

Treball final de màster

Estudi: Màster en Enginyeria de Tecnologies Industrials

Títol: Estudi dels paràmetres del procés de FDM aplicat a una làmina de PCL i casos reals de prototipatge en el sector industrial.

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Marc Gudayol Teixidó

Tutor: Inés Ferrer Real

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria de Processos de Fabricació

Convocatòria (mes/any): Juny 2020

AGRAÏMENTS

M'agradaria en primer lloc donar les gràcies a la Doctora Inés Ferrer Real, per la seva implicació en el treball i al GREP per cedir les instal·lacions i la maquinària per a la realització de les mesures i la fabricació de les provetes. També voldria agrair als meus pares el suport que m'han donat durant la realització del treball.

ÍNDEX

MEMÒRIA	15
1 Introducció.....	16
1.1 Antecedents.....	16
1.2 Objecte	16
1.3 Especificacions i abast	16
1.4 Metodologia	17
2 Memòria descriptiva i estat de l'art.....	19
2.1.1 Introducció a la fabricació additiva	19
2.1.2 Tecnologia FDM	28
2.1.3 Multimaterial al FDM.....	33
2.1.4 PCL a la indústria mèdica	38
3 Treball experimental	39
3.1 Geometria, material i caracterització.....	39
3.1.1 Geometria.....	39
3.1.2 Material.....	40
3.1.3 Metodologia de caracterització de les peces fabricades.	41
3.2 Experimentació preliminar	45
3.2.1 Assaig previ 1: Rang de valors líndars	45
3.2.2 Assaig previ 2: Anivellat de la taula	48
3.2.3 Assaig previ 3: Gradient Tèrmic.....	51
3.2.4 Assaig previ 4: Estudi de l'efecte de la temperatura del llit en la rugositat	54
3.2.5 Assaig previ 5: Estudi de la l'alçada de capa i la trajectòria d'impressió	57
3.3 Definició del pla experimental.....	61
3.3.1 Metodologia del pla experimental	61
3.3.2 Resultats	68
4 Explicació de casos industrials	94

4.1	Trompetes d'admissió per a un vehicle de competició	94
4.2	Lligament escafo-lunar	100
4.3	Diferents casos de prototipatge a la indústria de l'automoció.....	107
	• Suport de l'alternador	107
	• Suport potenciòmetre	108
	• Útil per a plegar xapa metàl·lica.....	110
5	Recomanacions per disenyar i fabricar amb fabricació additiva (design for am)	112
5.1	Geomètriques	112
5.2	D'impressió.....	113
5.3	D'unió entre elements.....	114
5.4	Funcionals	114
6	Resum del Pressupost.....	117
7	Glosari.....	118
7.1	Abreviatures	118
8	Conclusions	119
9	Relació de documents	121
10	Bibliografia.....	122
	Annexos.....	125
	Annex A Dades experimentals assajos previs.....	126
	A.1 Dades experimentals assaig previ 1	126
	A.2 Dades experimentals assaig previ 2.....	127
	A.3 Dades experimentals assaig previ 3.....	128
	A.4 Dades experimentals assaig previ 4.....	129
	A.5 Dades experimentals assaig previ 5.....	130
	Annex B Resultats del disseny d'experiments.....	131
	B.1 Resultats experimentals.....	131
	Part 1	136
	Part 2	148
	Part 3	153

Part 4	165
Part 5	172
B.2 Dades experimentals	183
Annex C Descripció de les impressores Utilitzades	185
C.1 Impressora Ultimaker 3.....	185
C.2 Impressora 3NTR A4-V4.....	192
Annex D Equipament.....	194
D.1 Impressora Ultimaker 3.....	194
D.2 Balança Kern PFB	195
D.3 Càmera tèrmica Image LR.....	196
D.4 Màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544	197
D.5 Micròmetre Mahr Micromar 40 EWV	198
D.6 Rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV 2100	199
D.7 Impressora 3ntr.....	200
Annex F Pressupost.....	201
Annex G Fitxes tècniques materials.....	202
Annex H Plànols	205

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Esquema de la metodologia.....	18
Figura 2: Nivells de les tecnologies de AM en cada indústria [3].....	20
Figura 3: Mètode d'extrusió de material [6].....	22
Figura 4: Mètode de deposició d'energia [6].....	23
Figura 5: Mètode de "Material Jetting" [6].....	24
Figura 6: Mètode de laminació [6].....	24
Figura 7: Mètode de fusió de pols [6].....	25
Figura 8: Mètode de fotopolimerització [6].....	26
Figura 9: Mètode de "Binder jetting" [6].....	26
Figura 10: Esquema representatiu d'una màquina de FDM (Font: [3W.2]).....	29
Figura 11: Nivells de l'estudi i els seus paràmetres [10].....	31
Figura 12: Condicions d'impressió individuals de cada proveta [10].....	31
Figura 13: Influència dels paràmetres del procés en les propietats mecàniques [10].....	32
Figura 14: Propietats de la combinació d'alguns materials, polimèrics i no polimèrics [8]	34
Figura 15: Tensió vs Temperatura entre capes [18].....	36
Figura 16: Comparació dels diferents materials biomèdics [19].....	37
Figura 17: Plànol de la geometria de les provetes.....	39
Figura 18: Punts de mesura de la proveta.....	42
Figura 19: Mesura del gruix amb el micròmetre.....	42
Figura 20: Direcció d'impressió i del rugosímetre.....	43
Figura 21: Mesura de la rugositat.....	43
Figura 22: Bàscula Kern.....	44
Figura 23: Decoloració en el procés de solidificació.....	47
Figura 24: Distribució de les provetes a la taula.....	49
Figura 25: Distribució de les provetes a la taula.....	50
Figura 26: Configuració de la taula per la visualització del gradient tèrmic.....	52
Figura 27: Gradient tèrmic del filament.....	53
Figura 28: Estats de solidificació de la PCL.....	56
Figura 29: Codi G de la primera capa de la proveta.....	59
Figura 30: Esquema de les 5 parts del treball experimental.....	61
Figura 31: Representació gràfica de les mostres.....	63
Figura 32: Metodologia d'estudi estadístic de les dades.....	67
Figura 33: Histograma pel gruix de 0,27 mm.....	70
Figura 34: Efectes principals per a gruix de 0,27 mm.....	72
Figura 35: Interaccions per a gruix de 0,27 mm.....	73

Figura 36: Punts de mesura.....	74
Figura 37: Histograma per a gruix de 0,37 mm	75
Figura 38: Diagrama de caixes complet per a gruix de 0,27 mm.....	76
Figura 39: Diagrama de caixes de la diferència del gruix	78
Figura 40: Efectes principals del model.....	80
Figura 41: Interacció entre la velocitat i el gruix	80
Figura 42: Gràfica de cub	81
Figura 43: Superfície de la diferència del gruix en funció de la velocitat i el gruix imprès.....	82
Figura 44: Histograma de la rugositat	84
Figura 45: Diagrama de caixes per la rugositat	84
Figura 46: Diagrama d'efectes principals de la rugositat	86
Figura 47: Diagrama de Cub per a la rugositat.....	87
Figura 48: Superfície del model de la rugositat	87
Figura 49: Histograma del pes per a gruix de 0,27 mm.....	90
Figura 50: Diagrama d'efectes principals pel gruix de 0,27 mm	91
Figura 51: Diagrama de caixes pel gruix de 0,57 mm	92
Figura 52: Interaccions pel gruix de 0,27 mm	93
Figura 53: Trompetes d'admissió dissenyades	95
Figura 54: Dibuix de les trompetes amb acotacions bàsiques.....	96
Figura 55: Diverses geometries de trompetes impreses	98
Figura 56: Trompetes instal·lades al vehicle	98
Figura 57: Part 1 del model de la pròtesi.....	100
Figura 58: Part 2 del model de la pròtesi.....	101
Figura 59: Part 3 del model de la pròtesi.....	101
Figura 60: Secció de la pròtesis sencera	101
Figura 61: Acotacions bàsiques del lligament escafo-lunar	102
Figura 62: Impressió completament horitzontal.....	104
Figura 63: Impressió amb inclinació.....	104
Figura 64: Impressió vertical	104
Figura 65: Croquis de les mesures experimentals	105
Figura 66: Prototip de suport d'alternador	108
Figura 67: Procés d'introducció del cos roscat (Font: [3W.3])	109
Figura 68: Prototip de suport de potenciòmetre.	109
Figura 69: Matriu de premsat de la xapa.....	110
Figura 70: Punts de mesura de la proveta	132
Figura 71: Histograma pel gruix de 0,27 mm	136
Figura 72: Diagrama d'efectes principals pel gruix de 0,27 mm	137

Figura 73: Diagrama de caixes pel gruix de 0,27 mm	137
Figura 74: Gràfica d'interaccions pel gruix de 0,27 mm.....	139
Figura 75: Histograma pel gruix de 0,37 mm	140
Figura 76: Diagrama d'efectes principals pel gruix de 0,37 mm	141
Figura 77: Diagrama de caixes pel gruix de 0,37 mm	141
Figura 78: Interaccions pel gruix de 0,37 mm	143
Figura 79: Histograma pel gruix de 0,57 mm	144
Figura 80: Diagrama d'efectes principals pel gruix de 0,57 mm	145
Figura 81: Diagrama de caixes pel gruix de 0,57 mm	145
Figura 82: Interaccions pel gruix de 0,57 mm	147
Figura 83: Histograma pel gruix de 0,27 mm	148
Figura 84: Histograma pel gruix de 0,37 mm	149
Figura 85: Histograma pel gruix de 0,57 mm	149
Figura 86: Diagrama de caixes pel gruix de 0,27 mm	150
Figura 87: Diagrama de caixes pel gruix de 0,37 mm	150
Figura 88: diagrama de caixes pel gruix de 0,57 mm.....	151
Figura 89: Diagrama de caixes complet pel gruix de 0,27 mm.....	151
Figura 90: Diagrama de caixes complet pel gruix de 0,37 mm.....	152
Figura 91: Diagrama de caixes complet pel gruix de 0,57 mm.....	152
Figura 92: Diagrama de caixes per a la diferència del gruix imprès	153
Figura 93: Efectes principals de la diferència del gruix.....	155
Figura 94: Gràfica d'interaccions per a la diferència del gruix.	155
Figura 95: Gràfica d'interacció pel model superfície.....	156
Figura 96: Gràfica de cub per a la diferència del gruix	156
Figura 97: Extracció de les dades no significatives del model.....	157
Figura 98: Efectes principals.....	158
Figura 99: Interacció entre la velocitat i el gruix	159
Figura 100: Gràfica de cub del model	159
Figura 101: Efectes principals.....	161
Figura 102: Interaccions pel model superfície	162
Figura 103: Superfície de la diferència del gruix (Gruix vs velocitat)	163
Figura 104: Superfície de la diferència del gruix (Temperatura vs velocitat)	163
Figura 105: Superfície de la diferència del gruix (Gruix vs Temperatura)	164
Figura 106: Histograma de la rugositat	165
Figura 107: Histograma de la rugositat corregit.....	166
Figura 108: Diagrama de caixes per a la rugositat.....	167
Figura 109: Efectes principals per la rugositat.....	167

Figura 110: Interaccions per la rugositat	168
Figura 111: Diagrama d'efectes principals de la rugositat	170
Figura 112: Diagrama de Cub per a la rugositat.....	170
Figura 113: Superfície del model de la rugositat	171
Figura 114: Histograma del pes per a gruix de 0,27 mm.....	172
Figura 115: Diagrama de caixes del pes per a gruix de 0,27 mm.....	173
Figura 116: Efectes principals del pes per a gruix de 0,27 mm	174
Figura 117: Interaccions del pes per a gruix de 0,27 mm.....	175
Figura 118: Histograma del pes per a gruix de 0,37 mm.....	176
Figura 119: Diagrama de caixes del pes per a gruix de 0,37 mm.....	177
Figura 120: Elements principals del pes pel gruix de 0,37 mm.....	178
Figura 121: Interaccions del pes pel gruix de 0,37 mm	179
Figura 122: Histograma del pes pel gruix de 0,57 mm	180
Figura 123: Diagrama de caixes del pes pel gruix de 0,57 mm	181
Figura 124: Efectes principals pel pes pel gruix de 0,57 mm.....	182
Figura 125: Vista frontal Ultimaker 3.....	185
Figura 126: Capçals de la Ultimaker 3	186
Figura 127: Posicionament bobines Ultimaker 3	187
Figura 128: Taula de compatibilitat de materials Ultimaker	188
Figura 129: Impressora 3NTR.....	192
Figura 130: Posicionament bobines a la 3NTR	192
Figura 131: Impressora Ultimaker 3.....	194
Figura 132: Balança Kern PFB	195
Figura 133: Càmera tèrmica Image LR	196
Figura 134: Màquina de coordenades Mitutoyo	197
Figura 135: Micròmetre Micromar 40 EWW	198
Figura 136: Rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV 2100	199
Figura 137: Impressora 3NTR.....	200
Figura 138: Fitxa tècnica Thermec-ZED (font:[3W.6])	202
Figura 139: Fitxa tècnica ABS (font: [3W.6])	203
Figura 140: Fitxa tècnica PCL (font:[3W.7])	204

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: Paràmetres químics de la PCL _____	40
Taula 2: Paràmetres teòrics del procés experimental _____	41
Taula 3: Paràmetres de l'assaig previ 1 _____	45
Taula 4: Paràmetres fixos assaig previ 1 _____	46
Taula 5: Resum dels resultats de l'assaig previ 1 _____	46
Taula 6: Paràmetres establerts a l'assaig 1 _____	48
Taula 7: Paràmetres de l'assaig previ 2 _____	49
Taula 8: Paràmetres de fixes de l'assaig previ 2 _____	49
Taula 9: Taula resum assaig previ 2 _____	50
Taula 10: Paràmetres assaig previ 3 _____	51
Taula 11: Paràmetres fixos assaig previ 3 _____	51
Taula 12: Resum de resultats de l'assaig previ 3 _____	52
Taula 13: Paràmetres modificats del quart assaig previ 4 _____	54
Taula 14: Paràmetres fixats per l'assaig previ 4 _____	54
Taula 15: Resum resultats Assaig previ 4 _____	55
Taula 16: Paràmetres modificats de l'assaig 5 _____	57
Taula 17: Paràmetres fixos de l'assaig previ 5 _____	58
Taula 18: Resum de resultats de l'assaig previ 5 _____	58
Taula 19: Capes generades pel post processador _____	59
Taula 20: Descripció de les capes modificades _____	60
Taula 21: Nivells d'impressió dels assajos 1, 2 i 5 _____	62
Taula 22: Nivells d'impressió dels assajos experimentals 3 i 4 _____	62
Taula 23: Disseny d'experiments _____	62
Taula 24: Disseny d'experiments _____	63
Taula 25: Taula representativa del gràfic _____	64
Taula 26: Disseny d'experiments 2k +punt central _____	64
Taula 27: Taula final del disseny d'experiments 2k +punt central _____	64
Taula 28: Combinacions dels assajos de 3 nivells _____	65
Taula 29: Disseny d'experiments 2k +punt central _____	65
Taula 30: Taula final del disseny d'experiments 2k +punt central _____	66
Taula 31: Gruixos reals de les provetes _____	68
Taula 32: Càlcul teòric dels pesos amb el gruix corregit _____	69
Taula 33: Nivells de l'estudi _____	70
Taula 34: Estadístics descriptius de la part 1 _____	71
Taula 35: Variables significatives per cada gruix _____	71

Taula 36: Ajustament quadràtic dels 3 gruixos _____	72
Taula 37: Nivells d'estudi de la part 2 _____	74
Taula 38: Anàlisi ANOVA per a cada gruix _____	74
Taula 39: Nivells d'estudi de la part 3 _____	77
Taula 40: Estadístics descriptius de la diferencia del gruix _____	77
Taula 41: Valors del model per a la part 3 _____	78
Taula 42: Valors del model per la part 3 significatius _____	79
Taula 43: Ajustament quadràtic del model _____	79
Taula 44: Valors significatius del model superfície _____	81
Taula 45: Ajustament quadràtic del model amb valors significatius _____	82
Taula 46: Paràmetres de la part 4 _____	83
Taula 47: Estadístics bàsics corregits de la rugositat _____	83
Taula 48: Valors del model de la rugositat _____	85
Taula 49: Valors significatius del model _____	85
Taula 50: Ajustament quadràtic del model _____	85
Taula 51: Paràmetres de la part 5 _____	89
Taula 52: Estadístics descriptius del pes _____	89
Taula 53: Valors del model del pes _____	90
Taula 54: Ajustament quadràtic dels 3 gruixos _____	91
Taula 55: Paràmetres d'impressió (font: [3W.6], fitxa tècnica a l'annex G) _____	97
Taula 56: Mesures trompetes _____	97
Taula 57: Paràmetres d'impressió del ABS (font: Filoalfa, fitxa tècnica a l'annex G) _____	103
Taula 58: Mesures experimentals _____	105
Taula 59: Dades de les mesures _____	105
Taula 60: Variació respecte els valors teòrics _____	106
Taula 61: Resum de les recomanacions _____	115
Taula 62: Dades experimentals Assaig previ 1 _____	126
Taula 63: Paràmetres de la PCL recomanats per el fabricant (font: ElogioAM) _____	126
Taula 64: Dades experimentals Assaig previ 2 _____	127
Taula 65: Dades experimentals assaig previ 3 _____	128
Taula 66: Dades experimentals assaig previ 4 _____	129
Taula 67: Dades experimentals assaig previ 5 _____	130
Taula 68: Variables de la part 1 _____	132
Taula 69: Variables de la part 2 _____	132
Taula 70: Variables de la part 3 _____	133
Taula 71: Variables de la part 4 _____	134
Taula 72: Estadístics descriptius pel gruix de 0,27 mm _____	136

Taula 73: P valors del model pel gruix de 0,27 mm	138
Taula 74: Ajustament quadràtic del model	138
Taula 75: Estadístics descriptius pel gruix de 0,37 mm	140
Taula 76: P valors del model	142
Taula 77: Ajustament quadràtic del model	142
Taula 78: Estadístics descriptius pel gruix de 0,57 mm	144
Taula 79: P valors del model	146
Taula 80: Ajustament quadràtic pel gruix de 0,57 mm	146
Taula 81: P valors de l'anàlisi de la posició de mesura.	148
Taula 82: Estadístics descriptius de la diferència del gruix	153
Taula 83: P valors de la diferència del gruix	154
Taula 84: Ajustament quadràtic de les dades	154
Taula 85: Variables no significatives del model	157
Taula 86: P valors del nou model	157
Taula 87: Ajustament quadràtic del model	158
Taula 88: P valors del model superfície	160
Taula 89: Ajustament quadràtic del model superfície	160
Taula 90: Valors significatius del model superfície	160
Taula 91: Ajustament quadràtic del model amb valors significatius	161
Taula 92: Estadístics bàsics de la rugositat	165
Taula 93: Estadístics bàsics	166
Taula 94: P valors del model de la rugositat	168
Taula 95: Ajustament quadràtic de les dades	169
Taula 96: valors significatius del model	169
Taula 97: Ajustament quadràtic del model	169
Taula 98: Estadístics bàsics del pes pel gruix de 0,27	172
Taula 99: P valors del model	173
Taula 100: Ajustament quadràtic del model	173
Taula 101: Estadístics bàsics del pes pel gruix de 0,37 mm	176
Taula 102: P valors del model	177
Taula 103: Ajustament quadràtic del model	177
Taula 104: Estadístics bàsics del pes per a gruix de 0,57 mm	180
Taula 105: P valors del model	181
Taula 106: Ajustament quadràtic del model	181
Taula 107: P valors del model	181
Taula 108: Ajustament quadràtic del model	182
Taula 109: Dades experimentals	183

Taula 110: Especificacions tècniques Ultimaker 3 (Font: [3W.4]) _____	186
Taula 111: Especificacions tècniques 3NTR (Font: [3W.5]) _____	193
Taula 112: Fitxa tècnica de la Ultimaker 3 (Font: [3W.4]) _____	194
Taula 113: Fitxa tècnica de la 3NTR A4-V4 (font: [3W.5]) _____	200

MEMÒRIA

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

La fabricació additiva (additive manufacturing, AM) obre un nou paradigma dins l'àmbit de la personalització dels productes, el prototipat ràpid, la complexitat geomètrica dels components i/o la combinació de possibles materials. Concretament, el sector mèdic és on l'adopció d'aquest tipus de tecnologies està tenint un grau més elevat d'impacte. Dins l'àmbit de la fabricació additiva, la tecnologia de modelat per deposició fosa (Fused Deposition Modeling, FDM) permet obtenir peces ràpidament amb una gran diversitat de polímers, cadascun amb unes propietats adequades a l'aplicació que se li vulgui donar. Un dels materials que té més aplicacions en l'àmbit mèdic és la Policaprolactona (PCL), degut a la seva capacitat de ser utilitzada com a estructura per a la regeneració de teixits.

1.2 Objecte

L'objectiu del treball és estudiar la capacitat de la tecnologia de modelatge per deposició fosa (Fused Deposition Modelling, FDM) per la fabricació de làmines primes de Policaprolactona (PCL) que s'utilitzen per recobrir peces del sector mèdic, així com, la seva aplicació en prototips industrials amb requeriments compromesos. Amb el coneixement adquirit de la tecnologia FDM, juntament amb l'expertesa analitzada de la literatura i en casos industrials, es pretén elaborar unes recomanacions de FDM que guiïn en la fabricació de peces utilitzant aquesta tecnologia.

1.3 Especificacions i abast

El projecte contindrà una recerca bàsica de la fabricació additiva, considerant la tecnologia FDM i el multimaterial com a factors clau. El treball experimental consistirà en una sèrie d'experiments per delimitar el procés, a continuació es farà l'estudi experimental i finalment s'analitzaran els paràmetres obtinguts a través d'un estudi estadístic de les dades. El resultat final serà unes recomanacions per a FDM basades en el treball experimental i els casos industrials estudiats.

1.4 Metodologia

La metodologia està dividida en 4 etapes: La primera consistirà en la memòria descriptiva i estat de l'art, la segona en l'experimentació, la tercera en l'estudi de casos industrials i finalment la confecció d'unes recomanacions. A continuació s'explicarà més detalladament cada part de la metodologia.

1. Memòria descriptiva i estat de l'art

La memòria descriptiva està dividida en quatre etapes:

- Estudi del funcionament bàsic de les tecnologies de fabricació additiva: Es dona una definició bàsica, les diferents tecnologies que en formen part i els diferents camps d'aplicació d'aquestes tecnologies.
- Estudi de la tecnologia FDM: Consisteix en una explicació del principi d'aquesta tecnologia i en la recerca de diferents estudis dels seus paràmetres principals.
- Estudi de la tecnologia FDM amb multimaterial: Consisteix a veure com la tecnologia FDM ha evolucionat cap al multimaterial i els diferents camps d'aplicació que comporta.
- Aplicacions mèdiques de la PCL: Consisteix en una breu explicació de les diferents aplicacions de la PCL en la indústria mèdica i la seva implementació a través de tecnologies de fabricació additiva.

2. Experimentació

El treball experimental està dividit en tres etapes:

- Una experimentació preliminar en la qual es busca l'establiment dels límits del procés a través d'una sèrie d'assajos previs. En aquest punt de l'anàlisi s'estableixen els límits del procés, maquinària i material, per tal de poder aconseguir un rang de valors que generi provetes vàlides per a ser mesurades. En aquesta etapa s'avalua el gruix de la peça i l'acabat superficial (rugositat). També s'hi analitzen paràmetres bàsics de la màquina com l'anivellat de la taula o el codi que genera.
- Disseny dels experiments: Un cop establerts els límits es plantegen els requeriments de l'anàlisi i es descriu el tractament de dades estadístic corresponent. On s'analitza el gruix, la rugositat i el pes de cadascuna de les provetes extrudides.
- Anàlisi dels resultats obtinguts: Un cop realitzats els experiments, s'analitzen de manera ordenada les dades obtingudes a través d'un assaig estadístic.

3. Explicació de casos industrials

En aquest apartat s'analitzen diferents casos d'aplicació de la tecnologia FDM testats en casos reals de diferents sectors d'aplicació, per tal de veure quins requeriments s'han necessitat en cada un dels casos, quina ha estat la millor tecnologia a implementar i finalment quines consideracions s'han tingut en compte en cada un dels models per tal que el resultat fos exitós.

4. Recomanacions per dissenyar amb fabricació additiva

Amb tota la informació recopilada dels resultats de l'experimentació i amb les consideracions extretes dels casos aplicats, s'ha confeccionat un llistat de recomanacions de FDM que guiïn en la fabricació de peces utilitzant aquesta tecnologia. A la Figura 1 s'hi pot veure l'esquema representatiu descrit anteriorment i aplicat en aquest estudi.

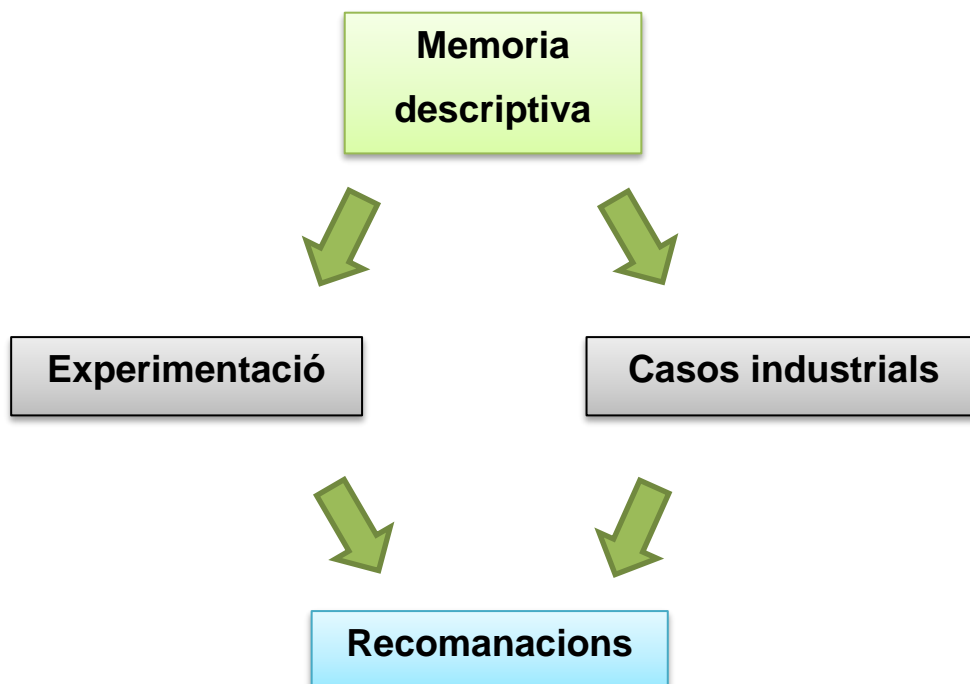


Figura 1: Esquema de la metodologia

2 MEMORIA DESCRIPTIVA I ESTAT DE L'ART

2.1.1 Introducció a la fabricació additiva

En aquest punt es dona una idea bàsica de les tecnologies de fabricació additiva i els camps en què s'està aplicant. També es descriuen els punts forts i febles d'aquestes tecnologies i finalment es fa una explicació de cada una distingint quina és més indicada pels requeriments que hi hagi, ja sigui en un procés industrial, en l'àmbit docent o en l'àmbit mèdic.

2.1.1.1 Definició de fabricació additiva

La fabricació additiva (additive manufacturing, AM) és grup de processos de fabricació on els objectes a fabricar són generats acumulant un conjunt de capes de material en un cert punt, línia o superfície [1]. En resum, són el conjunt de tècniques de fabricació que es basen en afegir material capa a capa, amb l'objectiu de produir components generalment complexes. La fabricació additiva engloba moltes tecnologies, ja sigui el prototipat ràpid, la impressió 3D, la fabricació a través de capes o la fabricació d'additius [2].

L'evolució que ha tingut la fabricació additiva al llarg del temps ha estat de ser una tecnologia només encara al prototip ràpid, a ser una tecnologia ja aplicada a la peça final, i per la producció en sèries curtes de components.

2.1.1.2 Beneficis i limitacions de AM

El principal avantatge que tenen les tecnologies de fabricació additiva, és la capacitat de produir geometries extremament complicades deixant de banda qualsevol mena d'impediment tecnològic [3], és a dir, no hi ha cap limitació del CAM (Computer Aided Manufacturing) en el CAD (Computer Aided Design). Això permet conformar estructures "lattice" o cel·lulars, amb alta aplicació a la indústria mèdica i aeronàutica. La fabricació additiva permet fabricar models amb densitat variable, adoptant la capacitat d'absorbir vibracions o sons. En les tecnologies de AM, no hi ha pràcticament pèrdua de material, provocant que els costos de processat i postprocessat siguin més baixos que amb els processos tradicionals, a més ha fet que molts dels processos tradicionals com ara la soldadura o la unió caragolada desapareguessin degut que es pot fabricar d'una sola peça.

Pel que fa a les mancances, cal destacar que al ser un procés que consisteix a afegir material capa a capa, és propens a formar error superficial en forma d'escala [4], que provoca un mal acabat superficial. Analitzant els costos, pel que fa a la maquinària i materials són un dels punts més negatius i el temps necessari de conformat és bastant més alt que en els processos de fabricació tradicionals [5], degut que són processos generalment lents [3].

Pel que fa als materials, cada vegada n'hi ha més de nous, amb un índex d'estandardització més alt, ja que fins hi havia poca estandardització i varietat.

Cal afegir que és necessària una certa formació per a poder combinar tots els processos que requereix la AM, siguin de CAD o CAM. Les tecnologies de AM tenen poca flexibilitat mentre transcorren, i segons sigui una màquina o altra pot variar molt les característiques de l'objecte final (poca estandardització). Això fa que en indústries aeroespacial i mèdiques on l'estandardització és un factor important, la seva adopció hagi estat més aviat lenta [3].

2.1.1.3 Sector d'aplicació de AM.

La fabricació additiva s'ha vist fortament implementada a bastantes indústries específiques, com per exemple en implants mèdics, en l'automoció, en la fabricació d'eines i utillatges i en la indústria aeroespacial.

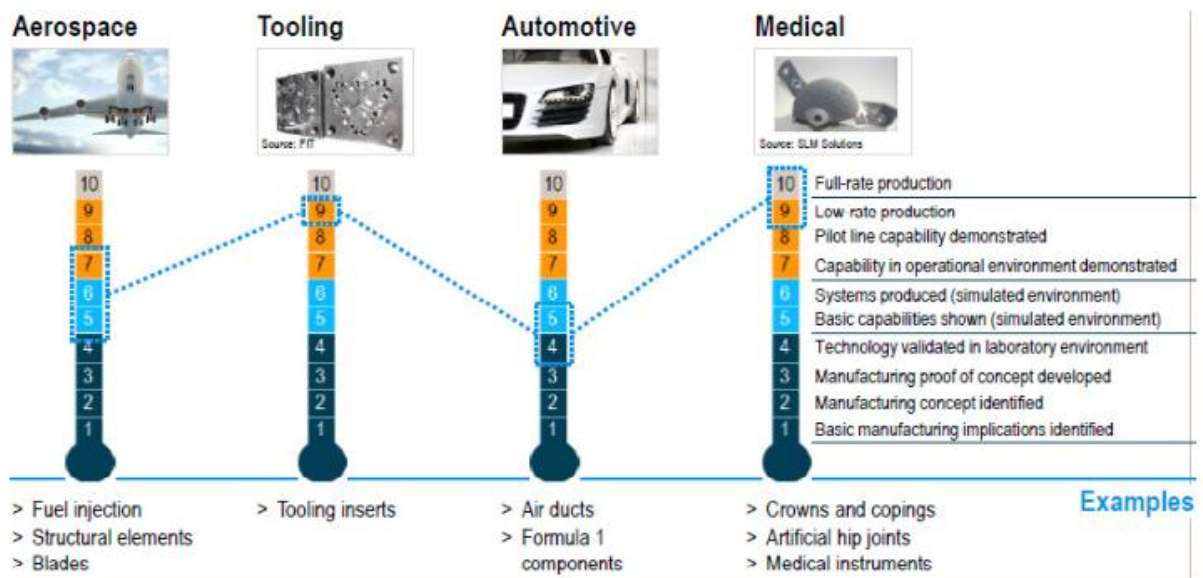


Figura 2: Nivells de les tecnologies de AM en cada indústria [3]

A la Figura 2 es pot veure en una escala de l'1 al 10, en quin estat es troba en cada indústria les tecnologies de AM. Sent 10, el nivell màxim d'implementació per a la producció de tots els components, i 1 el nivell mínim. A continuació s'explicarà detalladament cada una.

- Indústria de la fabricació tradicional

A la indústria actual, les tecnologies de AM s'utilitzen com a eina d'assistència als processos de fabricació tradicionals en la majoria de casos. Les aplicacions més comunes són per fabricar útils, eines i com a prototip per a verificar el model i poder tenir una visió de com serà l'objecte. Fins llavors, moltes de les peces fabricades es feien per assaig-error, fent diversos dissenys i fabricant fins que s'adaptés als requeriments dimensionals i visuals. Amb la AM els costos d'errors s'han reduït dràsticament, ja que permet verificar abans de mecanitzar, on el procés i els errors són cars. A causa de la gran evolució que han tingut aquests processos en la velocitat i la precisió, en diversos casos particulars el mecanitzat s'ha eliminat i la peça fabricada amb AM, passa a ser la peça final.

- Indústria aeroespacial

És un tipus d'indústria on la complexitat geomètrica i el nivell baix de peces fan que la AM s'hi hagi vist fortament implementada. A causa dels grans requeriments a nivell de pes i la capacitat de modificar les propietats mecàniques amb la densitat, han fet que tingués un fort creixement aquests últims anys.

- Indústria de l'automoció

És de les indústries on més temps porta, utilitzada en la seva major part per a la producció de prototips i parts personalitzades per cotxes antics o de luxe, on el nombre de peces és relativament baix, sovint a escala de peça única. Dins la indústria de l'automoció el sector on ha tingut més impacte és en l'àmbit dels vehicles de competició, ja que l'estructura de fabricació que requereix encaixa perfectament amb el de la fabricació additiva: Nivell baix de fabricació, baix pes, constant evolució dels requeriments, gran necessitat de prototipatge i baix temps de fabricació.

- Sector mèdic i biomèdic

A la indústria mèdica s'hi ha vist fortament implementada degut a l'alt nivell de personalització que es requereix en els implants, siguin d'ossos o teixits. Un dels grans avantatges que permet la AM és la capacitat de fer estructures internes completament mallades i poroses, això permet una gran integració de la pròtesi i conseqüentment reduir el temps de recuperació de pacient.

- A nivell docent i de recerca

En l'àmbit docent ha tingut un impacte molt important, ja que no només s'ha utilitzat en àmbits com l'enginyeria sinó també en camps com la biologia, medicina i arquitectura. S'ha tornat una eina molt útil a l'hora d'investigar. La AM tot i ser una tecnologia relativament recent, se n'han fet molts estudis, ja sigui pel que fa als paràmetres d'impressió, de materials o de possibles aplicacions de les tecnologies.

- Indústria arquitectònica i artística

S'ha utilitzat sobretot per tenir una idea visual de com serà el model posteriorment, no tant en l'àmbit dimensional com seria el cas de l'enginyeria. Hi ha bastants casos que la peça en aquest cas no és només prototip sinó peça final, sobretot en peces de dimensions petites.

2.1.1.4 Tipus de processos AM

L'Associació americana d'assajos i materials (ASTM), va formular un set d'estàndards per tal de classificar el rang de processos de AM en 7 categories [3W.1]. A continuació s'anomenaran i s'explicaran breument aquestes 7 categories [6].

- Extrusió de material

El material és extrudit a través de l'orifici d'un capçal calefactat, i és dipositat capa a capa sobre un llit. El capçal es mou en X i en Y, i cada cop que es fa una capa el capçal o la taula es mouen una certa cota en Z per tal de poder iniciar la següent capa. La tecnologia FDM és la tecnologia d'extrusió de material més implementada i està majoritàriament enfocada a polímers. Cada cop hi ha materials més avançats, com poden ser polímers reforçats amb fibra, per exemple fibra de carboni o partícules de materials biodegradables o amb medicaments, molt aplicable a la indústria mèdica. Hi ha molts paràmetres del procés que poden ser modificats per variar l'acabat i característiques finals del model. La tecnologia estudiada en aquest treball és d'aquest tipus. A la Figura 3 es pot veure el mètode d'extrusió de material.

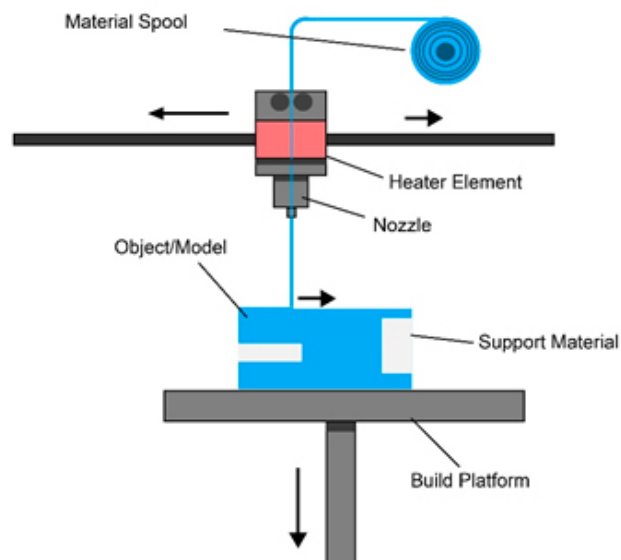


Figura 3: Mètode d'extrusió de material [6]

- Deposició d'energia

És un dels processos més complexos dins la AM, usat principalment per reparar o modificar peces ja fabricades amb mètodes tradicionals, on el cost de tornar a fer la peça de zero o reparar-la amb els mètodes tradicionals resulta molt car o hi ha algun impediment tecnològic que no ho permet. Hi ha diverses tecnologies diferents dins aquesta, però quasi totes es basen a fondre material prèviament dipositat a través d'un capçal en format pols sobre la peça a reparar, a través de làser o llum. Les més implementades a nivell de la indústria són la de "3D Laser Cladding" i la de "Direct Metal Desposition". Aquesta tecnologia sobretot treballa amb materials metàl·lics. El principi de funcionament és semblant al d'extrusió de material però en aquest el capçal sol tenir 5 eixos, per adaptar-se a la geometria. A la Figura 4 es pot veure el mètode de deposició d'energia.

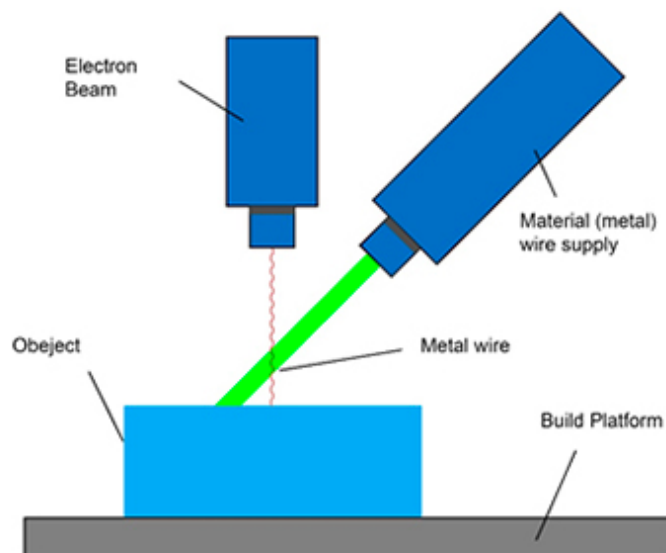


Figura 4: Mètode de deposició d'energia [6]

- Material jetting

La tecnologia de "Material Jetting" consisteix a crear objectes de manera molt similar a com ho faria una impressora de tinta però en 3 dimensions. El material en format tinta és dipositat de manera contínua o gota a gota per tal de crear el model a través d'un capçal que es mou horitzontalment al llarg de la plataforma. Entre capa i capa el material és solidificat a través d'una llum ultraviolada. Sobretot treballa amb materials polimèrics en format resina o cera, que tinguin una certa viscositat. A la Figura 5 es pot veure el mètode de "Material Jetting"

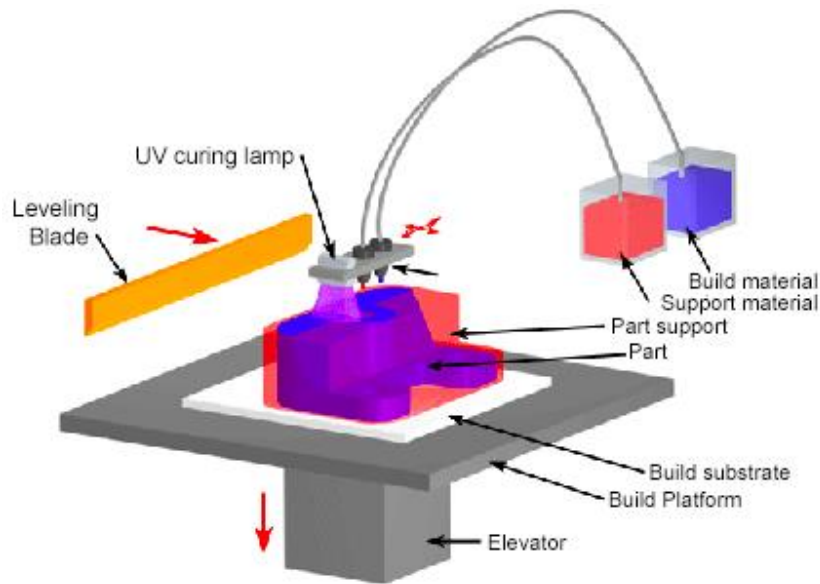


Figura 5: Mètode de "Material Jetting" [6]

- Laminació

El procés de laminació inclou la tecnologia d'ultrasons (Ultrasonic Additive Manufacturing, UAM) i la d'objectes laminats (Laminated Object Manufacturing, LOM). En aquesta tecnologia el material és introduït a la màquina a través de lamine fines. El material és desplaçat sobre la taula a través de dos corrns i el làser solidifica les zones capa a capa. Un cop ha acabat una capa, la taula es mou avall i els corrns fan córrer el material. Sobretot utilitza materials metàl·lics com alumini, acer inoxidable o titani. Aquest procés inclou un postprocessat per tal de retirar el material sobrant del procés de soldadura, que sol ser a través del procés tradicional de mecanització amb CNC. A la Figura 6 es pot veure el procés de laminat.

