,0375	31,3155	40,86621	0,055059	0,026757
174	56,19712	31,96031	36,27153	0,050241	0,018302
175	22,52662	27,96864	18,14934	0,010279	0,018968
176	54,22762	26,02509	30,26821	0,042578	0,036209
177	44,09339	24,38647	26,56945	0,03201	0,022585
178	27,13781	36,29316	16,85665	0,010975	0,011692
179	98,33626	41,30747	49,47947	0,094065	0,046249
180	71,81492	39,19029	43,16444	0,061879	0,019893
181	22,83093	25,10918	19,18734	0,013003	0,025163
182	47,72461	24,05511	31,17931	0,04691	0,070374
183	40,97283	17,90946	26,35458	0,036969	0,037739
184	20,57161	23,37491	21,30151	0,012516	0,015575
185	41,00671	20,67428	30,93308	0,041298	0,036825
186	37,09913	18,08239	26,23058	0,041131	0,020241
187	27,37139	29,67299	23,72165	0,014977	0,025875
188	57,8793	28,12243	36,53243	0,052692	0,084537
189	48,84639	20,99732	30,25164	0,040501	0,034823
190	16,76607	20,26919	18,54801	0,009895	0,012815
191	43,24795	21,92548	32,94917	0,040917	0,04014
192	35,05189	23,49646	27,84809	0,03231	0,017197
193	16,37273	18,61769	18,35707	0,009072	0,021173
194	36,20731	20,30743	30,44774	0,030029	0,034602
195	31,0299	16,71063	25,0187	0,024432	0,025047
196	17,13833	22,05851	18,10823	0,009666	0,01251
197	50,82779	25,12155	37,18523	0,047299	0,035509
198	41,29656	25,03342	30,55451	0,037826	0,024526
199	23,42831	27,63716	18,54661	0,010844	0,030057
200	55,98509	26,57452	32,9197	0,051054	0,047621
201	42,2765	23,90542	27,89504	0,030992	0,027693
202	17,72124	21,45132	17,36728	0,009439	0,010721

203	46,58659	22,51758	34,48621	0,042405	0,02351
204	35,23539	22,35637	28,55478	0,032677	0,014146
205	26,45686	31,09272	19,32547	0,011002	0,027347
206	68,21224	31,94763	38,70886	0,062336	0,046404
207	50,48029	27,66677	31,3798	0,035881	0,024977
208	19,44805	21,48192	21,40498	0,010874	0,01385
209	39,71749	18,15094	31,94255	0,038389	0,024548
210	33,36167	17,45528	25,92638	0,03486	0,016358
211	18,35777	20,11549	21,59773	0,007915	0,014779
212	32,40703	18,009	27,73991	0,027906	0,036947
213	26,54583	13,57739	23,2349	0,021514	0,022487
214	18,40819	21,89047	20,56317	0,009991	0,012012
215	44,91699	20,25707	36,8901	0,041857	0,026457
216	37,24905	19,75697	29,15378	0,037271	0,019861
217	11,78172	11,80438	15,14593	0,006502	0,015267
218	31,23776	17,21865	29,68143	0,028343	0,04062
219	24,33728	14,36862	23,30295	0,021327	0,02473
220	9,080237	8,659303	14,6327	0,005351	0,008813
221	26,36599	14,69024	26,69679	0,027124	0,01909
222	19,22829	14,65519	20,93062	0,018868	0,013484
223	17,58942	19,77547	17,65771	0,010516	0,022053
224	36,23504	19,35191	33,05186	0,029388	0,033713
225	28,13522	16,09928	25,02934	0,021561	0,022021
226	17,48097	19,80699	16,55954	0,009967	0,015063
227	37,60891	20,04854	32,5352	0,033425	0,026047
228	27,1178	19,75669	25,56471	0,024765	0,013933
229	18,256	19,63123	16,54771	0,010063	0,01693
230	34,36053	16,92255	25,21017	0,034136	0,029996
231	24,54214	15,29531	21,93844	0,019218	0,019408
232	21,99781	24,31048	17,69956	0,011156	0,015785
233	40,72976	21,93893	34,62134	0,036767	0,023592
234	30,67262	22,01284	27,80511	0,028352	0,014885
235	16,93527	17,97865	19,57006	0,007387	0,011527
236	29,69429	15,3766	26,57045	0,026399	0,028656
237	20,74787	11,79905	21,29059	0,016424	0,017177
238	14,62883	15,75142	19,28299	0,006869	0,00838
239	23,03112	12,03416	24,15992	0,022399	0,016294
240	18,97898	11,53448	19,66999	0,019158	0,009659
241	18,51826	19,86027	19,9615	0,008391	0,013528
242	35,66896	17,38041	30,29589	0,031399	0,02478
243	23,83041	12,93028	23,19757	0,019999	0,023628

ANNEX C. RUGOSITATS MESURADES

C.1 Plat de Ø63 mm

<i>nº exp.</i>	<i>Ra (µm)</i>	<i>Rq (µm)</i>			
1	0,79	0,966	41	1,397	1,756
2	0,646	0,801	42	1,354	1,741
3	0,69	0,825	43	1,547	1,907
4	0,888	1,066	44	1,127	1,424
5	0,8	0,983	45	1,332	1,625
6	0,806	0,981	46	1,017	1,298
7	0,757	0,946	47	0,875	1,121
8	0,605	0,726	48	1,108	1,355
9	0,679	0,8	49	0,743	0,916
10	0,796	0,968	50	0,717	0,909
11	0,729	0,885	51	0,794	1,012
12	0,758	0,916	52	0,959	1,204
13	1,056	1,319	53	0,798	1,006
14	0,785	0,975	54	0,83	0,995
15	0,895	1,082	55	1,294	1,619
16	0,734	0,885	56	1,206	1,501
17	0,761	0,914	57	1,101	1,407
18	0,731	0,903	58	1,333	1,709
19	0,846	0,991	59	1,207	1,554
20	0,751	0,973	60	1,303	1,677
21	0,882	1,051	61	1,244	1,529
22	0,948	1,137	62	1,111	1,359
23	0,984	1,163	63	1,096	1,404
24	0,97	1,148	64	1,62	1,978
25	0,863	1,061	65	1,596	1,955
26	0,801	1,016	66	1,579	1,926
27	0,847	1,046	67	1,759	2,177
28	1,07	1,33	68	1,596	1,99
29	0,83	1,005	69	1,765	2,239
30	0,833	1,015	70	1,533	1,908
31	1,044	1,349	71	1,653	2,02
32	0,941	1,193	72	1,562	1,889
33	1,179	1,515	73	0,952	1,212
34	0,834	1,023	74	0,826	1,058
35	0,707	0,862	75	0,885	1,119
36	0,672	0,83	76	0,901	1,106
37	1,6	2,018	77	0,817	0,999
38	1,363	1,72	78	0,879	1,111
39	1,234	1,547	79	0,916	1,135
40	1,764	2,155	80	0,854	1,062
			81	0,87	1,08

C.2 Plat de Ø20 mm (1ª sèrie)

<i>nº exp.</i>	<i>Ra (µm)</i>	<i>Rq (µm)</i>			
82	0,55	0,732	122	0,899	1,146
83	0,699	0,902	123	0,858	1,166
84	0,451	0,604	124	0,828	1,141
85	0,749	0,921	125	0,825	1,06
86	0,759	0,96	126	0,563	0,807
87	0,585	0,745	127	0,84	1,093
88	0,668	0,95	128	0,625	0,793
89	0,853	1,068	129	0,503	0,625
90	0,441	0,616	130	0,753	0,961
91	0,698	0,953	131	0,637	0,802
92	0,709	0,929	132	0,524	0,652
93	0,789	1,049	133	0,936	1,173
94	0,847	1,127	134	0,637	0,806
95	0,717	0,909	135	0,55	0,685
96	0,357	0,47	136	0,762	0,992
97	0,769	1,004	137	0,736	0,939
98	0,638	0,859	138	0,558	0,716
99	0,97	1,303	139	0,888	1,128
100	0,704	0,878	140	0,802	0,992
101	0,71	0,884	141	0,559	0,733
102	0,555	0,724	142	0,718	0,945
103	0,63	0,792	143	0,834	1,05
104	0,551	0,707	144	0,461	0,603
105	0,432	0,545	145	1,057	1,364
106	0,638	0,832	146	0,943	1,236
107	0,884	1,081	147	0,611	0,79
108	0,572	0,772	148	1,184	1,537
109	0,779	1,01	149	0,701	0,886
110	0,934	1,222	150	0,526	0,652
111	0,599	0,777	151	0,901	1,187
112	0,846	1,066	152	0,854	1,124
113	0,723	0,901	153	0,869	1,138
114	0,557	0,708	154	0,781	1,032
115	0,821	1,071	155	0,609	0,781
116	0,837	1,09	156	0,653	0,809
117	0,548	0,708	157	0,883	1,121
118	0,993	1,28	158	0,663	0,837
119	0,838	1,095	159	0,537	0,69
120	0,627	0,82	160	0,732	0,936
121	0,794	0,997	161	0,668	0,851
			162	0,571	0,721

C.3 Plat de Ø20 mm (2ª sèrie)

<i>nº exp.</i>	<i>Ra (µm)</i>	<i>Rq (µm)</i>			
163	2,01	2,508	203	2,021	2,483
164	0,736	1,033	204	1,145	1,459
165	0,464	0,705	205	3,359	4,205
166	1,928	2,363	206	2,159	2,687
167	1,229	1,601	207	1,206	1,579
168	0,84	1,214	208	1,416	1,746
169	1,936	2,48	209	0,797	0,993
170	0,829	1,171	210	0,524	0,743
171	0,489	0,726	211	2,855	3,443
172	2,614	3,22	212	1,007	1,28
173	1,648	2,103	213	1,079	1,37
174	0,64	0,899	214	1,443	1,799
175	3,173	3,742	215	0,671	0,872
176	1,644	1,965	216	0,759	1,032
177	1,062	1,38	217	2,052	2,452
178	2,208	2,889	218	1,388	1,716
179	1,86	2,366	219	1,091	1,381
180	0,761	1,103	220	2,28	2,808
181	1,201	1,53	221	1,329	1,628
182	0,671	0,894	222	0,983	1,255
183	0,574	0,81	223	2,048	2,548
184	0,875	1,106	224	1,236	1,511
185	0,448	0,635	225	0,997	1,251
186	0,623	0,872	226	3,237	4,031
187	1,67	2,01	227	2,231	2,781
188	0,86	1,08	228	1,094	1,563
189	0,735	0,979	229	3,065	3,762
190	2,176	2,72	230	1,63	1,997
191	1,079	1,36	231	1,299	1,583
192	0,666	0,927	232	3,14	3,876
193	1,903	2,343	233	2,195	2,732
194	1,046	1,267	234	1,16	1,536
195	0,938	1,214	235	1,561	1,938
196	1,769	2,282	236	1,022	1,26
197	1,158	1,446	237	1,082	1,337
198	0,774	1,021	238	1,553	1,872
199	3,521	4,473	239	0,773	1,101
200	2,152	2,612	240	0,716	0,929
201	1,524	1,93	241	1,729	2,155
202	3,291	3,967	242	0,979	1,264
			243	1,073	1,319