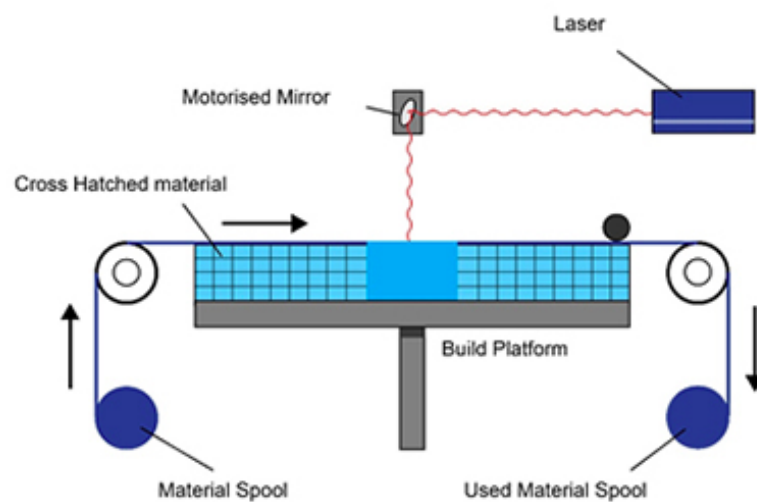


Figura 6: Mètode de laminació [6]

- Fusió de pols

La tecnologia de fusió de pols utilitza un raig d'electrons per a fusionar la pols, en format làser. Un corró aplanar la superfície del llit i incorpora material nou en format pols, a continuació el làser solidifica la zona del model, i es torna a repetir el procés. Quan acaba cada capa, la taula baixa una certa alçada, s'aporta material nou i el corró ho aplanar. Aquesta tecnologia s'està veient força implementada sobretot amb materials metàl·lics com ara l'alumini o el titani. Dins de la fusió en pols, les tecnologies més implementades són la de "Selective Laser Sinterizing" (SLS) per polímers i la de "Direct Metal Laser Sintering" (DMLS) per a metalls. A la Figura 7 es pot veure el mètode de fusió de pols.

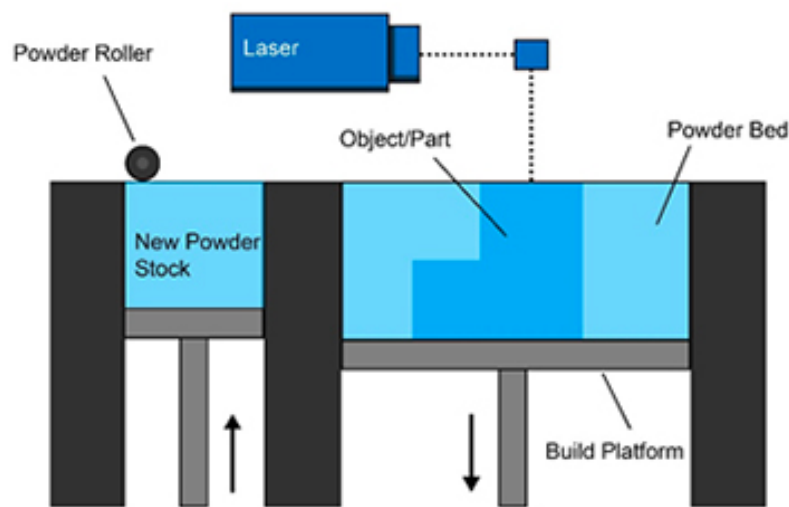


Figura 7: Mètode de fusió de pols [6]

- Fotopolimerització

El model és construït capa a capa a través de la solidificació de resina polimèrica. La solidificació es produeix a través d'una llum ultraviolada. La resina dins la impressora es troba dins d'una cubeta a la part inferior, la llum cura una capa i es mou una certa distància Z, es remou la resina del tanc i a continuació solidifica la següent capa. Les peces conformades amb aquest procés solen necessitar un postprocessat, per tal d'acabar de curar la peça. Actualment hi ha una gran diversitat de materials polimèrics, amb diferents propietats, com ara rigidesa, elasticitat o amb capacitat d'aguantar altes temperatures. Dins de la fotopolimerització, la tecnologia d'estereolitografia (Stereolithography, SLA), és de les més implementades, tant en l'àmbit docent com en la industrial. A la Figura 8 es pot veure el mètode de fotopolimerització.

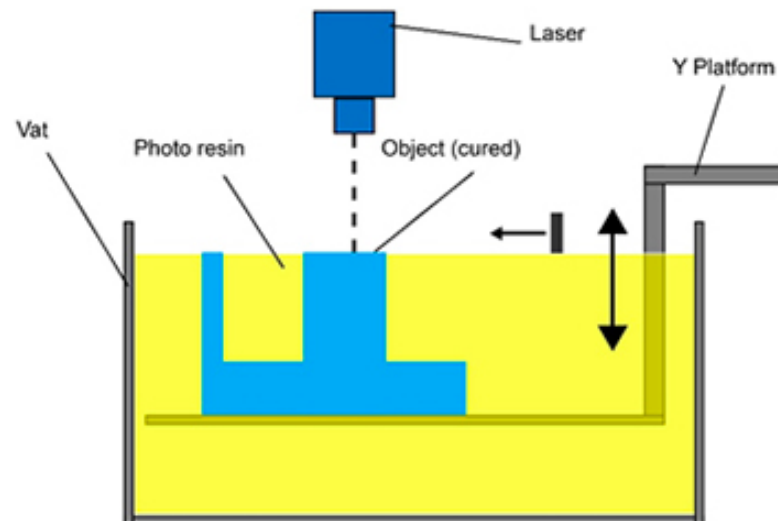


Figura 8: Mètode de fotopolimerització [6]

- Binder Jetting

La tecnologia de "Binder Jetting" utilitza dos materials diferents, un en format pols i l'altre en format aglutinant per tal de fer d'adhesiu de les capes de pols. Per tal de conformar el model els capçals de pols i adhesiu dipositen capa a capa el model, després de cada capa un corró aplana la superfície i la taula es desplaça una certa cota Z cap avall. Aquest procés sol ser bastant ràpid comparat amb altres tecnologies de AM, però sol incloure un postprocessat de curat, neteja i extracció de la peça acabada que afegeix temps al procés. Aquests últims anys els fabricants d'impressores amb aquestes tecnologies estan enfocant-se amb materials metàl·lics.

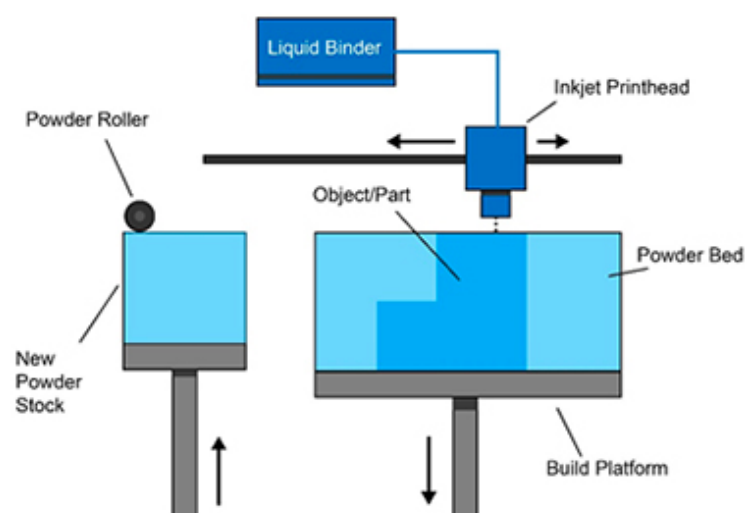


Figura 9: Mètode de "Binder jetting" [6]

2.1.1.5 Comparació de les diferents tecnologies

En primer lloc cal dir que no hi ha una tecnologia de AM que sigui millor que les altres, cadascuna té una aplicació per a cada requeriment industrial, docent o de recerca.

Si les peces a conformar han de ser metàl·liques, amb alts requeriments mecànics i amb un alt grau de tolerància dimensional, la tecnologia indicada és la de fusió de pols [7]. Actualment aquesta tecnologia és de les més cares, quant a maquinària o materials. Al ser una tecnologia que requereix postprocessat encara encareix més el procés, però pel que fa a l'acabat final de la peça, el nivell d'estandardització que té i els bons requeriments que proporciona, és un dels camps on hi ha més recerca i on més empreses en l'àmbit industrial hi han dedicat recursos.

Les tecnologies de "Binder Jetting" i "Material Jetting" són força similars, no obstant, l'empresa HP ha apostat per la tecnologia "Binder Jetting". Els punts positius d'aquesta tecnologia són la rapidesa i la gran precisió, fet que ha causat una gran implementació en les indústries. El gran punt negatiu és el preu que suposa utilitzar aquesta tecnologia, la manca de varietat de material que hi ha i que cal un postprocessat que requereix un cert temps [8]. També cal dir que tenen una certa limitació de dimensions i fa que no sigui apte per peces massa grosses.

Si el que cal fer és una reparació o modificació sobre una peça generalment metàl·lica de grans dimensions o tècnicament molt difícil d'accedir o desmuntar, la tecnologia indicada és la de deposició d'energia. Aquesta tecnologia ha estat implementada sobretot en l'àmbit industrial i ja fa forces anys que s'utilitza. És força lenta i molt cara, però ha estalviat moltes hores de transport de peces i de fer reparacions molt més precises que amb els processos de fabricació tradicionals.

Tecnologies com la fotopolimerització, també estan força implementades en l'àmbit industrial i docent a causa de la seva senzillesa d'ús i el bon acabat que proporcionen respecte tecnologies com FDM [7]. Si es compara amb FDM, la precisió dimensional és molt més bona i també l'acabat superficial, però són tecnologies molt més lentes i solen requerir postprocessat. Si el que es busca és una tecnologia ràpida, senzilla, econòmica i enfocada al prototipatge amb polímers, l'extrusió de material és la més indicada. L'extrusió de material és una tecnologia molt aplicada nivell docent i la més aplicada en usos domèstics a causa que és una de les més econòmiques i senzilles. La tecnologia FDM no és massa indicada per a peça final amb requeriments mecànics molt elevats, dit això, és una tecnologia que genera el model relativament ràpid, i per donar una idea visual o en un objecte on els requeriments mecànics són baixos i de material polimèric, és ideal.

2.1.2 Tecnologia FDM

2.1.2.1 Descripció i principi de funcionament FDM

La tecnologia de fabricació additiva a través del FDM, és la més extensa tant en l'àmbit industrial com en l'àmbit docent, a causa de la seva gran versatilitat de materials, que es força assequible i bastant senzilla d'utilitzar. Aquesta tecnologia ha establert nous límits tant en el disseny geomètric, com de fabricació, on pràcticament qualsevol geometria pot ser fabricada. El procés del FDM (fused deposition modelin), tal com indiquen les sigles, va dipositant capes de material fos en el pla X-Y en forma de filament per tal de crear una geometria. Cada cop que fa una capa, puja una certa distància Z (gruix de capa) i genera la següent capa. Els principals avantatges d'aquest tipus de tecnologia i de moltes altres de AM respecte als mètodes de fabricació tradicional són:

- Eliminació dels límits del disseny pensant en el posterior procés de fabricació. Un exemple és la possibilitat de fer peces de densitat variable o buides, fet que era impossible amb els processos d'arrancada de ferritja tradicionals [8].
- Eliminació del procés de CAM (Computed Aided Manufacturing). El postprocessat del disseny per tal de ser fabricat és molt més senzill, ràpid i per tant barat. No cal escollir eines, infinitat de paràmetres de procés, ni preparar la màquina ni el brut de mecanitzat [9].
- Ràpid prototipatge i reducció de costos, ja que és l'aplicació on aquest tipus de tecnologia ha estat més utilitzada i poder fer series curtes amb un alt nivell de personalització, que fins ara degut als alts costos era inviable.
- Baix manteniment i facilitat d'ús. La interfície de connexió amb la màquina sol ser un programari CAM de llicència oberta i sol ser molt intuïtiu. El manteniment és pràcticament zero, només cal lubricar les parts mòbils i de fricció de la màquina, i netejar-la i calibrar-la cada certes hores d'ús.
- Molts paràmetres del procés poden ser modificats per ajustar-se a cada material i a cada requeriment del producte [10].

El principi de funcionament del FDM és que el material és dipositat sobre una taula a través d'un capçal prèviament escalfat a través de resistències tèrmiques. El flux de material fos extrudit el controlen uns corròns impulsant o fent retrocedir el filament. Per tal de poder repartir correctament el material al llarg de tota la superfície d'impressió. El capçal es pot moure en els 3 eixos, normalment guiat a través de barres circulars llargues i connectat a través de corretges dentades als corresponents motors.

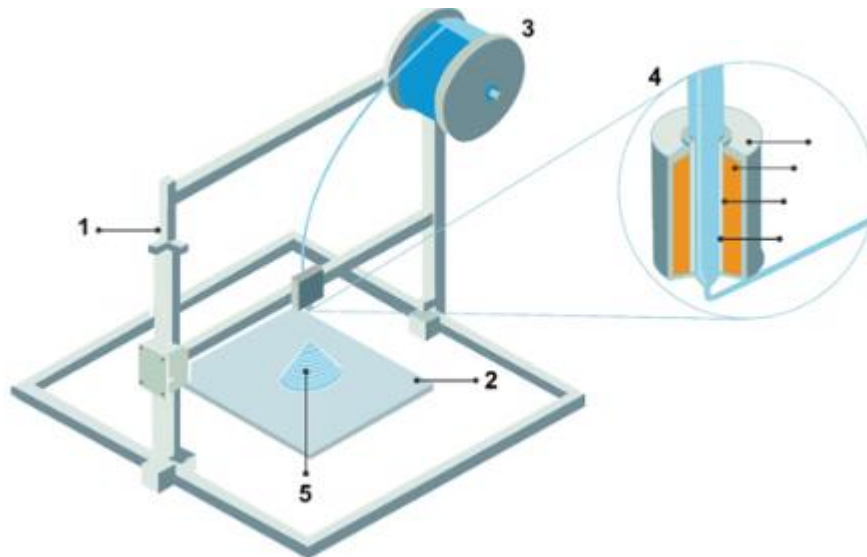


Figura 10: Esquema representatiu d'una màquina de FDM (Font: [3W.2])

Les corresponents parts de la màquina descrites a la Figura 10 són les següents:

1- Estructura: Aquesta part és la que forma el xassís principal de la màquina, subjecta els motors i guies de moviment del capçal, per tal de permetre el moviment en els 3 eixos. Sol estar fabricada de ferro, ja que es vol que sigui la més rígida possible per tal que les guies per on circuli l'extrusor tingui la mínima deformació possible, fet que afectaria la precisió de la màquina.

2- La base o llit: És on el material extrudit pel capçal s'anirà dipositant capa a capa, per tal de formar el model desitjat. Normalment aquesta base és calefactable per tal que les primeres capes de material extrudit s'adhereixin bé al llit, fet que evita defectes provocats pel moviment del model durant el procés d'extrusió. La base sol estar fabricada de material acrílic o vidre, ja que en ser un material molt dur, no serà ratllat en l'extreure la peça impresa amb una espàtula de la base.

3- El porta bobines: És on se situa el material que haurà de ser extrudit. Normalment el fabricant de material el subministra mitjançant una bobina amb dimensions estàndard per tal de ser col·locada a la majoria de màquines. La bobina no va muntada sobre cap coixinet, simplement recolzada sobre un eix pel forat central que incorporen totes les bobines. L'eix respecte al que gira la bobina ha d'estar correctament encarat per tal de facilitar el subministrament de filament.

4- El capçal és per on el material és extrudit sobre el llit, incorpora una sèrie de resistències estratègicament col·locades per tal de fondre el material d'una manera determinada. Normalment el capçal també incorpora algun sistema de refrigeració del material extrudit per tal de solidificar-lo tan bon punt surt per la puntera del capçal. A la punta del capçal va situada

l'orifici de sortida del capçal, amb un cert diàmetre de forat de sortida. Aquest orifici és el que marcarà el diàmetre de sortida del material extrudit.

5- El material extrudit es va dipositant sobre la base amb capes fines d'entre 0,05 i 0,4 mm normalment. A mesura que va dipositant capes va conformant el model. Hi ha impressores que tenen més d'un capçal i poden combinar els materials per generar suport o combinar propietats. Les màquines de més d'un capçal són les que últimament estan creant més tendència al mercat actual, sigui amb tecnologia FDM o amb altres tecnologies d'impressió en 3 dimensions.

2.1.2.2 Recerca sobre FDM i la influència dels paràmetres de procés

La tecnologia FDM al ser una de les més implementades, té una gran diversitat d'estudis, informació sobre l'afectació dels paràmetres del procés, guies d'impressió i casos d'aplicació de cada tecnologia i material segons els requeriments de la peça.

Hi ha una sèrie d'estudis que a través d'un model amb diferents geometries de forats, eixos i un conjunt de geometries específiques, busquen les toleràncies geomètriques i discrepàncies dimensionals respecte a la cota teòrica [11]. En aquest estudi es pot veure que les dimensions en l'eix X i Y tendeixen a ser més petites que els valors teòrics, en canvi, en l'eix Z tendeixen a ser majors. Segons l'estudi, això és perquè quan el material és extrudit té una certa fluïdesa cap als laterals i el gruix de línia no és constant respecte el que teòricament fa la màquina. També, si hi ha forats interns o externs la tolerància dimensional varia i per tant, tots els paràmetres variables de la impressió haurien de ser considerats en l'estudi, tot i que s'ha de tenir en compte que n'hi ha que afecten molt més considerablement que altres, com ara l'alçada de capa i la velocitat d'impressió. En l'estudi [11] es veu que en general l'error tendeix a augmentar quan s'augmenta la mida de la peça, i en tots els casos les dimensions perimetrals generals de la peça tenen tendència a ser més petites, per la contracció del material. Altres estudis se centren en l'acabat superficial del model extrudit en FDM, ja que és un dels seus punts més fluïdos [12]. Aquest estudi consisteix a optimitzar els paràmetres d'impressió per millorar la rugositat. Els resultats d'aquest estudi mostren que el postractament amb temperatura és dels factors que més hi influeix.

Els estudis dels paràmetres del procés sovint se centren en com cada paràmetre afecta unes certes característiques, siguin requeriments dimensionals o mecànics. Hi ha estudis que parlen de l'optimització experimental dels paràmetres del procés de FDM Experimental, per tal d'aconseguir millorar el conformat [10]. En aquest estudi es controlen els paràmetres d'impressió en un seguit d'assajos experimentals amb provetes de PLA. L'objectiu és comparar les provetes caracteritzades mecànicament amb els resultats calculats a través d'elements finits. En aquest estudi, els paràmetres del procés que s'han modificat són la

direcció d'impressió, velocitat d'impressió, temperatura d'extrusió, alçada de capa, densitat i el patró d'emplenat.

Table 1: The Values of varying Processing Parameters.

Levels	Building Direction	Infill Percent	Print Speed	Extrusion Temperature	Layer Height	Infill Pattern
0 (Reference)	Z	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	(1) Diamond F
1	X	20	70 mm/s	175 C ⁰	0.10 mm	(2) Diamond
2	Y	50	120 mm/s	180 C ⁰	0.25 mm	(3) Linear
3	Z	80	170 mm/s	205 C ⁰	0.40 mm	(4) Hexagonal

Figura 11: Nivells de l'estudi i els seus paràmetres [10]

Com es pot veure a la Figura 11 hi ha 4 nivells diferenciats. Quedant representades les combinacions a la Figura 12. Com es pot veure hi ha 18 possibles combinacions diferents:

Table 2 Sample processing parameters specification

Sample	Building Direction	Infill Percent	Print Speed	Extrusion Temperature	Layer Height	Infill Pattern
1	X	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
2	Y	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
3	Z	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
4	Z	20	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
5	Z	50	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
6	Z	80	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
7	Z	100	170 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
8	Z	100	120 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
9	Z	100	70 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
10	Z	100	90 mm/s	175 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
11	Z	100	90 mm/s	180 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
12	Z	100	90 mm/s	205 C ⁰	0.30 mm	Diamond (F)
13	Z	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.40 mm	Diamond (F)
14	Z	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.25 mm	Diamond (F)
15	Z	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.10 mm	Diamond (F)
16	Z	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Diamond
17	Z	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Linear
18	Z	100	90 mm/s	185 C ⁰	0.30 mm	Hexagonal

Figura 12: Condicions d'impressió individuals de cada proveta [10]

Si es miren els resultats dimensionals de l'estudi, a la Figura 13 es pot veure que a velocitats de més de 80 mm/s, l'error puja dràsticament a causa de la transferència de calor a aquestes velocitats. En segon lloc, a més temperatura d'extrusió més error, ja que el material tarda més a solidificar i flueix més quan és extrudit. L'alçada de capa també hi influeix i a menys alçada de capa menys error, a causa que s'acumula menys error. Per tant la refrigeració de la proveta és un factor a tenir un compte a l'hora d'evitar que el material no flueixi i provoqui deformacions i variacions del gruix un cop s'ha extrudit el material [10].

Pel que fa l'estudi de les propietats mecàniques, l'eix Z resulta ser el més fort perquè té més línies en contacte entre capes. Pel que fa als paràmetres d'impressió, les propietats

mecàniques no es veuen massa afectades per la velocitat d'impressió ni per el patró d'emplenat, però en canvi si es veuen afectades per paràmetres tèrmics. A més temperatura d'extrusió millors propietats mecàniques, degut a que la difusió entre capes és millor.

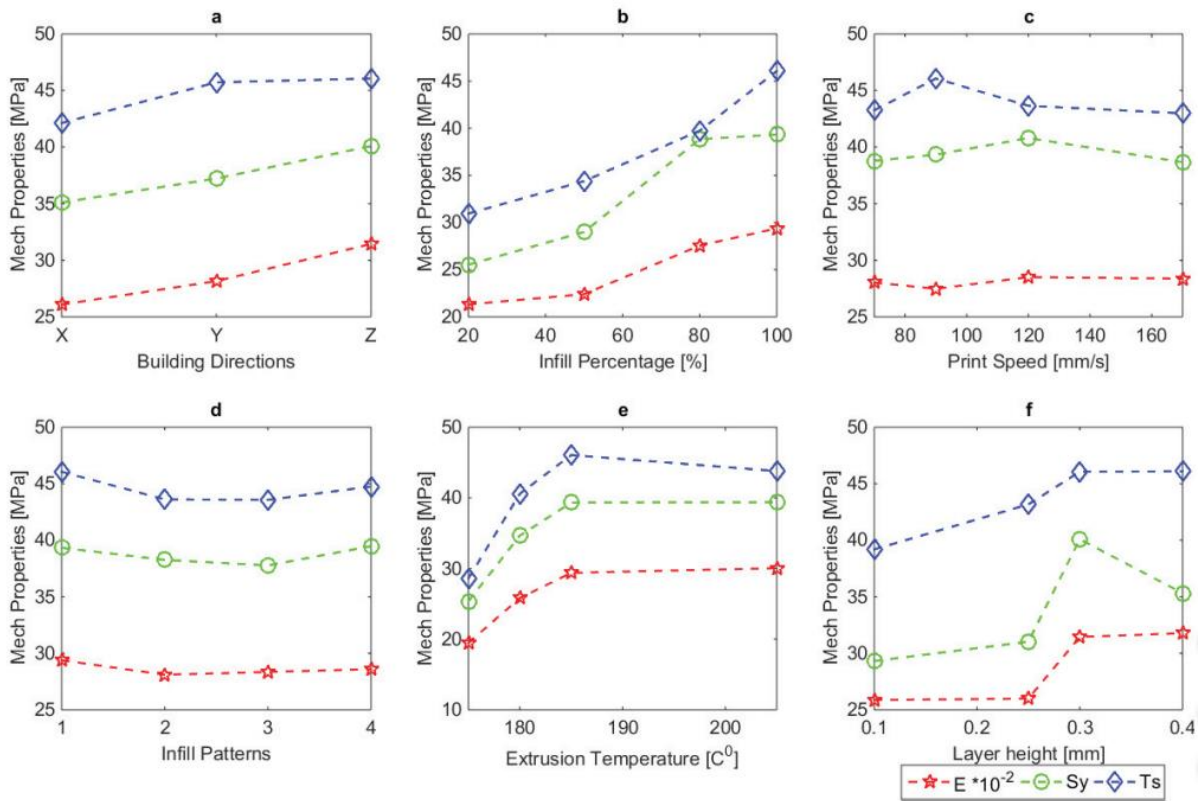


Figura 13: Influència dels paràmetres del procés en les propietats mecàniques [10]

Com es pot veure a la Figura 13, els paràmetres més influents són la temperatura d'extrusió, la densitat i l'alçada de capa. A més densitat més resistència, i a més alçada de capa també. Pel que fa a la temperatura d'extrusió hi ha un punt a partir de 185°C on s'estabilitza, que és on el material aconsegueix obtenir una bona difusió entre capes.

2.1.3 Multimaterial al FDM

2.1.3.1 Multimaterial en la fabricació additiva

La fabricació additiva ha revolucionat el món de la fabricació gràcies a les seves capacitats de disseny de geometries complicades a més dels seus avantatges econòmics [8]. Aquestes tecnologies s'han vist fortament implementades en empreses de l'automoció, aeronàutiques, aeroespacials i mèdiques durant aquesta última dècada. La gran evolució que hi ha hagut en la tecnologia de FDM i moltes altres de AM és la capacitat d'imprimir amb multi material per tal de modificar les propietats del model com ara la duresa o adaptar-se al medi al qual han de ser instal·lats, conegut com a 4D Printing [13]. Amb les tecnologies tradicionals ha estat impossible fins fa relativament poc, i ha servit per crear models amb requeriments molt específics. El principal avantatge del multimaterial al AM, és la capacitat d'adequar-se als requeriments locals de la peça, per altra banda el principal inconvenient és la complexitat que representa combinar materials amb propietats i condicions d'impressió molt diferents.

Les tecnologies d'impressió 3D en polímers volen millorar la funcionalitat, la duresa i volen tenir les millors propietats tèrmiques i funcionals, però el fet de combinar materials ocasiona una sèrie de patologies en la fabricació a tenir en compte. Aquestes patologies són: La discrepància dimensional, la necessitat de postprocessat i la incapacitat de processar dos materials amb condicions d'impressió molt diferents, però el principal paràmetre a controlar és l'adhesió entre capes, sobretot quan els materials que es combinen tenen propietats notablement diferents. D'aquests paràmetres se n'ha fet diversos estudis [14] i [13] els quals es comentaran més endavant a l'apartat 2.1.3.2. Pel que fa a l'adhesió de capes, hi ha molts altres factors a tenir en compte, com ara el gruix de capa i l'escala tèrmica, que compliquen el procés. Una de les opcions, és aplicar una capa adhesiva intermèdia entre els dos materials [15], on diversos materials amb propietats molt diferents poden ser units, tot i que el temps i la complexitat augmenta.

Com es pot veure a la Figura 14, hi ha diverses combinacions de materials, i cada combinació afavoreix o empitjora les propietats [8]. Com es pot veure en el cas de l'Acrilonitril butadiè estirè (ABS) amb Fibra de carboni, sobretot el que es millora són les propietats mecàniques, en canvi en el segon cas combinat ABS amb un material conductor (ferro o coure) milloren les propietats tèrmiques. Si es mira el tercer, combinant PCL i TCP que és un material utilitzat per la regeneració d'ossos, en millora la biocompatibilitat. Per tant la combinació de materials serveix adaptar la peça a les propietats i requeriments del medi on romandrà.

Table 3
MM-AM composition examples and their respective properties.

Compositions	Process	Properties (↑ Increase, ↓ Moderate, ↓ Decrease)	
<i>Polymer-based</i>			
ABS + carbon fiber	FDM	↑↑ Tensile Strength, Modulus, ↓ Porosity	[47]
ABS + Fe/Cu	FDM	↑ Thermal Conductivity, ↓ Tensile Strength	[48]
PCL + TCP	FDM	↑ Osteoconduction, Bioactivity, Non-Toxic	[49]
PLA + carbon fiber	FDM	↑ Flexural Strength, Modulus	[50]
<i>Metal-Ceramic</i>			
16NCD13 + TiC	LC	↑ Hardness, No Defects, Fine TiC Particles	[51]
AZ91D + Al + SiC	LC	↓ Wear, ↑ Hardness, Dendritic Microstructure	[52]
CpTi + Zr	LENS	↓ Wear, ↑ Cell Attachment, Hardness	[53]
SS316 + Al ₂ O ₃	LENS	↑ Hardness, ↓ Porosity, Fine Grains	[31]
SS316 + BN	LENS	↑ Hardness, Wear Resistance	[54]
SS316 + YS-Zr	LENS	↑↑ Hardness, Micron-level Material Control	[55]
Ti6Al4V + TiC	LMD	↑ Hardness, Ultimate Tensile Strength	[28]
<i>Metal-Metal</i>			
CpTi + Ti-Ni-Si	LC	↑↑ Hardness, Wear Resistance	[56]
IN718 + Cu	LENS	↑ Thermal conductivity/diffusivity	[22]
IN718 + Ti6Al4V	LENS	↑ Functionality, Coherent Bimetallic Structure	
IN625 + SS304	DED	↑↑ Hardness, Surface Finish, FGM	[18]
SS316 + SS430	LENS	↓ Porosity, ↑ Magnetism Functionality	[69]
SS316 + Ti6Al4V + NiCr	LENS	Coherent Multi-Layers, NiTi and Cr ₂ Ti Phase	[19]
Ti6Al4V + Ti + Al	DMD	↑ Hardness, ↓ Surface Finish, Cracks	[57]
Ti6Al4V + V	LMD	Coherent Bimetallic Structure, Crack-Free	[20]
Ti6Al4V + Nb	LMD	FGM, ↑ Thermal Performance Capabilities	[18]
Ti6Al4V + CoCrMo	LENS	↑ Hardness, Cell Proliferation, Wear Resistance	[58]

Figura 14: Propietats de la combinació d'alguns materials, polimèrics i no polimèrics [8]

2.1.3.2 AM Multimaterial General

El progrés a la indústria del AM ha causat un augment de les estructures dissenyades per ser fabricades amb multi material. El punt crític d'aquest tipus de tecnologies és la barrera que es crea entre els dos materials [13], tal com s'ha comentat anteriorment i serà un reflex real del comportament mecànic que tindrà aquesta unió. Hi ha estudis [14], que se centren a veure aquest punt crític. Els requeriments d'aquest tipus d'estudis per a combinar dos materials, són els comportaments per separat de cada material i la Interface o frontera que hi ha entre ells.

A la Tecnologia "Material Jetting", aplicada a l'estudi [13], amb dos materials diferenciats, un de rígid i un flexible, s'ha vist la relació entre la direcció d'impressió i la tensió, i s'ha trobat que es casi igual de rígid el propi material de la unió, que la combinació un altre material diferent. La direcció d'impressió també és un dels punts importants, ja que la resistència es redueix fins al 50%, per tant, és un factor a tenir en compte. S'ha observat amb aquest procés que el mòdul de Young es redueix bastant en l'eix Z però no en l'eix X o Y, a causa de l'esforç tallant. Hi ha altres estudis que en cicles de fatiga demostren que el multi material no trenca abans que un material normal, el que si s'ha trobat és el trencament aleatori de provetes [16]. Hi ha altres estudis que diuen que la fallada sol ocórrer a la barrera entre els dos materials, i

factors com ara la direcció d'impressió o el postprocessat afecten notablement. Es va veure que amb la direccionalitat de capes pot causar que les provetes aguantin un 20% més, i que la probabilitat de trencament es redueixi un 50% [17]. Per tant la direcció és un factor molt a tenir en compte.

2.1.3.3 Am multimaterial difusió de capes

Hi ha estudis que se centren en la difusió molecular de cara a la combinació de possibles materials [14]. El principal problema del AM amb multi material és que al ser un model que no és el 100% isotròpic, queda lluny dels estàndards dels models més isotròpics com ara els conformats per injecció de plàstic.

L'estudi [14] descriu la unió del material en dues etapes, primerament un contacte superficial on a continuació es produeix una difusió intermolecular de la cadena de la interfície. Per tant la força d'unió ve donada pel grau de difusió intermolecular entre els dos materials. Aquest estudi compara les característiques de cada un dels materials, l'efecte de la temperatura ambient d'ençà que surt del capçal fins que es diposita i la difusió molecular entre els dos materials abans de la creació de la barrera entre ells. Es pot veure que en la unió entre ABS i TPU, la seva resistència s'ha incrementat en un 93% fent que la temperatura del llit passi de 30°C a 68°C, a causa de la difusió entre els materials, en aquest cas, és molt millor a més temperatura. La teoria proposada és que la força de la unió entre els 2 materials extrudits augmenta linealment a mesura que augmenta el temps de recuita. La fusió succeeix quan la temperatura de cada material sobrepassa la temperatura de transició vítria i en els resultats es veu que el canvi més important és amb la placa, amb increment del 93% de la residència passant de 30°C a 68°C, en canvi canviat la temperatura d'extrusió de 240°C a 260°C només hi va haver un increment del 15,3% [14].

Altres models d'estudi es basen a escalfar el material ja extrudit, per afavorir la difusió amb el nou material. Per a la difusió de materials amb temperatures de fusió diferents [18], la metodologia consisteix a no abocar primer la PCL (baixa temperatura de fusió), ja que quan es diposita el PLA a sobre, amb una temperatura de fusió major, es fon la PCL, i és per això que algunes tecnologies refrigeren el material extrudit perquè això no succeeixi. Aquest sistema però redueix l'adherència entre els 2 materials, a causa de l'alta diferència de temperatures entre ells. Per altre banda si primer s'extrudeix el PLA i després la PCL a sobre, com que la diferència de temperatures de fusió entre un i l'altre és pràcticament de 100 graus no s'aconsegueix que la sinterització sigui correcte i per tant, cal aplicar calor per tal d'afavorir aquesta sinterització.

El Mètode SLTAT [18], que consisteix en un cop s'ha acabat d'extrudir el PLA, es fa una capa a molta alta temperatura de PCL (més que a temperatura d'impressió normal) i després se

segueix extrudint la PCL a temperatura de fusió normal. El reescalfament de l'altre material, provoca una millor adherència entre els dos materials. Per tant es creu que augmentant la temperatura d'extrusió de la PCL sobre el PLA, incrementaria notablement la força de la unió, però provoca deformacions a la peça. Com es pot veure a la Figura 15, en els resultats d'aquest estudi, amb PCL/PLA, amb 130 graus de la PCL en la temperatura de la capa de contacte és quan la resistència va ser major.

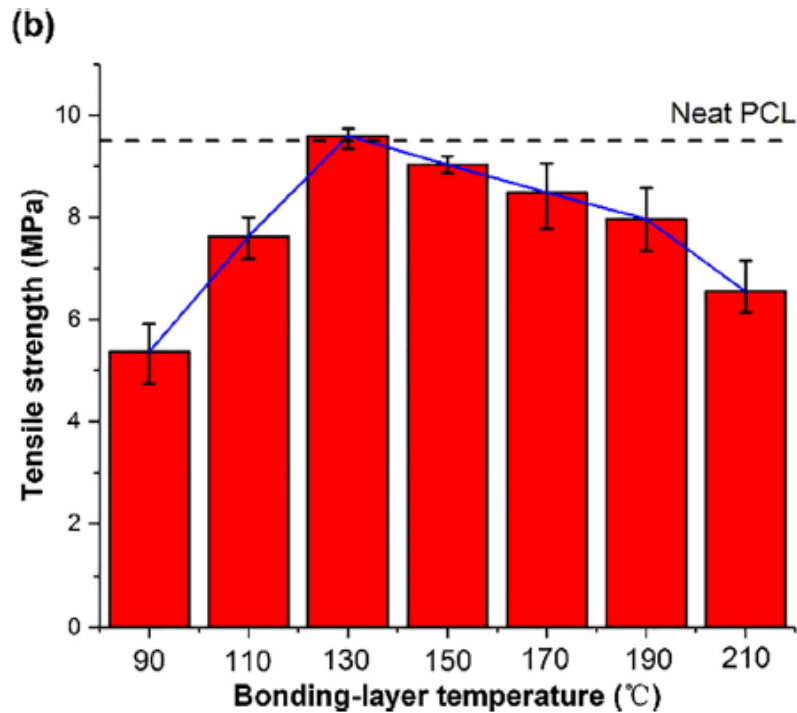


Figura 15: Tensió vs Temperatura entre capes [18]

2.1.3.4 AM al sector mèdic i multi material

En el sector mèdic tal com s'ha comentat anteriorment, les tecnologies de fabricació additiva hi són molt representades. En el cas de la indústria mèdica, aquestes tecnologies han permès que els implants puguin estar dissenyats amb el nivell de personalització molt elevat per tal de reduir els temps de recuperació, això també implica una adaptació millor a la pròtesi, millorar l'aparença cosmètica del pacient i millorar en general els implants i pròtesis [19]. Els productes mèdics fets amb impressió 3D es poden classificar en 5 categories diferenciades [19]:

- Sistemes d'entrenament quirúrgics (òrgans artificials)
- Implants i pròtesis especials per cada pacient
- Estructures pel creixement cel·lular ("scaffolds")
- Sistemes farmacèutics (pastilles)
- Produir teixits i òrgans

El requeriments principals dels productes mèdics fets amb fabricació additiva són que l'element ha de ser altament biocompatible i en segon lloc degradable en un període de temps

considerablement ràpid. Pel que fa a els requeriments geomètrics i de rugositat, l'estructura ha de ser altament porosa, i amb propietats mecàniques semblants a teixits regenerats. Molts materials s'han adaptat directament a la indústria mèdica i cada vegada més els fabricants de filament hi estan dedicant més temps de recerca i desenvolupament [8]. El material S-TPU [19] per exemple és biocompatible, i és un biomaterial creat expressament per a la indústria mèdica. Si es comparen les diverses tecnologies usades a la indústria mèdica, l'FDM és molt menys tòxic que el SLA, per als éssers vius [20].

Hi ha una sèrie de companyies que han dedicat recursos en fer productes aplicables al FDM en l'àmbit mèdic, una d'elles es dedica a fer filament mèdic certificat per FDM i és AndersonSC (USA) on fabriquen filaments tots basats en diversos materials com la policaprolactona (PCL), l'àcid polilàctic (PLA) o el poliuretà termoplàstic (TPU). Actualment els més usats són el TPU i la PCL. El TPU ja s'ha utilitzat exitosament per fer estructures poroses. El TPU té unes capacitats elàstiques molt bones, i és fàcil d'imprimir. En l'estudi [19], es fabriquen 2 materials amb base de TPU, el (S-TPU) i el (F-TPU), que són biocompatibles es caracteritzen. Analitzant els dos materials en l'estudi es veu que hi ha diferències en l'acabat del S-TPU i el F-TPU, on el F-TPU resulta generar un millor acabat. A la Figura 16 es poden veure diferents filaments mèdics disponibles al mercat, amb les seves característiques principals.

Value Range	MilaMed®	Desmopan® AU	Texin® RxT50	S-TPU
TSb [MPa]	15–30	25–50	25–52	26
Eb [%]	540–565	470–880	320–770	705
HS [°Sh A/D]	no data found	60A–75D	70A–65D	26D
Chemical composition	Aliphatic polyether	Aromatic polyester	Aromatic polyether	Aliphatic polyester

Figura 16: Comparació dels diferents materials biomèdics [19]

2.1.4 PCL a la indústria mèdica

Tal com s'ha vist en els estudis analitzats, la fabricació additiva es veu cada dia més implicada en la indústria mèdica. Estudis com el de [8] o el de [18] que fan recerca sobre l'adhesió de capes amb làmines de PCL combinats amb altres materials per aconseguir biocompatibilitat, demostren que la PCL està força implementada en la recerca mèdica. Empreses com AndersonSC, USA, ja desenvolupen filaments específics amb PCL per ser utilitzats en intervencions quirúrgiques i altres aplicacions de la PCL. Per tant es podria afirmar que actualment hi ha bastant implementació d'aquestes tecnologies tant en l'àmbit industrial i de recerca en el camp sanitari i biomèdic.

Una de les aplicacions de la PCL més importats en la indústria mèdica, és per a la regeneració de teixits, a través del recobriment amb làmines o estructures de PCL. Estudis com el de [21] o el de [22] en fan referència. El primer d'ells analitza l'estudi funcional i mecànic d'estructures en 3D totalment biodegradables amb nanocòsits per a la regeneració de teixits, fabricades amb PCL combinades amb nanopartícules de Hydroxyapatita (HA), a través de tècniques de fabricació additiva. En els teixits es busca una estructura porosa biocompatible per tal d'afavorir la regeneració del teixit, per tant, la precisió, la rugositat i les dimensions dels porus són factors clau a tenir en compte. A l'estudi [21] es va caracteritzar la mida del porus amb un microscopi de provetes prèviament extrudides amb tècniques de fabricació additiva, concretament amb la tècnica de deposició de fibres.

Avui en dia hi ha bastant dedicació de recursos en l'estudi de la utilització de material polimèrics per a la fabricació d'"scaffolds" (estructures per a la regeneració cel·lular) juntament amb cèl·lules mare [22]. L'estudi investiga l'ús de tècniques de fabricació additiva per a la fabricació d'"scaffolds" de PCL conjuntament amb grafè o carboni per a l'aplicació en ossos, per tal de millorar-ne l'afinitat i la unió de les cèl·lules [22].

Tal com es pot veure la majoria d'estudis es centren en la utilització de la PCL a través de tècniques de fabricació additiva, per a la fabricació d'"scaffolds" o elements de medicina regenerativa. És per aquesta raó que aquest treball se centrarà en l'estudi dels paràmetres del FDM a través d'una proveta en format làmina fina de PCL per a una futura aplicació en l'àmbit biomèdic.

3 TREBALL EXPERIMENTAL

L'objectiu del treball experimental és establir com afecten els paràmetres del procés de FDM, a través de l'anàlisi de dades amb un model estadístic obtingut amb el programari Minitab 19, per a posteriorment generar una sèrie de recomanacions per assegurar l'èxit dimensional i d'acabat del model imprès. L'estudi experimental es farà sobre una proveta en forma de làmina de PCL, que té aplicacions a la indústria biomèdica. El treball experimental està dividit en 3 parts diferenciades. En primer lloc s'han fet una sèrie d'anàlisis previs per veure els límits del procés, en segon lloc amb els límits establerts s'ha plantejat el procediment experimental, i per últim s'han analitzat els resultats del treball experimental.

3.1 Geometria, material i caracterització

3.1.1 Geometria

La geometria utilitzada en el treball experimental s'ha decidit de fer en format làmina per tal de ser mesurada de manera senzilla amb un micròmetre Mahr, i palpar-ne fàcilment la rugositat amb el rugosímetre Mitutoyo (A l'annex D, es poden veure descrits tots els equipaments utilitzats). La làmina té una geometria quadrada per tal que el dimensionat en X i Y sigui el mateix i el possible desnivellat de la taula en una direcció o l'altra no afecti tant. L'única variable geomètrica que es modifica durant l'experimentació és el gruix d'aquesta làmina. A la Figura 17 es pot veure la geometria que té la proveta. Les dimensions X i Y són de 50 mm. Al plànol 1 de l'annex H es pot veure les cotes completes de la làmina.

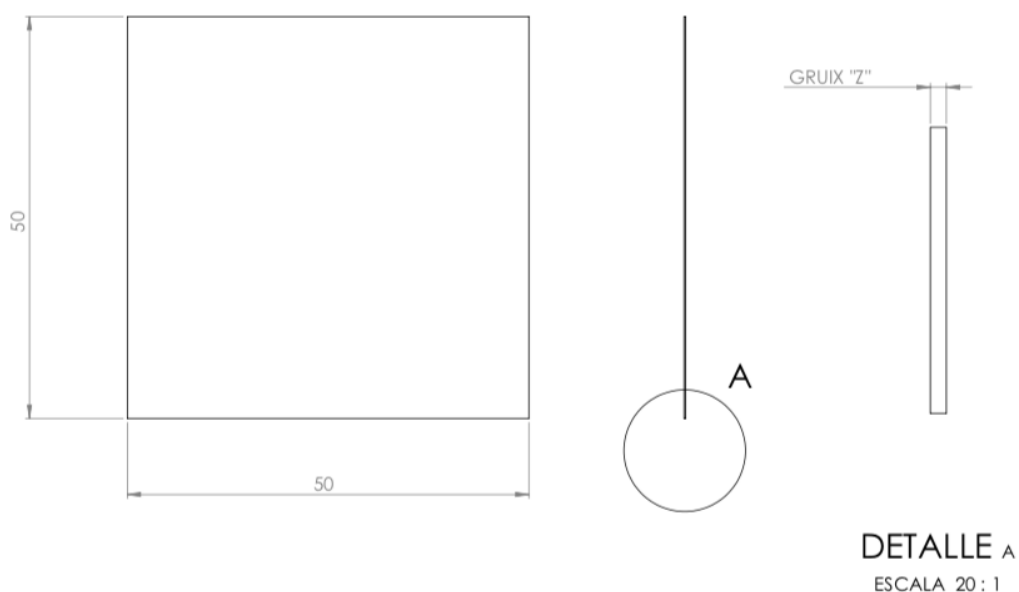


Figura 17: Plànol de la geometria de les provetes

Aquest Gruix “Z”, durant les experimentacions prèvies es varia entre 0,15 mm i 0,6 mm, i pel que fa al treball experimental, els gruixos teòrics de les làmines estudiats són de 0,2 mm, 0,4 mm i 0,6 mm.

3.1.2 Material

El material utilitzat en l'estudi és la Policaprolactona (PCL), ja que és biodegradable i té una gran versatilitat d'usos i propietats, ja sigui en l'àmbit mèdic per a la fabricació de pròtesis o per prototipatge industrial. Les característiques més destacades de la PCL són el seu baix cost, l'alta compatibilitat amb altres materials, la seva biocompatibilitat i que és hidrofòbic. De les seves propietats mecàniques destaquen una bona elasticitat i adherència.

Si s'analitza químicament el procés d'obtenció, la Policaprolactona (PCL) és un poliestirè alifàtic biodegradable obtingut a partir del procés de polimerització de la Caprolactona. Les seves característiques bàsiques principals són les que es poden veure a la Taula 1. A la Figura 140 de l'annex G es poden veure les característiques físiques de la PCL.

Taula 1: Paràmetres químics de la PCL

Temperatura de fusió	60 °C
Densitat	1145 kg/m ³
Formulació Química	$C_6H_{10}O_2$

Com es pot veure la temperatura de fusió és relativament baixa, fet que fa que requereixi poca energia tèrmica en el procés d'extrusió. El material (PCL) es subministra a la màquina en format filament de gruix 3 mm, en bobines de 4 kg. Aquest material va ser extrudit i caracteritzat pel departament de LEPAMAP de la UDG.

Durant els experiments, la pèrdua de material durant el procés d'extrusió és pràcticament nul·la. Es pot considerar com a perdut el material que queda dins l'extrusor, però en la següent extrusió es podrà utilitzar i no es perdrà, per tant, no es considera un desapropiament de material. Es pot considerar que les làmines tenen una densitat del 100%, per tant, es pot trobar el pes teòric, i la quantitat teòrica de material utilitzat. Primerament s'ha corroborat si la densitat de la PCL utilitzada és igual a la teòrica, per fer-ho s'ha pesat un tall de filament de longitud 100 mm i 3 mm de secció, per tal de trobar la densitat i compara-la. El pes dels 100 mm de filament de secció 3 mm és de 0,81 grams, per tal de trobar la densitat cal trobar el volum del filament pesat. A través de l'equació del volum d'un cilindre es troba el volum teòric.

$$Volum = secció * longitud = 1,5^2 * \pi * 100 = 706,5 \text{ mm}^3$$

A continuació es fa el factor de conversió per passar-ho a sistema internacional.

$$\frac{0,81 \text{ grams}}{706,5 \text{ mm}^3} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ grams}} * \frac{10^9 \text{ mm}^3}{1 \text{ m}^3} = 1146,49 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

La densitat teòrica de la PCL pura és de $1145,00 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$, per tant es pot afirmar que l'error entre l'experimental i el teòric és molt petit i per tant és PCL pura. Dit això es pot calcular quant de material es necessita per cada una de les làmines en el treball experimental. Per tal de trobar el pes i longitud teòrics cal saber el volum de cadascuna de les làmines del procés experimental.

Taula 2: Paràmetres teòrics del procés experimental

Gruix (mm)	Volum teòric (mm³)	Pes teòric (g)	Longitud teòrica (mm)
0,2	500	0,573	70,37
0,4	1000	1,146	141,48
0,6	1500	1,719	211,11

A la Taula 2 es poden veure els paràmetres físics teòrics de les làmines del procés experimental. L'anàlisi es fa sobre les següents variables del model imprès: El gruix de la làmina, la rugositat i el pes amb cadascun dels 3 gruixos teòrics indicats (0,2 mm, 0,4 mm i 0,6 mm). Totes les variables són mesurades a totes les peces.

3.1.3 Metodologia de caracterització de les peces fabricades.

Al treball experimental, s'analitzen 3 propietats de les làmines impreses, el gruix, la rugositat i el pes. A continuació s'explica cada una d'elles i la metodologia seguida per caracteritzar-les. A l'annex D, es pot veure la descripció de cadascun dels equipaments utilitzats per a la caracterització de les provetes.

- **Gruix**

El gruix de la làmina ve marcat per distància que hi ha entre la part inferior i superior en l'eix Z de construcció de la peça i correspon a la cota gruix "Z" teòrica de la Figura 17. Aquesta cota serà mesurada amb un micròmetre Mahr model 40 EWW en 5 punts estratègics de la peça. Posteriorment es realitzarà la mitjana d'aquestes mesures, per tal de minimitzar l'efecte del desnivellat de la taula o dels eixos de moviment del capçal i la uniformitat del gruix d'extrusió.

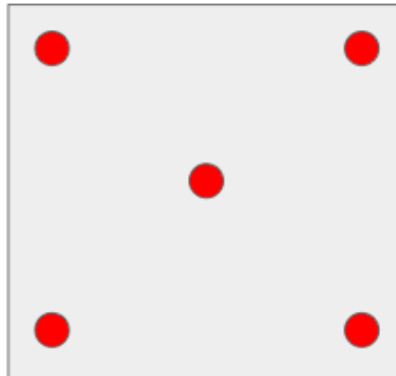


Figura 18: Punts de mesura de la proveta

A la Figura 18 es pot veure els 5 punts de mesura de la proveta, la distància dels punts laterals és de $20 \pm 1 \text{ mm}$ des del centre de la proveta en els eixos X i Y. El punt central està a 25 mm de cada cantonada. La metodologia consisteix a fer una mesura amb el micròmetre per cada un dels 5 punts. El micròmetre se subjectarà amb un suport, i es posarà la proveta perpendicular i tal com es veu a la Figura 19. Les punteres utilitzades en el micròmetre són les cilíndriques de 5 mm de diàmetre, per tal de no deformar el material amb la compressió de la mesura. El resultat serà la mitjana d'aquests 5 punts.

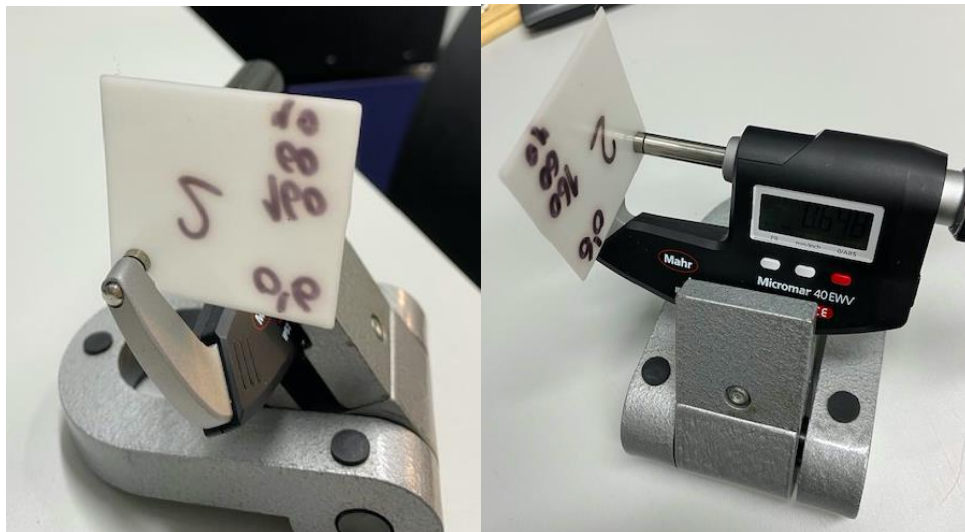


Figura 19: Mesura del gruix amb el micròmetre.

- **Rugositat**

La rugositat és la desigualtat que hi ha en superfície de la làmina, es defineix com la mitjana de la diferència entre les cotes menors i majors de l'ondulació que segueix la superfície. També és un indicador de l'aspresa l'àrea de la peça. La rugositat s'ha mesurat en totes les peces del treball experimental i només a la part superior, ja que a la part inferior, que és on està en contacte amb el llit i la rugositat que té, és molt baixa, ja que és de vidre i agafa

aquesta forma. La rugositat es mesura en micròmetres (μm) a través del rugosímetre Mitutoyo surf-test. La proveta es col·locarà de manera que el rugosímetre ressegueixi la línia central amb un angle de 45 graus a les línies d'impressió, ja que no es vol agafar la línia de material paral·lelament ni en la direcció perpendicular. A la Figura 20 es pot veure amb vermell la direcció d'impressió i en verd la direcció de mostreig del palpador del rugosímetre. La trajectòria de palpació tindrà una longitud de 10 mm.

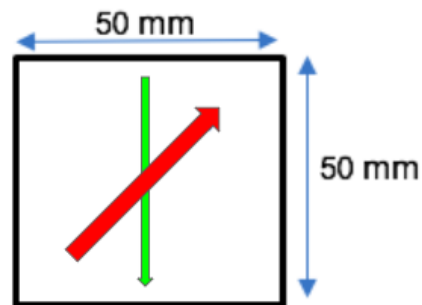


Figura 20: Direcció d'impressió i del rugosímetre

Com es pot veure a la Figura 20 la trajectòria de palpació del rugosímetre és paral·lela a l'eix Y de la proveta, sobre la línia central i es realitzarà únicament una mesura per cada proveta



Figura 21: Mesura de la rugositat

Les mesures amb la rugositat s'han realitzat tal com es veu a la Figura 21.

- **Pes**

El pes de la peça es mesurarà per tal de trobar la densitat de la làmina i comparar-la amb la teòrica calculada. El pes es mesurarà amb una bàscula de precisió fins al mil·ligram. La bàscula utilitzada és de la marca Kern, representada a la Figura 22.



Figura 22: Bàscula Kern

La base de la bàscula és circular i les provetes seran col·locades una a una de manera centrada sobre la base, i la bàscula serà tarada per a cada mesura.

3.2 Experimentació preliminar

L'assaig previ s'ha utilitzat per establir una sèrie de limitacions físiques del procés per tal d'evitar possibles errors en el treball experimental i assegurar l'èxit. L'experimentació preliminar està dividida en 5 etapes:

- Obtenció dels valors líndar del procés d'impressió
- Test d'anivellat de la taula
- Anàlisi del gradient tèrmic
- Anàlisi de la rugositat
- Anàlisi del gruix de capa i codi

A continuació s'expliquen detalladament cadascun d'ells:

3.2.1 Assaig previ 1: Rang de valors líndars

3.2.1.1 Objectiu

L'objectiu del primer assaig és estudiar els valors límit de tres dels paràmetres del procés més influents en la uniformitat de gruix de les peces obtingudes, per tal de tenir un rang acotat de valors i evitar possibles defectes experimentals i de la maquinària. També es busca comparar-ho amb els paràmetres acotats pels diferents fabricants de la PCL. A la Taula 63 de l'annex A.1 es pot veure els paràmetres de la PCL recomanats pel fabricant.

3.2.1.2 Paràmetres modificats

Els paràmetres que s'han modificat han estat la velocitat d'impressió, la temperatura d'extrusió i en la part 2, la temperatura del llit. A la Taula 3 es poden veure les diferents combinacions de paràmetres de cada part del primer assaig.

Taula 3: Paràmetres de l'assaig previ 1

		Assaig 1.1-1.3	Assaig 1.4 -1.6	Assaig 1.6-1.9
Part 1	Temperatura extrusió (°C)	130	160	190
	Velocitat impressió (mm/s)	20	40	60
	Temperatura llit (°C)	40		
Part2		Assaig 1.10	Assaig 1.11	Assaig 1.12
	Temperatura extrusió (°C)	190		
	Velocitat impressió (mm/s)	30		
	Temperatura llit (°C)	30	40	60

En la Part 1 per a cada temperatura d'extrusió s'han fet 3 assajos diferents, un amb cada velocitat d'impressió, fixant la temperatura del llit. Per tal de veure la influència de la velocitat d'impressió en 3 casos diferenciats de temperatura d'extrusió. Fent un total de 9 assajos.

En la Part 2 es va fixar la temperatura d'extrusió i la velocitat d'impressió tenint en compte els paràmetres de l'apartat 1 que resultaven una millor precisió respecte al valor esperat, i es va modificar la temperatura del llit fent un total de 3 assajos. Els paràmetres fixats en les dues parts són els que es poden veure a la Taula 4.

Taula 4: Paràmetres fixos assaig previ 1

Temperatura base(°C)	40
Gruix (mm)	0,5
Alçada de capa (mm)	0,1
Temperatura taller (°C)	19
Ventilador (%)	100

3.2.1.3 Paràmetres estudiats i resultats

D'aquestes provetes se n'ha caracteritzat el gruix, el pes i visualment els possibles errors que s'han vist durant el procés. A la Taula 5 es pot veure un resum de resultats de l'assaig previ 1, a l'annex A.1 hi ha la taula de resultats completa.

Taula 5: Resum dels resultats de l'assaig previ 1

		Gruix teòric (mm)	Temperatura extrusió (°C)	Velocitat impressió (mm/s)	Temperatura base (°C)	Temps impressió (minuts)	Mitjana gruix(mm)	Diferència (%)
PART 1	Assaig 1.1	0,5	130	20	40	46	0,503	0,5%
	Assaig 1.2			40		23	0,448	10,4%
	Assaig 1.3			60		16	0,438	12,4%
	Assaig 1.4		160	20		46	0,517	3,3%
	Assaig 1.5			40		23	0,481	3,7%
	Assaig 1.6			60		16	0,478	4,4%
	Assaig 1.7		190	20		46	0,553	10,7%
	Assaig 1.8			40		23	0,503	0,6%
	Assaig 1.9			60		16	0,485	3,1%
PART 2	Assaig 1.10	0,5	190	30	30	32	0,578	15,6%
	Assaig 1.11				40	32	0,510	2,0%
	Assaig 1.12				60	32	0,471	5,7%

A la Taula 5 es pot veure que en els assajos 1.1 a 1.3 es van fixar la temperatura d'extrusió a 130°C i la temperatura del llit a 40°C i el que es va modificar va ser la velocitat. S'observa que a més velocitat el gruix tendeix a disminuir. Variant la velocitat de 20 mm/s a 60 mm/s, el gruix es redueix 6 dècimes de mm. La mitjana de les mesures per aquests assajos 1 a 3 és 0,463 mm. A la temperatura d'extrusió utilitzada, 130°C, el material solidifica bastant ràpidament, això es pot visualitzar amb el color del material extrudit, ja que és pràcticament

blanc un cop surt del capçal, tal com es veu a la Figura 23. Pel que fa a l'adherència al llit es força bona en aquestes condicions dels assajos 1.1 a 1.3.



Figura 23: Decoloració en el procés de solidificació

Pel que fa a els assajos 1.4 a 1.6 es van fixar la temperatura d'extrusió a 160°C i la temperatura del llit 40°C, i també se'n va modificar la velocitat. S'observa que a més velocitat el gruix tendeix a disminuir. Variant la velocitat de 20 mm/s a 60 mm/s, el gruix es redueix 6 dècimes de mm. La mitjana de les mesures per aquests assajos és 0,492 mm. Com es pot veure, comparant-t'ho amb l'assaig anterior (1-3), l'únic paràmetre que s'ha variat és la temperatura i es demostra que a més temperatura, el gruix tendeix a augmentar. L'acabat superficial visualment és una mica millor. En aquests assajos, el filament tarda més a solidificar a la base, a causa que hi arriba a més temperatura, tal com es veu a la Figura 23. Finalment en els assajos del 1.6 al 1.9 es van fixar la temperatura d'extrusió a 190°C també modificant la velocitat. S'observa que a més velocitat el gruix tendeix a disminuir i al tacte també és millor. Variant la velocitat de 20 a 60 mm/s, el gruix es redueix 8 dècimes de mm. La mitjana de les mesures per aquests assajos és 0,5137 mm. Com es pot observar en aquest assaig, únicament variant la velocitat, es veu clarament que si es compara amb els anteriors (1-3) i (4-6), a més temperatura el gruix tendeix clarament a augmentar.

En la segona part es va fixar la temperatura d'extrusió a 190°C, la velocitat a 30 mm/s i es va variar la temperatura del llit, per trobar-ne el límit. S'observa que a més temperatura de llit, el gruix tendeix a disminuir, i la rugositat també. El problema és que amb temperatures de base de més de 40°C, succeeix el mateix que amb temperatures d'extrusió massa elevades, el

contorn no queda ben definit, i la solidificació total del material és molt lenta. La mitjana de les mesures per aquests assajos és 0,5198 mm.

3.2.1.4 Conclusions Primer assaig previ

S'ha observat que a mesura que s'augmenta la velocitat amb una mateixa temperatura, les mesures tendeixen a disminuir, i per tant la proveta es fa més fina. Variant la temperatura d'extrusió s'observa que a més temperatura, el gruix tendeix a augmentar. El problema és que amb temperatures de base de més de 40°C, el contorn no queda ben definit, i la solidificació total del material és molt lenta. Per tant d'aquest assaig es fixen els límits del procés per tenir una bona imprimibilitat que són: La temperatura màxima del llit sigui de 40°C, ja que 60°C de llit provoca deformacions del contorn. Les temperatures d'extrusió tindran un rang de 130°C a 190°C. Amb la velocitat a 40 mm/s és quan es produeix la millor relació acabat/gruix i a més velocitat la deformació del contorn disminueix, per tant el rang s'estableix de 20 mm/s a 60 mm/s. A la Taula 6 es poden veure els paràmetres líndars establerts.

Taula 6: Paràmetres establerts a l'assaig 1

Temperatura extrusió (°C)	130-190
Velocitat extrusió (mm/s)	20-60
Temperatura llit (°C)	35-40

Aquests paràmetres resulten ser bastant semblants amb els proporcionats pels fabricants de PCL, tal com es pot veure a la Taula 63 de l'annex A.1. A causa de la gran variabilitat de mesures, es va decidir fer un test d'anivellat de la taula d'impressió per veure si la col·locació de la proveta a diferents posicions del llit, amb unes mateixes condicions d'impressió afecta el gruix. Correspondrà al segon assaig previ.

3.2.2 Assaig previ 2: Anivellat de la taula

3.2.2.1 Objectiu

L'objectiu d'aquest segon assaig és estudiar la influència de la posició d'impressió de les peces per veure si el llit d'impressió està correctament anivellat, per tal que durant el procés experimental conèixer si l'error és degut a la maquinària o al procés i poder corregir-lo.

3.2.2.2 Paràmetres modificats

Tal com es pot veure a la Taula 7 es va fixar la temperatura a 190°C, el llit a 40°C i la velocitat d'extrusió a 40 mm/s, ja que són paràmetres que en el primer assaig previ han aconseguit unes bones condicions d'impressió. Es van col·locar les provetes estratègicament per tal de poder veure el possible desnivellat que pot tenir la taula d'impressió.

Taula 7: Paràmetres de l'assaig previ 2

Part 1	Paràmetre	Assajos 2.1- 2.5
	Temperatura extrusió(°C)	190
	Velocitat impressió (mm/s)	40
	Temperatura llit (°C)	40

Els paràmetres fixats per l'assaig són els de la Taula 8. Com es pot veure són els mateixos que en l'assaig previ 1.

Taula 8: Paràmetres de fixes de l'assaig previ 2

<i>Temperatura base(°C)</i>	40
<i>Gruix (mm)</i>	0,5
<i>Alçada de capa (mm)</i>	0,1
<i>Temperatura taller (°C)</i>	19
<i>Ventilador (%)</i>	100

La distribució de les provetes a la taula es pot veure a la Figura 24, la distància en X entre la proveta 1 i 2 és de 12 cm, igual que la de 4 a 5. Les distàncies en Y també són les mateixes. La proveta 3 es troba centrada a la taula.

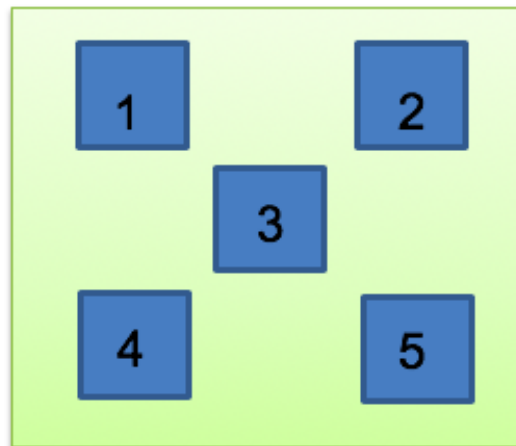


Figura 24: Distribució de les provetes a la taula

3.2.2.3 Paràmetres estudiats i resultats

D'aquestes provetes se n'ha caracteritzat únicament el gruix. A continuació es representa una taula resum dels resultats, a la Taula 64 l'annex A.2 hi ha els resultats complets.

Taula 9: Taula resum assaig previ 2

		Gruix Teòric (mm)	Temperatura extrusió (°C)	Velocitat impressió (mm/s)	Temperatura base (°C)	Temps impressió (minuts)	Mitjana gruix (mm)	Diferència respecte la mitja (%)
Assaig 2.1	proveta DE (1)	0,5	190	40	40	32	0,506	1,41%
Assaig 2.2	proveta DD (2)					32	0,483	0,87%
Assaig 2.3	proveta C (3)					32	0,488	0,39%
Assaig 2.4	proveta AE (4)					32	0,497	0,47%
Assaig 2.5	proveta AD (5)					32	0,486	0,61%

A la Taula 9 es poden veure les mesures dels gruixos de l'assaig previ 2. Com es pot observar les mesures 1 i 4 (esquerra) tendeixen a ser majors que les 2 i 5 (dreta), fet que ens indica que la taula està lleugerament inclinada cap a la dreta. Dit això la inclinació és tant poca, que es pot considerar molt ben alineada. Entra la mesura més alta i la més baixa només hi ha dues centèsimes de mm de variació. La mitjana de les mesures per aquests assajos és 0,4921 mm.

3.2.2.4 Conclusions Segon assaig previ

Veient els resultats obtinguts i que les provetes amb més error són les no centrades, s'evitarà posar les provetes allunyades a les cantonades i els assajos del treball experimental es farà amb les provetes segons la distribució de la Figura 25 de dos en dos. La distància entre els centres de les provetes és aproximadament de 12 cm.

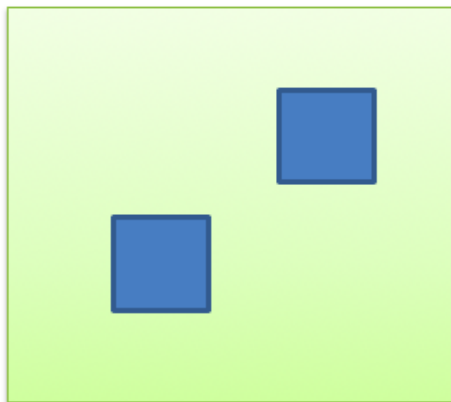


Figura 25: Distribució de les provetes a la taula

3.2.3 Assaig previ 3: Gradient Tèrmic

3.2.3.1 Objectiu

L'objectiu d'aquest assaig previ és establir la diferència entre la temperatura teòrica d'extrusió i la real que es diposita sobre el llit. Per tal de poder comparar correctament els valors experimentals amb els teòrics. Aquest estudi es farà través de l'anàlisi del gradient tèrmic del fil extrudit a través de la càmera tèrmica model Image LR.

3.2.3.2 Paràmetres modificats

Taula 10: Paràmetres assaig previ 3

	Paràmetre	Nivell 1	Nivell 2
Part 1	Temperatura extrusió (°C)	160	
	Velocitat impressió (mm/s)	40	
	Temperatura llit (°C)	40	
	Gruixos (mm)	0,5	0,25

Els paràmetres de l'assaig es troben a la Taula 10, són els de la temperatura d'extrusió, velocitat d'impressió i temperatura del llit, fixats segons els paràmetres que generaven una millor precisió en els assajos anteriors, que resulten ser de 160°C de temperatura de l'extrusor, 40 mm/s de velocitat d'extrusió i 40 graus de temperatura del llit. El paràmetre modificat va ser el gruix de la proveta, per tal de veure si en capes superiors la temperatura de l'extrusor es veia afectada per la distància que hi havia sobre el llit. En aquest cas s'han fet 3 rèpliques de cada gruix de proveta, fent un total de 6 assajos.

Taula 11: Paràmetres fixos assaig previ 3

Temperatura base (°C)	40
Alçada de capa (mm)	0,1
Temperatura taller (°C)	19
Ventilador (%)	100

A la Taula 11 es pot veure els paràmetres fixats pels dos experiments. Com es pot veure es va fixar la temperatura del llit a 40°C, la que donava millor acabat en els assajos previs 1 i 2. En aquest assaig previ, per captar millor el gradient de temperatures al llarg de la taula es va afegir a la impressió de la proveta quadrada un filament centrat a la taula per poder captar el perfil de temperatures amb la qual els fils es dipositen sobre el llit. El filament té exactament el mateix gruix que la proveta impresa. A la Figura 21 es pot veure la distribució d'elements a la taula.

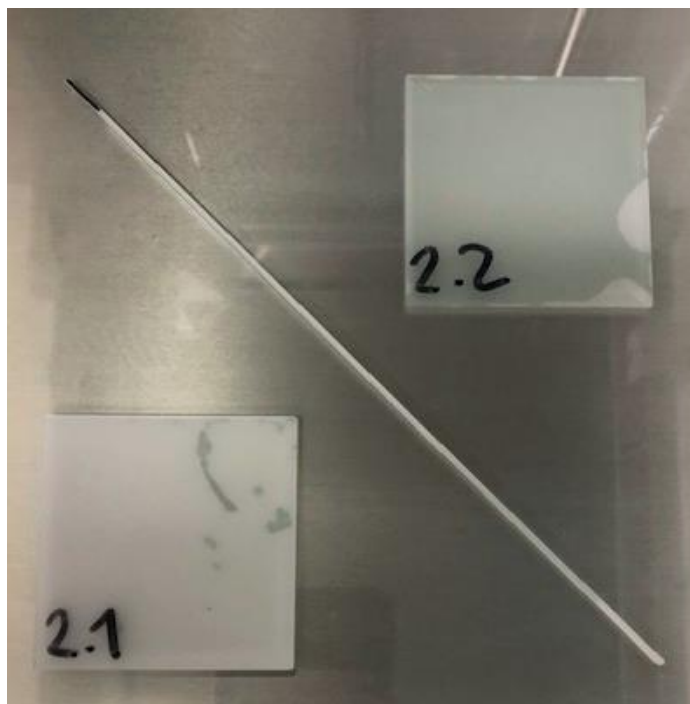


Figura 26: Configuració de la taula per la visualització del gradient tèrmic

3.2.3.3 Paràmetres estudiats i resultats

A continuació, a la Taula 12 es pot veure els resultats del tercer assaig previ, en aquest cas s'ha estudiat el gruix i el gradient tèrmic. A l'annex A.3 es pot veure la Taula 65, que correspon a la taula completa de resultats de l'assaig previ 3.

Taula 12: Resum de resultats de l'assaig previ 3

	Gruix teòric (mm)	Temperatura extrusió (°C)	Velocitat impressió (mm/s)	Temperatura base (°C)	Temps impressió (minuts)	Mitjana gruix (mm)	Diferència (mm)	Temperatura Camera Tèrmica (°C)
Assaig 3.1	0,5	160	40	40	32	0,443	0,057	45,4
Assaig 3.2	0,25				16	0,269	0,019	46
Assaig 3.3	0,5				32	0,463	0,037	45,3
Assaig 3.4	0,25				16	0,271	0,021	46
Assaig 3.5	0,5				32	0,476	0,024	45,5
Assaig 3.6	0,25				16	0,269	0,019	46

Si primerament s'analitza el gruix, com es pot veure a Taula 12, les provetes de gruix 0,5 mm sempre queden per sota el valor teòric, en canvi les de gruix 0,25 mm sempre queden per sobre. Caldrà per tant analitzar la superposició de capes i el codi per veure com genera "el llescat" i la superposició de capes el post processador utilitzat per a la impressora Ultimaker 3, això es farà posteriorment a l'assaig previ 5.

3.2.4 Assaig previ 4: Estudi de l'efecte de la temperatura del llit en la rugositat

3.2.4.1 Objectiu

Tot i que en la segona part de l'assaig previ 1 es va veure l'efecte de la temperatura del llit en el gruix, en aquest assaig previ l'objectiu és veure quin límit es pot assolir de temperatura del llit, per tal que no fongui la làmina, afectant molt notablement la rugositat i deformació de la làmina.

3.2.4.2 Paràmetres Modificats

Per tal de veure l'afectació de la temperatura del llit en l'acabat superficial, s'ha mesurat la rugositat a diferents provetes, de gruixos 0,6 mm i 0,4 mm, per tal de veure quina afectació té en la rugositat la temperatura del llit. Els gruixos de 0,6 mm i 0,4 mm s'han decidit fer per tal que fossin múltiples del gruix de capa, tal com es pot veure a la Taula 13.

Taula 13: Paràmetres modificats del quart assaig previ 4

Part 1	Paràmetre	Nivell 1	Nivell 2
	Temperatura extrusió (°C)	160	
	Velocitat impressió (mm/s)	40	
	Temperatura llit (°C)	40	60
	Gruixos (mm)	0,6	0,4

Les condicions d'impressió fixades d'aquestes provetes seran les de la Taula 14.

Taula 14: Paràmetres fixats per l'assaig previ 4

<i>Velocitat impressió (mm/s)</i>	40
<i>Alçada de capa (mm)</i>	0,1
<i>Temperatura taller (°C)</i>	19
<i>Ventilador (%)</i>	100

S'han fet 2 assajos de cada gruix per cadascun de les temperatures de base, i s'ha replicat. Resultant un total de 8 provetes.

3.2.4.3 Paràmetres estudiats i resultats

A continuació es pot veure la Taula 15, que conté el resum dels resultats del quart assaig previ, en aquest cas s'ha estudiat la rugositat. A la Taula 66 de l'annex A.4 hi ha els resultats complets

Taula 15: Resum resultats Assaig previ 4

	Gruix teòric (mm)	Temperatura extrusió (°C)	Temperatura llit (°C)	Velocitat impressió (mm/s)	Temps impressió (minuts)	Rugositat (µm)	Mitjana Rugositat (µm)	
Assaig 4.1	0,6	160	60	40	40	1,301	1,350	
Assaig 4.2					40	1,399		
Assaig 4.3			40		40	2,378	1,915	
Assaig 4.4					40	1,451		
Assaig 4.5	0,4		60		40	30	1,186	1,266
Assaig 4.6						30	1,346	
Assaig 4.7			40		40	30	1,608	1,669
Assaig 4.8						30	1,729	

Com es pot veure a la Taula 15 per la temperatura de base de 40 graus, l'acabat superficial no és tan bo, com amb 60°C, a causa que el material no flueix tant. Amb la temperatura de la base més elevada, es permet que el material estigui un major temps en estat semi líquid, fet que fa que el material flueixi i allisi la part superior. Pel que fa el gruix no hi ha cap tendència significativa que mostri una afectació en la rugositat.

A través de la càmera tèrmica segons l'assaig previ 3 es pot veure que la temperatura de la base es manté una bona estona a alta temperatura un cop s'ha acabat la impressió i a mesura que va extrudint, es veu com el material que fa estona ha estat extrudit comença allisar-se i és molt menys rugós que el que s'ha acabat d'extrudir. A la Figura 28 es pot veure els diferents estats de solidificació de les làmines de PCL un cop extrudides, el color transparent és un bon indicador de l'estat en què es troben, a més transparència més líquid, i a més opac més sòlid. La proveta transparent és just acabada d'imprimir i la més opaca és al cap de 2 minuts.

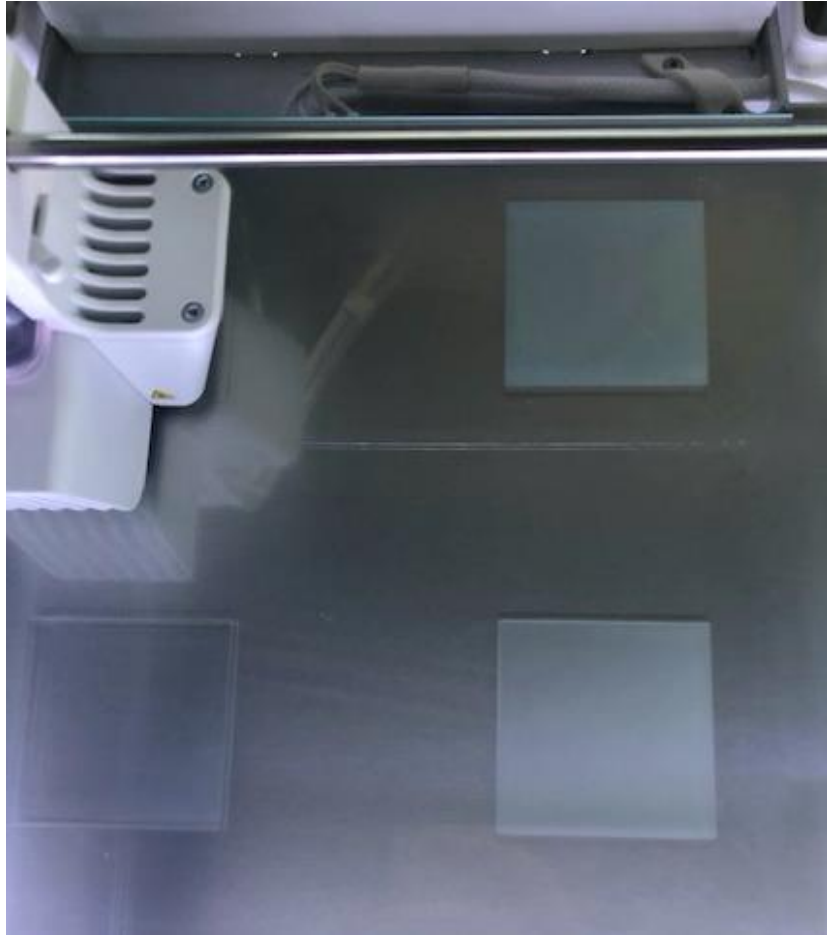


Figura 28: Estats de solidificació de la PCL

3.2.4.4 Conclusions Quart assaig previ

Amb els assajos realitzats es pot veure que amb la temperatura de la base alta, de 60°C, fa que la PCL flueixi, i per tant alteri l'acabat que donen les altres condicions d'impressió. Per tant la temperatura del llit s'establirà en 40°C. A més segons s'ha vist en l'assaig previ 3, la temperatura de sortida del filament del capçal és d'uns 45 graus, i si es diposita a uns 60°C de llit, fa que es deformi, en fluir massa el material.

3.2.5 Assaig previ 5: Estudi de la l'alçada de capa i la trajectòria d'impressió

3.2.5.1 Objectiu

L'objectiu d'aquest assaig és veure quin és el gruix mínim de capa imprimible i la precisió d'aquesta, per tal de poder establir el mínim gruix de la capa d'impressió. També es vol veure si la trajectòria d'impressió té algun efecte en l'alçada de capa, la manera amb la qual el programari genera el codi d'impressió i quin efecte té en el gruix de capa. En l'assaig previ 3 s'ha vist que la uniformitat del gruix segons l'alçada de la proveta té unes tendències poc coherents, és per això que cal estudiar l'alçada de capa i com el post processador genera el codi, per poder validar-ho de manera clara de cara al treball experimental.

3.2.5.2 Paràmetres modificats

S'ha fet un una primera part per veure quina precisió dimensional té la màquina per a gruix de làmina de 0,15 mm, que és proper al mínim que permet amb aquest material la Ultimaker 3, imprimint amb un gruix de capa 0,1 mm. Les condicions d'impressió són les mateixes que en els assajos anteriors 3 i 4. En la segona part, amb gruix de capa 0,2 mm, s'ha fet que el gruix de la làmina fos múltiple de l'alçada de capa, per tant, són de 0,4 mm i 0,6 mm, per veure si s'acumula l'error. Les condicions són també les mateixes que en els assajos anteriors, per tal d'analitzar el codi i l'alçada de capa. A la Taula 16 es poden veure els paràmetres modificats de l'assaig previ 5.

Taula 16: Paràmetres modificats de l'assaig 5

	Paràmetres	Nivell 1	
Part 1	Temperatura extrusió (°C)	160	
	Velocitat impressió (mm/s)	40	
	Temperatura llit (°C)	40	
	Gruixos (mm)	0,15	
Part 2	Paràmetres	Nivell 1	Nivell 2
	Temperatura extrusió (°C)	160	
	Velocitat impressió (mm/s)	40	
	Temperatura llit (°C)	40	
	Gruixos (mm)	0,4	0,6

En la part 1 s'han fet 5 rèpliques de la mateixa làmina amb les mateixes condicions, per tal de poder veure el mínim gruix imprimible per la màquina. En la part 2 s'ha fet que l'alçada de capa fos de 0,2 mm i el gruix de la peça múltiple, és a dir de 0,4 mm i 0,6 mm. A la Taula 17 es poden veure els paràmetres fixos de l'assaig previ 5. Com es pot veure a la primera part s'ha utilitzat un gruix de capa de 0,1 mm i a la part 2 de 0,2 mm, per tal que l'alçada de la capa fos un múltiple de l'alçada de la proveta.

Taula 17: Paràmetres fixos de l'assaig previ 5

Temperatura base (°C)	40
Alçada de capa (mm)	0,1 part 1 i 0,2 part 2
Temperatura taller (°C)	19
Ventilador (%)	100

3.2.5.3 Paràmetres estudiats i resultats

A continuació es pot veure a la Taula 18, el resum dels resultats del tercer assaig previ, en aquest cas s'ha estudiat el gruix i el gradient tèrmic. A l'annex A.5, a la Taula 67 es poden veure els resultats de l'assaig experimental 5.