ANNEX D. PROGRAMES GUI

D.1 Forces

```
function varargout = Forces(varargin)
% FORCES MATLAB code for Forces.fig
%   FORCES, by itself, creates a new FORCES or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = FORCES returns the handle to a new FORCES or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   FORCES('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in FORCES.M with the given input arguments.
%
%   FORCES('Property','Value',...) creates a new FORCES or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%   applied to the GUI before Forces_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
application
%   stop. All inputs are passed to Forces_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Forces

% Last Modified by GUIDE v2.5 19-Apr-2017 11:30:50

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Forces_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Forces_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Forces is made visible.
function Forces_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```



```
% varargin    command line arguments to Forces (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Forces
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Forces wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Forces_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject     handle to figure
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
clc;
format long;

global Fs
global fx
global fy
global fz

cla(handles.axes1);
cla(handles.axes2);
cla(handles.axes3);
cla(handles.axes4);
cla(handles.axes5);
cla(handles.axes6);

set(handles.text2, 'String', '0');
set(handles.text3, 'String', '0');
set(handles.text4, 'String', '0');

[filename, pathname] = uigetfile({'*.mat*'}, 'Arxiu de so');
forces = load(strcat(pathname, filename));

fx = forces.A(:,10);
fy = forces.A(:,11);
fz = forces.A(:,12);

Fs = str2double(get(handles.edit1, 'String'));
t=(0:1/Fs:(length(fx)-1)/Fs)';
plot(handles.axes1, t, fx);
plot(handles.axes2, t, fy);
plot(handles.axes3, t, fz);
```

```
FFX = fft(fx);
FFY = fft(fy);
FFZ = fft(fz);

L = length(FFX);

P2 = abs(FFX/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L/2;
plot(handles.axes4,f,P1)

[m, i] = max(P1);
set(handles.text2,'String',num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
set(handles.text8,'String',num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l,n]=max(P4);
set(handles.text9,'String',num2str(f(n)));

P2 = abs(FFY/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L/2;
plot(handles.axes5,f,P1)

[m, i] = max(P1);
set(handles.text3,'String',num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
set(handles.text10,'String',num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l,n]=max(P4);
set(handles.text11,'String',num2str(f(n)));

P2 = abs(FFZ/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(handles.axes6,f,P1)

[m, i] = max(P1);
set(handles.text4,'String',num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
set(handles.text12,'String',num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l,n]=max(P4);
set(handles.text13,'String',num2str(f(n)));
```

```
set(handles.edit2,'String',num2str(t(1)));
set(handles.edit3,'String',num2str(t(end)));
set(handles.edit4,'String',num2str(t(1)));
set(handles.edit5,'String',num2str(t(end)));
set(handles.edit6,'String',num2str(t(1)));
set(handles.edit7,'String',num2str(t(end)));

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Fs
global fx
global fy
global fz

cla(handles.axes1);
cla(handles.axes4);

ti = str2double(get(handles.edit2, 'String'));
tf = str2double(get(handles.edit3, 'String'));
ti = round(ti*Fs+1)/Fs;
tf = round(tf*Fs)/Fs;
tti = int64(ti*Fs);
ttf = int64(tf*Fs-1);
fxx = fx(tti:ttf);
ty = (1/Fs:1/Fs:(tf-ti));

set(handles.text17,'String',num2str(rms(fxx)));

if (get(handles.radiobutton1,'Value') == 1)
    m = mean(fxx);
    fxx = fxx - m;
end

plot(handles.axes1, ty, fxx);

FXX = fft(fxx);
```

```
L = length(FXX);
P2 = abs(FXX/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
```

```
f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(handles.axes4,f,P1)
```

```
[m, i] = max(P1);
set(handles.text2,'String',num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
set(handles.text8,'String',num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l,n]=max(P4);
set(handles.text9,'String',num2str(f(n)));
```

```
function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a
double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a
double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global Fs
global fx
global fy
global fz

cla(handles.axes2);
cla(handles.axes5);

ti = str2double(get(handles.edit4, 'String'));
tf = str2double(get(handles.edit5, 'String'));
ti = round(ti*Fs+1)/Fs;
tf = round(tf*Fs)/Fs;
tti = int64(ti*Fs);
ttf = int64(tf*Fs-1);
fyy = fy(tti:ttf);
ty = (1/Fs:1/Fs:(tf-ti));

set(handles.text18,'String',num2str(rms(fyy)));

if (get(handles.radiobutton1,'Value') == 1)
    m = mean(fyy);
    fyy = fyy - m;
end

plot(handles.axes2, ty, fyy);