Taula 18: Resum de resultats de l'assaig previ 5

		Gruix teòric (mm)	Temperatura extrusió (°C)	Velocitat impressió (mm/s)	Temperatura a base (°C)	Temps impressió (minuts)	Mitjana gruix (mm)	Diferència (%)			
PART 1	Assaig 5.1	0,15	160	40	40	32	0,267	0,117			
	Assaig 5.2					32	0,268	0,118			
	Assaig 5.3					32	0,280	0,130			
	Assaig 5.4					32	0,276	0,126			
	Assaig 5.5					32	0,262	0,112			
PART 2	Assaig 5.6	0,6				160	40	40	60	0,601	0,001
	Assaig 5.7	0,6							60	0,602	0,002
	Assaig 5.8								40	0,398	0,002
	Assaig 5.9	0,4							40	0,398	0,002

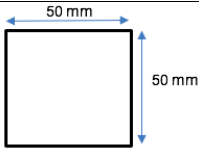
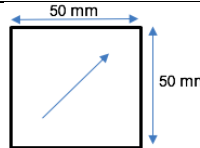
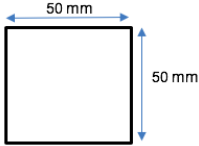
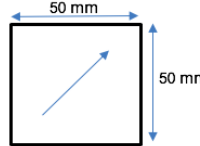
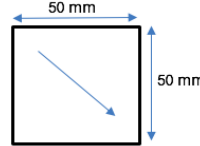
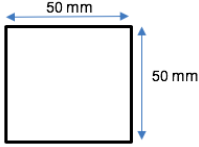
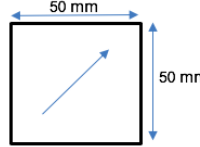
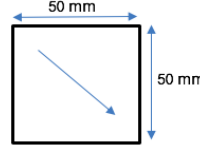
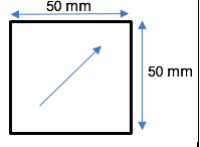
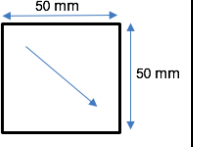
Si es miren les diferències en el gruix en la part 1, hi ha un error bastant considerable d'aproximadament 0,1 mm en totes les mesures. En ser un error tan gran es va analitzar el codi per veure com generava el "llescat". Es va veure que la primera capa sempre la fa de 0,27 mm fos quina fos el gruix de capa, gruix de proveta, o qualsevol altre tipus de paràmetre, i és per això que la majoria de mesures en la part 1 s'hi assimilen bastant.

```
G92 E0
M109 S195
G0 F15000 X9 Y6 Z2
G280
G1 F1500 E-6.5
;LAYER_COUNT:3
;LAYER:0
M107
M204 S625
M205 X6 Y6
;MESH:Object 1
G0 F4285.7 X146.425 Y129.018 Z0.27
M204 S500
M205 X5 Y5|
;TYPE:WALL-OUTER
```

Figura 29: Codi G de la primera capa de la proveta

Com es pot veure a la Figura 29, la primera capa la fa a 0,27 mm d'alçada, siguin quines siguin les condicions, fet que provoca un error. Si es mira com aplica el post processador per tal de generar les capes a la Taula 19, es pot veure el post processador sempre fa les capes tal a partir del gruix de capa indicat (0,1 mm), però respecte a la primera capa de 0,27, i mai genera l'última a l'alçada que li pertoca per generar el gruix desitjat. És per aquesta raó que els resultats difereixen tant de la consigna en la majoria d'assajos.

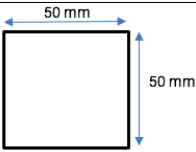
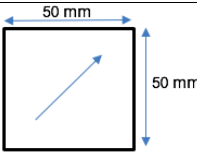
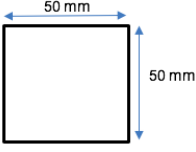
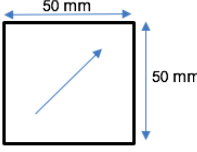
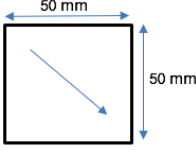
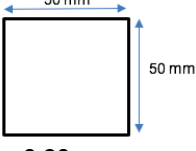
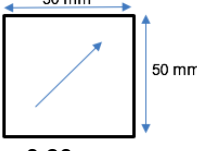
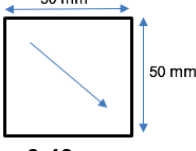
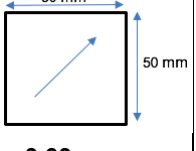
Taula 19: Capes generades pel post processador

Gruix Làmina (mm)	Contorn	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4
0,2	 0,27 mm	 0,27 mm			
0,4	 0,27 mm	 0,27 mm	 0,37 mm		
0,6	 0,27 mm	 0,27 mm	 0,37 mm	 0,47 mm	 0,57 mm

Per tant de cara a l'assaig experimental, es tindrà en compte a l'hora de mirar els errors respecte a l'alçada real generada pel codi i no la teòrica d'impressió. Per tal de comprovar-ho

s'ha fet la segona part de l'assaig amb aquesta nova proposta de gruix de capes modificant el codi, tal com es pot veure a la Taula 20, amb alçada de capa de 0,2.

Taula 20: Descripció de les capes modificades

Gruix Làmina (mm)	Contorn	Capa 1	Capa 2	Capa 3
0,2	 0,20 mm	 0,20 mm		
0,4	 0,20 mm	 0,20 mm	 0,40 mm	
0,6	 0,20 mm	 0,20 mm	 0,40 mm	 0,60 mm

Els resultats es poden veure a la part 2 de la Taula 18. Els errors han baixat molt considerablement i la precisió és molt bona, pràcticament de la mil·lèsima, amb les capes modificades a l'alçada descrita anteriorment, el resultat quadra amb el gruix imposat. No és que en l'altre cas, el resultat fos dolent, sinó que el programa generava unes capes que no quadraven amb les imposades i generava una capa final que no estava al gruix que realment havia de tenir la proveta.

3.2.5.4 Conclusions Cinquè assaig previ

S'establirà el gruix de capa a 0,1 mm per tal de treballar amb la màxima precisió de la impressora, es respectarà el codi que genera la màquina per tant les alçades seran de 0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm, ja que s'ha cregut que aquests 0,27 mm de capa inicial que genera el post processador, és per un tema de gruix inicial o d'adhesió al llit i calia respectar-lo. S'ha vist que el valor entrat al programa de gruix i el que realment genera el programa són diferents, i els paràmetres d'impressió i el material no afecten en la generació del codi per part del post processador, per tant no hi ha correcció per part del programa de l'alçada de capa segons material i condicions d'impressió. Havent obtingut els límits bàsics de funcionament i havent establert els requeriments experimentals, el pas que ve a continuació és establir el pla experimental i realitzar una sèrie de mesures dins d'aquests límits, per veure la variabilitat de les mesures a través d'un model estadístic.

3.3 Definició del pla experimental

En aquest apartat es defineix el pla experimental i els requeriments del pla experimental. La metodologia i requeriments d'impressió que se seguiran, són els establerts en els assajos de Mueller [23] que són els següents:

- Les provetes estan separades una certa distància entre elles i repartides al llot.
- Materials amb la mateixa data de caducitat i lot.
- Abans de cada impressió els capçals es netegen i la taula també.
- Es calibra la màquina abans de cada impressió.
- El suport es treu sense components químics, just acabat d'imprimir.
- Totes les provetes són guardades en les mateixes condicions.
- Les provetes són testades 24 hores després de ser impreses.
- Imprimir-ho tot amb la mateixa impressora.

3.3.1 Metodologia del pla experimental

El pla experimental constarà de 5 parts diferenciades, aquestes 5 parts es veuen representades a la Figura 30.

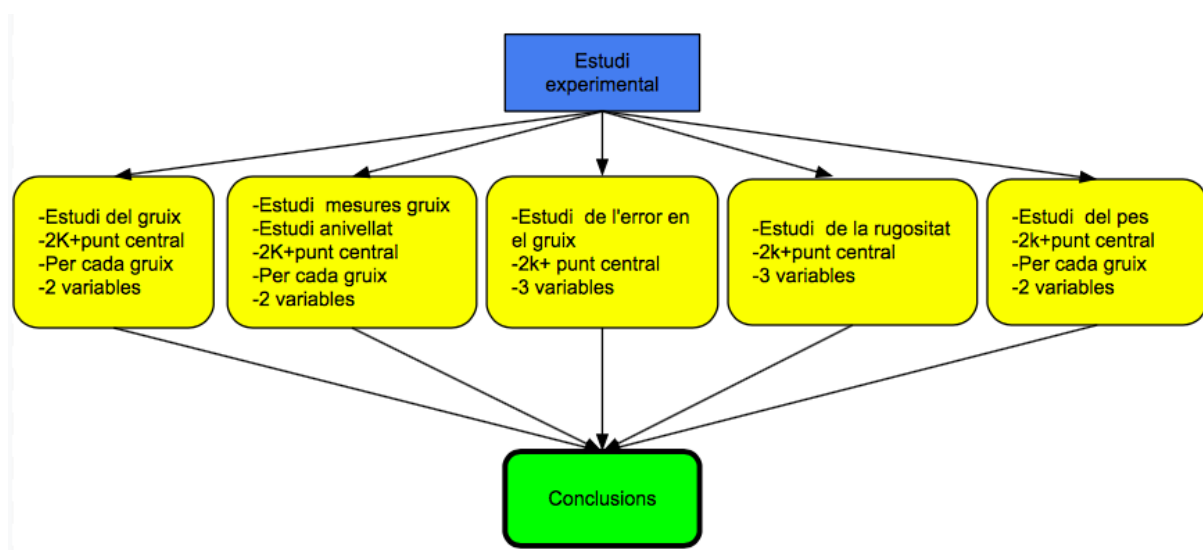


Figura 30: Esquema de les 5 parts del treball experimental

A continuació s'explicaran els nivells dels quals consta cada part experimental, i la metodologia d'estudi del model.

3.3.1.1 Nivells dels experiments

Els límits establerts de les condicions d'impressió per la PCL són els obtinguts amb els assajos previs, aquests límits es troben recollits a la Taula 6 de l'assaig previ 1. Els nivells de les 5 parts es troben delimitats per aquest valors.

Taula 21: Nivells d'impressió dels assajos 1, 2 i 5

Temperatura extrusió (°C)	130-190
Velocitat extrusió (mm/s)	20-60

Els paràmetres del procés pels assajos experimentals 1, 2 i 5 seran la temperatura d'extrusió i la velocitat d'extrusió, tal com es pot veure a la Taula 21, el que significa que seran els factors de disseny en els experiments, la resta de paràmetres es mantindran constants. En els assajos experimentals 3 i 4 el gruix de la proveta passarà a ser un paràmetre i en aquell cas hi haurà 3 variables tal com es veu a la Taula 22.

Taula 22: Nivells d'impressió dels assajos experimentals 3 i 4

Temperatura extrusió (°C)	130-190
Gruix (mm)	0,27 - 0,57
Velocitat extrusió (mm/s)	20-60

El disseny d'experiments es dividirà en 5 parts diferenciades. A la Taula 23 es mostren els paràmetres del disseny d'experiments per la part 1, 2 i 5, justificats i fixats a través dels 5 estudis previs experimentals (Apartat 3.2). Es farà per cada un dels gruixos, 0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm.

Taula 23: Disseny d'experiments

Paràmetre	Nivell 1	Punt central	Nivell 3
Temperatura extrusió (°C)	130	160	190
Velocitat d'impressió (mm/s)	20	40	60
Temperatura de la base (°C)	40		
Alçada de capa (mm)	0,1		
Ventilació (%)	100		
Temperatura del taller (°C)	20		
Nombre de provetes	4		

A la Taula 24 es mostra el disseny d'experiments per la part 3 i 4, justificats i fixats a través dels 5 estudis previs experimentals (Apartat 3.2). Tal com es pot veure, el gruix passa a ser un paràmetre.

Taula 24: Disseny d'experiments

Paràmetre	Nivell 1	Punt central	Nivell 3
Temperatura extrusió (°C)	130	160	190
Velocitat d'impressió (mm/s)	20	40	60
Gruix de la proveta (mm)	0,27	0,37	0,57
Temperatura de la base (°C)	40		
Alçada de capa (mm)	0,1		
Ventilació (%)	100		
Temperatura del taller (°C)	20		
Nombre de provetes	4		

Pels assajos 1, 2 i 5 s'obtidran 4 mostres en condicions idèntiques de cada un dels 5 punts, fent un total de 20 mostres. Com que hi ha 3 gruixos teòrics diferents (0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm) s'obtenen un total de 60 mostres. En aquest estudi, on es realitzarà un disseny d'experiments $2^k + \text{punt central}$, on K són els paràmetres del procés, que en aquest cas són la temperatura d'extrusió i la velocitat, resultant el nombre d'experiments en $2^2 + 1$, és a dir, 5. Amb aquesta metodologia experimental s'obté la capacitat de veure l'efecte de cada paràmetre del procés sobre la resposta, i també les possibles relacions que hi pugui haver entre elles. Tal com es pot veure a la Figura 31 s'estudia la velocitat de 20 mm/s i 60 mm/s i la temperatura d'extrusió de 130°C i 190 °C, a part s'afegeix un punt central, que correspon a una velocitat d'impressió de 40 mm/s i 160°C, resultats un disseny de $2^k + \text{punt central}$. L'adhesió d'aquest punt central a l'estudi permetrà veure si hi ha efecte quadràtic.

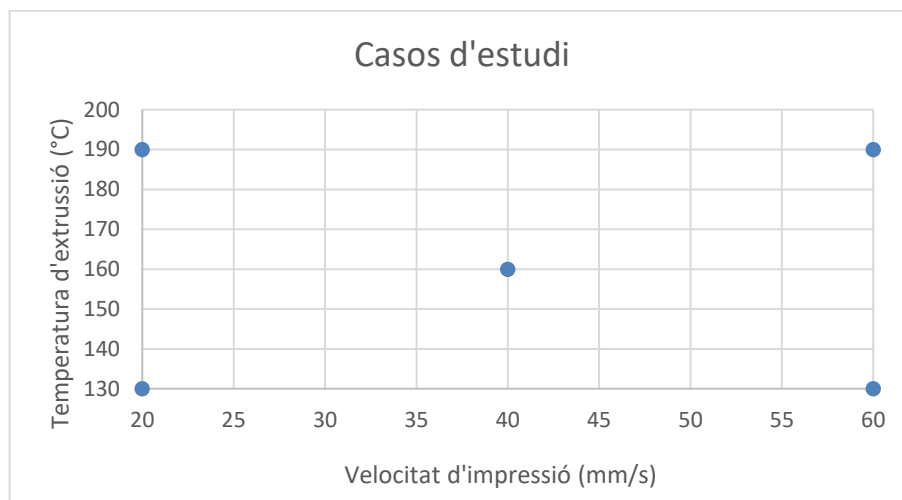


Figura 31: Representació gràfica de les mostres

Si es converteix el gràfic en una taula les combinacions, s'obté la Taula 25 on hi ha 5 combinacions possibles. Per a un bon anàlisi del disseny d'experiments cal denominar els valors dels paràmetres de velocitat d'extrusió i temperatura d'extrusió, segons nivell baix, nivell mitja i nivell alt.

Taula 25: Taula representativa del gràfic

N mostra	Velocitat (mm/s)	Temperatura (°C)
1	20	130
2	20	190
3	40	160
4	60	130
5	60	190

A la Taula 26 es poden veure els 3 nivells del disseny 2^k + punt central, on les possibles combinacions són (-1,-1), (-1,1), (1,-1), (1,1) i el punt central (0,0).

Taula 26: Disseny d'experiments 2^k +punt central

Paràmetre	Nivell Baix (-1)	Nivell mitjà (0)	Nivell alt (1)
Velocitat d'extrusió (mm/s)	20	40	60
Temperatura d'extrusió (°C)	130	160	190

Si es combina la Taula 25 i la Taula 26 s'obté la taula de disseny d'experiments finals de 2^k + punt central, representada a la Taula 27.

Taula 27: Taula final del disseny d'experiments 2^k +punt central

N mostra	Velocitat (mm/s)	Temperatura (°C)	Codi Velocitat	Codi Temperatura
1	20	130	-1	-1
2	20	190	-1	1
3	40	160	0	0
4	60	130	1	-1
5	60	190	1	1

Pel que fa als assajos 3 i 4, en passar a ser el gruix un paràmetre també es realitzarà un disseny d'experiments 2^k + punt central, en aquest cas els paràmetres són la temperatura d'extrusió, la velocitat i el gruix, resultant el nombre d'experiments en 2^3 , és a dir, $8+1=9$. Tal com es pot veure a la Taula 22 s'estudia la velocitat de 20 mm/s i 60 mm/s, la temperatura d'extrusió de 130°C i 190 °C, i gruix 0,27 i 0,57 establint el punt central en 40 mm/s 160°C i gruix 0,37 mm. Aquest punt entremig, si es tenen en compte els dos gruixos dels extrems, de 0,27 mm i 0,57 mm correspondria a 0,42 mm. Aquests 0,42 mm que correspon al punt central teòric, genera una discrepància respecte al valor experimental entremig que és de 0,37 mm.

Aquesta diferència entre els 2 valors ve donada ja que gruixos teòrics són 0,2 mm, 0,4 mm i 0,6 mm i els que realment generava la impressora són 0,27mm 0,37 mm i 0,57 mm i el punt de 0,37 mm no coincideix amb el punt central entre els dos gruixos reals experimentals. El que s'ha fet és assumir com a gruix central 0,37 mm tot i no ser el punt central real experimental. Aquesta consideració s'ha pogut fer, ja que com que en aquesta tercera part s'estudia l'error respecte al valor experimental imprès, s'ha assumit que no hi hauria massa variació entre el 0,42 mm i el 0,37 mm, respecte al valor teòric imprès, és a dir, la diferència que hi pugui haver entre 0,42 mm - valor real imprès i 0,37 mm - valor real imprès s'ha considerat com a assumible, tot i que caldrà tenir en compte que si el punt central s'estableix com a un mínim o màxim, aquest podria estar o més per sota o per sobre si es considerés el punt central real de 0,42 mm.

Els assajos experimentals 3 i 4 generen les següents combinacions, recopilades a la Taula 28.

Taula 28: Combinacions dels assajos de 3 nivells

N mostra	Velocitat (mm/s)	Temperatura (°C)	Gruix (mm)
1	20	190	0,27
2	20	190	0,57
3	20	130	0,27
4	20	130	0,57
5	40	160	0,37
6	60	190	0,27
7	60	190	0,57
8	60	130	0,27
9	60	130	0,57

A la Taula 29 es poden veure els 3 nivells del disseny 2^k +punt central, on les possibles combinacions són (-1,-1,-1), (-1,1,1), (1,-1,1), (1,1,1) i el punt central (0,0,0)

Taula 29: Disseny d'experiments 2^k +punt central

Paràmetre	Nivell Baix (-1)	Nivell mitjà (0)	Nivell alt (1)
Velocitat d'extrusió (mm/s)	20	40	60
Temperatura d'extrusió (°C)	130	160	190
Gruix (mm)	0,27	0,37	0,57

Si es combina la Taula 28 i la Taula 29 s'obté la taula de disseny d'experiments finals de 2^k + punt central, representada a la Taula 30.

Taula 30: Taula final del disseny d'experiments 2^k +punt central

N mostra	Velocitat (mm/s)	Temperatura (°C)	Gruix (mm)	Codi Velocitat	Codi Temperatura	Codi Gruix
1	20	190	0,27	-1	1	-1
2	20	190	0,57	-1	1	1
3	20	130	0,27	-1	-1	-1
4	20	130	0,57	-1	-1	1
5	40	160	0,37	0	0	0
6	60	190	0,27	1	1	-1
7	60	190	0,57	1	1	1
8	60	130	0,27	1	-1	-1
9	60	130	0,57	1	-1	1

La metodologia d'estudi del model que se seguirà per cada un dels experiments és la de la següent:

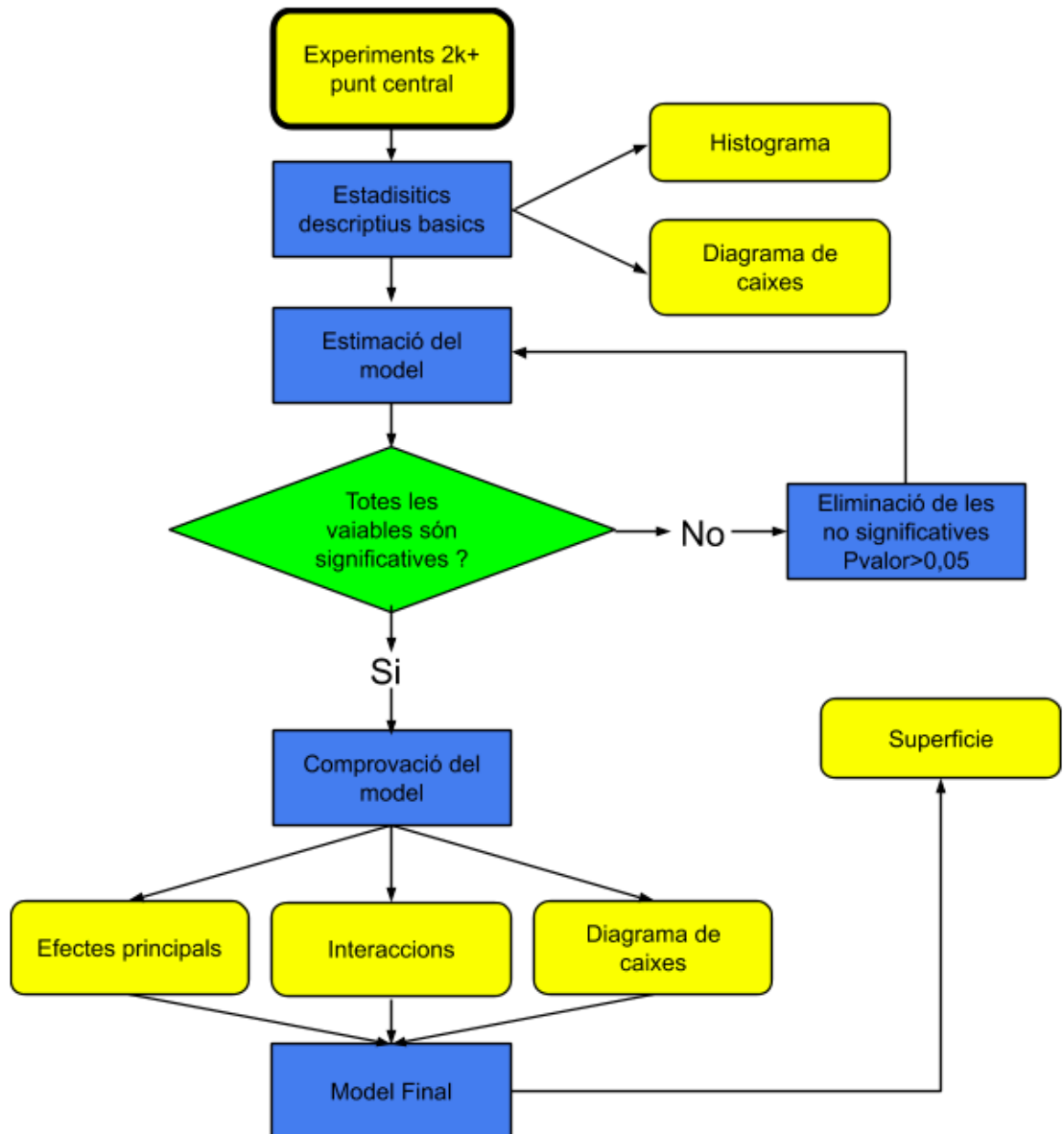


Figura 32: Metodologia d'estudi estadístic de les dades

La Figura 32 mostra l'esquema que s'ha seguit per l'estudi de les dades del model estadístic per a cada una de les 5 parts que conformen l'estudi. Tal com es pot veure a la Figura 32 els experiments s'iniciaran definint el model 2k amb punt central, que en alguns casos serà amb 2 variables i els altres amb 3, a continuació es farà un estudi bàsic dels elements estadístics descriptius de les dades, s'exclouran les variables no significatives en els casos que es cregui convenient, i a través d'un model factorial es generaran una sèrie de diagrames descriptius per definir la tendència de les dades i finalment obtenir el model que ho defineix. Es completarà amb el model de la seva superfície. Aquesta metodologia s'aplicarà a les 5 parts en les que s'ha dividit el treball experimental. A continuació es representen els resultats de les 5 parts, i a l'annex B, els resultats complets.

3.3.2 Resultats

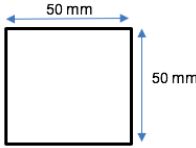
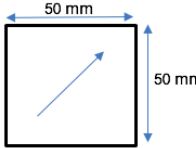
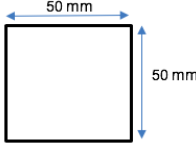
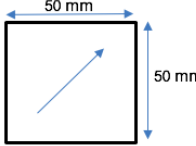
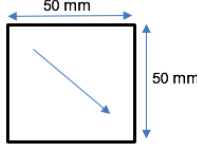
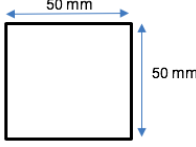
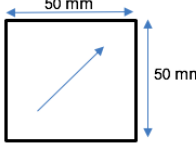
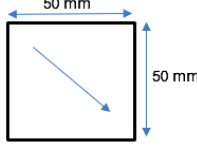
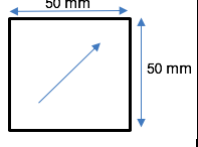
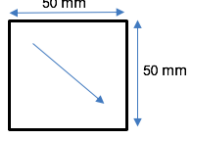
En aquest subapartat dins del treball experimental, s'expliquen els resultats obtinguts en el treball experimental, amb la metodologia experimental esmentada en l'apartat 3.3.1. S'analitzen les característiques d'impressió reals de les provetes i els resultats estudiats segons el gruix, la rugositat i el pes.

3.3.2.1 Característiques reals d'impressió de la proveta.

Havent estudiat en l'assaig previ 5 el codi d'impressió, s'ha corroborat que la consigna que és introduïda al programa en forma de gruix de capa, i la de la dimensió final del gruix de la proveta no són coincidents, a causa d'algun error de postprocessat que genera el programari Ultimaker Cura.

Tal com es veu al punt 3.2.5.3, sigui quin sigui el gruix imprès de la proveta, la primera capa, que és la que està en contacte amb la base, és de 0,27 mm en la totalitat de casos, no hi ha un mínim que pugui ser introduït al programari directament. El postprocessador genera les capes sumant el gruix de capa a sobre aquests 0,27 mm. A la Taula 31 s'hi pot veure el "llescat" o generació de capes que fa el programari a partir d'entrar les provetes de 0,2 mm, 0,4 mm o 0,6 mm, amb un gruix de capa de 0,1 mm. Tal com es veu hi ha un error considerable, en tots els casos, amb el gruix de 0,2 mm un error de +0,07 mm, amb el gruix de 0,4 i 0,6 mm un error de -0,03 mm.

Taula 31: Gruixos reals de les provetes

Gruix Làmina (mm)	Contorn	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4
0,2	 0,27 mm	 0,27 mm			
0,4	 0,27 mm	 0,27 mm	 0,37 mm		
0,6	 0,27 mm	 0,27 mm	 0,37 mm	 0,47 mm	 0,57 mm

Dit això, a l'hora de mesurar la precisió de la impressora, es compararan els valors de gruixos mesurats de les provetes amb els valors generals pel codi, és a dir 0,27 mm en el cas de la proveta de gruix teòric 0,2 mm, 0,37 mm en el cas de la proveta de gruix teòric 0,4 mm i 0,57 mm pel cas de 0,6 mm de gruix. Es mantindran els gruixos generats pel post processador a causa que es vol mantenir les condicions generades pel fabricant, per no alterar el "llescat" proposat, ja que podria ser que aquesta capa inicial de 0,27 mm, es generés per qüestions d'adhesió al llit o de precisió dimensional. El que cal tenir present, és que a l'hora de calcular la desviació respecte al valor imprès, caldrà fer-ho respecte als gruixos de 0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm, ja que serà el valor real de la consigna generada pel programari.

Cal recalcular doncs els pesos teòrics per tal de comparar-los amb les provetes extrudides, ja que segons l'apartat 3.1 es van calcular els pesos a partir dels gruixos de 0,2 mm, 0,4 mm i 0,6 mm. Seguin les mateixes consideracions de càlcul de l'apartat 3.1, s'obtenen els pesos de les provetes. Sabent que la densitat de la PCL utilitzada és de $1146,49 \frac{Kg}{m^3}$, segons el càlcul de l'apartat 3.1, s'obté la Taula 32.

Taula 32: Càlcul teòric dels pesos amb el gruix corregit

Gruix (mm)	Volum teòric (mm³)	Pes teòric gruix corregit (g)	Pes teòric gruixos desitjats (g)	Diferència (g)
0,27	675	0,77	0,57	0,2
0,37	925	1,06	1,14	0,08
0,57	1425	1,63	1,71	0,08

Com es pot veure a la Taula 32, hi ha una petita diferència en el pes, entre el gruix teòric desitjat (0,2 mm, 0,4 mm i 0,6 mm) i el que va fer generar el programa (0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm), és per aquesta raó que a l'hora de comparar els pesos caldrà fer-ho respecte als corregits i també caldrà fer el mateix amb els gruixos.

3.3.2.2 Resultats dels assajos experimentals

- **Part 1**

En la part 1 s'ha fet l'anàlisi dels 3 gruixos per separat, per tal de veure la influència dels paràmetres de procés en cada un dels gruixos. Consisteix en un estudi 2^k+punt central, pels gruixos de 0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm. No s'han exclòs els paràmetres del procés no significatius, ja que això es farà pel model final (Part 3). El resultat estudiat, també anomenat resposta, ha estat el gruix de la peça final. Per la correcta visualització i comparació dels resultats s'han comparat els 3 gruixos, a la Taula 33 es poden veure els nivells de l'estudi.

Taula 33: Nivells de l'estudi

Paràmetre	Nivell 1	Punt central	Nivell 2
Temperatura extrusió (°C)	130	160	190
Velocitat d'impressió (mm/s)	20	40	60

En comparar els estadístics bàsics descriptius, es pot veure a la Taula 34 que a mesura que s'augmenta el gruix, la desviació estàndard augmenta. Pel que fa a les mitjanes, el de gruix 0,27 mm és el que té la mitjana més propera i l'histograma més centrat tal com es pot veure a la Figura 33. A la Figura 75 i a la Figura 79 de l'annex B es poden veure els histogrames dels altres dos gruixos.

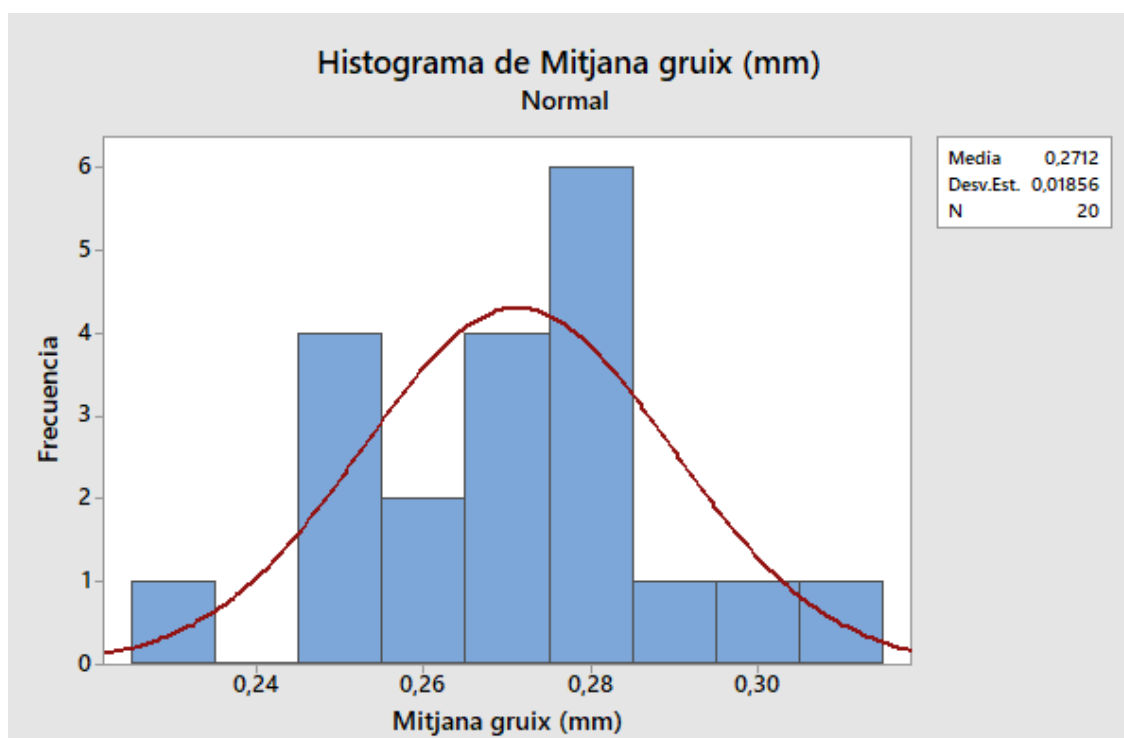


Figura 33: Histograma pel gruix de 0,27 mm

Taula 34: Estadístics descriptius de la part 1

Gruix (mm)	Nº mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
0,27	20	0,27121	0,00415	0,01856	0,2733
0,37	20	0,38482	0,00457	0,02042	0,3865
0,57	20	0,58699	0,00706	0,03158	0,5958

Si es comparen a continuació els valors factorials, es pot veure a la Taula 35 que hi ha una certa variació de paràmetres significatius en els 3 gruixos, tot i que les tendències són bastant semblants. Com es pot veure la temperatura és significativa en els 3 casos i la combinació dels 2 no és significativa en cap d'ells.

Taula 35: Variables significatives per cada gruix

Gruix (mm)	Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
0,27	Temperatura extrusió (°C)	0,00186	17,17	0,001	Si
	Velocitat extrusió (mm/s)	0,00240	22,09	0,000	SI
	Temp extrusió* Vel extrusió	0,00019	1,83	0,061	NO
0,37	Temperatura extrusió (°C)	0,00156	5,19	0,038	Si
	Velocitat extrusió (mm/s)	0,00004	0,14	0,713	NO
	Temp extrusió* Vel extrusió	0,00000	0,01	0,923	NO
0,57	Temperatura extrusió (°C)	0,00098	6,74	0,000	Si
	Velocitat extrusió (mm/s)	0,01383	95,4	0,02	SI
	Temp extrusió* Vel extrusió	0,00031	2,16	0,923	NO

La tendència que segueixen els efectes principals es força semblant pels 3 gruixos, igual que els diagrames de caixes. A la Figura 34, es pot veure el diagrama d'efectes principals pel gruix de 0,27 mm i la tendència clara que segueix, a més temperatura més gruix i a més velocitat menys gruix. Per a tots els gruixos es replica aquesta tendència, tal com es pot veure a la Figura 72, Figura 76 i Figura 80 de l'annex.

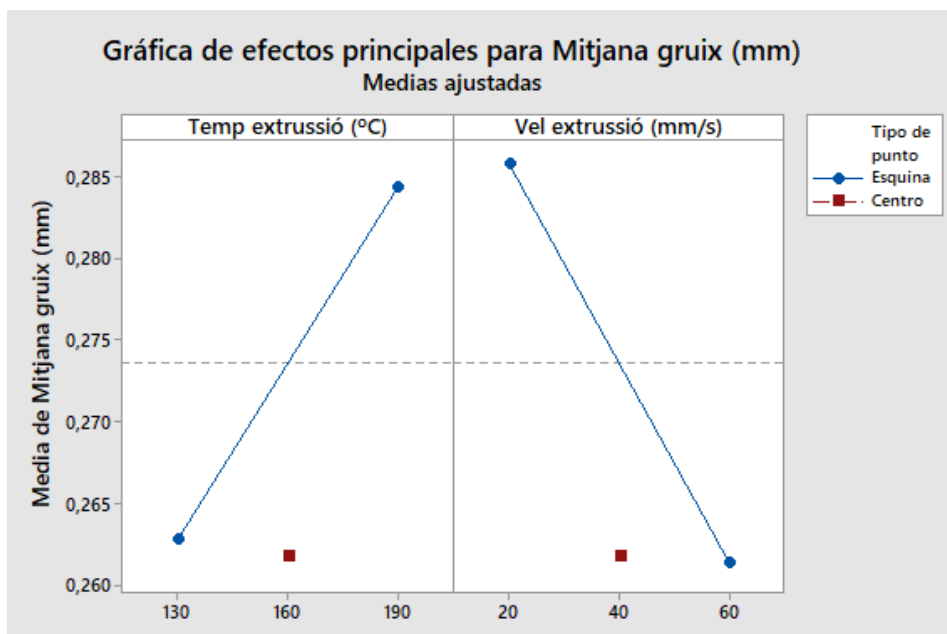


Figura 34: Efectes principals per a gruix de 0,27 mm

Si es comparen els diagrames de caixes, es pot veure que tots els gruixos segueixen una tendència bastant semblant, tal com es pot veure a la Figura 73, Figura 77 i Figura 81 de l'annex. Si ara es compara l'ajustament quadràtic del model per a cada un dels gruixos, es pot veure el que el gruix de 0,57 mm és el que s'ajustaria més al seu model, i el de 0,37 mm el que menys.

Taula 36: Ajustament quadràtic dels 3 gruixos

Gruix (mm)	S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,27	0,01042	75,08%	68,44%	55,71%
0,37	0,01733	43,10%	27,92%	0%
0,57	0,01205	88,5%	85,43%	79,55%

Pel que fa a les interaccions es pot veure que la tendència dels 3 gruixos menys el de 0,37 mm són bastant semblants, a la Figura 35 es poden veure les interaccions pel gruix de 0,27 mm i a la Figura 78 i Figura 82 de l'annex es poden veure les gràfiques pels altres 2 gruixos.

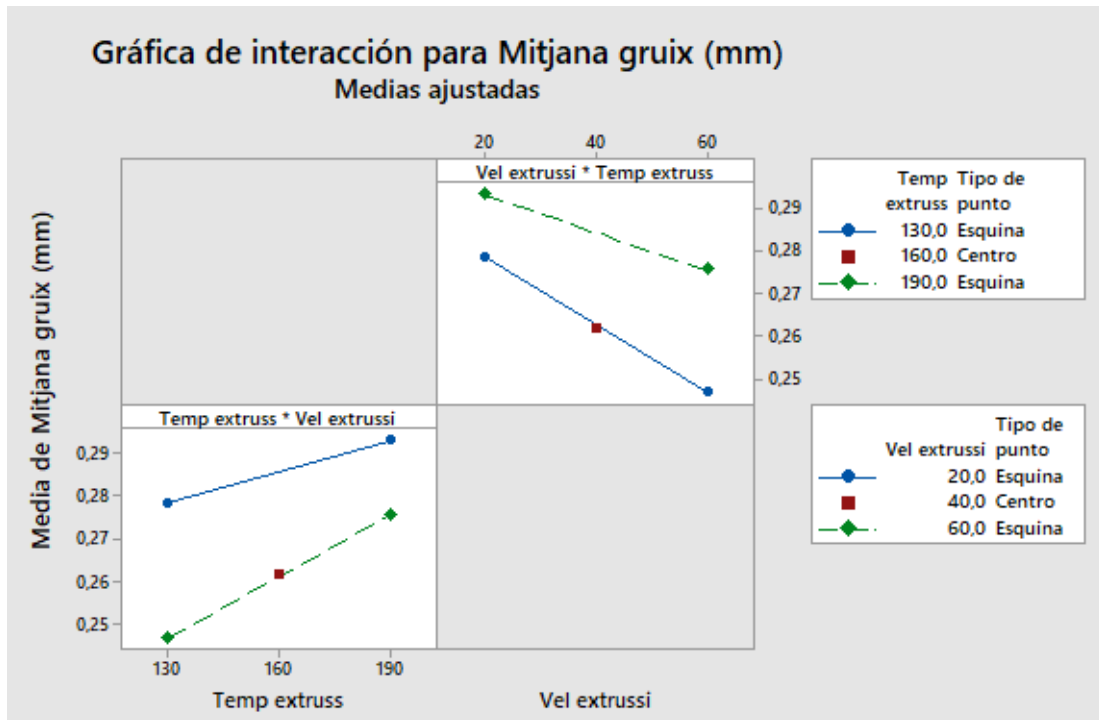


Figura 35: Interaccions per a gruix de 0,27 mm

Com es pot veure a la Figura 35 del gràfic d'interaccions pel gruix de 0,27 mm, el gruix central no és cap mínim. En cap dels 3 gruixos, les interaccions són significatives segons el P valor.

Havent vist els diagrames de la part 1 es pot afirmar que els paràmetres significatius dels models dels 3 gruixos són la temperatura i la velocitat, menys en el cas del gruix central on la velocitat no és significativa, això queda visualitzat amb els valors de la Taula 35. La tendència de la velocitat és que a l'augmentar, el gruix disminueix, i pel que fa a la temperatura a l'augmentar el gruix augmenta. A la Taula 34 de paràmetres bàsics es pot veure que a mesura que s'augmenta el gruix, l'error estàndard de la mitjana i la desviació tendeix a augmentar, a causa de l'acumulació de capes. Per tant aparentment si es vol ser acurat amb el gruix, sense considerar-lo com a un paràmetre, cal treballar amb el mínim nombre de capes possibles.

- **Part 2**

A la segona part s'ha estudiat la influència del possible desnivellament de la taula a través de les mesures dels gruixos als 5 punts diferents de la peça. Aquest estudi s'ha fet sobre els nivells recollits a la Taula 37 i per cada un dels gruixos per separat, tot i que la representació de resultats serà de manera conjunta, per tal de comparar-los.

Taula 37: Nivells d'estudi de la part 2

<i>Paràmetre</i>	Nivell 1	Punt central	Nivell 2
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	130	160	190
<i>Velocitat d'impressió (mm/s)</i>	20	40	60

A la Figura 36 es poden veure els 5 punts de mesura G1, G2, G3, G4, G5.

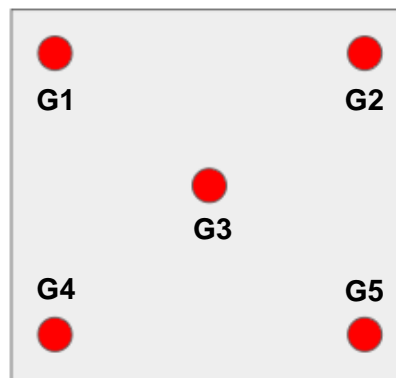


Figura 36: Punts de mesura

S'ha fet per cada gruix una anàlisi ANOVA d'un sol factor per G1,G2,G3,G4,G5 i s'ha comprovat si el posicionat de les mesures es significatiu. A la Taula 38 es pot veure l'anàlisi ANOVA per a cadascun dels 3 gruixos, amb el factor d'estudi la posició de mesura.

Taula 38: Anàlisi ANOVA per a cada gruix

<i>Gruix (mm)</i>	SC Ajustada	Valor F	P valor
0,27	0,001779	0,74	0,565
0,37	0,001427	0,55	0,696
0,57	0,01282	1,94	0,112

Com es pot veure a la Taula 38 en cap dels 3 gruixos la zona de mesura és significativa, fet que indica en primer lloc que la taula està completament anivellada al lloc on s'han imprès les provetes, i en segon lloc que no hi ha cap mena de malformació important dins la peça que hagi afectat la mesura del gruix en un cert punt de la proveta.

Si es comparen els histogrames dels 3 gruixos, a la Figura 83, Figura 84 i Figura 85 de l'annex, es veu que els 3 es troben bastant centrats i les desviacions estàndard són de l'ordre de la centèsima en els 3 casos. El gruix central de 0,37 mm és el que aparentment es veu més centrat però no té la desviació estàndard més baixa, que correspon a la de gruix 0,27 mm. A la Figura 37 es pot veure l'histograma pel gruix de 0,37 mm, clarament centrat.

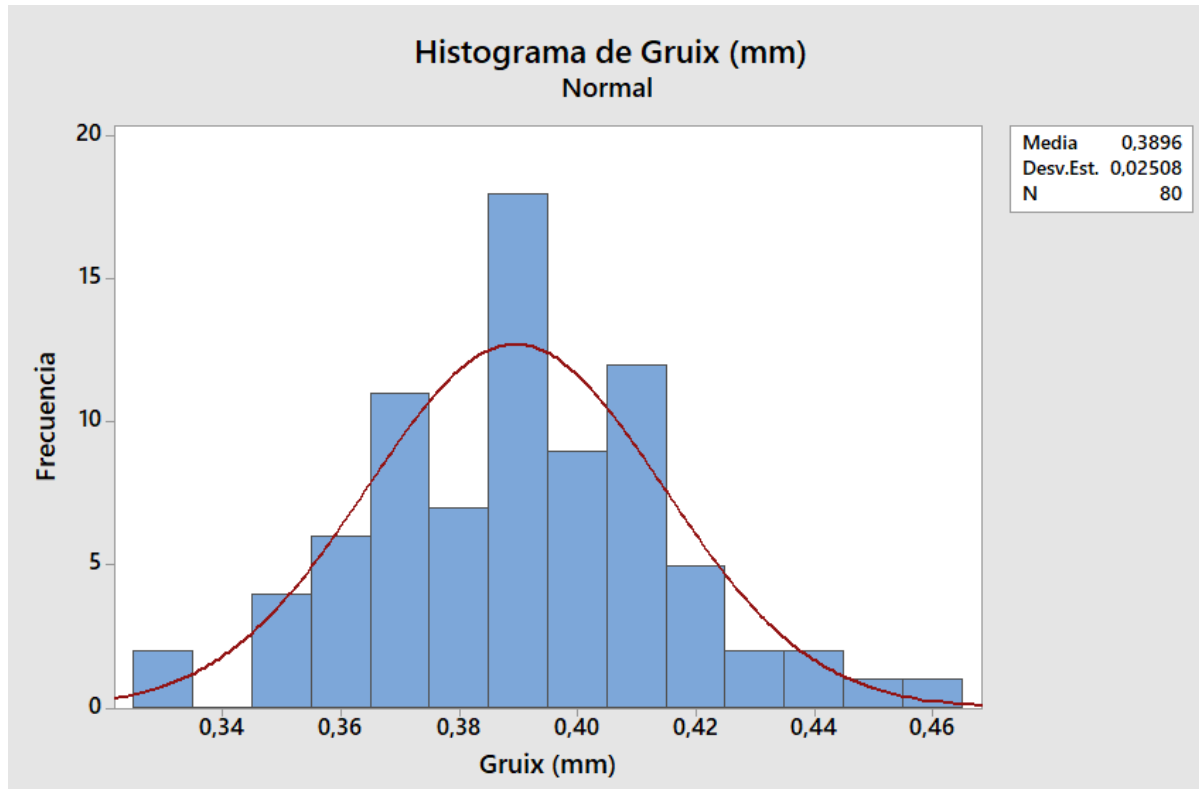


Figura 37: Histograma per a gruix de 0,37 mm

Per últim, analitzant el diagrama de caixes, es pot veure que en els 3 casos apareix algun valor fora de les caixes, ja que es troba molt fora de la mitjana. Això és a causa que en aquell punt de mesura per aquell gruix hi havia una certa imperfecció, que més endavant es veurà que també ha succeït en la mesura de la rugositat. A la Figura 86, Figura 87 i a la Figura 88 de l'annex es pot veure que no hi ha cap tendència clara de cap gruix a comportar-se de manera molt diferenciada de les altres, tal com ha indicat el test ANOVA representat a la Taula 38

Si s'observen els diagrames de caixes complets amb els paràmetres velocitat i temperatura es pot veure a la Figura 89, Figura 90 i a la Figura 91 de l'annex que succeeix el mateix, el patró es repeteix per a cada gruix, i no hi ha diferències significatives. Si es mira per exemple la de gruix 0,27 tal com es veu a la Figura 38, el mateix patró es va repetint per cada zona de mesura i no hi ha una diferència significativa entre elles, per tant es pot concloure que no hi ha efecte del punt de mesura ni anivellat de la taula.

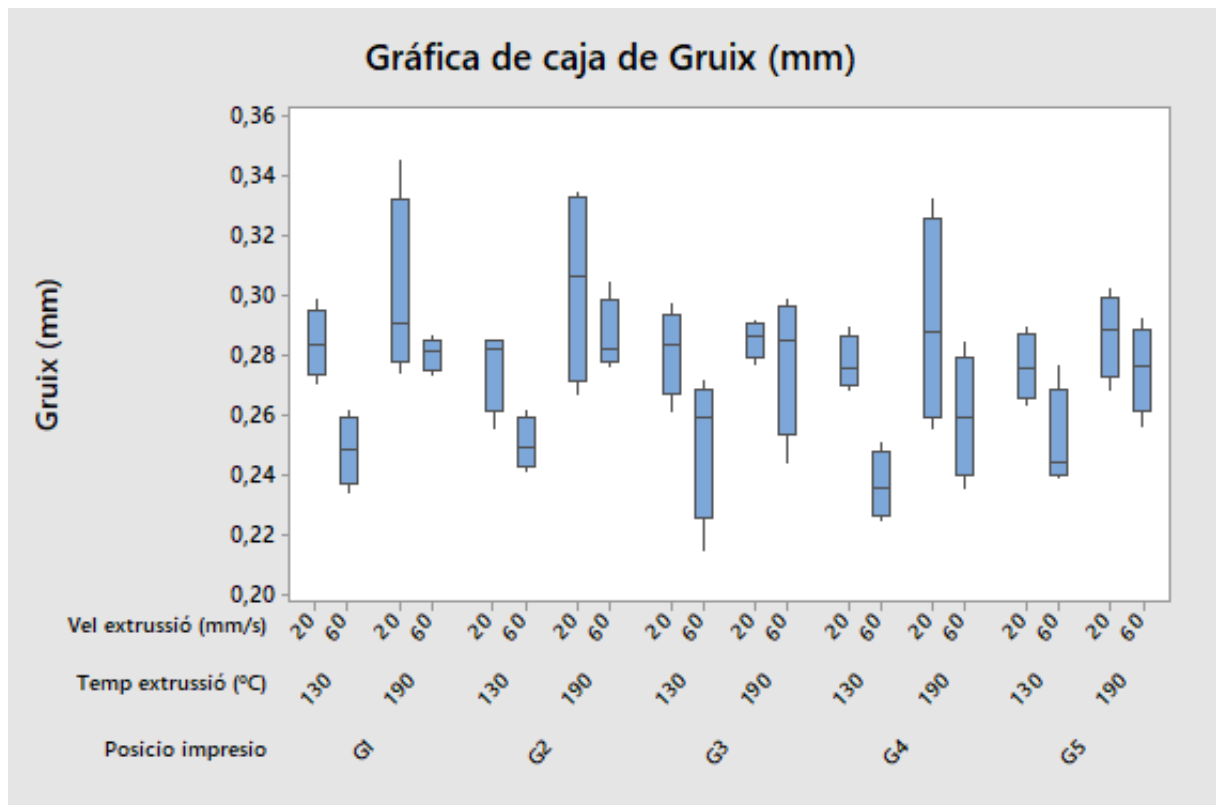


Figura 38: Diagrama de caixes complet per a gruix de 0,27 mm

Segons els resultats obtinguts en aquesta segona part es pot concloure que no hi ha cap mena d'afectació del munt de mesura sobre els resultats del gruix, tal com indiquen els valors de la Taula 38, i per tant també es pot afirmar que la taula es trobava completament anivellada en les zones on es va triar per imprimir les provetes. El diagrama de caixes de la Figura 38 indica que el mateix patró es repeteix per a cada punt de mesura, i no hi ha cap variació de tendència de mesures entre els 5 punts.

- **Part 3**

La part 1 i 2 formen part de l'estudi inicial, la part 3 consisteix en una depuració de l'estudi a través de la generació d'un model 2^k amb punt central, amb 3 variables d'estudi: El gruix teòric de la peça, la velocitat i la temperatura. En aquesta part no s'estudia cada gruix per separat, ja que el gruix passa a ser un paràmetre. L'objectiu és fer un model per predir la desviació, i aquí si s'eliminen els paràmetres no significatius. S'entén per desviació, la diferència o error que hi ha entre cada gruix experimental mesurat i el valor teòric del gruix generat pel post processador, és a dir, la resta entre els gruixos impresos mesurats i els corresponents 0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm. S'estudia la influència d'aquests 3 paràmetres sobre la desviació del gruix, resumits en els 3 nivells representats a la Taula 39.

Taula 39: Nivells d'estudi de la part 3

<i>Paràmetre</i>	Nivell 1	Punt entremig	Nivell 2
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	130	160	190
<i>Velocitat d'impressió (mm/s)</i>	20	40	60
<i>Gruix (mm)</i>	0,27	0,37	0,57

Tal com es veu a la Taula 39 en aquesta tercera part hi ha 3 nivells, la temperatura, el gruix i la velocitat, i s'estudia amb un punt entremig. Aquest punt entremig, tenint en compte els dos gruixos dels extrems, de 0,27 mm i 0,57 mm correspondria a 0,42 mm. Aquests 0,42 mm que correspon al punt central teòric, genera una discrepància respecte al valor experimental entremig que és de 0,37 mm. A l'apartat 3.3.1.1 s'explica com s'ha assumit aquests 0,37 mm com a valor entremig i les consideracions que caldrà tenir en compte per a la interpretació dels resultats.

Al primer anàlisi bàsic de les dades, es pot veure que la desviació estàndard de la mitjana de totes les mostres de l'ordre de la centèsima, com es pot veure a la Taula 40.

Taula 40: Estadístics descriptius de la diferència del gruix

<i>Variable</i>	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
<i>Diferència gruix imprès (mm)</i>	36	0,0066	0,00439	0,02635	0,0039

Per tenir una visió global de la tendència de les dades, es presenta el diagrama de caixes de la Figura 39.

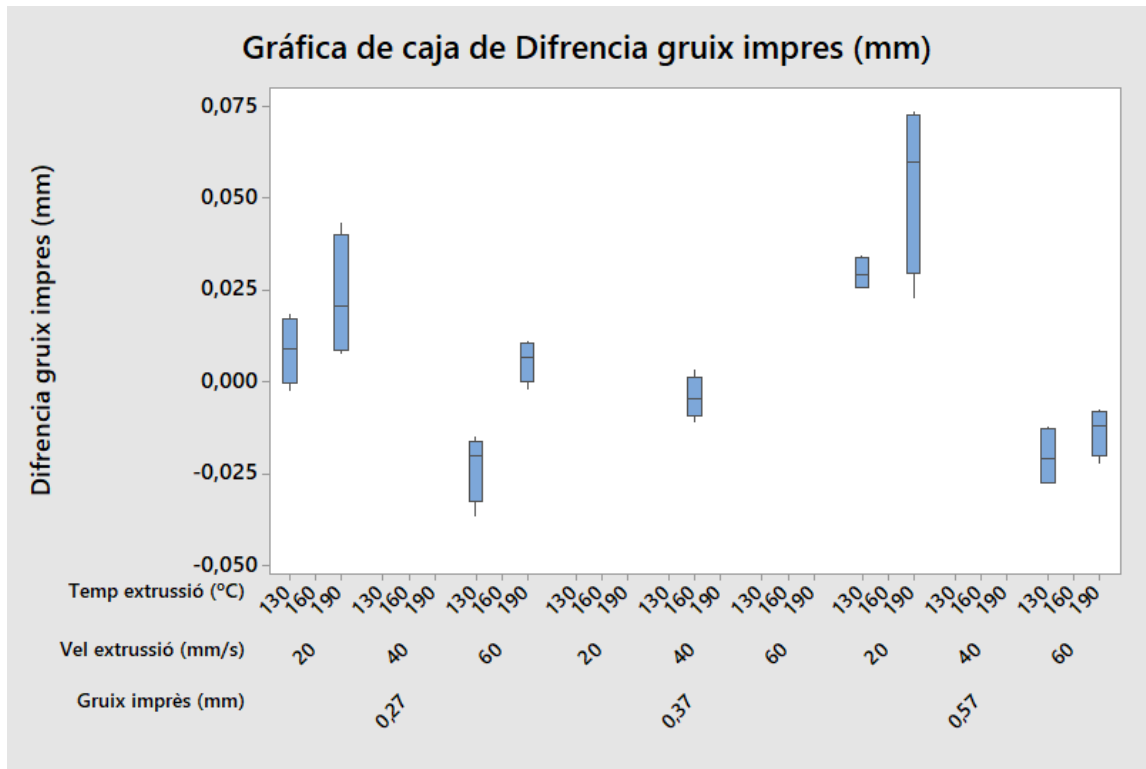


Figura 39: Diagrama de caixes de la diferència del gruix

Com es pot veure a la Figura 39, aparentment a més velocitat les mesures tendeixen a tenir un error negatiu, és a dir, a ser més petites que la mesura desitjada i a més temperatura a tenir un error positiu, és a dir, a ser més gruixudes que el valor desitjat. El punt central aparenta tenir l'error més baix de tots.

Si es mira l'estudi factorial del model, a la Taula 41 es poden veure quins valors són significatius.

Taula 41: Valors del model per a la part 3

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,00277	6,16	0,000	SI
Velocitat extrusió (mm/s)	0,01387	105,61	0,000	SI
Gruix Imprès (mm)	0,00063	4,80	0,037	SI
Vel extrusió*Temp extrusió	0,000006	0,05	0,826	NO
Vel extrusió* Gruix imprès	0,002353	17,91	0,000	SI
Temp extrusió*Gruix imprès	0,000071	0,54	0,469	NO
Vel*Temp*Gruix	0,000506	3,85	0,06	NO

Un cop extrets els valors no significatius s'obté la Taula 42 de valors actualitzada.

Taula 42: Valors del model per la part 3 significatius

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,002775	20,15	0,000	SI
Velocitat extrusió (mm/s)	0,013878	100,79	0,000	SI
Gruix Imprès (mm)	0,000630	4,58	0,041	SI
Vel extrusió* Gruix imprès	0,002353	17,09	0,000	SI

Aquests valors fan que el model tingui el següent ajustament quadràtic, representat a la Taula 43. Com es pot veure les dades s'ajusten bastant al model, tal com indica l'alt valor que té l'ajustament.

Taula 43: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0117344	83%	80,17%	75,97%

I finalment l'equació que defineix el model és la següent:

$$Diferència\ gruix = -0,0604 + 0,000159 * Vel\ extrusió \left(\frac{mm}{s}\right) + 0,000310 * Temp\ extrusió\ (^{\circ}C) + 0,1439$$

$$* gruix\ (mm) - 0,002858 * gruix\ (mm) * Vel\ extrusió \left(\frac{mm}{s}\right) - 0,01073 * Punt\ central$$

A continuació es mostren els diagrames del nou model, amb els elements significatius. Com es pot veure a la Figura 40, al diagrama d'efectes principals, només en el cas del gruix, el punt central s'estableix com a un mínim en la tendència. Es veu clarament que la velocitat és el que té el pendent més pronunciat i es veu que a mesura que augmenta, l'error disminueix. El punt central queda bastant sobreposat sobre la línia d'error 0, és a dir, la millor que podria ser. Pel que fa al diagrama d'interaccions, tal com es veu a la Figura 41 les interaccions entre velocitat i gruix indiquen que hi ha una certa interacció, degut a que no són paral·leles.

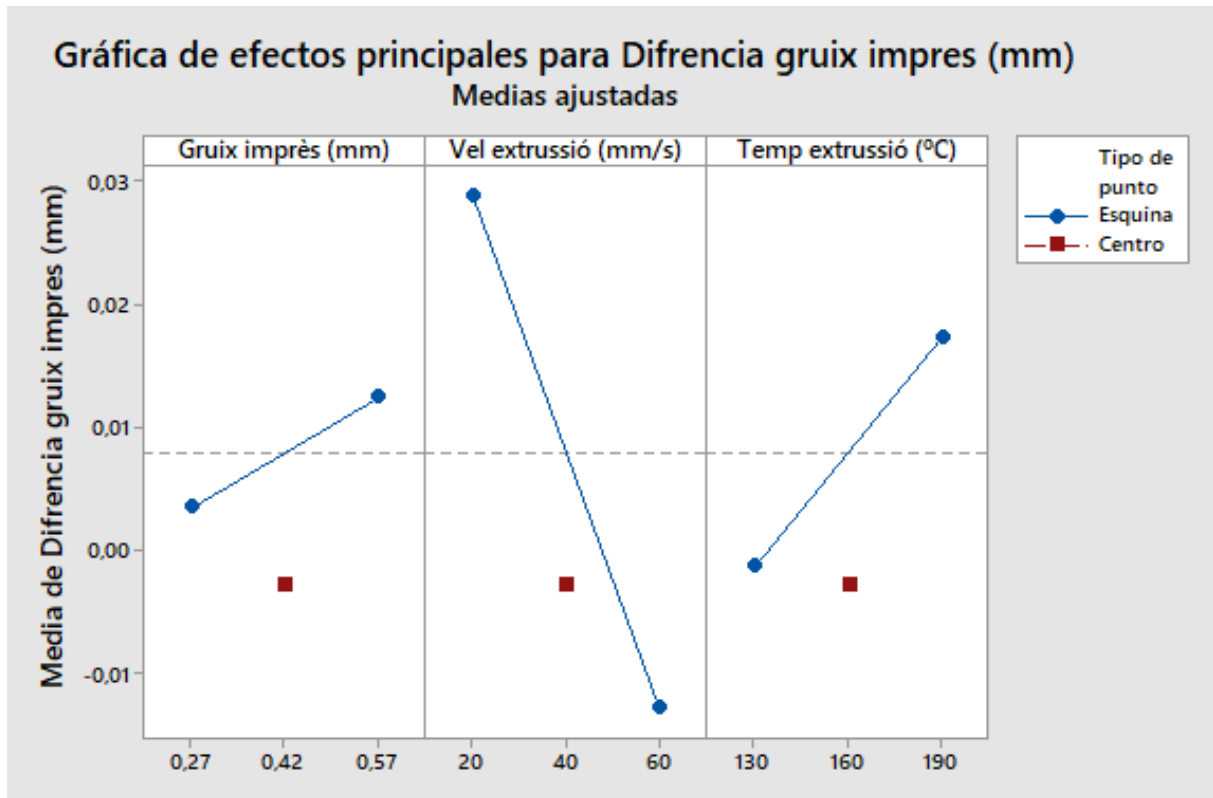


Figura 40: Efectes principals del model

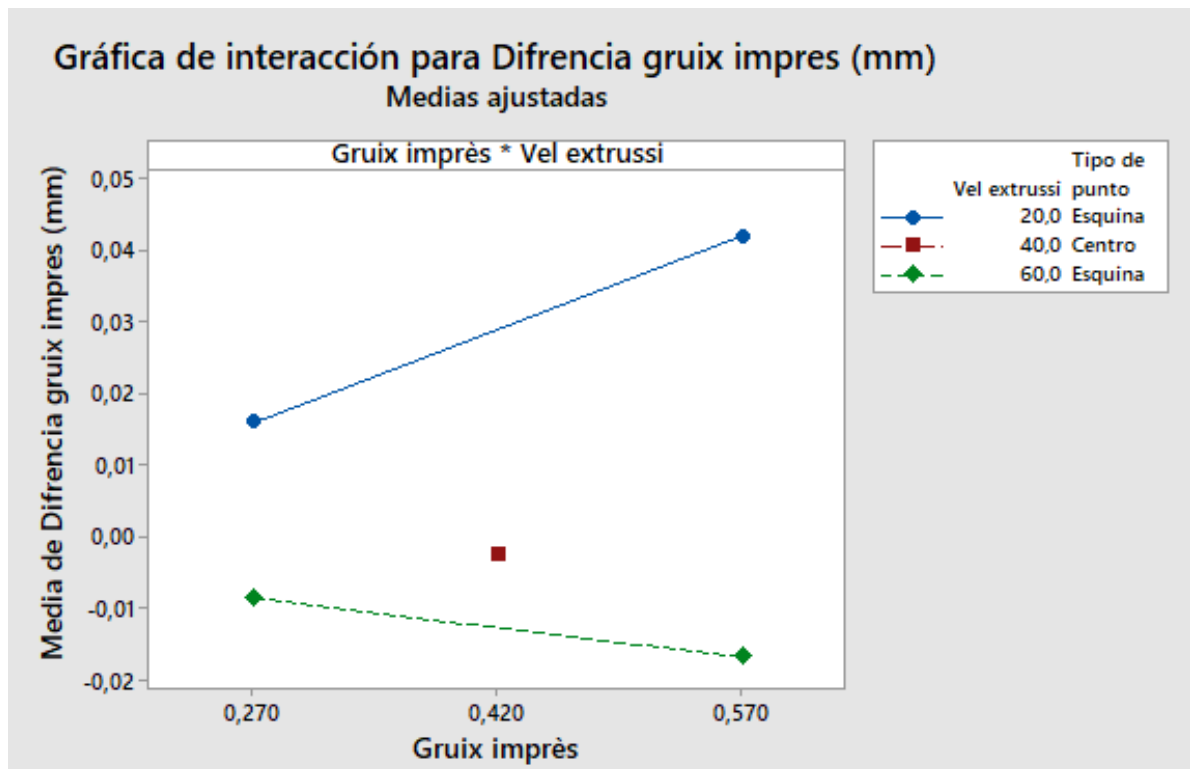


Figura 41: Interacció entre la velocitat i el gruix

A la Figura 42 es veu el diagrama de cub, amb el punt central. Com es veu, el punt central correspon pràcticament al punt amb l'error més baix. Tot i que la combinació de 60 mm/s, gruix 0,27 mm i 190°C seria la combinació amb menys error.

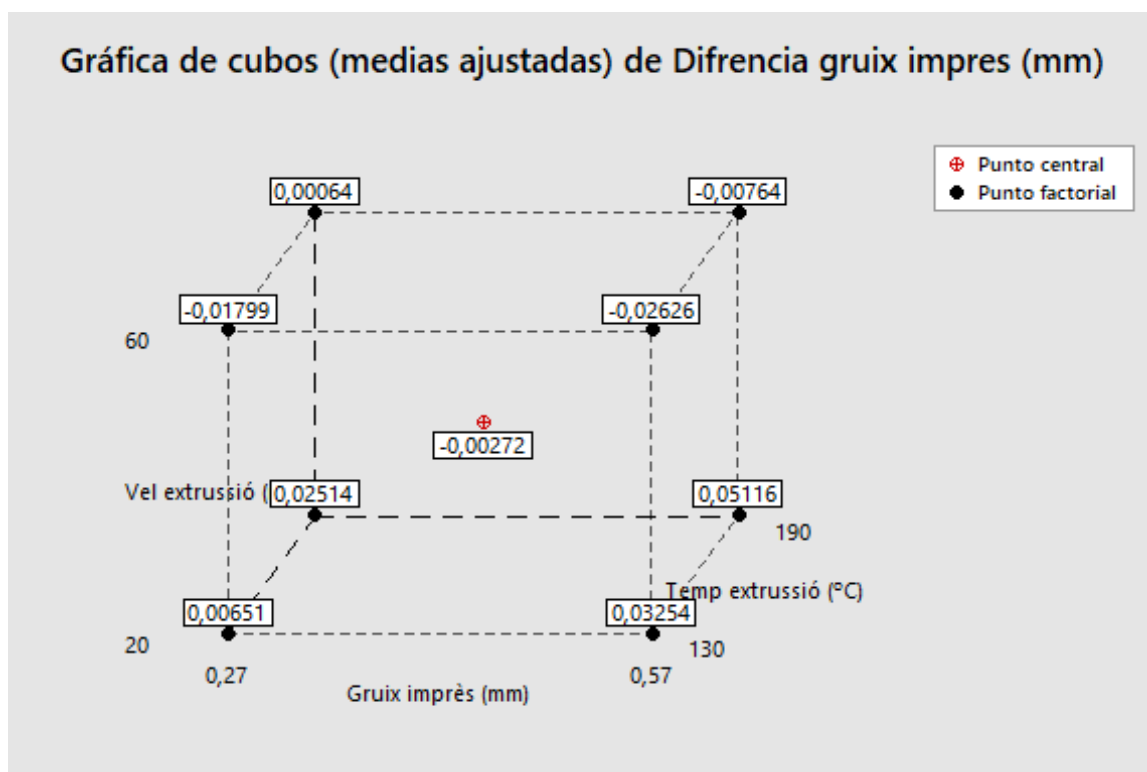


Figura 42: Gràfica de cub

Havent vist la representació del model amb aquests diagrames a continuació es presentaran les superfícies, prèviament havent extret els valors no significatius del model, tal com s'ha fet en l'assaig factorial, a l'annex B es pot veure l'extracció de les variables no significatives del model superfície. El resultat són els de la Taula 44 i l'ajustament quadràtic el de la Taula 45.

Taula 44: Valors significatius del model superfície

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,00277	18,97	0,000	SI
Velocitat extrusió (mm/s)	0,01387	94,85	0,000	SI
Gruix Imprès (mm)	0,00075	5,17	0,03	SI
Vel extrusió* Gruix imprès	0,00235	16,08	0,000	SI

El P valor del quadrat es de 0,106 i el del model 0,000. Tal com es veu l'ajustament quadràtic del model es força bo també, senyal que les dades s'hi ajusten correctament i és pràcticament el mateix que el model factorial

Taula 45: Ajustament quadràtic del model amb valors significatius

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0120957	81,33%	78,92%%	74,60%

A l'annex B part 3, es poden veure les gràfiques d'interaccions i elements principals del model superfície, a continuació es presenta la gràfica de superfície de la combinació dels elements significatius velocitat i gruix, a l'annex hi ha les altres dues combinacions que no són significatives. Es veu que el punt central és molt proper a l'error 0.

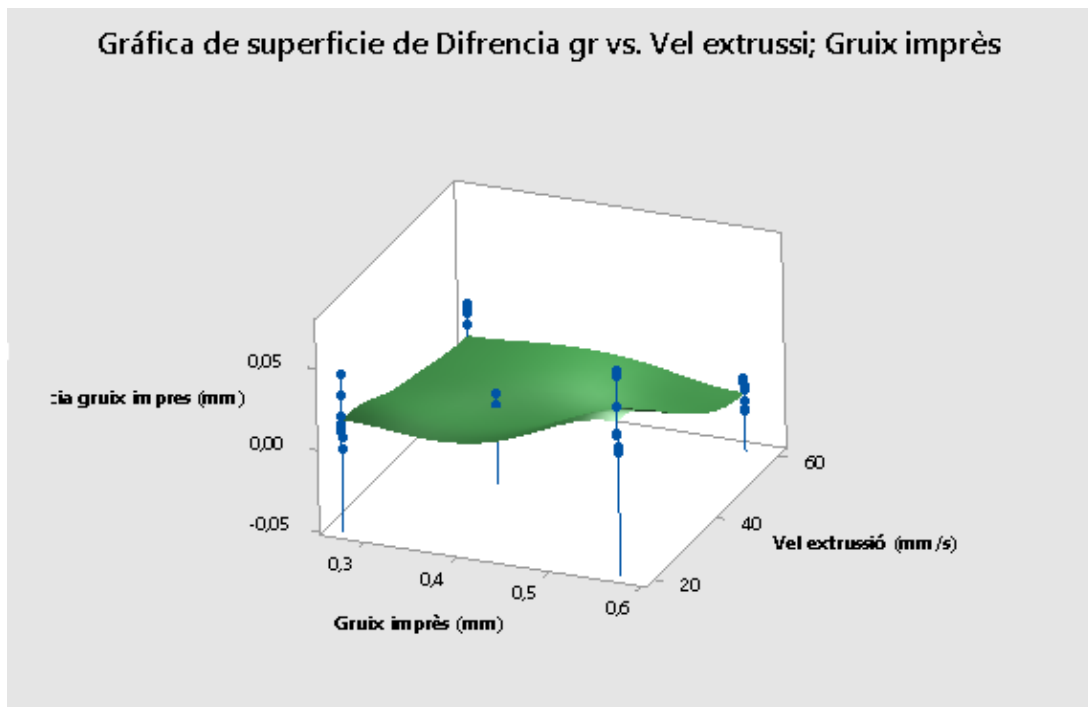


Figura 43: Superfície de la diferència del gruix en funció de la velocitat i el gruix imprès

Tal com es pot veure a la Taula 44, els paràmetres significatius del model són la velocitat, la temperatura, el gruix i la combinació de velocitat i gruix. Havent vist tots els diagrames i taules d'aquesta tercera part es pot concloure que la tendència de la velocitat és que a l'augmentar, el gruix tendeix a disminuir, a causa que a menys temps, menys material pot ser dipositat. La velocitat és dels paràmetres significatius, el que té més afecte, com es veu la Figura 40. El model indica que el punt central és dels que menys error genera, i per tant dels nivells estudiats seria un dels òptims per obtenir el gruix desitjat, tot i que la combinació de 60 mm/s, gruix 0,27 mm i 190°C seria la combinació amb menys error. Si es mira el nivell inferior i superior es veu que el comportament de la velocitat i la temperatura és contrari entre ells, fet que fa que en el punt central o dos valors de velocitat i temperatura que es trobin anivellats entre el seu valor inferior i superior generin un error petit. Els resultats d'aquest assaig han seguit la tendència prèviament marcada per la primera part on s'analitzava cada gruix per separat.

- **Part 4**

En aquesta part s'ha estudiat la rugositat amb la influència de 3 variables: el gruix teòric de la peça, la velocitat i la temperatura. En aquesta part no s'estudia cada gruix per separat, ja que el gruix passa a ser un paràmetre. Les consideracions fetes pel gruix central són les mateixes que en la part 3. L'objectiu és definir un model per predir la rugositat, i aquí si s'eliminen els paràmetres no significatius. A la Taula 46 es poden veure els diferents nivells d'estudi per a cada variable.

Taula 46: Paràmetres de la part 4

Paràmetre	Nivell 1	Punt entremig	Nivell 2
Temperatura extrusió (°C)	130	160	190
Velocitat d'impressió (mm/s)	20	40	60
Gruix (mm)	0,27	0,37	0,57

En primer lloc es pot veure que les dades de la rugositat, representades a la Taula 92 de l'annex, la desviació estàndard es força elevada degut que hi ha 3 valors que es troben bastant desviats de la mitjana, el que s'ha fet és examinar visualment les provetes i s'ha vist que a la zona de la mesura de la rugositat, hi havia malformacions que havien provocat una mala lectura, aquestes provetes s'han descartat per a la mesura de la rugositat. A la Taula 47 es poden veure les dades de la rugositat sense els 3 valors que eren incoherents a causa d'un error de la zona de mesura, la desviació estàndard ara és molt més petita.

Taula 47: Estadístics bàsics corregits de la rugositat

Variable	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
Rugositat (μm)	33	1,625	0,148	0,852	1,314

A la Figura 44 es pot veure que pràcticament totes les mesures es troben sota la corba de normalitat i molt més agrupades, molt millor que el de les dades inicials, tal com es pot veure a la Figura 106 de l'annex.

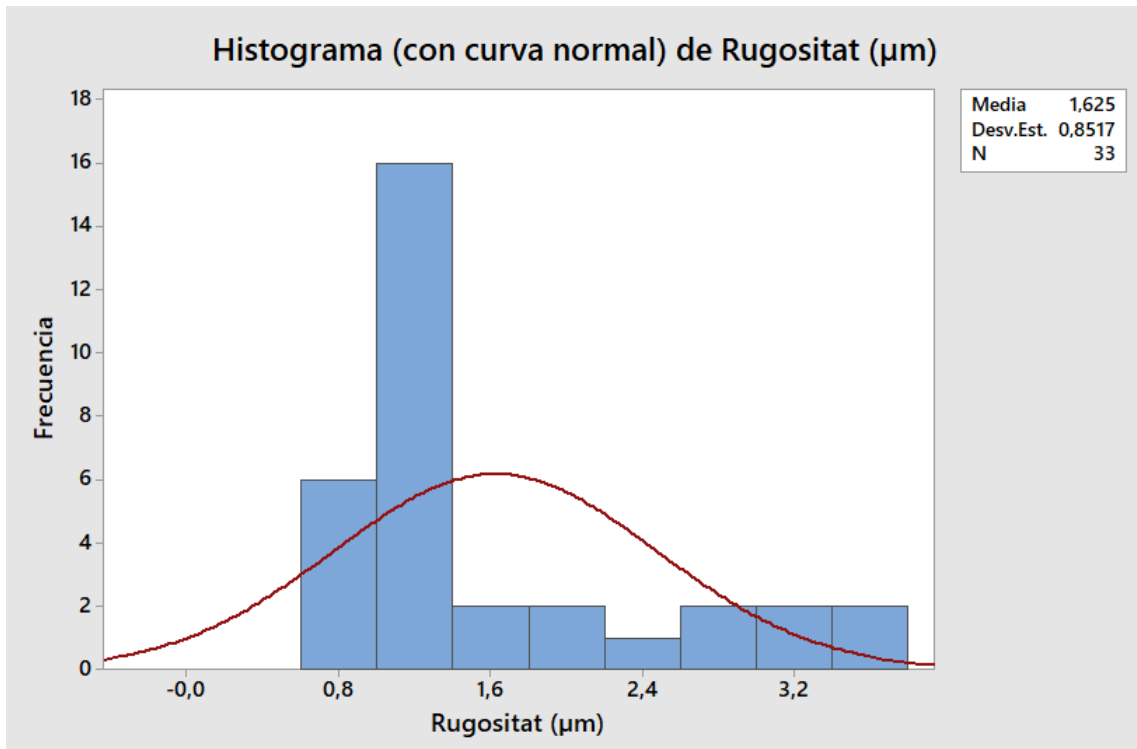


Figura 44: Histograma de la rugositat

Per tenir una visió global de les dades a continuació es mostra el diagrama de caixes, tal com es veu a la Figura 45.

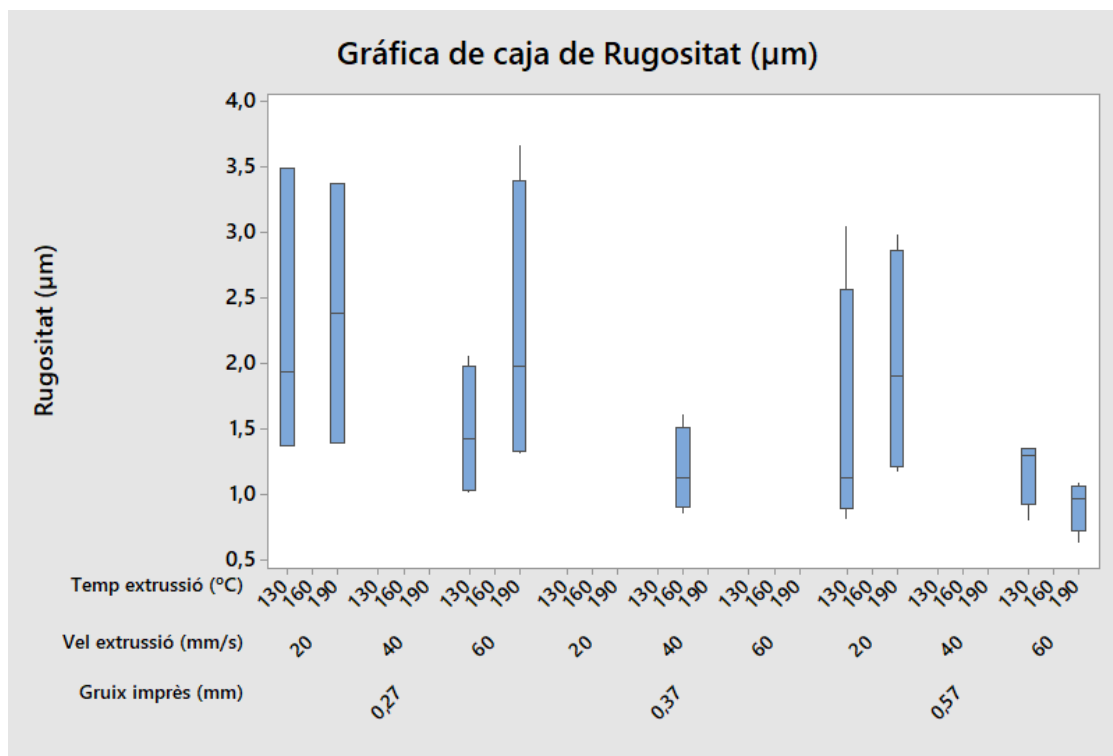


Figura 45: Diagrama de caixes per la rugositat

A la Figura 45 es pot veure el diagrama de caixes complet pels 3 paràmetres d'estudi. Tal com es pot veure, aparentment a més gruix la rugositat tendeix a millorar, tot i que hi ha bastant dispersió de mesures tal com indica la gran amplitud de les caixes. A l'annex B, a la Figura 109 i a la Figura 110 es poden veure els diagrames d'efectes principals i d'interaccions abans de realitzar l'estudi factorial i l'extracció dels elements no significatius del model. Com es pot veure el gruix i la velocitat tenen una tendència clara, en canvi la temperatura aparentment no sembla tenir un efecte important. A l'estudi factorial del model, a la Taula 48 es poden veure quins valors són significatius.

Taula 48: Valors del model de la rugositat

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,4797	0,76	0,391	NO
Velocitat extrusió (mm/s)	2,3619	3,75	0,065	SI
Gruix Imprès (mm)	3,2130	5,11	0,033	SI
Vel extrusió*Temp extrusió	0,0041	0,01	0,936	NO
Vel extrusió* Gruix imprès	0,0991	0,16	0,695	NO
Temp extrusió*Gruix imprès	0,1996	0,32	0,579	NO
Vel*Temp*Gruix	0,8204	1,30	0,265	NO

Després d'extreure els no significatius, els valors del model obtingut són els de la Taula 49. El P valor del model es 0,026.

Taula 49: Valors significatius del model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Velocitat extrusió (mm/s)	2,528	4,32	0,047	SI
Gruix Imprès (mm)	3,421	5,85	0,022	SI

A la Taula 50 es pot veure l'ajustament quadràtic del model, amb les dades significatives. Com es pot veure és força baix, fet que indica que les dades no s'ajusten massa al model a causa de la gran dispersió que hi ha.

Taula 50: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,764692	26,94%	19,38%%	7,72%

I l'equació que defineix el model és la següent:

$$Rugositat = 3,325 - 0,014949 * Vel\ extrusió \left(\frac{mm}{s}\right) - 2,318 * gruix\ (mm) - 0,692$$

* Punt central

A continuació es representaran els diagrames principals amb els valors significatius. En primer lloc es presenta el diagrama d'efectes principals a la Figura 46, els dos únics elements significatius són el gruix i la velocitat, i el punt central s'estableix com a un mínim en els dos casos. Aparentment en augmentar el gruix i la velocitat la rugositat disminueix.

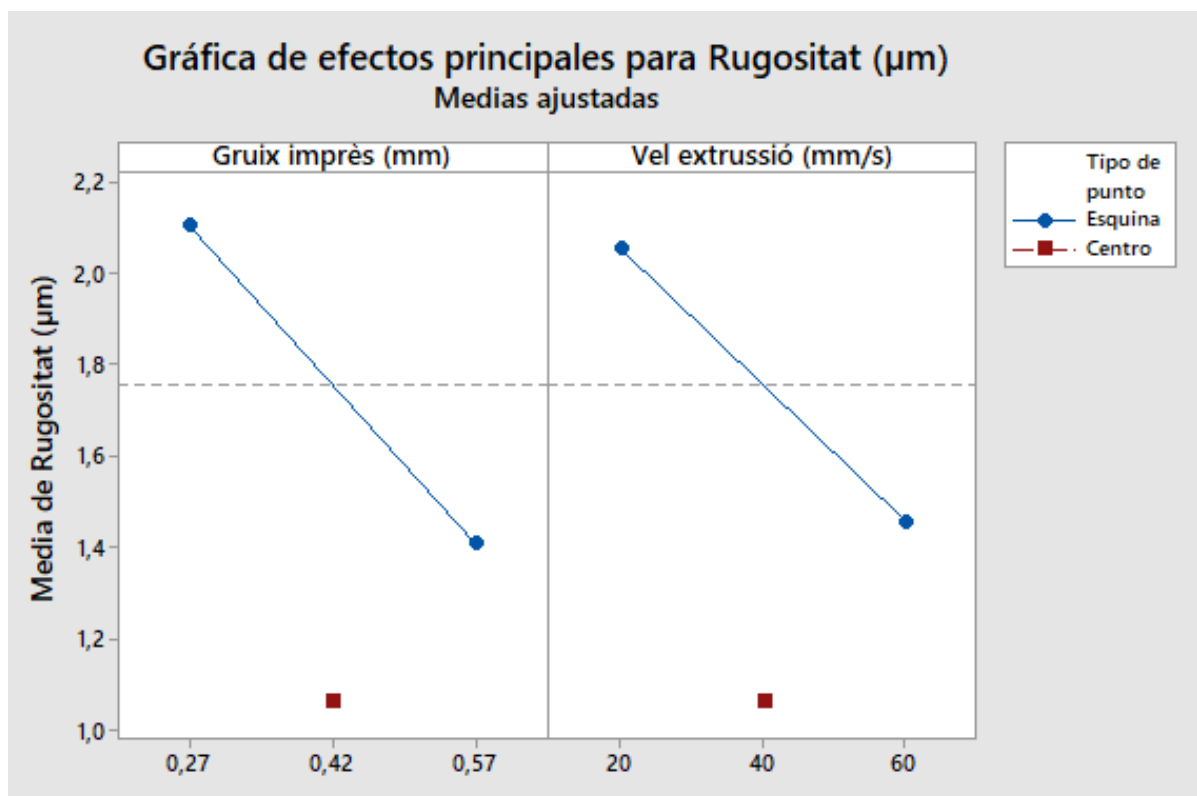


Figura 46: Diagrama d'efectes principals de la rugositat

A la Figura 47 es pot veure el diagrama de cub amb la mitjana de la rugositat a cada punt, tal com es veu el punt central s'estableix com a un mínim.