FYY = fft(fyy);
L = length(FYY);
P2 = abs(FYY/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(handles.axes5,f,P1)

[m, i] = max(P1);
set(handles.text3,'String',num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
```

```
set(handles.text10,'String',num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l,n]=max(P4);
set(handles.text11,'String',num2str(f(n)));

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton4 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global Fs
global fx
global fy
global fz

cla(handles.axes3);
cla(handles.axes6);

ti = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
tf = str2double(get(handles.edit7, 'String'));
ti = round(ti*Fs+1)/Fs;
tf = round(tf*Fs)/Fs;
tti = int64(ti*Fs);
ttf = int64(tf*Fs-1);
fzz = fz(tti:ttf);
ty = (1/Fs:1/Fs:(tf-ti));

set(handles.text19, 'String', num2str(rms(fzz)));

if (get(handles.radiobutton1, 'Value') == 1)
    m = mean(fzz);
    fzz = fzz - m;
end

plot(handles.axes3, ty, fzz);

FZZ = fft(fzz);
L = length(FZZ);
P2 = abs(FZZ/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(handles.axes6, f, P1)

[m, i] = max(P1);
set(handles.text4, 'String', num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
set(handles.text12, 'String', num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l,n]=max(P4);
set(handles.text13, 'String', num2str(f(n)));

% --- Executes on button press in radiobutton1.
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to radiobutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject, 'Value') returns toggle state of radiobutton1
```


D.2 Acceleracions

```
function varargout = Acceleracions(varargin)
% ACCELERACIONS MATLAB code for Acceleracions.fig
% ACCELERACIONS, by itself, creates a new ACCELERACIONS or raises the
existing
% singleton*.
%
% H = ACCELERACIONS returns the handle to a new ACCELERACIONS or the
handle to
% the existing singleton*.
%
% ACCELERACIONS('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the
local
% function named CALLBACK in ACCELERACIONS.M with the given input
arguments.
%
% ACCELERACIONS('Property','Value',...) creates a new ACCELERACIONS or
raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
% applied to the GUI before Acceleracions_OpeningFcn gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property
application
% stop. All inputs are passed to Acceleracions_OpeningFcn via
varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Acceleracions

% Last Modified by GUIDE v2.5 19-Apr-2017 15:37:26

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Acceleracions_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Acceleracions_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Acceleracions is made visible.
function Acceleracions_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

```
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to Acceleracions (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Acceleracions
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Acceleracions wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Acceleracions_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
format long

global tx
global ty
global acx
global acy
global Fs
global ACC

clc

cla(handles.axes1);
cla(handles.axes2);
cla(handles.axes3);
cla(handles.axes4);

ACC = lvm_import;

tx = ACC.Segment1.data(:,1);
acx = ACC.Segment1.data(:,2);
ty = ACC.Segment1.data(:,3);
acy = ACC.Segment1.data(:,4);

Fs = 1/tx(2)

acx(isnan(acx))=0; %Per treure els valors de NaN
acy(isnan(acy))=0;
```

```
set(handles.text17,'String',num2str(rms(acx)));
set(handles.text18,'String',num2str(rms(acy)));

if (get(handles radiobutton1, 'Value') == 1)

    m = mean(acx);
    acx = acx - m;
    m = mean(acy);
    acy = acy - m;

end

plot(handles.axes1,tx,acx);
plot(handles.axes2,ty,acy);

FACX = fft(acx);
FACY = fft(acy);

L = length(FACX);

P2 = abs(FACX/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L/2;
plot(handles.axes3,f,P1)

[m, i] = max(P1);
set(handles.text2,'String',num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
set(handles.text9,'String',num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l,n]=max(P4);
set(handles.text10,'String',num2str(f(n)));
P5=P4;
P5(n)=0;
[o,p]=max(P5);
set(handles.text11,'String',num2str(f(p)));

P2 = abs(FACY/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L/10;
plot(handles.axes4,f,P1)

[m, i] = max(P1);
set(handles.text3,'String',num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
set(handles.text12,'String',num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l,n]=max(P4);
```

```
set(handles.text13,'String',num2str(f(n)));
P5=P4;
P5(n)=0;
[o,p]=max(P5);
set(handles.text14,'String',num2str(f(p)));

set(handles.edit1,'String',num2str(tx(1)));
set(handles.edit2,'String',num2str(tx(end)));
set(handles.edit3,'String',num2str(ty(1)));
set(handles.edit4,'String',num2str(ty(end)));
set(handles.text7,'String',num2str(Fs));

% --- Executes on button press in radiobutton1.
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to radiobutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton1

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
format long

global Fs
global tx
global ty
global acx
global acy

cla(handles.axes1);
cla(handles.axes3);

ti = str2double(get(handles.edit1, 'String'));
tf = str2double(get(handles.edit2, 'String'));
ti = round(ti*Fs+1)/Fs;
tf = round(tf*Fs)/Fs;

tti = int64(ti*Fs);
ttf = int64(tf*Fs-1);
acxx = acx(tti:ttf);
tx = (1/Fs:1/Fs:(tf-ti));

cla(handles.text17);
set(handles.text17,'String',num2str(rms(acxx)));

if (get(handles.radiobutton1,'Value') == 1)
    m = mean(acxx);
    acxx = acxx - m;
end

plot(handles.axes1, tx, acxx);

ACXX = fft(acxx);
L = length(ACXX);
P2 = abs(ACXX/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

f = Fs*(0:(L/2))/L/2;
plot(handles.axes3,f,P1)
```

```
[m, i] = max(P1);
set(handles.text2, 'String', num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j, k]=max(P3);
set(handles.text9, 'String', num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l, n]=max(P4);
set(handles.text10, 'String', num2str(f(n)));
P5=P4;
P5(n)=0;
[o, p]=max(P5);
set(handles.text11, 'String', num2str(f(p)));

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit3 as text
%         str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of edit3 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit4 as text
%         str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of edit4 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end  
  
% --- Executes on button press in pushbutton3.  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject      handle to pushbutton3 (see GCBO)  
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)  
format long  
  
global Fs  
global tx  
global ty  
global acx  
global acy  
  
cla(handles.axes2);  
cla(handles.axes4);  
  
ti = str2double(get(handles.edit3, 'String'));  
tf = str2double(get(handles.edit4, 'String'));  
ti = round(ti*Fs+1)/Fs;  
tf = round(tf*Fs)/Fs;  
  
tti = int64(ti*Fs);  
ttf = int64(tf*Fs-1);  
  
acyy = acy(tti:ttf);  
ty = (1/Fs:1/Fs:(tf-ti));  
  
cla(handles.text18);  
set(handles.text18,'String',num2str(rms(acyy)));  
  
if (get(handles.radiobutton1,'Value') == 1)  
    m = mean(acyy);  
    acyy = acyy - m;  
end  
  
plot(handles.axes2, ty, acyy);  
  
ACYY = fft(acyy);  
L = length(ACYY);  
P2 = abs(ACYY/L);  
P1 = P2(1:L/2+1);  
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);  
  
f = Fs*(0:(L/2))/L/10;  
plot(handles.axes4,f,P1)  
  
[m, i] = max(P1);  
set(handles.text3,'String',num2str(f(i)));  
P3=P1;  
P3(i)=0;  
[j,k]=max(P3);  
set(handles.text12,'String',num2str(f(k)));
```

```
P4=P3;  
P4(k)=0;  
[l,n]=max(P4);  
set(handles.text13,'String',num2str(f(n)));  
P5=P4;  
P5(n)=0;  
[o,p]=max(P5);  
set(handles.text14,'String',num2str(f(p)));
```


D.3 Àudio

```
function varargout = Audio(varargin)
% AUDIO MATLAB code for Audio.fig
%     AUDIO, by itself, creates a new AUDIO or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = AUDIO returns the handle to a new AUDIO or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     AUDIO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in AUDIO.M with the given input arguments.
%
%     AUDIO('Property','Value',...) creates a new AUDIO or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%     applied to the GUI before Audio_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
application
%     stop. All inputs are passed to Audio_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Audio

% Last Modified by GUIDE v2.5 18-Apr-2017 15:54:52

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Audio_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Audio_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Audio is made visible.
function Audio_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Audio (see VARARGIN)
```

```
% Choose default command line output for Audio
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Audio wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Audio_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global mono
global monoy
global Fs

format long

cla(handles.axes1);
cla(handles.axes2);

set(handles.text2, 'String', '0');

[filename, pathname] = uigetfile({'*.wav'}, 'Arxiu de so');
[y, Fs] = audioread(strcat(pathname, filename));
mono = (y(:,1)+y(:,2))/2;
%mono = y(:,1);
t=(0:1/Fs:(length(y)-1)/Fs)';
plot(handles.axes1, t, mono)
Fs
set(handles.edit1, 'String', num2str(t(1)));
set(handles.edit2, 'String', num2str(t(end)));

ti = t(1);
tf = t(end);
ti = round(ti*Fs+1)/Fs;
tf = round(tf*Fs)/Fs;
tti = int64(ti*Fs);
ttf = int64(tf*Fs);
monoy = mono(tti:ttf);
ty = (0:1/Fs:(tf-ti));
length(ty)
length(monoy)
plot(ty, monoy);
```

```
Y = fft(monoy);
L = length(monoy);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

f = Fs*(0:(L/2))/L/2 / 4;    %Buscar perquè dividit per 4!!! <== 2^2
plot(handles.axes2,f,P1)

[m, i] = max(P1);
set(handles.text2, 'String', num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
set(handles.text4,'String',num2str(f(k)));
P4=P3;
P4(k)=0;
[l,n]=max(P4);
set(handles.text5,'String',num2str(f(n)));

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global mono
global monoy
global Fs

format long

cla(handles.axes1);
cla(handles.axes2);

ti = str2double(get(handles.edit1,'String'));
tf = str2double(get(handles.edit2,'String'));
ti = round(ti*Fs+1)/Fs;
tf = round(tf*Fs)/Fs;
tti = int64(ti*Fs);
ttf = int64(tf*Fs);
monoy = mono(tti:ttf);
ty = (0:1/Fs:(tf-ti));
length(ty)
length(monoy)
plot(handles.axes1, ty, monoy);

set(handles.text9,'String',num2str(rms(monoy)));

Y = fft(monoy);
L = length(monoy);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

f = Fs*(0:(L/2))/L/2 / 4;    %Buscar perquè dividit per 4!!! <== 2^2
plot(handles.axes2,f,P1)

[m, i] = max(P1);
set(handles.text2, 'String', num2str(f(i)));
P3=P1;
P3(i)=0;
[j,k]=max(P3);
set(handles.text4,'String',num2str(f(k)));
P4=P3;
```

```
P4(k)=0;
[1,n]=max(P4);
set(handles.text5,'String',num2str(f(n)));

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global mono
global monoy
global Fs

sound(monoy, Fs);
```