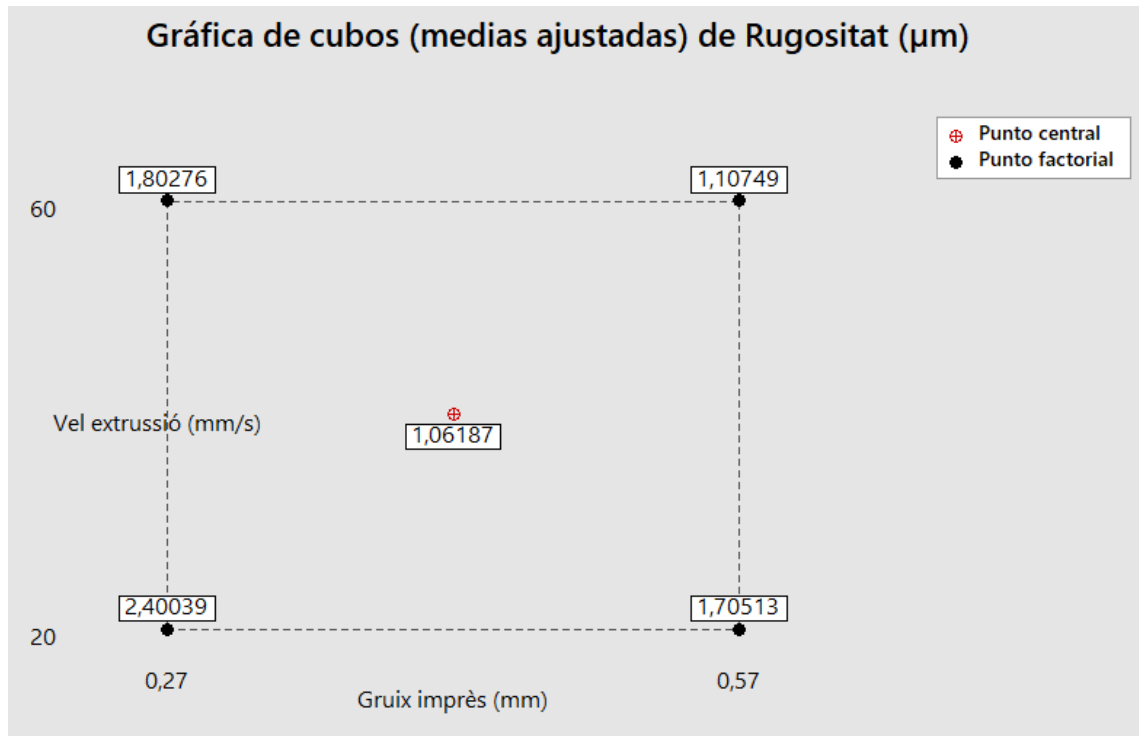


Figura 47: Diagrama de Cub per a la rugositat

Finalment a la Figura 48 es pot veure la superfície del model, i tal com indicaven els diagrames anteriors el punt central s'estableix com a un mínim.

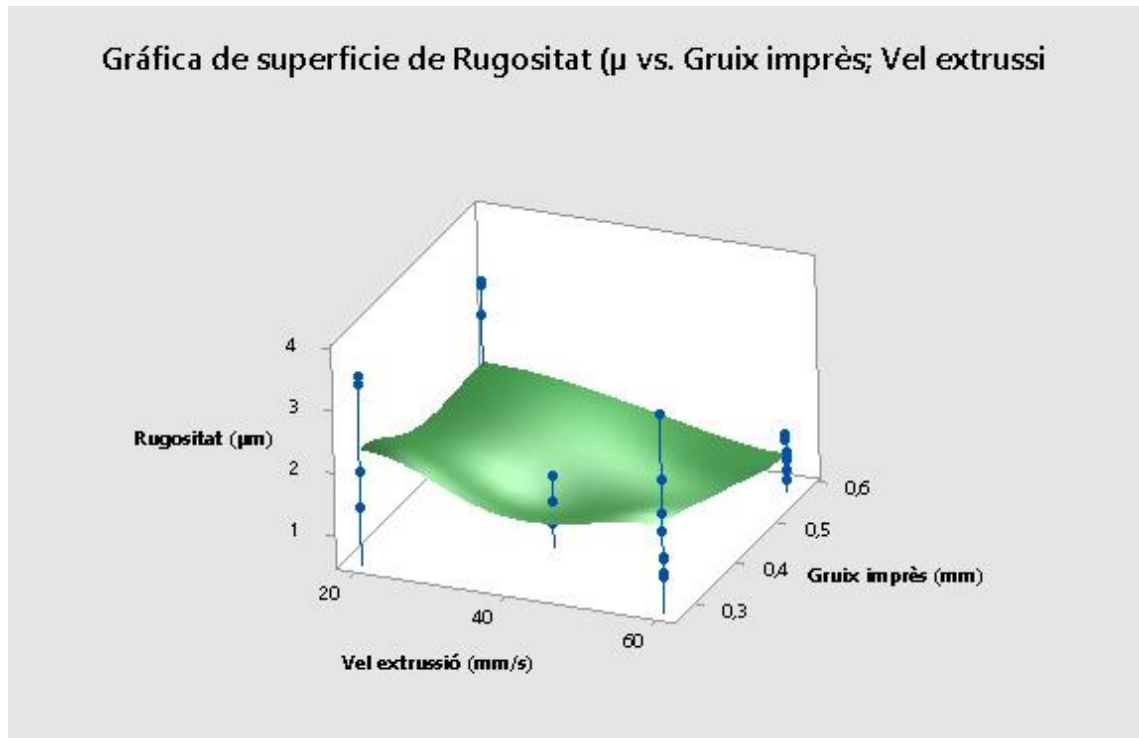


Figura 48: Superfície del model de la rugositat

Analitzant els resultats de la part 4, es pot afirmar que el gruix és el paràmetre més significatiu del model, i té sentit, ja que la rugositat depèn molt de l'ondulació deguda per l'acumulació de capes que generen el corresponent gruix. Tal com es pot veure, el gruix que ha generat millors rugositats, és a dir, més baixes, és la del gruix central de 0,37 mm, això es creu que és perquè de les 3 provetes és la que té menys acumulació de capes fines. Tal com es veu al diagrama de la Taula 31, la de 0,27 mm només es diposita una capa de 0,27 mm de gruix, i resulta ser la que té els valors de rugositat més alts i més dispersió tal com mostra el diagrama de caixes de la Figura 45, i la de 0,57 mm és la que té més capes acumulades. Per tant la de 0,37 mm és la que té millor rugositat ja que només s'acumula una única capa fina de 0,1 mm a la part superior. La velocitat també és influent, i la tendència que té amb els 3 gruixos és que a més velocitat millor rugositat, això perquè a més velocitat el fil extrudit s'estira i per tant redueix la seva secció fent que se suavitzí la superfície. Per tant, per obtenir una bona rugositat s'ha de treballar amb el nombre mínim de capes fines superiors i amb la velocitat major possible dins el rang que el fabricant en aquest cas de la PCL proporciona.

- **Part 5**

A la part 5 s'analitzen els 3 gruixos per separat per tal de veure la tendència del pes sobre cada un d'ells i comparar-los. Consisteix en un estudi 2^k+punt central pels gruixos de 0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm. Es vol veure només la tendència que segueix el pes, ja que no és un paràmetre que es vulgui optimitzar, per tant, no s'han extret els paràmetres no significatius del model. Es vol veure amb quins dels 3 gruixos hi ha menys variabilitat en el pes, i quins paràmetres hi influeixen. Els paràmetres seran la velocitat i la temperatura d'extrusió, els mateixos que la part 1 tal com es veu a la Taula 51.

Taula 51: Paràmetres de la part 5

<i>Paràmetre</i>	Nivell 1	Punt central	Nivell 2
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	130	160	190
<i>Velocitat d'impressió (mm/s)</i>	20	40	60

Al comparar els estadístics bàsics descriptius, es pot veure a la Taula 52 que a mesura que s'augmenta el gruix, la desviació estàndard augmenta, però l'error respecte al valor teòric del pes disminueix.

Taula 52: Estadístics descriptius del pes

<i>Gruix (mm)</i>	Numero mostres	Mitjana	Pes teòric calculat (g)	Error respecte pes teòric(g)	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
0,27	20	0,7330	0,77	0,037	0,0105	0,04468	0,7450
0,37	20	1,0385	1,06	0,0215	0,0132	0,0591	1,0400
0,57	20	1,6425	1,63	0,0125	0,0186	0,0830	1,6450

A la Figura 49 es pot veure l'histograma pel gruix de 0,27 mm que és el que té la desviació estàndard més baixa dels 3 pesos, a la Figura 118 i a la Figura 122 de l'annex es poden veure els dos altres histogrames pels dos altres pesos.

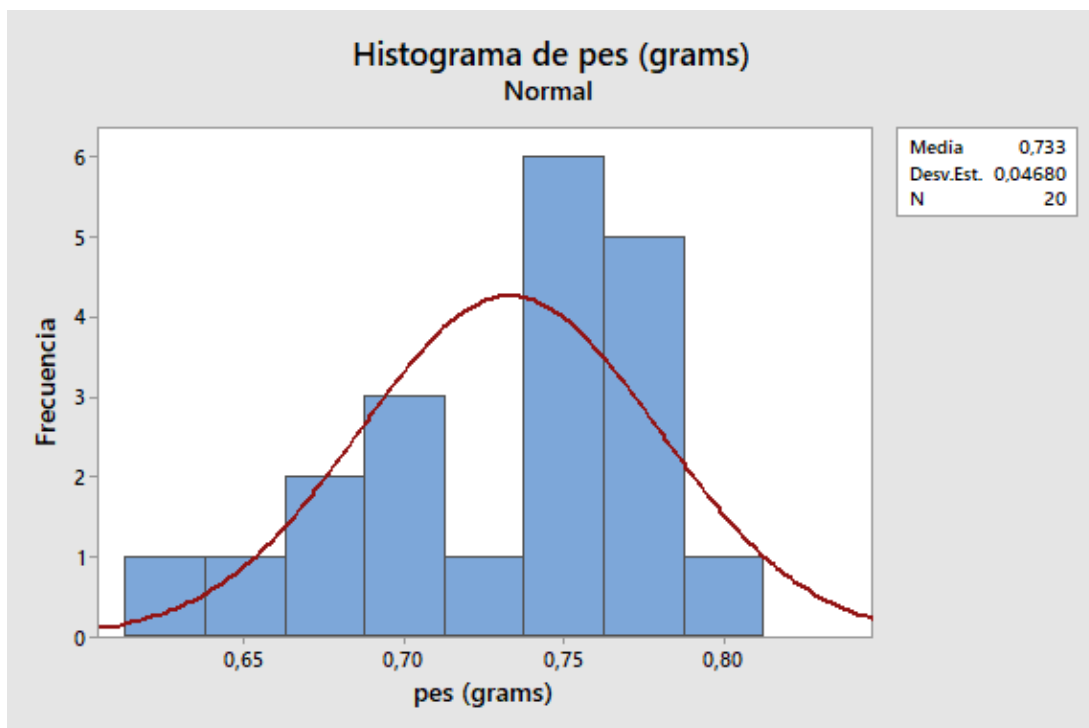


Figura 49: Histograma del pes per a gruixa de 0,27 mm

Si es comparen a continuació els valors factorials, es pot veure a la Taula 53 que hi ha variació de paràmetres significatius en els 3 gruixos, tot i que les tendències són bastant semblants. A la Taula 53 es pot veure aquesta variació de paràmetres significatius. Com es pot veure la temperatura és significativa en els 3 casos i la combinació dels 2 només ho és en els dos gruixos menors. És en el gruix més gros on hi ha menys paràmetres significatius.

Taula 53: Valors del model del pes

Gruix (mm)	Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
0,27	Temperatura extrusió (°C)	0,01625	30,67	0,000	SI
	Velocitat extrusió (mm/s)	0,08556	16,14	0,001	SI
	Vel extrusió*Temp extrusió	0,00765	14,45	0,002	SI
0,37	Temperatura extrusió (°C)	0,03610	38,34	0,000	SI
	Velocitat extrusió (mm/s)	0,01000	10,62	0,005	SI
	Vel extrusió*Temp extrusió	0,005625	5,97	0,027	SI
0,57	Temperatura extrusió (°C)	0,003306	1,51	0,238	NO
	Velocitat extrusió (mm/s)	0,085556	39,10	0,000	SI
	Vel extrusió*Temp extrusió	0,000056	0,03	0,875	NO

A la Taula 54 es pot veure l'ajustament quadràtic que segueixen els models dels 3 gruixos. A l'annex B part 5 es poden veure les equacions que defineixen cadascun dels models. Com es pot veure l'ajustament quadràtic es força elevat en els 3 casos, i a mesura que s'augmenta el gruix aquest disminueix, que vol dir que les dades s'ajusten menys al model.

Taula 54: Ajustament quadràtic dels 3 gruixos

Gruix (mm)	S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,27	0,02302	80,90%	75,80%	66,04%
0,37	0,0306866	78,75%	73,08%	62,21%
0,57	0,0467796	74,90%	68,21%	55,38%

Si es mira a continuació la tendència que segueixen els efectes principals, aparentment és força semblant, igual que els diagrames de caixes, a la Figura 50 es pot veure el diagrama d'efectes principals i la tendència clara que segueix, a més temperatura més pes i a més velocitat menys pes. Per a tots els gruixos es replica aquesta tendència, tal com es pot veure a la Figura 116, Figura 120 i a la Figura 124 de l'annex. La mateixa tendència hi ha amb els diagrames de caixes tal com es veu a la Figura 115, Figura 119 i a la Figura 123 de l'annex.

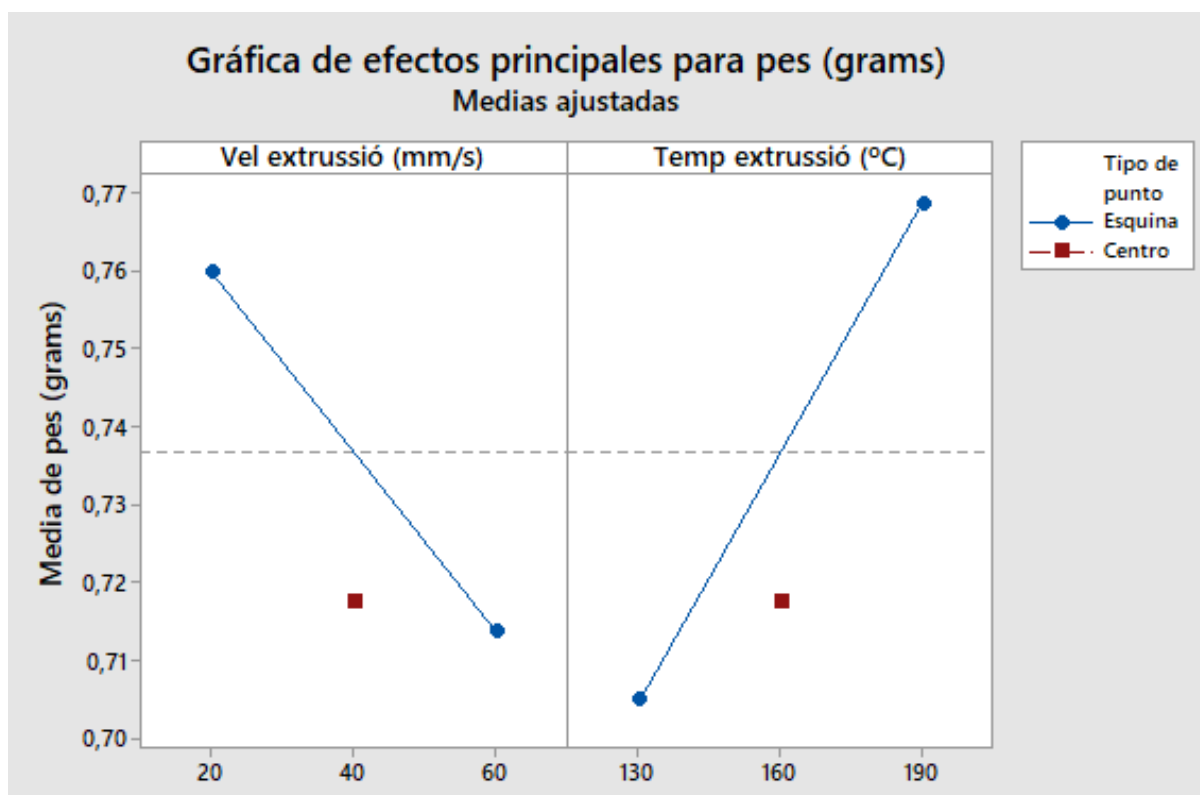


Figura 50: Diagrama d'efectes principals pel gruix de 0,27 mm

A la Figura 51 es pot veure el diagrama de caixes del pes pel gruix de 0,57 mm, dels 3 gruixos és el que hi ha més variabilitat de mesures, fet que fa que les caixes siguin molt més llargues i els P valors del model indiquin que dos dels 3 paràmetres no són significatius.

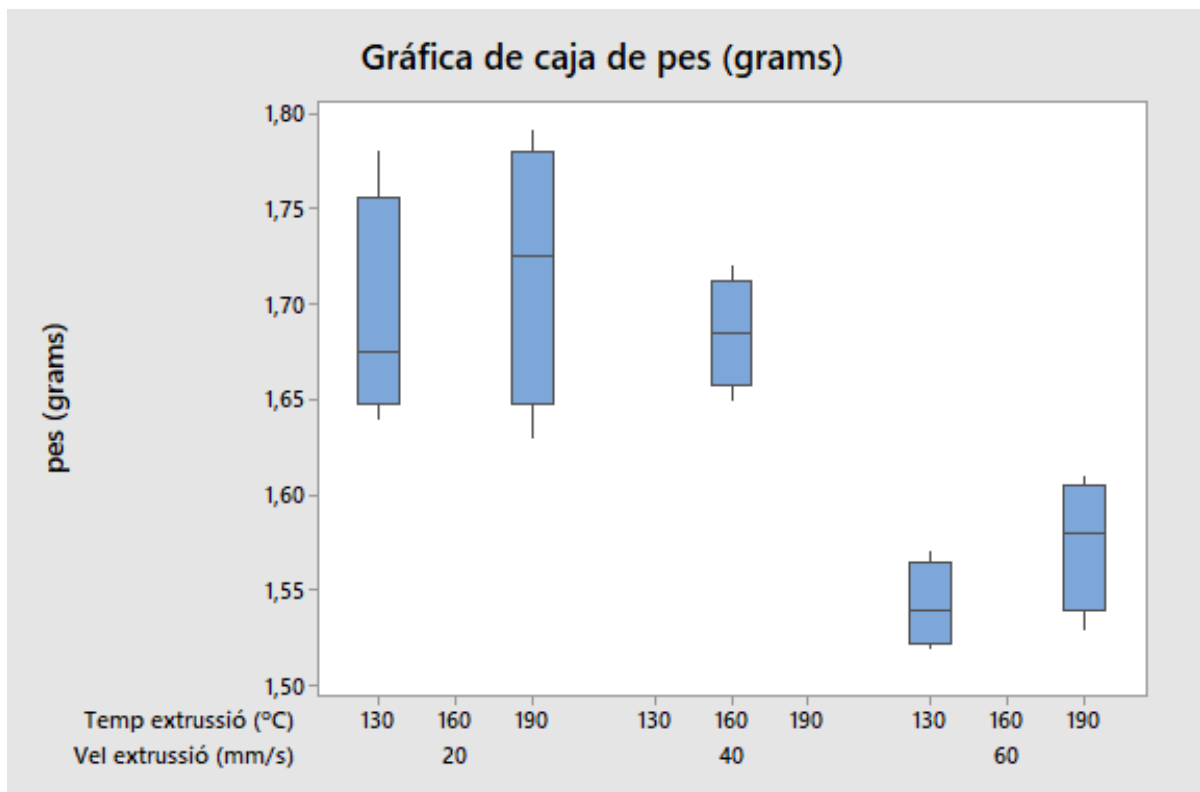


Figura 51: Diagrama de caixes pel gruix de 0,57 mm

Per últim si es miren els diagrames d'interaccions, representats a la Figura 117 i a la Figura 121 de l'annex. En cap dels 2 diagrames el punt central suposa un mínim. El diagrama sembla indicar degut al no paral·lelisme, que hi pot haver una certa interacció entre els paràmetres.

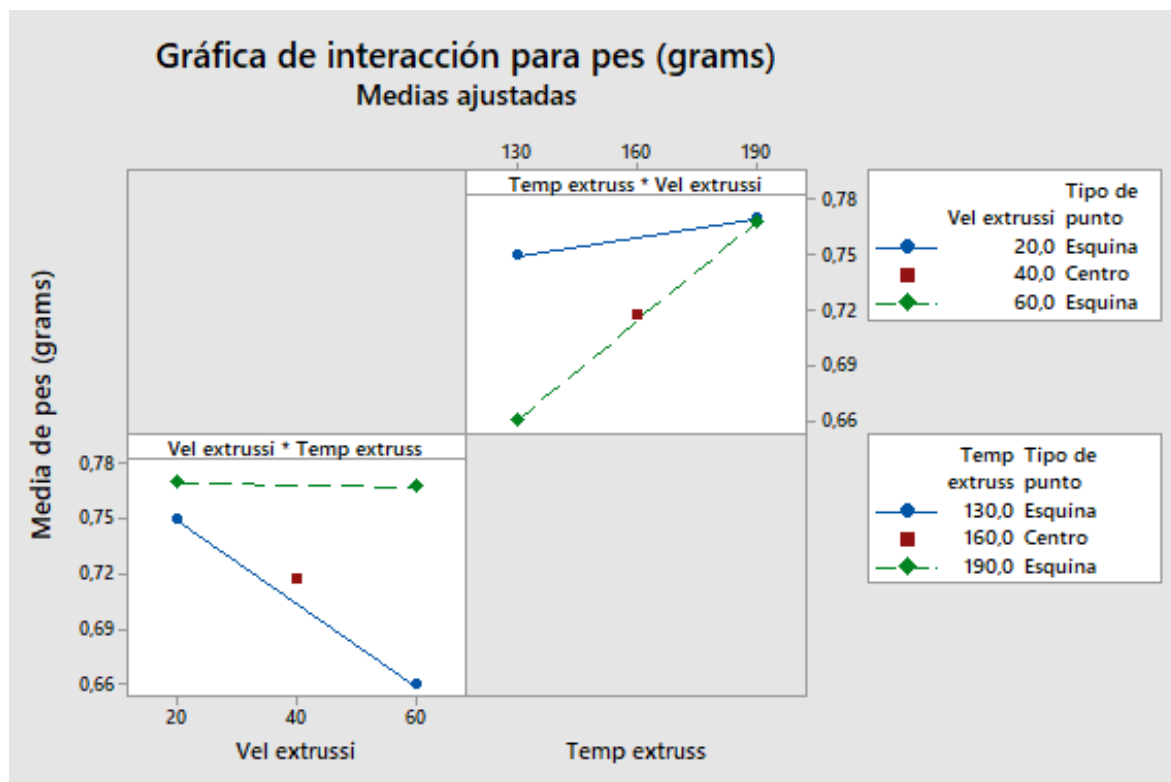


Figura 52: Interaccions pel gruix de 0,27 mm

Per tant amb aquest assaig es pot afirmar que el paràmetre més influent en el pes és la temperatura d'extrusió, i que tot i haver-hi més variabilitat de valors, si es compara la mitjana de pesos, el gruix de 0,57 mm és el que té menys error respecte al valor teòric calculat. La tendència d'aquest model és que a més velocitat el pes disminueix, i a més temperatura el pes augmenta. Fet que té sentit, ja que a més velocitat el capçal té menys temps per dipositar material i per tant el pes disminueix, i a més temperatura el material flueix més i per tant se'n diposita més, fent que el pes augmenti.

4 EXPLICACIÓ DE CASOS INDUSTRIALS

En aquest apartat s'analitzen diversos casos amb aplicació industrial per tal d'estudiar un seguit de situacions amb requeriments concrets, per tal de conjuntament amb els resultats trobats de l'assaig experimental, generar una sèrie de recomanacions. Els casos estudiats han estat tots processats amb la tecnologia FDM, i de cadascun d'ells s'ha validat de forma dimensional i operacional. Els casos estudiats són els següents:

- Prototips de trompetes d'admissió, per ser testades en un vehicle de competició.
- Pròtesis d'un lligament escafo-lunar a escala 3:1 per tal de provar la possible combinació de materials en FDM.
- Diversos prototips per a la indústria de l'automoció.

4.1 Trompetes d'admissió per a un vehicle de competició

Antecedents

En els motors atmosfèrics dels vehicles de competició es busca la màxima eficiència dels conductes, per afavorir la sortida i entrada dels gasos, causant un augment del rendiment volumètric i conseqüentment una pujada de la potència del vehicle.

La regulació de la càrrega d'aquests motors es fa a través d'una sèrie de vàlvules de papallona individuals per a cada cilindre. Cada vàlvula de papallona incorpora un accelerador de la velocitat de l'aire per afavorir l'entrada de gasos al motor. Aquests acceleradors tenen una geometria molt específica per a cada motor i rang de revolucions.

El que es pretén és dissenyar i fabricar mitjançant processos de fabricació additiva aquests acceleradors de flux, també coneguts vulgarment com a trompetes d'admissió. El procés de fabricació típic a través d'una fresadora de CNC resulta molt car, es malgasta molt material i per tal de provar diverses geometries generaria molts costos.

Requeriments, funcions i especificacions de disseny

- Requeriments geomètrics

La distància entre les trompetes, ha de complir-se amb una precisió de $\pm 0,2 \text{ mm}$, ja que han de ser instal·lades al col·lector d'admissió original. El diàmetre interior i exterior de les trompetes ha de ser el més circular possible amb una precisió de $\pm 0,2 \text{ mm}$, per tal que s'encari correctament amb el col·lector, on els conductes són 100% circulars. Per últim la part que quedarà en contacte amb els cossos d'admissió de papallones ha de ser pla.

- Requeriments funcionals

Ha de poder aguantar temperatures de més de 70 graus, ja que estaran sota el capó del vehicle i es poden arribar a aquestes temperatures. Es requereix que la part inferior del conducte de la trompeta, ha de poder resistir la força de les abraçadores, que el subjecten mitjançant un maneguet de silicona al cos de papallona.

- Funcions

La funció principal de l'element a dissenyar, és accelerar l'aire d'admissió aspirat pel motor. D'aquesta manera s'aconsegueix que una major quantitat d'aire entri a la cambra de combustió causant que l'explosió generi més energia.

- Especificacions de disseny

La longitud total de l'accelerador s'ha establert en 44,6 mm, tenint en compte les especificacions del motor en qüestió i sotmetent el disseny a diversos estudis al banc de flux i simulacions tipus CFD. De la mateixa manera s'ha caracteritzat el diàmetre de l'obertura d'admissió. Pel que fa al diàmetre interior i exterior de l'accelerador, ve definit pel mateix diàmetre del cos de regulació de la càrrega tipus papallona, que és de diàmetre interior 46 mm i 51 mm exterior. Al plànol 2 de l'annex H hi ha les trompetes acotades.

Estructuralment s'instal·larà un nervi al llarg dels 4 acceleradors per poder reforçar la zona on les vibracions del motor podrien provocar una fractura entre 2 dels acceleradors, a causa que segons el disseny sense el nervi hi havia poca zona de contacte entre ells. Pel que fa a la geometria, durant tota la curvatura de la part interior de l'accelerador, s'ha de mantenir la tangència entre els cercles que el componen. A la Figura 53 es pot veure el disseny de les trompetes.



Figura 53: Trompetes d'admissió dissenyades

- Dissenyar per fabricar amb AM

Les especificacions de disseny principals tenint en compte que la fabricació es farà mitjançant processos additius, concretament amb la tecnologia FDM són: El gruix de la paret de la trompeta, haurà de tenir com a mínim 2,5 mm perquè suporti la pressió de les abraçadores, i la possible dilatació a causa de la temperatura. Cal intentar no posar voladissos en el disseny, ja que són possibles punts d'imperficcions causa de la generació del suport necessari en aquestes zones i finalment s'ha de tenir en compte les dimensions de la taula, si es vol imprimir el model sencer amb una sola impressió.

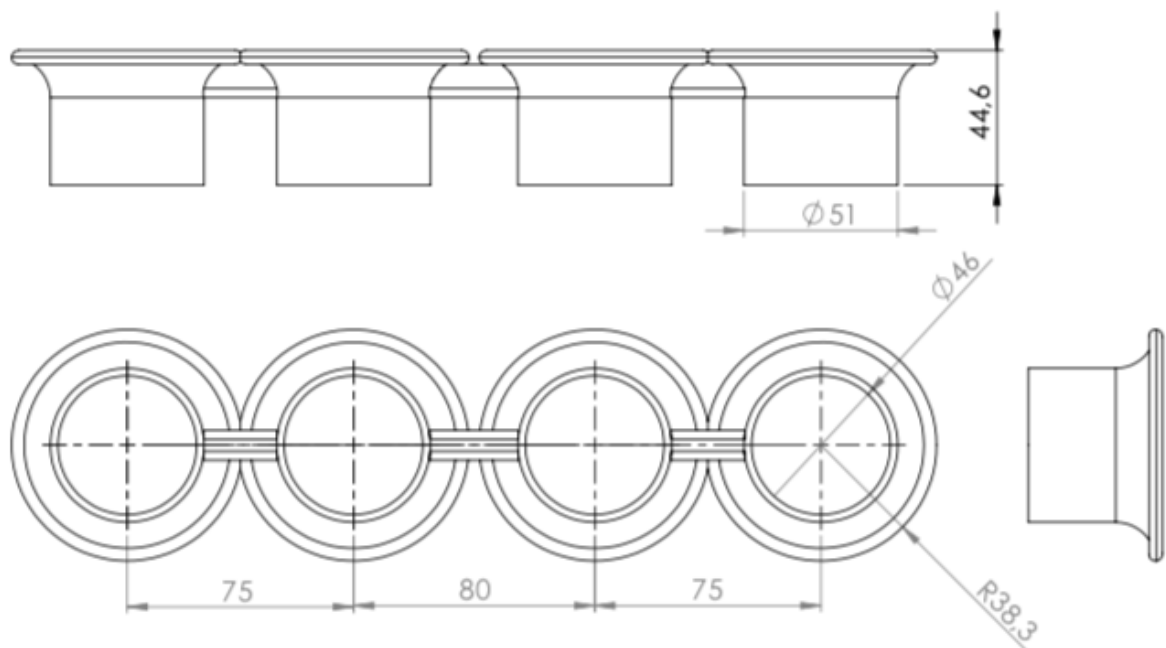


Figura 54: Dibuix de les trompetes amb acotacions bàsiques

A la Figura 54 s'hi pot veure el disseny final de les trompetes, al plànol 2 de l'annex H es pot veure les acotacions completes. Com es pot veure la paret interna s'ha fet de 2,5 mm tal com s'ha indicat als requeriments. Les cotes que es verificaran seran la distància entre centres i el diàmetre interior, per tal de veure la precisió de la impressora i veure si es compleixen els requeriments geomètrics.

Impressió 3D

- Caracterització de la impressora

El model de la impressora utilitzada, per aquesta peça és el AV4 de la marca 3ntr (descrita a l'annex C), ja que les seves especificacions d'impressió s'adapten als requeriments de fabricació que es necessiten per a les trompetes.

- Caracterització del material

El material utilitzat és l'ABS del fabricant Filoalfa (fitxa tècnica a l'annex G), ja que les seves característiques s'adeqüen als requeriments del model.

- Paràmetres d'impressió

A la Taula 55 es poden veure els paràmetres d'impressió utilitzats.

Taula 55: Paràmetres d'impressió (font: [3W.6], fitxa tècnica a l'annex G)

Temperatura d'extrusió (°C)	270
Velocitat d'impressió (mm/s)	70
Temperatura base (°C)	110
Temperatura cambra (°C)	70
Altura de capa (mm)	0.2
Temperatura taller (°C)	19
Ventilador (%)	100

La impressora va generar un suport de tipus no soluble. L'extracció va ser senzilla, i no es va comprometre la integritat ni l'acabat de cap element del conjunt durant la seva extracció. El temps d'impressió va ser de 10,5 hores.

Caracterització i validació

Taula 56: Mesures trompetes

	Diàmetre real interior (mm)	X (mm)	Y (mm)	distància entre centres (mm)	error diàmetre teòric (mm)	error distància entre centres(mm)
circum1	45.8489	8.3609	113.2401	75.0618	0.1511	0.0618
circum2	45.8421	83.4227	113.2552	79.8459	0.1579	0.1541
circum3	45.8868	163.2686	113.3467	75.0549	0.1132	0.0549
circum4	45.8164	238.3235	113.4119		0.1836	

A la Taula 56 es pot veure que es compleixen els requeriments geomètrics.

A la Figura 55 es pot veure les trompetes impreses amb vermell i un segon model que es va generar amb una geometria amb més longitud, també per ser provada al motor.



Figura 55: Diverses geometries de trompetes impreses

A la Figura 56 es poden veure les trompetes posades al vehicle.



Figura 56: Trompetes instal·lades al vehicle

Experiència extreta i conclusions

Tal com es pot veure s'han complert els requeriments de disseny dimensionals i es pot afirmar que l'error de la impressora utilitzada amb ABS, amb els paràmetres recomanats pel fabricant, és de menys $\pm 0,2$ mm en totes les mesures fetes, i en moltes d'elles l'error és només $\pm 0,1$ mm. Tal com es pot veure, el diàmetre interior sempre té tendència a sortir més petit al què realment ha de ser degut a la contracció, i concorda amb la literatura estudiada a l'apartat 2.1.2.2. Per tant per obtenir una precisió millor caldria donar una tolerància superior de $+0,2$ mm al diàmetre perquè un cop impresa mesures els 46 mm desitjats.

A l'hora d'imprimir, cal intentar que tot es pugui fer d'una sola vegada així s'evitaran unions i haver d'unir peces entre elles, per tant, cal conèixer els límits en les 3 dimensions de la impressora i aprofitar-los al màxim possible. També és molt important la col·locació de la peça a la taula per el possible suport que pugui generar. Per exemple a les trompetes, no es posa suport a la part interior, ja que la zona impresa en contacte amb el suport la rugositat hi sol quedar alterada.

4.2 Lligament escafo-lunar

Antecedents

La inestabilitat del canell pot ser causada per la pèrdua de fermesa dels moviments de l'articulació, la lesió més comuna és la del lligament escafo-lunar. Aquestes lesions poden ser provocades per traumatismes accidentals, fractures repetitives, o simplement el desgast per fatiga. El que es busca són noves tecnologies de fabricació i disseny de pròtesis de canell, per tal de donar un nivell més elevat de personalització al lligament, i que pugui ser conformat amb tècniques de fabricació additiva. El procés de fabricació tradicional a través de diversos processos de control numèric en un centre de mecanitzat resulta molt costós a causa de l'alta personalització i complexitat que requereix, per això es busquen nous processos i dissenys a través de tecnologies de AM. Per tant, el que es pretén és dissenyar i fabricar mitjançant processos de fabricació additiva un prototip a escala 3:1 d'aquestes pròtesis, per tal de veure quin posicionat a la taula afavorirà l'acabat i la precisió.

Requeriments, funcions i especificacions de disseny

- Requeriments geomètrics

El diàmetre màxim de la pròtesi ha de ser de $3\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$ i la longitud màxima ha de ser de $25\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$. Ha de contenir un forat central d' $1\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$ de diàmetre per poder guiar l'agulla Kirchner durant l'operació i ha d'incloure un ancoratge mecànic per unir els 3 elements del conjunt. El disseny s'ha dividit en 3 elements diferenciats, tal com es veu a la Figura 57, Figura 58 i a la Figura 59.

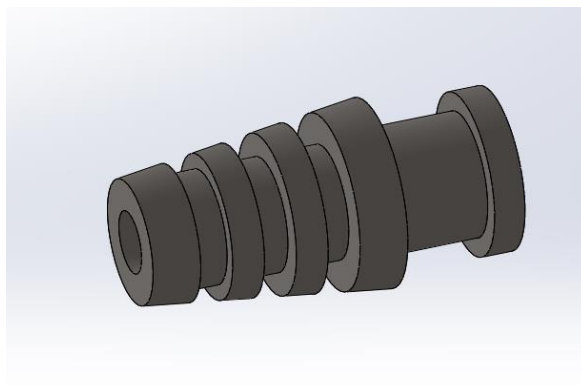


Figura 57: Part 1 del model de la pròtesi

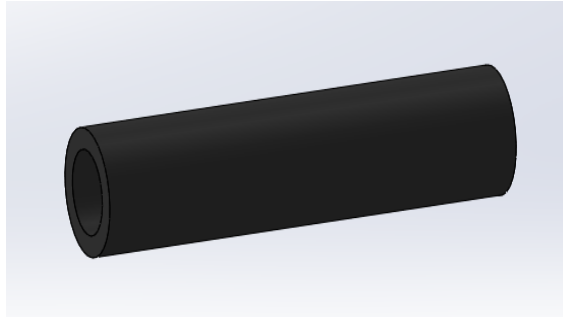


Figura 58: Part 2 del model de la pròtesi

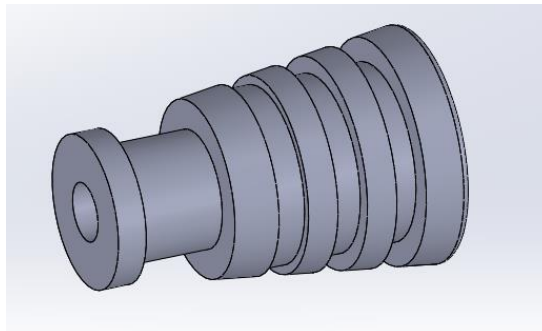


Figura 59: Part 3 del model de la pròtesi

De la manera que s'ha fet el disseny, el procés de fabricació és el que marcarà l'ancoratge. El disseny està fet amb multimaterial per tal d'adaptar-se al moviment natural del canell, on la part central serà d'un material amb comportament elàstic, i els laterals amb un material més rígid per assegurar l'ancoratge. A la Figura 60 es pot veure la secció de l'assemblatge de la pròtesi. El disseny de la d'unió, com es veu, un cop imprès no té la capacitat de desmuntar-se. El disseny està extret del treball final de Carrera d'en Francesc Soy.

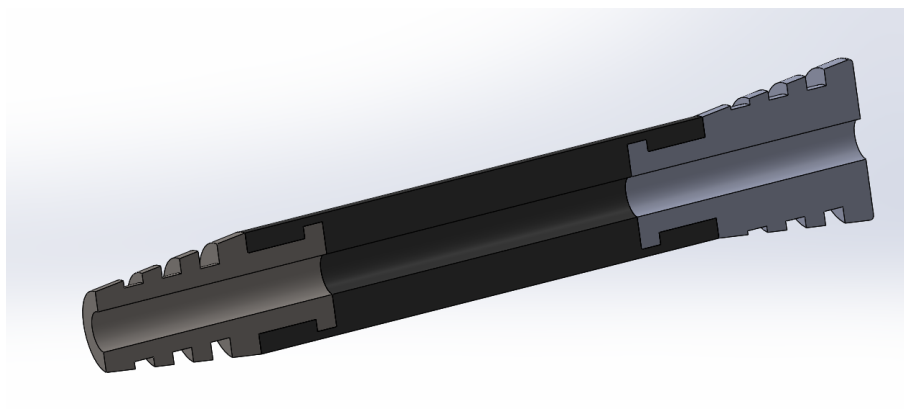


Figura 60: Secció de la pròtesis sencera

- Requeriments funcionals

El requeriment principal és el de substituir el lligament escafo-lunar, per tant donar la capacitat al canell de realitzar els moviments del lligament, i ha de poder ser implantat mitjançant artroscòpia.

- Requeriments Físic-Químics

Pel que fa els requeriments físics, ha de poder suportar els esforços provocats pel moviment del canell en plenes capacitats funcionals, i ha de permetre la rotació de tota l'articulació. Pel que fa als requeriments químics, ha de ser principalment bio-compatible i de vida útil llarga.

- Requeriments de fabricació

Pel que fa a els requeriments de fabricació, ha de ser manufacturat amb processos de fabricació bio-compatibles, i ha de ser un procés que permeti la fabricació amb alta personalització de l'element, és a dir, que calgui fer poques modificacions en el procés de CAM per a la fabricació.

- Dissenyar per fabricar amb AM

L'única manera de fabricar aquest conjunt de la manera que estan dissenyats els ancoratges mecànics és amb fabricació additiva. És un procés molt indicat per a aquest tipus de fabricació, ja que permet una fàcil personalització del producte sense haver de canviar la manera de fabricar-lo. En aquesta anàlisi, es farà un model a escala 3:1 de l'element per tal de veure quin es el millor posicionament a la taula d'impressió que assegura una millor precisió dimensional.