D.4 Interfície d'ús

```
function varargout = Aplicacio(varargin)
% APLICACIO MATLAB code for Aplicacio.fig
%     APLICACIO, by itself, creates a new APLICACIO or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = APLICACIO returns the handle to a new APLICACIO or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     APLICACIO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in APLICACIO.M with the given input
%     arguments.
%
%     APLICACIO('Property','Value',...) creates a new APLICACIO or raises
%     the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
%     are
%     applied to the GUI before Aplicacio_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
%     application
%     stop. All inputs are passed to Aplicacio_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Aplicacio

% Last Modified by GUIDE v2.5 28-Aug-2017 01:37:01

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Aplicacio_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Aplicacio_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Aplicacio is made visible.
function Aplicacio_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% varargin    command line arguments to Aplicacio (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Aplicacio
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Aplicacio wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

global D,
global z,
global r,
global h,
global S,
global F,
global ae,
global ap,
global externos,
global tacc,
global xacc,
global yacc,
global tf,
global xf,
global yf,
global zf,
global FFTXF,
global FFXYF,
global FFTZF,
global FFTFF,
global FFTXA,
global FFXYA,
global FFTFA,
global VeffX,
global VeffY,
global VeffZ,
global VeffAX,
global VeffAY,
global FFTXFP,
global FFTXFS,
global FFXYFP,
global FFXYFS,
global FFTZFP,
global FFTZFS,
global FFTXAP,
global FFTXAS,
global FFXYAP,
global FFXYAS,

VeffX = 0;
VeffY = 0;
VeffZ = 0;
VeffAX = 0;
VeffAY = 0;
FTTXFP = 0;
FTTXFS = 0;
FFXYFP = 0;
FFXYFS = 0;
```

```
FFTZFP = 0;
FFTZFS = 0;
FFTXAP = 0;
FFTXAS = 0;
FFTYAP = 0;
FFTYAS = 0;

set(handles.edit1,'string','');
set(handles.edit2,'string','');
set(handles.edit3,'string','');
set(handles.edit4,'string','');
set(handles.edit5,'string','');
set(handles.edit6,'string','');
set(handles.edit7,'string','');
set(handles.edit8,'string','');

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Aplicacio_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu2
% contents as cell array
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
% popupmenu2

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenu3.
function popupmenu3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```