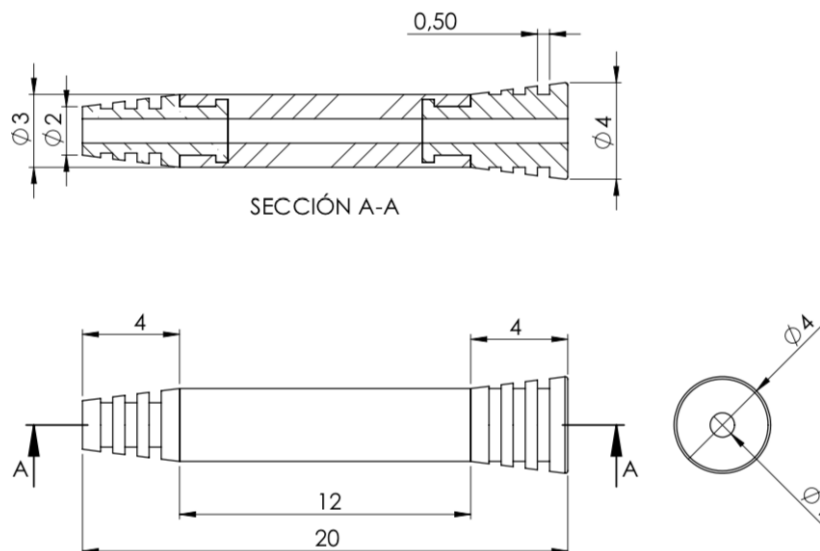


Figura 61: Acotacions bàsiques del lligament escafo-lunar

A la Figura 61 es poden veure les cotes a escala 1:1 que seran mesurades, al plànol 3 de l'annex H es pot veure el plànol complet de la pròtesi. El model serà imprès a escala 3:1, per tal de poder realitzar millor les mesures amb la màquina de coordenades Mitutoyo (descrita a l'annex D) i poder apreciar millor les característiques del model. S'estudiaran 3 situacions diferents d'impressió, la primera amb la proveta completament horitzontal, la segona amb una inclinació del 5%, ja que es el pendent dels 2 conus de les parts 1 i 3 de la pròtesi, i per últim amb la proveta completament vertical.

Impressió 3D

- Caracterització de la impressora

El model de la impressora utilitzada, per aquesta peça és el AV4 de la marca 3ntr, per les seves especificacions d'impressió s'adapten als requeriments de fabricació que es necessita per la pròtesi.

- Caracterització del material

El material utilitzat és l'ABS (fitxa tècnica a l'annex G) del fabricant Filoalfa, ja que les característiques s'adeqüen als requeriments del model. En cap cas aquest serà el material utilitzat per fer una pròtesi que ha d'anar implantada, és simplement per verificar la precisió dimensional i la inclinació de la peça a imprimir.

- Paràmetres d'impressió

Els paràmetres d'impressió utilitzats són els de la Taula 57, que són els recomanats pel fabricant. El temps d'impressió va ser de 3 hores.

Taula 57: Paràmetres d'impressió del ABS (font: [3W.6], fitxa tècnica a l'annex G)

<i>Temperatura d'extrusió (°C)</i>	270
<i>Velocitat d'impressió (mm/s)</i>	70
<i>Temperatura base (°C)</i>	110
<i>Temperatura cambra (°C)</i>	70
<i>Altura de capa (mm)</i>	0.2
<i>Temperatura taller (°C)</i>	19
<i>Ventilador (%)</i>	100

Caracterització i validació

Tal com es veu a la Figura 62 i a la Figura 63, en les provetes que estaven inclinades o horitzontals, l'acabat de la part que estava en contacte amb el material de suport no va ser massa bo. D'altra banda, a la proveta impresa completament vertical, tal com es veu a la Figura 64 l'acabat va ser molt bo, l'única imperfecció a destacar va ser un petit llavi sobre de les dues peces laterals. El suport en tots els casos tot i no ser soluble, va ser extret fàcilment, i no es va malmetre la peça durant la seva extracció.



Figura 62: Impressió completament horitzontal



Figura 63: Impressió amb inclinació

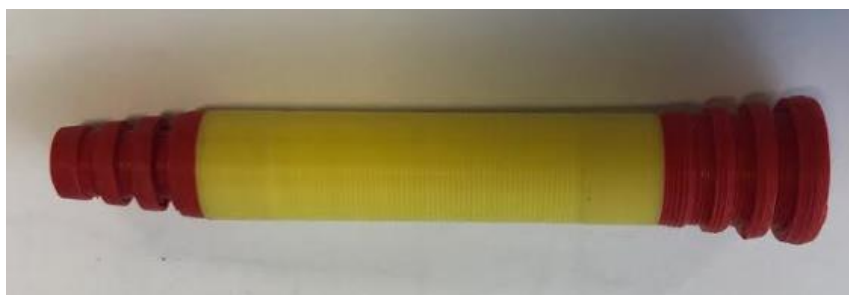


Figura 64: Impressió vertical

Pel que fa a la validació de les mesures. S'ha realitzat la mitjana dels punts 2, 3 i 4 que haurien de ser d'igual diàmetre. A la Figura 65 es poden veure els punts de mesura.

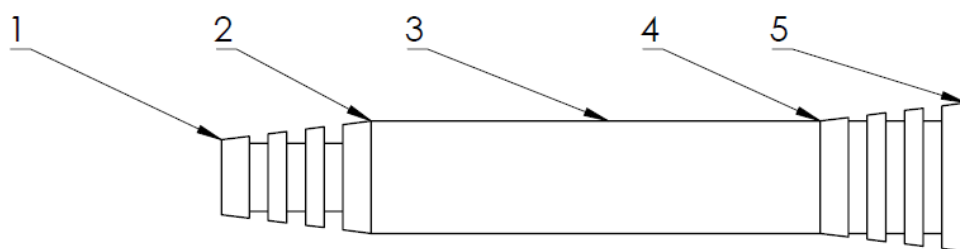


Figura 65: Croquis de les mesures experimentals

A continuació es presenta a la Taula 58, el conjunt de mesures experimentals referents als punts de mesura de la Figura 65.

Taula 58: Mesures experimentals

	Horitzontal	Vertical	Inclinació 5°
cota 1 (mm)	6.26	6.01	6.31
cota2 (mm)	8.88	8.92	8.89
cota 3 (mm)	8.88	8.89	8.92
cota 4 (mm)	8.92	8.9	8.9
Mitjana tub (mm)	8.893	8.903	8.903
cota 5 (mm)	11.57	11.66	11.66

Com es pot observar a la Taula 58, no hi ha una variació dimensional molt significativa entre la impressió horitzontal, vertical o inclinada, però si es mira la gran quantitat d'imperficcions causades en les impressions no verticals, cal tenir en compte que només s'ha d'utilitzar suport quan sigui totalment imprescindible i que sempre que la geometria ho permeti es farà de manera vertical. Aquestes imperficcions són causades, per diverses raons: La primera és que cal canviar de capçal moltes més vegades per generar el suport, fet que genera acumulació de residus de material solidificat als capçals, i en segon lloc, la precisió dimensional és de $\pm 0,2 \text{ mm}$, i en peces tan detallades com aquestes, aquesta precisió no és suficient.

A continuació a la Taula 59 i a la Taula 60 es pot veure la variació respecte als valors teòrics.

Taula 59: Dades de les mesures

	Teòric	Horitzontal	Vertical	Inclinat
Cota 1 (mm)	6.57	6.26	6.01	6.31
Mitjana 2,3,4 (mm)	9	8.893	8.903	8.903
Cota 5 (mm)	11.91	11.57	11.66	11.66

Taula 60: Variació respecte els valors teòrics

	Error Horitzontal	Error Vertical	Error Inclinat
<i>Cota 1 (mm)</i>	0.31	0.56	0.26
<i>Mitjana 2,3,4 (mm)</i>	0.107	0.097	0.097
<i>Cota 5 (mm)</i>	0.34	0.25	0.25

Per últim si es compara amb les mesures teòriques de la peça multiplicades per 3, per igualar l'escala, es veu a la Taula 59 i a la Taula 60, que en les cotes intermèdies que haurien de ser de 9 mm, s'aconsegueix que l'error no superi els 0,2 mm, és pràcticament de 0,1 mm. D'altra banda, es pot veure que les altres dues, de les puntes, es veuen més afectades per l'error, a causa que són més fines i s'han deformat. El que es va imprimir inclinat, és el que té menys error en tots els mesuraments, però és el que visualment té més imperfeccions, en cap cas s'ha aconseguit la precisió dimensional que es requeria.

Experiència extreta i conclusions

S'ha vist que la inclinació i el posicionament a la taula és un factor clau alhora de l'acabat i la precisió de la peça, també s'ha vist que les peces on no hi ha suport tenen tendència a generar menys imperfeccions i que la precisió dimensional general sigui millor.

4.3 Diferents casos de prototipatge a la indústria de l'automoció

Antecedents

En el la indústria de l'automoció i concretament en la dels vehicles de competició, les tecnologies de fabricació additiva i concretament l'FDM han tingut un elevat impacte. A continuació es presentaran una sèrie de casos d'aplicació de la tecnologia FDM com a prototipat en el camp dels vehicles de competició. En cada cas s'explicarà la funcionalitat del prototip i què es va tenir en compte alhora del "Design for Am", i també les observacions que es van treure del procés d'impressió. Tots els casos explicats a continuació han estat impresos amb la 3NTR amb material ABS, amb els paràmetres recomanats pel fabricant, representats a la Taula 57.

- **Suport de l'alternador**

En aquest vehicle, l'assumpte a resoldre era que la potència generada per un l'alternador original no era suficient i calia adaptar-ne un de majors prestacions, ja que incorporava un seguit d'accessoris que alteraven el consum elèctric. Aquests accessoris eren per exemple una bomba d'aigua externa, la direcció assistida elèctrica o un conjunt de llums secundaries.

Per tant el que es volia era adaptar un alternador de majors prestacions en línia amb la corretja d'accessoris i culata d'un Renault 5. La problemàtica era que la culata ja estava muntada al vehicle, i no podia ser mesurada a la màquina de coordenades, és per això que es va optar per imprimir un prototip amb ABS per tal de verificar el posicionament i corregir les mesures preses amb el peu de rei i el regle. Fent-t'ho d'aquesta manera es va aconseguir reduir el temps de presa de mesures i no haver de mecanitzar un suport tipus prototip, ja que hagués augmentat molt els costos. L'avantatge que té també imprimir-ho en plàstic, és que amb una llima molt ràpidament es poden fer retocs sobre el model per tal de corregir-ne el disseny, per després aplicar-ho al mecanitzat.

Els requeriments que es van tenir en compte a l'hora de ser impresos, van ser que els forats on anaven el suport collat a la culata calia que portessin una certa tolerància, ja que com s'ha vist que els forats tenen tendència a tancar-se a causa de la contracció del material. En ser un objecte pesat (5 kg) es va optar per augmentar la densitat normal d'impressió fins al 60%, per tal d'evitar deformacions en el suport i conseqüentment la presa errònia de mesures. Com es pot veure a la Figura 66, l'orella on pivota l'alternador es va deixar més estreta del compte per tal que amb volanderes poder compensar cap a un cantó i altre a l'hora d'alinear-lo amb la corretja, aquesta cota després es va aplicar al disseny final.

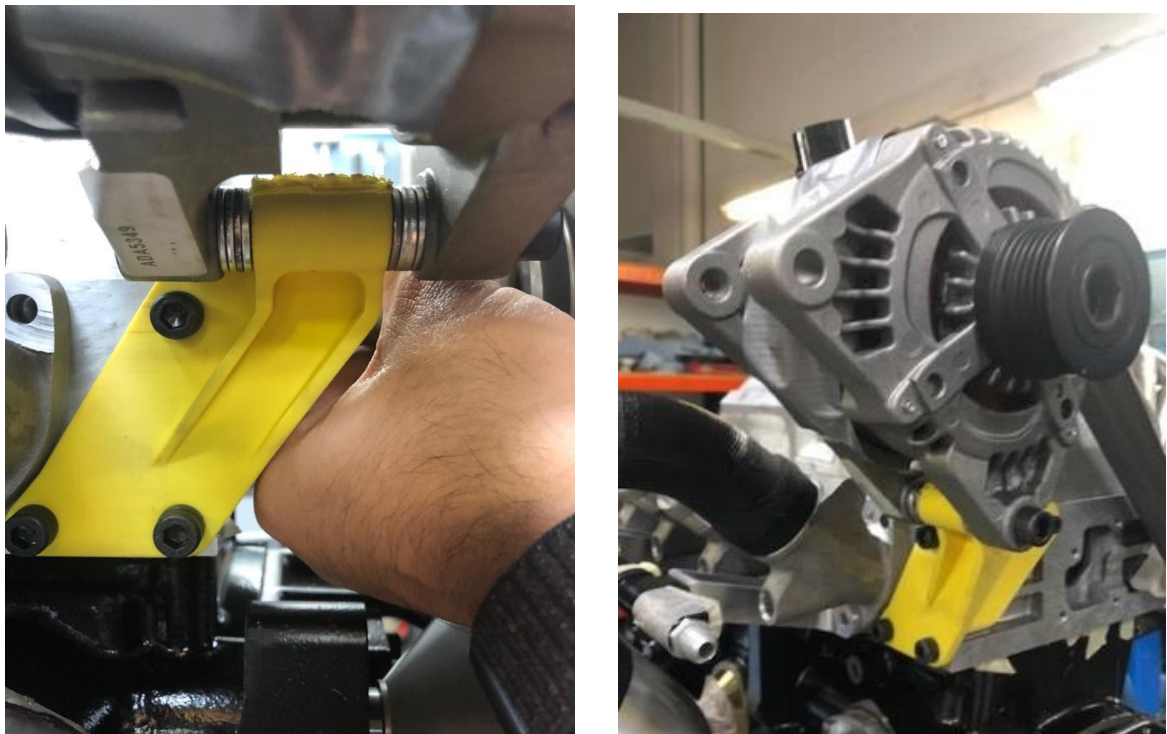


Figura 66: Prototip de suport d'alternador

A la Figura 66 es pot veure el prototip del suport de l'alternador instal·lat al motor. Com es pot veure en el prototip de plàstic es van col·locar nervis més pronunciats per tal d'evitar la deformació de la peça.

- **Suport potenciòmetre**

L'objectiu en aquest cas concret era adaptar un potenciòmetre universal a un cos d'admissió d'un vehicle de competició. En els vehicles de competició és habitual substituir la centralita de sèrie per una on més paràmetres puguin ser modificats, fet que comporta haver de canviar la majoria de sensors de gestió del motor, per tal que la centralita universal els pugui captar i llegir. L'eix del cos de papallona està situat dins el potenciòmetre i llegeix l'angle d'obertura. Cada papallona té una geometria d'eix específica, per tant, cada potenciòmetre necessita un adaptador diferent, és per això que es va optar per la impressió per FDM per tal de fer la peça final i poder-la utilitzar directament al vehicle. Per aquesta raó es va haver de verificar que la peça impresa aguantes temperatures de fins a 70°C de forma continuada, i amb ABS es va aconseguir. L'altre punt crític era la tolerància del centrador del potenciòmetre amb l'eix, el que es va fer va ser imprimir només el cercle de centratge amb 4 mides diferents, amb una tolerància de $\pm 0,1 \text{ mm}$ de diferència entre elles, per veure quina era la que s'hi adaptava millor i després aplicar-ho al disseny final.

En aquest cas particular, el potenciòmetre va collat directament al suport d'ABS imprès, i per tant, es necessitava alguna mena d'unió cargolada. Per fer-ho es va optar per introduir cossos roscats dins el plàstic per tal que s'hi pogués collar. Per fer-ho es va deixar el diàmetre del forat 0,1 mm més petit, per tal que amb la contracció fes d'unió amb serratge, i que el cos roscat quedés fixe. El procediment correcte per instal·lar-los és fent pressió amb un soldador tal com es veu a la Figura 67. Es pot veure que els cossos roscats tenen la part exterior estriada per tal que al ser introduïts amb calor quedin fixes i no puguin rotar ni ser extrets del seu lloc d'ancoratge. Aquest tipus d'unió és de les més utilitzades en assemblatges desmuntables dins el camp de la fabricació additiva amb FDM.



Figura 67: Procés d'introducció del cos roscat (Font: [3W.3])

A la Figura 68 es pot veure el suport del potenciòmetre acabat i instal·lat en el cos de papallona



Figura 68: Prototip de suport de potenciòmetre.

- **Útil per a plegar xapa metàl·lica**

L'objectiu era fabricar un útil de la manera de la manera més senzilla i econòmica possible per tal de doblegar xapa d'alumini amb una geometria específica. En aquest cas particular calia doblegar una xapa de 1,5 mm d'alumini per tal de subjectar les bombes de gasolina a la part inferior d'un vehicle. El problema que sorgia és que mecanitzar el motlle per tal de ser premsat suposava un cost molt elevat per una peça que pràcticament única, on el nivell de rèpliques seria molt baix. El que es va fer va ser buscar un material amb unes característiques que permetessin suportar la pressió de doblegat de la xapa de 1,5 mm d'alumini. Es va optar per imprimir amb Thermec-ZED, del Fabricant Filoalfa (fitxa tècnica al l'annex G), per tal de suportar la força de premsatge, aproximadament de 3 tones.



Figura 69: Matriu de premsat de la xapa

Figura 69 es pot veure que la matriu de premsatge estava formada per dues parts. En el disseny es va tenir en compte arrodonir les arestes del motlle per tal que no es concentres la tensió, i que entre els dos motlles hi hagués espai per tal de poder allotjar la xapa doblegada i no el deformés.

Pel que fa als requeriments d'impressió, en ser un material "especial", es va haver de fer amb la 3NTR, (descrita a l'annex C) ja que té la capacitat tèrmica per poder imprimir aquest material. El Thermec-ZED requereix temperatures d'extrusió de 320 °C aproximadament i la capacitat d'escalfar la cabra fins a uns 80°C. També es va fer que la densitat del model fos del 100% per tal d'evitar deformacions durant el procés de premsatge, fet que va causar durant el procés d'impressió fortes dilatacions tèrmiques del material sobre la taula, provocant que es desenganxés de les puntes. Això es va corregir aplicant laca adhesiva sobre la taula abans de la primera capa d'impressió, i mantenint la temperatura de la base a 110°C durant tot el procés d'impressió.

5 RECOMANACIONS PER DISENYAR I FABRICAR AMB FABRICACIÓ ADDITIVA (DESIGN FOR AM)

En aquest apartat es recullen una sèrie de recomanacions aplicables a la tecnologia FDM basades en els resultats dels assajos experimentals, els casos industrials, la literatura estudiada en la memòria, l'experiència extreta durant els processos d'impressió i la generació del CAM i disseny. Aquestes recomanacions s'han distribuït en 4 blocs diferenciats.

1. Geomètriques: L'objectiu és obtenir la millor precisió dimensional possible, per tant, es donaran una sèrie de recomanacions i combinacions de paràmetres d'impressió tant per la PCL com per altres materials per tal d'aconseguir-ho.
2. D'impressió: L'objectiu és aconseguir assegurar l'èxit en la impressió, no a base de la modificació paràmetres del procés, sinó de la maquinària i el posicionament del model, com l'orientació de la peça, la generació de suports, l'adhesió de la peça al llit de treball, etc.
3. Unió d'elements: L'objectiu és donar un ventall d'opcions a l'hora de crear assemblatges amb peces impreses en 3D, ja hagin de ser desmuntables o unions permanents.
4. Funcionals: Aquesta part té l'objectiu de donar consells bàsics aplicables per exemple a algú que vol realitzar la primera impressió. Consisteix en un seguit d'aspectes a tenir en compte tant de CAD, de CAM i de paràmetres bàsics d'impressió.

5.1 Geomètriques

- Pel que fa al gruix, si es miren els resultats de la part 1 i part 3 del treball experimental, on s'ha analitzat el gruix i la seva desviació, es pot veure l'afectació que hi tenen els paràmetres típics d'impressió, que són la velocitat i la temperatura. A més velocitat el gruix tendeix a disminuir, i a més temperatura el gruix tendeix a augmentar, per tant, es pot considerar que un paràmetre compensa l'altre. En el cas que el fabricant d'un material doni un rang de temperatures i velocitat es recomana utilitzar el punt central de cadascuna de les dues variables, ja que els resultats d'aquest estudi han indicat que són dels que proporcionen una millor precisió en el gruix. En el cas de la PCL els paràmetres que generaven una millor precisió han estat els propers al punt central o combinacions de temperatura alta i velocitat alta o a l'inrevés, ja que es contraresten.

- Si es miren les toleràncies en eixos i forats, en el cas dels eixos el diàmetre sempre tendeix a ser superior al teòric (+0,2 mm de diàmetre aproximadament), i en el cas de forats sempre tendeix a ser menor (-0,2 mm de diàmetre aproximadament), a causa de la dilatació i fluència del plàstic fos. Per tant per obtenir una precisió millor en un eix caldria donar una tolerància negativa (*diàmetre_{-0,2}⁰ mm*), perquè un cop imprès mesurés el diàmetre teòric. En el cas de forats caldria que la tolerància fos positiva (*diàmetre₊₀^{+0,2} mm*). Aquesta tolerància depèn de cada impressora i de cada material, i cal a través d'assaig i error obtenir-la.
- Pel que fa la rugositat, a la part 4 de l'assaig experimental, on s'ha analitzat quina influència hi tenen els paràmetres del procés, es pot veure que les velocitats d'impressió altes generen millors rugositats, sempre mantenint-se dins el rang de velocitats proposat pel fabricant.
- Tal com s'ha vist, és important repassar el codi que genera el programari, per veure quin "llescat" genera i si quadra amb les dimensions del model, ja que pot ser que generi un error degut als paràmetres de generació de codi predeterminats pel fabricant, i es cregui que és a causa d'algun paràmetre del procés.

5.2 D'impressió

- A l'hora de col·locar la peça sobre la taula d'impressió en el programari, cal intentar que de la manera que quedi posicionada, no generi voladissos, ja que són possibles punts d'imperficcions a causa de la generació de suport aquestes zones.
- L'orientació del model tindrà un gran efecte en la precisió dimensional i en l'acabat, ja que les capes sempre són generades en l'eix Z, i és en l'eix on la precisió dimensional és millor. Es recomana que es posicioni la peça per tal que les zones que requereixin una precisió més alta siguin paral·leles a l'eix vertical o l'eix Z.
- S'ha vist que la inclinació i el posicionament a la taula és un factor clau alhora de l'acabat i la precisió de la peça, i que les peces on no hi ha suport tenen tendència a generar menys imperficcions i que la precisió dimensional en general sigui millor.
- Pel que fa a l'adhesió amb la taula, s'intentarà no situar la cara amb més secció sobre el llit, ja que les dilatacions i contraccions que pateix el material durant la solidificació provoca que s'aixequin les puntes. Posar una mica de laca adherent ajuda que la peça no s'aixequi del llit quan el disseny no permet orientar correctament el model.

5.3 D'unió entre elements

- Cal aprofitar la fabricació additiva, ja que permet incorporar els ancoratges o parts d'unió de components en el disseny, a causa de la manera com es genera el model durant el procés de fabricació. Sempre que es pugui, ja sigui en el cas que la peça sigui amb multimaterial o d'un sol material, es recomana que el mateix disseny contingui l'ancoratge que unirà les peces. Aquest mètode és per a unions permanents fixes o mòbils.
- Un altre mètode per unir, en aquest cas amb unions desmuntables, és a través d'introduir cossos roscats dins el plàstic per tal que es puguin collar els diferents components. Per fer-ho cal deixar el diàmetre del forat més petit (de l'ordre de $\text{diàmetre } \begin{matrix} -0,1 \text{ mm} \\ -0,2 \text{ mm} \end{matrix}$) per crear una unió amb serratge per tal que el cos roscat hi quedi fixat. La manera adient d'instal·lar-los és fent pressió amb un soldador. Aquests cossos roscats tenen la part exterior estriada per tal que quan són introduïdes amb temperatura quedin fixes i no puguin rotar ni ser extretes del seu lloc d'ancoratge. Aquest tipus d'unió és de les més utilitzades en assemblatges desmuntables dins el camp de la fabricació additiva amb FDM.
- Un altre tipus d'unió de peces de FDM permanents és a través d'adhesiu. Per la majoria de materials comuns d'utilització com ara l'ABS o el PLA, els fabricants recomanen adhesiu tipus resina que durant el procés de curat no alterin la seva temperatura.

5.4 Funcionals

- S'han de tenir en compte les dimensions de la taula, per tal d'aprofitar-les si es vol imprimir el model sencer amb una sola impressió, així s'evitaran unions i haver d'encolar peces entre elles. Per tant és important conèixer els límits en les 3 dimensions de la impressora, per tal d'ajustar el disseny a les especificacions.
- La Densitat d'impressió és un paràmetre molt important a tenir en compte, ja que serà el que marcarà el temps d'impressió conjuntament amb la velocitat d'impressió. Segons la utilitat que ha de tenir la peça caldrà o no modifica-la, i els valors habituals per prototipatge són d'entre el 20% i el 40%, i per peça final d'entre el 40% i 70%.
- Que la localització de la impressora tingui una temperatura constant d'entre 20°C i 25°C, per tal d'evitar que per contraccions de solidificació la peça, es desenganxi de la taula.
- Anivellar la taula abans de cada impressió, assegurar que estigui calibrada i purgar el capçal per evitar obstruccions de material durant la impressió.

- Mantenir neta la impressora i netejar la taula amb acetona després de cada impressió, ja que evitarà l'acumulació de residus a la taula, fet que provocaria una mala adherència.
- Esperar que la peça hagi arribat a la temperatura ambient per retirar-la de la taula, ja que serà molt més fàcil a causa que la contracció haurà provocat que s'hagi desenganxat pràcticament en la totalitat de l'àrea en contacte amb el llit.

A continuació, a la Taula 61 es presenta una taula resum de les recomanacions esmentades anteriorment.

Taula 61: Resum de les recomanacions

<p>Geomètriques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Treballar dins el rang dels paràmetres del fabricant. Agafar aproximadament el punt mig de cada paràmetre. Els més importants tal i com s'ha vist són la velocitat, la temperatura d'extrusió i l'alçada i acumulació de capes. • Tenir en compte la contracció del material de cara a les toleràncies en eixos i forats. (<i>diàmetre</i>$_{-0,2}^0$ mm) per eixos i (<i>diàmetre</i>$_{+0,0}^{+0,2}$ mm) per forats. • Velocitats altes dins el rang del fabricant generen millor rugositats. • Verificar el codi generat pel programari, per tal de veure com genera el "llescat", i si es veu afectat pels paràmetres del procés.
<p>D'impressió</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar voladissos sempre que es pugui, ja que evitaran deformacions a les zones que queden en voladís. • Evitar utilitzar suport sempre que es pugui, ja que afecta l'acabat superficial de la zona que hi està en contacte i la precisió dimensional. • Orientar la peça en l'eix Z sempre que es pugui, ja que és l'eix on s'acumulen les capes, sobretot ja que si s'imprimeixen forats en l'eix X o Y queden ovalats tot i tenir suport. • Controlar l'adhesió a la taula i afegir laca adherent sempre que es pugui, ja que la contracció del material provoca que les puntes s'aixequin, provocant malformacions i conseqüentment errors geomètrics. Controlar també la temperatura del llit, a més alta més adhesió, degut a que evita que la capa en contacte es contragui i aixequi.

<p>D'unió entre elements</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Incorporar els ancoratges en el mateix disseny per a unions permanents. • Controlar la tolerància dels forats dels cossos roscats. Aplicar un factor de ($diàmetre_{-0,2}^0 mm$) al forat per generar una unió amb serratge. • En el cas de les unions encolades, consultar el fabricant del material per la compatibilitat de l'adhesiu. Generalment els fabricants recomanaran resina tipus EPOXY.
<p>Funcionals</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conèixer els límits de la taula en els 3 eixos, per tal de poder escollir amb quina de les impressores és necessària per a cada impressió. • Utilitzar la densitat que més s'ajusti als requeriments. Els valors habituals per prototipatge són d'entre el 20% i el 40% de densitat i per peça final d'entre el 40% i 70%. • Controlar la temperatura del local on se situï la impressora, generalment temperatures d'entre 20 i 25°C. • Mantenir la taula neta, anivellar-la i calibra-la abans de cada impressió, ja que assegurarà tant l'èxit dimensional, com d'extracció de la peça de la taula. • Esperar a que la peça s'hagi refredat per extreure-la de la taula, serà més senzill degut a que s'haurà contret i desadherit.

6 RESUM DEL PRESSUPOST

El total del pressupost per a l'estudi dels paràmetres del procés de FDM aplicat a una làmina de PCL i casos reals de prototipatge en el sector industrial és de 4.735,54 euros. (quatre mil set-cents trenta-cinc coma cinquanta-quatre). El pressupost complet es pot trobar a l'annex F.

7 GLOSARI

7.1 Abreviatures

FDM: Fused Desposition modeling

SLA: Stereolithography

PCL: Policaprolactona

AM: Additive Manufacturing

CAM: Computer Aided Manufaturing

CAD: Computer Aided Desing

PLA: Àcid polilàctic

TPU: Poliuretà termoplàstic

ABS: Acrilonitril butadiè estirè

8 CONCLUSIONS

En aquest apartat s'estableixen les conclusions principals del projecte.

En primer lloc es pot afirmar que s'ha complert l'objectiu plantejat a l'inici de l'estudi, el qual és estudiar la capacitat de la tecnologia FDM per a la fabricació de làmines fines de PCL, i l'aplicació que tenen aquestes tecnologies en diversos casos industrials, per tal de generar una sèrie de recomanacions que assisteixin a la fabricació additiva a través de processos de FDM. Per tal de poder estudiar la capacitat de la tecnologia FDM i els paràmetres del procés s'ha elaborat un anàlisi estadístic de les dades i s'han generat una sèrie de models per a predir la resposta o l'error per cada un dels paràmetres estudiats. Aquests paràmetres estudiats han estat delimitats prèviament a través d'una sèrie d'assajos previs al treball experimental. Finalment les recomanacions s'han generat a partir de la literatura estudiada, dels resultats de l'assaig experimental i de l'estudi dels casos industrials.

Dels paràmetres del procés prèviament delimitats amb els assajos previs, que són la velocitat d'extrusió, la temperatura d'extrusió i el gruix, se n'ha estudiat les següents variables de resposta: el gruix, la rugositat i el pes a través d'una proveta tipus lamina fina de PCL.

A partir de l'anàlisi d'experiments pel paràmetre del gruix s'ha vist que el comportament de la velocitat i la temperatura és contrari entre ells, és a dir, un augment o disminució dels dos paràmetres en igual percentatge no suposaria una variació important del gruix, ja que es compensarien. En cas contrari, en augmentar un i disminuir l'altre, si suposaria un canvi dràstic en el gruix final de la peça i l'error que tindria respecte al valor desitjat. És per aquesta raó que ha resultat que dels punts que reduïen més l'error del gruix i generaven una millor precisió eren propers als punts centrals dels rangs dels 3 paràmetres. Aquesta combinació ha resultat ser propera a una velocitat d'extrusió de 40 mm/s, 160°C de temperatura d'extrusió i el gruix central de 0,37 mm, tot i que la combinació de 60 mm/s, gruix 0,27 mm i 190°C seria la combinació que generaria menys error. Cal dir que aquest gruix de 0,37 mm no es el punt central teòric, però si l'experimental fet que podria causar una petita desviació en aquest valors. Aquest valors s'ajusten als paràmetres proposats pels diversos fabricants de la PCL. També s'ha vist que la temperatura límit del lilit per no provocar deformacions a la làmina ha de ser com a màxim de 40°C, i per això va ser un paràmetre que no es va alterar i es va mantenir constant.

Pel que fa a l'estudi de la rugositat s'ha vist que la temperatura d'extrusió no és un paràmetre important i el que més afecte hi té, és el gruix, que és causat per l'acumulació de capes. S'ha vist que el gruix que ha generat millors rugositats, és a dir, més baixes és el que només acumula una única capa fina a la part superior, és a dir el gruix de 0,37 mm. La velocitat també és influent, i la tendència que té amb els 3 gruixos és que a més velocitat millor rugositat. Això

és perquè a més velocitat el fil extrudit s'estira i per tant redueix la seva secció fent que se suavitzí la superfície. Per tant, per obtenir una bona rugositat s'ha de treballar amb el nombre mínim de capes fines superiors i amb la velocitat major possible dins el rang del fabricant, en aquest cas de PCL. Coneixent els resultats de la rugositat i el gruix, es veu que el punt central és el que generaria provetes amb una relació gruix-rugositat millor, és a dir, si es volgués una proveta que combines una bona rugositat i un baix error en el gruix, seria la impresa amb els paràmetres del punt central. Cal dir que el punt central no és el que genera l'error més petit pel que fa al gruix, ja que l'òptim és 60 mm/s, gruix 0,27 mm i 190°C, però tot i això l'error en el punt central és relativament baix, i és el punt que genera millors rugositats.

Pel que fa al pes, el paràmetre més influent és la temperatura d'extrusió. La tendència d'aquest model és que a més velocitat el pes disminueix, i a més temperatura el pes augmenta. Això és a causa que a més velocitat el capçal té menys temps per dipositar material i per tant el pes disminueix, i a més temperatura el material flueix més, per tant se'n diposita una major quantitat i conseqüentment el pes augmenta.

A través de l'estudi previ hi ha hagut una sèrie de paràmetres que s'han pogut estudiar com ara el gradient tèrmic. S'ha vist que la temperatura d'extrusió i la que realment surt del capçal difereixen en un grau elevat, sent aproximadament la mateixa que la temperatura de la base. També s'ha pogut comprovar l'anivellament de la taula i de les mesures, i ha resultat ser bastant bo.

Pel que fa als casos industrials estudiats s'ha vist un conjunt d'aplicacions directes en el prototipat, aplicades a la indústria de l'automoció i mèdica, i s'han pogut verificar a través de la comparació de les mesures dimensionals amb els requeriments que demanava cada un dels casos.

Havent estudiat la influència dels paràmetres del procés de FDM, els casos industrials i la recerca en la literatura s'han obtingut una sèrie de recomanacions aplicables un gran ventall de situacions i estudis de FDM, per tant s'ha complert l'objectiu principal plantejat en aquest estudi. Aquestes recomanacions es podrien completar en l'àmbit de la impressió amb la investigació dels paràmetres del procés amb multimaterial, fet que suposaria obrir un ventall enorme en el camp d'estudi de la fabricació additiva amb processos de FDM.

9 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Aquest estudi inclou un sol document, que és la memòria conjuntament amb els annexos.

10 BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Hassanin and K. Jiang, "Net Shape Manufacture of Freestanding Ceramic Micro-components through Soft Lithography," in *Micromanufacturing Engineering and Technology: Second Edition*, Elsevier Inc., 2015, pp. 239–256.
- [2] "Fabricación aditiva: qué es, proceso y usos | VIU." [Online]. Available: <https://www.universidadviu.es/fabricacion-aditiva-que-es-proceso-y-usos/>. [Accessed: 28-May-2020].
- [3] M. Al-Makky and D. Mahmoud, "THE IMPORTANCE OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES IN INDUSTRIAL APPLICATIONS," *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 17, pp. 1–14, Apr. 2016.
- [4] F. Wasserfall, N. Hendrich, and J. Zhang, "Adaptive slicing for the FDM process revisited," in *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2017, vol. 2017-August, pp. 49–54.
- [5] D. S. Thomas and S. W. Gilbert, "Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing A Literature Review and Discussion."
- [6] "The 7 categories of Additive Manufacturing | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." [Online]. Available: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>. [Accessed: 19-May-2020].
- [7] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, "Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing," *Chemical Reviews*, vol. 117, no. 15. American Chemical Society, pp. 10212–10290, 09-Aug-2017.
- [8] A. Bandyopadhyay and B. Heer, "Additive manufacturing of multi-material structures," *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 129. Elsevier Ltd, pp. 1–16, 01-Jul-2018.
- [9] "FDM technology: The advantages of FDM printing | dddrop." [Online]. Available: <https://www.dddop.com/fdm-technology/>. [Accessed: 20-May-2020].
- [10] A. Alafaghani, A. Qattawi, B. Alrawi, and A. Guzman, "Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach," *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 791–803, Jan. 2017.
- [11] S. Mahmood, A. J. Qureshi, and D. Talamona, "Taguchi based process optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling," *Additive*

- Manufacturing*, vol. 21, pp. 183–190, May 2018.
- [12] L. M. Galantucci, F. Lavecchia, and G. Percoco, “Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 189–192, Jan. 2009.
- [13] T. S. Lumpe, J. Mueller, and K. Shea, “Tensile properties of multi-material interfaces in 3D printed parts,” *Materials and Design*, vol. 162, pp. 1–9, Jan. 2019.
- [14] J. Yin, C. Lu, J. Fu, Y. Huang, and Y. Zheng, “Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion,” *Materials and Design*, vol. 150, pp. 104–112, Jul. 2018.
- [15] S. T. Amancio-Filho and J. F. dos Santos, “Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 49, no. 8, pp. 1461–1476, Aug. 2009.
- [16] J. P. Moore and C. B. Williams, “Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 675–685, Oct. 2015.
- [17] I. Q. Vu, L. B. Bass, C. B. Williams, and D. A. Dillard, “Characterizing the effect of print orientation on interface integrity of multi-material jetting additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 22, pp. 447–461, Aug. 2018.
- [18] W. Lin, H. Shen, G. Xu, L. Zhang, J. Fu, and X. Deng, “Single-layer temperature-adjusting transition method to improve the bond strength of 3D-printed PCL/PLA parts,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 115, pp. 22–30, Dec. 2018.
- [19] A. Haryńska, I. Gubanska, J. Kucinska-Lipka, and H. Janik, “Fabrication and Characterization of Flexible Medical-Grade TPU Filament for Fused Deposition Modeling 3DP Technology,” *Polymers*, vol. 10, no. 12, p. 1304, Nov. 2018.
- [20] S. M. Oskui *et al.*, “Assessing and Reducing the Toxicity of 3D-Printed Parts,” *Environmental Science and Technology Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, Jan. 2016.
- [21] D. Ronca *et al.*, “Bone Tissue Engineering: 3D PCL-based Nanocomposite Scaffolds with Tailored Properties,” in *Procedia CIRP*, 2016, vol. 49, pp. 51–54.
- [22] W. Wang, B. Huang, J. J. Byun, and P. Bártolo, “Assessment of PCL/carbon material scaffolds for bone regeneration,” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 93, pp. 52–60, May 2019.
- [23] J. Mueller, K. Shea, and C. Daraio, “Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design,” *Materials and Design*, vol. 86, pp. 902–912, Dec. 2015.