```
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu3  
contents as cell array  
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from  
popupmenu3
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.  
function popupmenu3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to popupmenu3 (see GCBO)  
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.  
%         See ISPC and COMPUTER.  
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

```
% --- Executes on button press in checkbox1.  
function checkbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to checkbox1 (see GCBO)  
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox1
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton2.  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)  
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)  
global D,  
global z,  
global r,  
global h,  
global S,  
global F,  
global ae,  
global ap,  
global externos,  
global tacc,  
global xacc,  
global yacc,  
global tf,  
global xf,  
global yf,  
global zf,  
global FFTXF,  
global FFTYF,  
global FFTZF,  
global FFTFF,  
global FFTXA,  
global FFTYA,  
global FFTFA,  
global VeffX,
```

```
global VefFY,
global VefFZ,
global VefAX,
global VefAY,
global FFTXFP,
global FFTXFS,
global FFTYFP,
global FFTYFS,
global FFTZFP,
global FFTZFS,
global FFTXAP,
global FFTXAS,
global FFTYAP,
global FFTYAS,

clc;

[FileName,PathName] = uigetfile('*.txt','Selecciona l'arxiu de forces);
data = tdfread(strcat(PathName,FileName),' ');

tf = data.tx;
xf = data.fx;
yf = data.fy;
zf = data.fz;

VefFX = rms(xf)
VefFY = rms(yf)
VefFZ = rms(zf)

FFTXF = fft(xf);
FFTYF = fft(yf);
FFTZF = fft(zf);

L = length(FFTXF);

P2 = abs(FFTXF/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
FFTXF = P1;

P2 = abs(FFTYF/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
FFTYF = P1;

P2 = abs(FFTZF/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
FFTZF = P1;

Fs = 1/(tf(2)-tf(1));
FFTFF = Fs*(0:(L/2))/L;

[m, i] = max(FFTXF);
FFTXFP = FFTFF(i)
[m, i] = max(FFTXF(FFTXF~=max(FFTXF)));
FFTXFS = FFTFF(i)

[m, i] = max(FFTYF);
```

```
FFTYFP = FFTFF(i)
[m, i] = max(FFTYF(FFTYF~=max(FFTYF)));
FFTYFS = FFTFF(i)

[m, i] = max(FFTZF);
FFTZFP = FFTFF(i)
[m, i] = max(FFTZF(FFTZF~=max(FFTZF)));
FFTZFS = FFTFF(i)

graficar(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global D,
global z,
global r,
global h,
global S,
global F,
global ae,
global ap,
global externos,
global tacc,
global xacc,
global yacc,
global tf,
global xf,
global yf,
global zf,
global FFTXF,
global FFXYF,
global FFTZF,
global FFTFF,
global FFTXA,
global FFXYA,
global FFTFA,
global VefFX,
global VefFY,
global VefFZ,
global VefAX,
global VefAY,
global FFTXFP,
global FFTXFS,
global FFXYFP,
global FFXYFS,
global FFTZFP,
global FFTZFS,
global FFTXAP,
global FFTXAS,
global FFXYAP,
global FFXYAS,

clc;

[FileName,PathName] = uigetfile('*.txt','Selecciona l'arxiu
d'acceleracions');
```

```
data = tdfread(strcat(PathName,FileName),' ');

tacc = data.tx;
xacc = data.acx;
yacc = data.acy;

VefAX = rms(xacc);
VefAY = rms(yacc);

FFTXA = fft(xacc);
FFTYA = fft(yacc);

L = length(FFTXA);

P2 = abs(FFTXA/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
FFTXA = P1;

P2 = abs(FFTYA/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
FFTYA = P1;

Fs = 1/(tacc(2)-tacc(1));
FFTFX = Fs*(0:(L/2))/L;

[m, i] = max(FFTXA);
FFTXAP = FFTFX(i);
[m, i] = max(FFTXA(FFTXA~=max(FFTXA)));
FFTXAS = FFTFX(i);

[m, i] = max(FFTYA);
FFTYAP = FFTFX(i);
[m, i] = max(FFTYA(FFTYA~=max(FFTYA)));
FFTYAS = FFTFX(i);

graficar(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu1
contents as cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu1
graficar(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end  
  
% --- Executes on button press in pushbutton1.  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)  
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)  
global D,  
global z,  
global r,  
global h,  
global S,  
global F,  
global ae,  
global ap,  
global externos,  
global tacc,  
global xacc,  
global yacc,  
global tf,  
global xf,  
global yf,  
global zf,  
global FFTXF,  
global FFXYF,  
global FFTZF,  
global FFTFF,  
global FFTXA,  
global FFXYA,  
global FFTFA,  
global VeffX,  
global VeffY,  
global VeffZ,  
global VeffAX,  
global VeffAY,  
global FFTXFP,  
global FFTXFS,  
global FFXYFP,  
global FFXYFS,  
global FFTZFP,  
global FFTZFS,  
global FFTXAP,  
global FFTXAS,  
global FFXYAP,  
global FFXYAS,  
clc;  
externos = get(handles.checkbox1,'value');  
D = str2double(get(handles.edit1, 'string'));  
z = str2double(get(handles.edit2, 'string'));  
r = str2double(get(handles.edit3, 'string'));  
h = str2double(get(handles.edit4, 'string'));  
S = str2double(get(handles.edit5, 'string'));  
F = str2double(get(handles.edit6, 'string'));  
ae = 1/100*(str2double(get(handles.edit7, 'string')));  
ap = str2double(get(handles.edit8, 'string'));
```

```
if externos
    xarxa = importdata('Online.mat');
    rugositat =
sim(xarxa, [D,z,r,h,ap,S,F,ae,VefFX,VefFY,VefFZ,VefAX,VefAY]');

    set(handles.text11,'string',num2str(rugositat(1)));
    set(handles.text13,'string',num2str(rugositat(2)));

else

    xarxa = importdata('Offline.mat');
    rugositat = sim(xarxa, [D,z,r,h,ap,S,F,ae]');

    set(handles.text11,'string',num2str(rugositat(1)));
    set(handles.text13,'string',num2str(rugositat(2)));

end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
```



```
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function graficar(hObject, eventdata, handles)
    global D,
    global z,
    global r,
    global h,
    global S,
    global F,
    global ae,
    global ap,
    global externos,
    global tacc,
    global xacc,
    global yacc,
    global tf,
    global xf,
    global yf,
    global zf,
```

```
global FFTXF,
global FFTYF,
global FFTZF,
global FFTFF,
global FFTXA,
global FFTYA,
global FFTFA,
global VeffX,
global VeffY,
global VeffZ,
global VeffAX,
global VeffAY,
global FFTXFP,
global FFTXFS,
global FFTYFP,
global FFTYFS,
global FFTZFP,
global FFTZFS,
global FFTXAP,
global FFTXAS,
global FFTYAP,
global FFTYAS,

allItems = get(handles.popupmenu1,'string');
selectedIndex = get(handles.popupmenu1,'Value');
tipoGraf = allItems{selectedIndex};

allItems = get(handles.popupmenu2,'string');
selectedIndex = get(handles.popupmenu2,'Value');
EixF = allItems{selectedIndex};

allItems = get(handles.popupmenu3,'string');
selectedIndex = get(handles.popupmenu3q,'Value');
EixA = allItems{selectedIndex};

if strcmp(tipoGraf,'Wave')

    cla(handles.axes1);
    cla(handles.axes2);

    if strcmp(EixF,'Eix X')

        plot(handles.axes1, tf, xf);
        set(handles.textFFTFP,'string', num2str(FTTXFP));
        set(handles.textFFTFs,'string', num2str(FTTXFS));
        set(handles.textVeff,'string', num2str(VeffX));

    elseif strcmp(EixF,'Eix Y')

        plot(handles.axes1, tf, yf);
        set(handles.textFFTFP,'string', num2str(FTTYFP));
        set(handles.textFFTFs,'string', num2str(FTTYFS));
        set(handles.textVeff,'string', num2str(VeffY));

    elseif strcmp(EixF,'Eix Z')

        plot(handles.axes1, tf, zf);
        set(handles.textFFTFP,'string', num2str(FTTZFP));
```

```
        set(handles.textFFTFS,'string', num2str(FFTZFS));
        set(handles.textVefF,'string', num2str(VefFZ));

    end

    if strcmp(EixA,'Eix X')

        plot(handles.axes2, tacc, xacc);
        set(handles.textFFTAA,'string', num2str(FFTAP));
        set(handles.textFFTAB,'string', num2str(FFTAS));
        set(handles.textVefA,'string', num2str(VefAX));

    elseif strcmp(EixA,'Eix Y')

        plot(handles.axes2, tacc, yacc);
        set(handles.textFFTAA,'string', num2str(FTTYAP));
        set(handles.textFFTAB,'string', num2str(FTTYAS));
        set(handles.textVefA,'string', num2str(VefAY));

    end

elseif strcmp(tipoGraf,'FFT')

    cla(handles.axes1);
    cla(handles.axes2);

    if strcmp(EixF,'Eix X')

        plot(handles.axes1, FFTFF, FFTXF);
        set(handles.textFFTFF,'string', num2str(FFTFF));
        set(handles.textFFTFS,'string', num2str(FFTFFS));
        set(handles.textVefF,'string', num2str(VefFX));

    elseif strcmp(EixF,'Eix Y')

        plot(handles.axes1, FFTFF, FTTFYF);
        set(handles.textFFTFF,'string', num2str(FTTFYF));
        set(handles.textFFTFS,'string', num2str(FTTFYS));
        set(handles.textVefF,'string', num2str(VefFY));

    elseif strcmp(EixF,'Eix Z')

        plot(handles.axes1, FFTFF, FFTZF);
        set(handles.textFFTFF,'string', num2str(FFTZF));
        set(handles.textFFTFS,'string', num2str(FFTZFS));
        set(handles.textVefF,'string', num2str(VefFZ));

    end

    if strcmp(EixA,'Eix X')

        plot(handles.axes2, FFTFA, FFTXA);
        set(handles.textFFTAA,'string', num2str(FFTAP));
        set(handles.textFFTAB,'string', num2str(FFTAS));
        set(handles.textVefA,'string', num2str(VefAX));
```

```
elseif strcmp(EixA,'Eix Y')

    plot(handles.axes2, FFTFA, FFITYA);
    set(handles.textFFTA, 'string', num2str(FFITYAP));
    set(handles.textFFTAB, 'string', num2str(FFITYAS));
    set(handles.textVefA, 'string', num2str(VefAY));

end

end
```

ANNEX E. PRESSUPOST

A continuació es resumeix el pressupost corresponent al present projecte. Aquest està format per dos seccions: material i mà d'obra. En la primera s'inclouen els diferents elements materials que s'han adquirit per al desenvolupament del projecte, mentre que la segona conté totes aquelles tasques humanes que s'han dut a terme al llarg del projecte.

Material	Quantitat (u)	Preu unitari (€/u)	Preu total (€)
Caixa 10 plaquetes plat Ø63	1	72,15	72,15 €
Caixa 10 plaquetes plat Ø20	1	130,10	130,10 €
Subtotal Material			202,25 €

Mà d'obra	Hores (h)	Preu unitari (€/h)	Preu total (€/h)
Recerca d'informació	18	10	180,00 €
Aprenentatge funcionament Deckel	4	10	40,00 €
Instrumentació Deckel	8	20	80,00 €
Experimentació	32	20	640,00 €
Mesures amb el Rugosímetre	24	20	480,00 €
Tractament de dades	24	20	480,00 €
Anàlisi de resultats	10	20	200,00 €
Desenvolupament del model	20	20	400,00 €
Redacció del projecte	90	20	1.800,00 €
Subtotal Mà d'obra			4.380,00 €

Material	202,25 €
Mà d'obra	4.380,00 €
Suma	4.582,25 €
Benefici (15%)	687,34 €
TOTAL (sense IVA)	5.269,59 €
IVA (21%)	1.106,61 €
TOTAL	6.376,20 €

El pressupost total del present projecte ascendeix a 6.376,20 € (SIS MIL TRES-CENTS SETANTA-SIS EUROS amb VINT CÈNTIMS).

Guillem Torrado Canada

4 de Setembre de 2017