Bibliografia WEB

- [3W.1] [(Standard Terminology for additive Manufacturing Technologies, 2012).] [Informació]
Recuperat de
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [3W.2] Trimaker, 2017, "Esquema representatiu d'una màquina de FDM" [Figura]. Recuperat de <https://trimaker.com/guia-impresion-3d-2-que-es-fdm-2/>
- [3W.3] Al Williams, 2019, "Procés d'introducció del cos roscat" [Figura]. Recuperat de (<https://hackaday.com/2019/03/26/threaded-3d-printed-part-comparison/7>)
- [3W.4] Ultimaker ,2016, "Característiques Ultimaker" [Informació]. Recuperat de www.Ultimaker.com
- [3W.5] 3NTR, 2017, "Característiques 3NTR" [Informació]. Recuperat de www.3NTR.com
- [3W.6] Filoalfa, 2020, "Fitxes tècniques ABS i Thermec ZED" [Informació]. Recuperat de www.Filoalfa3d.com
- [3W.7] Elogio AM, 2019, "Fitxa tècnica PCL" [Informació]. Recuperat de <https://www.3d4makers.com/>

ANNEXOS

ANNEX A DADES EXPERIMENTALS ASSAJOS PREVIS

A.1 Dades experimentals assaig previ 1

Taula 62: Dades experimentals Assaig previ 1

	Part 1									Part 2		
	Nivell 1			Nivell 2			Nivell 3			Nivell 1	Nivell 2	Nivell 3
	Assaig 1.1	Assaig 1.2	Assaig 1.3	Assaig 1.4	Assaig 1.5	Assaig 1.6	Assaig 1.7	Assaig 1.8	Assaig 1.9	Assaig 1.10	Assaig 1.11	Assaig 1.12
Gruix Teòric (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Temperatura extrusió (°C)	130	130	130	160	160	160	190	190	190	190	190	190
Velocitat impressió (mm/s)	20	40	60	20	40	60	20	40	60	30	30	30
Temperatura base (°C)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	30	40	60
Alçada de capa (mm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Temperatura taller (°C)	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Ventilador (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Temps impressió (minuts)	46	23	16	46	23	16	46	23	16	32	32	32
Mesura gruix 1 (mm)	0,572	0,451	0,449	0,500	0,477	0,517	0,551	0,515	0,479	0,588	0,543	0,495
Mesura gruix 2 (mm)	0,474	0,435	0,424	0,519	0,520	0,449	0,543	0,457	0,432	0,592	0,473	0,467
Mesura gruix 3 (mm)	0,508	0,471	0,451	0,575	0,461	0,513	0,630	0,605	0,595	0,682	0,546	0,489
Mesura gruix 4 (mm)	0,479	0,447	0,437	0,491	0,485	0,454	0,544	0,479	0,469	0,520	0,509	0,455
Mesura gruix 5 (mm)	0,480	0,437	0,430	0,498	0,464	0,457	0,499	0,460	0,448	0,508	0,480	0,451
Mitjana gruix (mm)	0,503	0,448	0,438	0,517	0,481	0,478	0,553	0,503	0,485	0,578	0,510	0,471
Diferència (mm)	0,003	0,052	0,062	0,017	0,019	0,022	0,053	0,003	0,015	0,078	0,010	0,029
Diferència (%)	0,52 %	10,36 %	12,36 %	3,32 %	3,72 %	4,40 %	10,68 %	0,64 %	3,08 %	15,60 %	2,04 %	5,72 %

Taula 63: Paràmetres de la PCL recomanats per el fabricant (font: [3W.7])

Temperatura del lliit (°C)	30 - 45
Temperatura extrusor (°C)	130 – 170
Velocitat impressió (mm/s)	20 – 40
Refrigeració ventilador (%)	100

A.2 Dades experimentals assaig previ 2

Taula 64: Dades experimentals Assaig previ 2

	Assaig 2.1	Assaig 2.2	Assaig 2.3	Assaig 2.4	Assaig 2.5
	Posició (1)	Posició (2)	Posició (3)	Posició (4)	Posició (5)
<i>Gruix teòric (mm)</i>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	190	190	190	190	190
<i>Velocitat impressió (mm/s)</i>	40	40	40	40	40
<i>Temperatura base (°C)</i>	40	40	40	40	40
<i>Alçada de capa (mm)</i>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Temperatura taller (°C)</i>	19	19	19	19	19
<i>Ventilador (%)</i>	100	100	100	100	100
<i>Temps impressió (minuts)</i>	32	32	32	32	32
<i>Mesura gruix 1 (mm)</i>	0,519	0,504	0,489	0,517	0,508
<i>Mesura gruix 2 (mm)</i>	0,471	0,465	0,476	0,498	0,507
<i>Mesura gruix 3 (mm)</i>	0,536	0,494	0,506	0,504	0,468
<i>Mesura gruix 4 (mm)</i>	0,504	0,495	0,491	0,461	0,460
<i>Mesura gruix 5 (mm)</i>	0,501	0,459	0,479	0,504	0,487
<i>Mitjana gruix (mm)</i>	0,506	0,483	0,488	0,497	0,486
<i>Diferència respecte la mitja (%)</i>	1,41%	0,87%	0,39%	0,47%	0,61%

A.3 Dades experimentals assaig previ 3

Taula 65: Dades experimentals assaig previ 3

	Assaig 3.1	Assaig 3.2	Assaig 3.3	Assaig 3.4	Assaig 3.5	Assaig 3.6
<i>Gruix teòric (mm)</i>	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	160	160	160	160	160	160
<i>Velocitat impressió (mm/s)</i>	40	40	40	40	40	40
<i>Temperatura base (°C)</i>	40	40	40	40	40	40
<i>Temperatura màxima càmera tèrmica (°C)</i>	45,4	46	45,3	46	45,5	46
<i>Alçada de capa (mm)</i>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Temperatura taller (°C)</i>	19	19	19	19	19	19
<i>Ventilador (%)</i>	100	100	100	100	100	100
<i>Temps impressió (minuts)</i>	32	16	32	16	32	16
<i>Mesura gruix 1 (mm)</i>	0,455	0,275	0,474	0,276	0,5	0,285
<i>Mesura gruix 2 (mm)</i>	0,431	0,265	0,456	0,262	0,473	0,251
<i>Mesura gruix 3 (mm)</i>	0,473	0,279	0,473	0,271	0,495	0,268
<i>Mesura gruix 4 (mm)</i>	0,421	0,272	0,439	0,273	0,441	0,267
<i>Mesura gruix 5 (mm)</i>	0,434	0,256	0,472	0,273	0,472	0,275
<i>Mitjana gruix (mm)</i>	0,4428	0,2694	0,4628	0,271	0,4762	0,2692
<i>Diferència (mm)</i>	0,0572	0,0194	0,0372	0,021	0,0238	0,0192
<i>Diferència temperatura (°C)</i>	114,6	114	114,7	114	114,5	114

A.4 Dades experimentals assaig previ 4

Taula 66: Dades experimentals assaig previ 4

	Assaig 4.1	Assaig 4.2	Assaig 4.3	Assaig 4.4	Assaig 4.5	Assaig 4.6	Assaig 4.7	Assaig 4.8
<i>Gruix teòric (mm)</i>	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	160	160	160	160	160	160	160	160
<i>Velocitat impressió (mm/s)</i>	40	40	40	40	40	40	40	40
<i>Temperatura base (°C)</i>	60	60	40	40	60	60	40	40
<i>Alçada de capa (mm)</i>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Temperatura taller (°C)</i>	19	19	19	19	19	19	19	19
<i>Ventilador (%)</i>	100	100	100	100	100	100	100	100
<i>Temps impressió (minuts)</i>	40	40	40	40	30	30	30	30
<i>Rugositat (μm)</i>	1,301	1,399	2,378	1,451	1,186	1,346	1,608	1,729
<i>Mitjana rugositat (μm)</i>	1,350		1,915		1,266		1,669	

A.5 Dades experimentals assaig previ 5

Taula 67: Dades experimentals assaig previ 5

	Test gruix de capa					Testos alçades capa			
	Part 1					Part 2			
	Assaig 5.1	Assaig 5.2	Assaig 5.3	Assaig 5.4	Assaig 5.5	Assaig 5.6	Assaig 5.7	Assaig 5.8	Assaig 5.9
Gruix teòric (mm)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,6	0,6	0,4	0,4
Temperatura extrusió (°C)	160	160	160	160	160	160	160	160	160
Velocitat impressió (mm/s)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Temperatura base (°C)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Alçada de capa (mm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Temperatura taller (°C)	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Ventilador (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Temps impressió (minuts)	32	32	32	32	32	60	60	40	40
Mesura gruix 1 (mm)	0,276	0,272	0,279	0,279	0,287	0,599	0,577	0,393	0,393
Mesura gruix 2 (mm)	0,257	0,258	0,280	0,276	0,270	0,617	0,624	0,394	0,394
Mesura gruix 3 (mm)	0,280	0,283	0,301	0,288	0,245	0,601	0,611	0,412	0,412
Mesura gruix 4 (mm)	0,256	0,282	0,272	0,263	0,241	0,595	0,600	0,405	0,405
Mesura gruix 5 (mm)	0,264	0,247	0,267	0,276	0,266	0,591	0,597	0,386	0,386
Mitjana gruix (mm)	0,267	0,268	0,280	0,276	0,262	0,601	0,602	0,398	0,398
Diferència (mm)	0,117	0,118	0,130	0,126	0,112	0,001	0,002	0,002	0,002

ANNEX B RESULTATS DEL DISSENY D'EXPERIMENTS

B.1 Resultats experimentals

A continuació es mostren els resultats del disseny d'experiments, per a cada part s'han fet una sèrie de diagrames i estadístics descriptius per tal de veure la tendència de les dades i veure la forma que segueix el model. Per a cada una de les 5 parts en les que s'han dividit els resultats s'han obtingut els estadístics descriptius, que permeten tenir una visió global de les dades, la mitjana, mediana i la desviació estàndard. Un histograma per tal de veure la tendència que segueixen les dades, per tenir un element més visual dels estadístics descriptius i veure si segueixen una distribució normal. També es presenta el diagrama d'efectes principals, per tal de veure la tendència de les dades per l'efecte dels elements significatius. El diagrama de caixes s'utilitza per veure l'agrupació de dades en cada punt del model, i veure la tendència que segueix cada un d'aquests punts. Finalment es presenta l'estudi factorial i s'utilitza per veure quins elements són significatius i trobar el model que defineix el cas d'estudi en cada una de les parts. Es complementa amb la representació de gràfics en 3D en format superfície.

Els resultats experimentals estan dividits en 5 parts:

- **Part 1**

En la part 1 es fa l'anàlisi dels 3 gruixos per separat, per tal de veure la influència dels paràmetres de procés en cada un dels gruixos. Consisteix en un estudi 2^k +punt central, pels gruixos de 0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm. No s'eliminen els paràmetres del procés no significatius, ja que això s'ha fet pel model final (Part 3). El resultat estudiat, també anomenat resposta, és el gruix de la peça final. L'objectiu principal es veure la tendència de les dades per a cada gruix, a través de les següents eines:

- Estadístics descriptius
- Histograma
- Diagrama d'Efectes principals
- Diagrama de caixes
- Estudi factorial i Interaccions

En aquesta primera part, les variables són la temperatura i la velocitat, i s'estudia cada gruix per separat, tal com es veu a la Taula 68.

Taula 68: Variables de la part 1

Paràmetre	Nivell 1	Punt central	Nivell 2
Temperatura extrusió (°C)	130	160	190
Velocitat d'impressió (mm/s)	20	40	60

- **Part 2**

A la segona part s'estudia la influència del possible desnivellament de la taula a través de les mesures dels gruixos als 5 punts diferents de la peça tal com es veu a la Figura 70.



Figura 70: Punts de mesura de la proveta

S'ha fet una anàlisi ANOVA d'un sol factor sobre cada un dels 3 gruixos per G1, G2, G3, G4, G5, i s'ha mirat si és significatiu. Les variables per a aquesta segona part són la temperatura i la velocitat, tal com es veu a la Taula 69.

Taula 69: Variables de la part 2

Paràmetre	Nivell 1	Punt central	Nivell 2
Temperatura extrusió (°C)	130	160	190
Velocitat d'impressió (mm/s)	20	40	60

Es representen:

- Estadístics descriptius
- Histograma
- Diagrama d'Efectes principals
- Diagrama de caixes

- **Part 3**

La part 1 i 2 formen part de l'estudi inicial, i la part 3 consisteix en una depuració de l'estudi, a través de la generació d'un model 2^k amb punt central, amb 3 variables d'estudi: El gruix teòric de la peça, la velocitat i la temperatura. Ara no s'estudien els gruixos per separat ja que el gruix passa a ser un paràmetre. L'objectiu és fer un model per predir la desviació, i aquí si s'eliminen els paràmetres no significatius.

Es representen:

- Estudi factorial
- Efectes principals
- Diagrama de caixes
- Estadístic descriptiu
- Superfície
- Interaccions
- Diagrama de Cub

Taula 70: Variables de la part 3

<i>Paràmetre</i>	Nivell 1	Punt entremig	Nivell 2
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	130	160	190
<i>Velocitat d'impressió (mm/s)</i>	20	40	60
<i>Gruix (mm)</i>	0,27	0,37	0,57

Tal com es veu a la Taula 70, en aquesta tercera part hi ha 3 variables, la temperatura, el gruix i la velocitat, i s'estudia amb un punt entremig. Aquest punt entremig, tenint en compte els dos gruixos dels extrems, de 0,27 mm i 0,57 mm correspondria a 0,42 mm. Aquests 0,42 mm que corresponen al punt central teòric, generen una discrepància respecte al valor experimental entremig que és de 0,37 mm. Aquesta diferència entre els 2 valors ve donada pels gruixos teòrics, que són 0,2 mm, 0,4 mm i 0,6 mm i els que realment genera la impressora, que són de 0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm i el punt de 0,37 mm no coincideix amb el punt central entre els dos gruixos reals experimentals.

El que s'ha fet és assumir com a gruix central 0,37 mm tot i no ser el punt central real experimental. Aquesta consideració s'ha pogut fer, ja que com que en aquesta tercera part s'estudia l'error respecte al valor experimental imprès, s'ha assumit que no hi hauria massa variació entre el 0,42 mm i el de 0,37 mm, respecte al valor teòric imprès, és a dir, la diferència que hi pugui haver entre 0,42 mm - valor real imprès i 0,37 mm - valor real imprès s'ha considerat com a assumible, tot i que caldrà tenir en compte que si el punt central s'estableix

com a un mínim o màxim, aquest podria estar o més per sota o per sobre si es considerés el punt central real de 0,42 mm.

Cal dir també que si el gruix que hagués generat per imprimir fos de 0,42 mm, sense modificar el codi de la impressora, el gruix imprès hagués estat també de 0,37 mm, degut de la manera que el post processador el genera.

- **Part 4**

Les variables d'aquesta part són el gruix teòric de la peça, la velocitat i la temperatura. El gruix passarà a ser un paràmetre d'igual manera que la part 3 i les consideracions fetes pel gruix central són les mateixes que en la part 3. L'objectiu es fer un model per predir la rugositat, i aquí si s'eliminen els paràmetres no significatius. S'estudia la influència d'aquests 3 paràmetres sobre la rugositat.

Es representen:

- Estudi factorial
- Efectes principals
- Diagrama de caixes
- Estadístic descriptiu
- Superfície
- Interaccions
- Diagrama de Cub

Taula 71: Variables de la part 4

<i>Paràmetre</i>	Nivell 1	Punt entremig	Nivell 2
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	130	160	190
<i>Velocitat d'impressió (mm/s)</i>	20	40	60
<i>Gruix (mm)</i>	0,27	0,37	0,57

A la Taula 71 es poden veure les variables de la Part 4.

- **Part 5**

En la part 5 es fa l'anàlisi dels 3 gruixos per separat, per tal de veure la tendència del pes sobre cada un dels gruixos i comparar-los. S'ha fet un estudi 2^k +punt central, pels gruixos de 0,27 mm, 0,37 mm i 0,57 mm. L'objectiu principal és veure la tendència del pes per a cada gruix. Els paràmetres són la velocitat i la temperatura d'extrusió, els mateixos que la part 1.

Es representen:

- Histograma
- Efectes principals
- Diagrama de caixes
- Estudi factorial
- Interaccions

Part 1

Gruix 0,27

- Estadístics descriptius

Taula 72: Estadístics descriptius pel gruix de 0,27 mm

Variable	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
Mitjana gruix (mm)	20	0,27121	0,00415	0,01856	0,2733

Com es pot veure a la Taula 72 la mitjana és pràcticament 0,27 mm, que es el gruix teòric imprès. I la desviació estàndard és de l'ordre de la centèsima.

- Histograma del gruix imprès

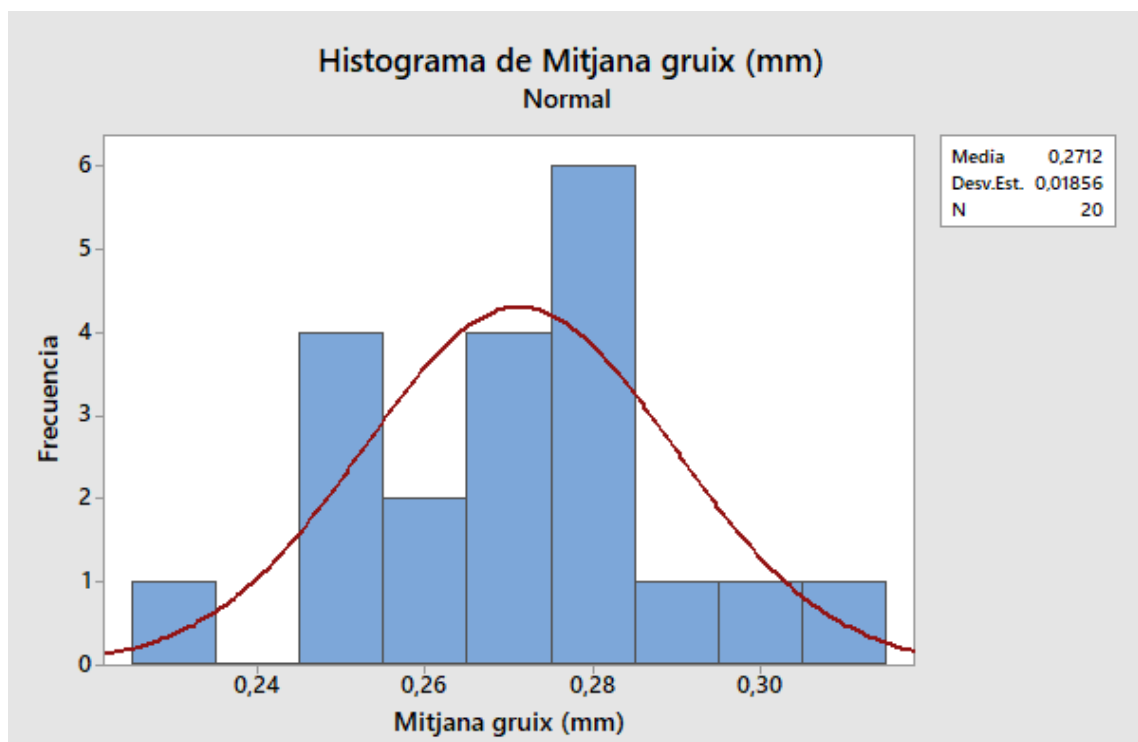


Figura 71: Histograma pel gruix de 0,27 mm

Tal i com es pot veure a la Figura 71, aparentment la distribució és bastant normal, tot i que hi ha una certa acumulació de dades a 0,28 mm, la desviació estàndard és de 0,01856 mm.

- Efectes principals

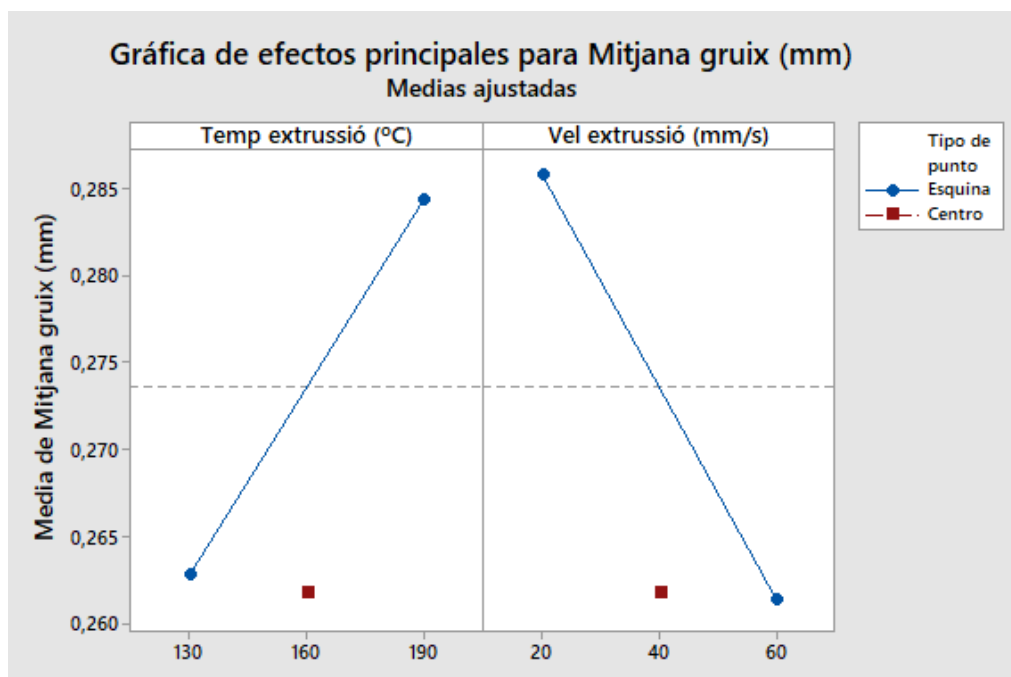


Figura 72: Diagrama d'efectes principals pel gruix de 0,27 mm

Tal com es pot veure a la Figura 72 aparentment tant a temperatura com la velocitat tenen un efecte significatiu sobre el gruix, i el punt central en el cas de la temperatura és un mínim.

- Diagrama de caixes

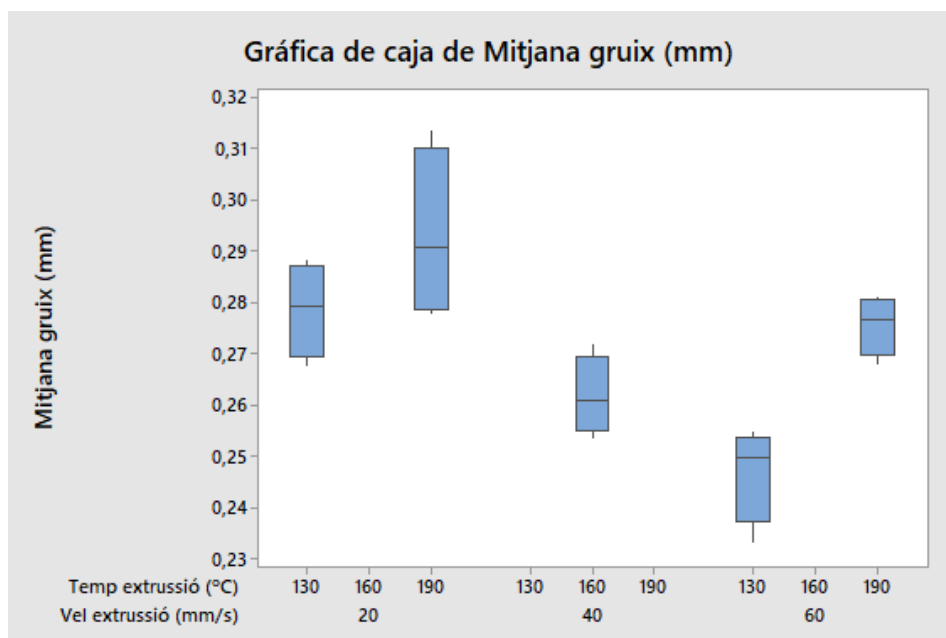


Figura 73: Diagrama de caixes pel gruix de 0,27 mm

Segons el que es pot veure a la Figura 73, sembla que la tendència és que a més velocitat el gruix tendeix a disminuir, i a més temperatura a augmentar.

- Estudi factorial

A l'estudi factorial s'ha dissenyat un model amb dos factors (velocitat i temperatura), amb un punt central, i les dades obtingudes han estat les de la Taula 73. Amb els valors de la Taula 73, es poden considerar com influents la temperatura i la velocitat, concordant amb el diagrama d'efectes principals i de caixes. La combinació dels dos no ho és, ja que $0,061 > 0,05$, però per molt poc, i per tant es podria arribar a considerar també significatiu.

Taula 73: P valors del model pel gruix de 0,27 mm

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	0,001866	17,17	0,001	Si
<i>Velocitat extrusió (mm/s)</i>	0,002401	22,09	0,000	SI
<i>Temp extrusió* Vel extrusió</i>	0,000199	1,83	0,061	NO

L'ajustament quadràtic del model es el de la Taula 74.

Taula 74: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0104258	75,08%	68,44%	55,71%

I l'equació que defineix el model ha estat la següent:

$$\begin{aligned}
 \text{Gruix} = & 0,2781 + 0,000125 * \text{Temp extrusió } (^{\circ}\text{C}) - 0,00155 * \text{Vel extrusió } \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) \\
 & + 0,000006 * \text{Temp extrusió} (^{\circ}\text{C}) * \text{Vel extrusió } \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) - 0,1182 \\
 & * \text{Punt central}
 \end{aligned}$$

- Gràfica interacció

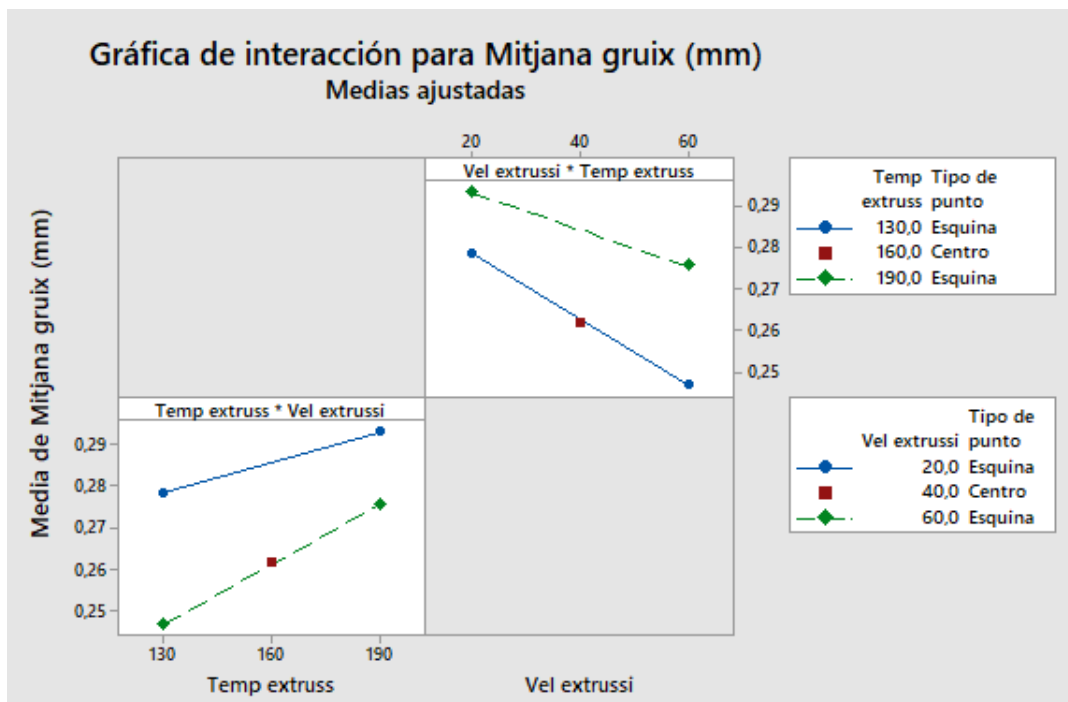


Figura 74: Gràfica d'interaccions pel gruix de 0,27 mm

Tal com es pot veure a la Figura 74 les interaccions entre la velocitat i la temperatura.

Gruix 0,4 mm

- Estadístics descriptius

Taula 75: Estadístics descriptius pel gruix de 0,37 mm

Variable	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
Mitjana gruix (mm)	20	0,38482	0,00457	0,02042	0,3865

Com es pot veure a la Taula 75 la mitjana és pràcticament 0,37 mm, que és el gruix teòric imprès. La desviació és de l'ordre de la centèsima.

- Histograma

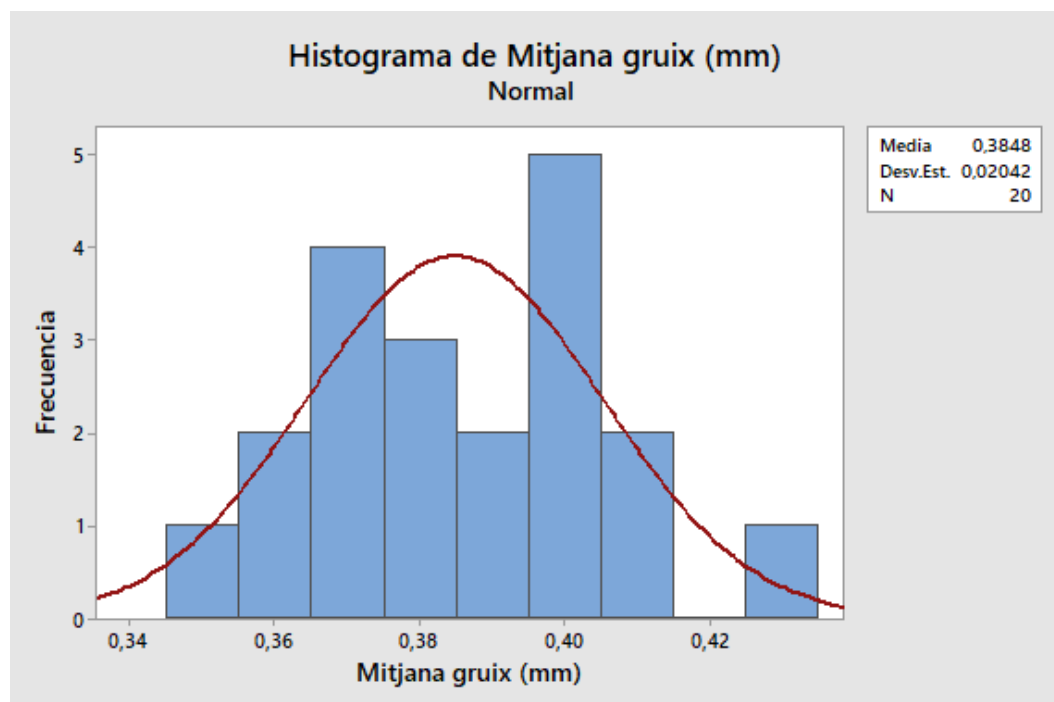


Figura 75: Histograma pel gruix de 0,37 mm

Tal com es pot veure a la Figura 75, aparentment la distribució és normal, tot i que hi ha una certa acumulació de dades a 0,40 mm, la desviació estàndard és de 0,02042 mm, major que pel gruix de 0,27 mm.

- Efectes principals

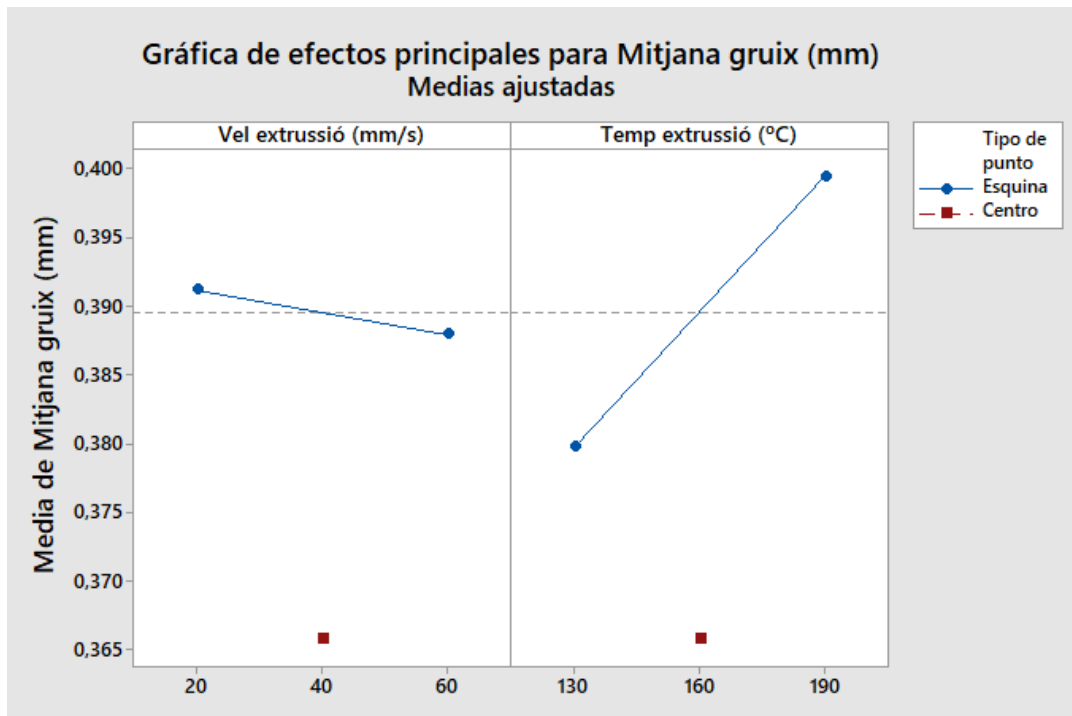


Figura 76: Diagrama d'efectes principals pel gruix de 0,37 mm

Tal com es pot veure a la Figura 76 aparentment la velocitat no és tan significativa com la temperatura. En els dos casos però, el punt central és un mínim, per tant pot tenir un cert comportament quadràtic.

- Diagrama de caixes

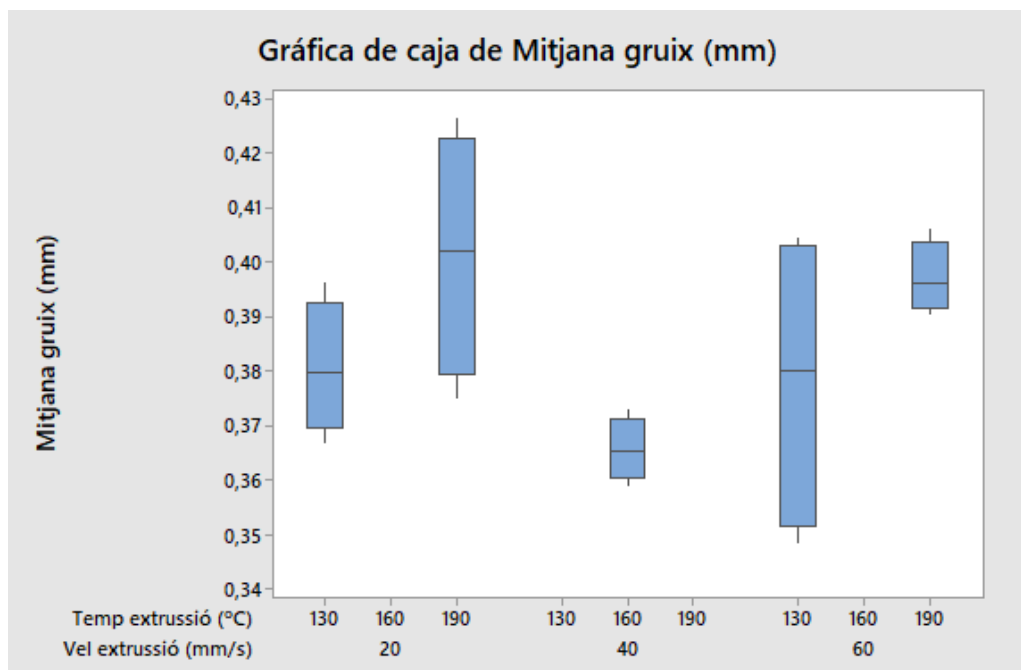


Figura 77: Diagrama de caixes pel gruix de 0,37 mm

Segons el que es pot veure a la Figura 77, sembla que la tendència és que a més velocitat el gruix tendeix a disminuir, i a més temperatura a augmentar. Aparentment hi ha més variabilitat de valors que en el cas de 0,27 mm, ja que les caixes són més llargues, això també ho ha indicat l'histograma.

- Estudi factorial

A l'estudi factorial s'ha dissenyat un model amb dos factors (velocitat i temperatura, amb un punt central, i les dades obtingudes han estat les de la Taula 76. Per tant es poden considerar com influent la temperatura, analitzant els P valors. La combinació dels dos no ho serà, ja que $0,0923 > 0,05$, i concorda amb el diagrama d'efectes principals i de caixes. La velocitat d'extrusió tampoc seria significativa en aquest cas.

Taula 76: P valors del model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,001560	5,19	0,038	Si
Velocitat extrusió (mm/s)	0,000042	0,14	0,713	NO
Temp extrusió* Vel extrusió	0,000003	0,01	0,923	NO

L'ajustament quadràtic del model és el de la Taula 77.

Taula 77: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0173354	43,10%	27,92%	0%

I l'equació que defineix el model ha estat la següent:

$$\begin{aligned}
 \text{Gruix} = & 0,3356 + 0,000003 * \text{Vel extrusió} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) + 0,000357 * \text{Temp extrusió} (^\circ\text{C}) \\
 & - 0,000001 * \text{Temp extrusió}(^\circ\text{C}) * \text{Vel extrusió} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) - 0,02377 \\
 & * \text{Punt central}
 \end{aligned}$$

- Interaccions

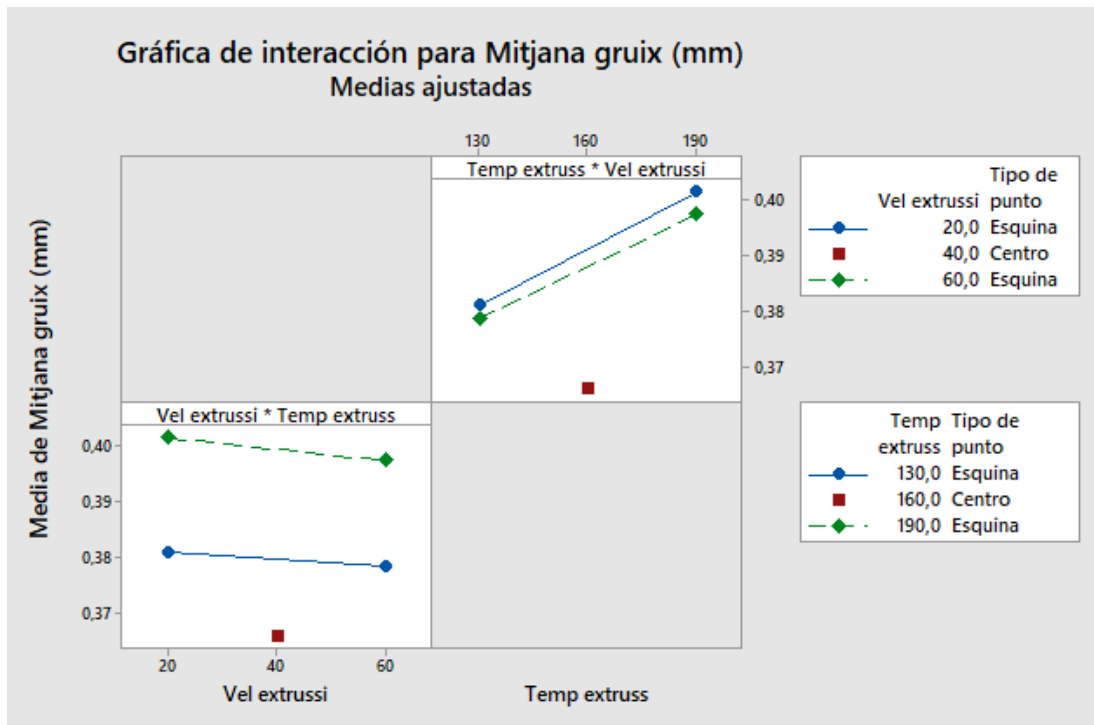


Figura 78: Interaccions pel gruix de 0,37 mm

Tal com es veu a la Figura 78 no hi ha interaccions entre els dos termes, el punt central s'estableix com a un mínim en els dos casos.

Gruix 0,6 mm

- Estadístics descriptius

Taula 78: Estadístics descriptius pel gruix de 0,57 mm

<i>Variable</i>	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
<i>Mitjana gruix (mm)</i>	20	0,58699	0,00706	0,03158	0,5958

Com es pot veure a la Taula 78 la mitjana és de 0,5869 mm, i el gruix teòric imprès que és de 0,57 mm. La desviació és de l'ordre de la centèsima.

- Histograma

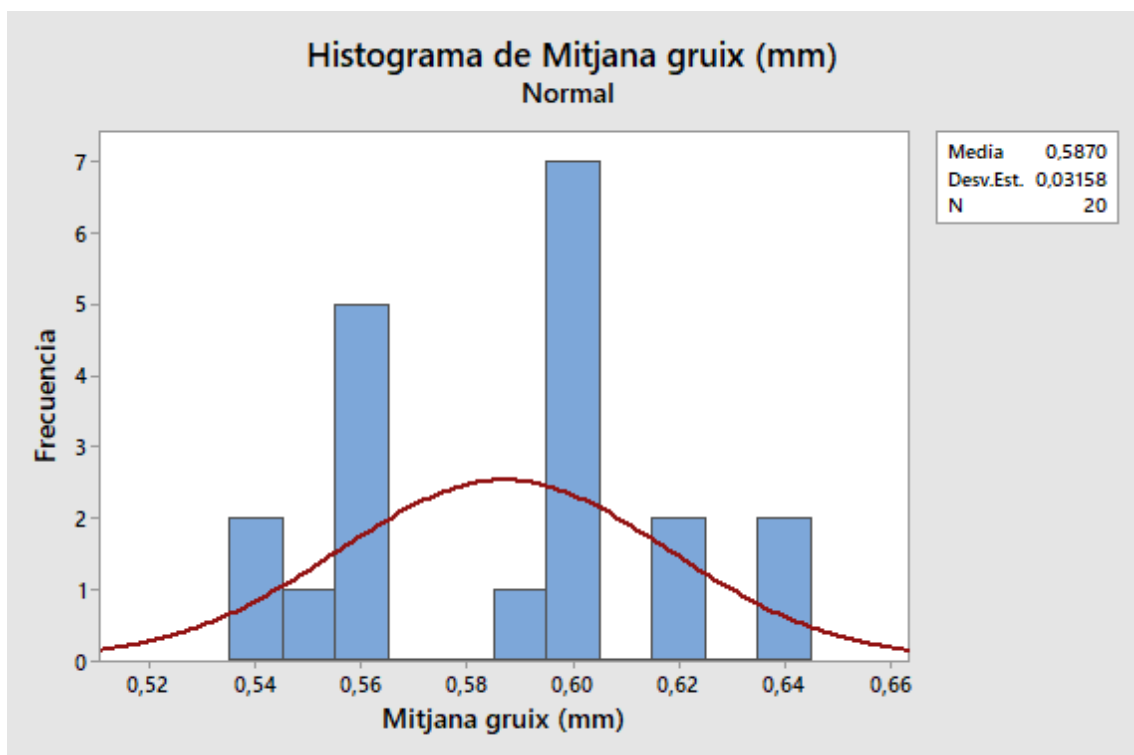


Figura 79: Histograma pel gruix de 0,57 mm

Tal com es pot veure a la Figura 79, aparentment la distribució és bastant normal, tot i que hi ha una certa acumulació de dades a 0,60 mm. La desviació estàndard és de 0,03158 mm, major que pel gruix de 0,37 mm. Dels 3 gruixos és el que la desviació és major, ja que és en el que s'acumulen més capes, i per tant pot ser que s'acumuli l'error.

- Efectes principals

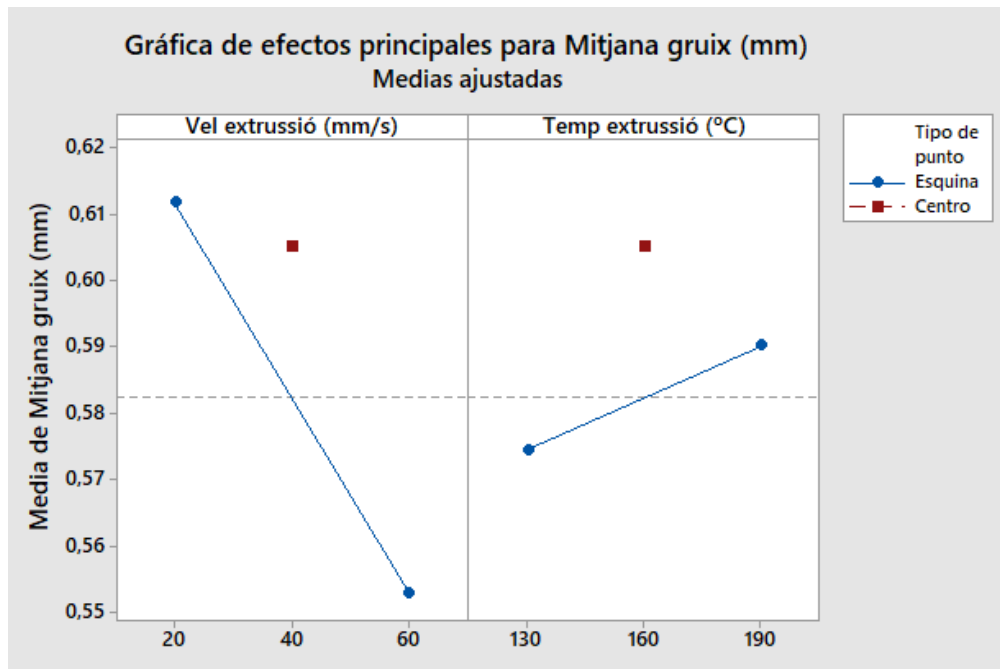


Figura 80: Diagrama d'efectes principals pel gruix de 0,57 mm

Tal com es pot veure a la Figura 80 aparentment la temperatura no és tan significativa com la velocitat.

- Diagrama de caixes

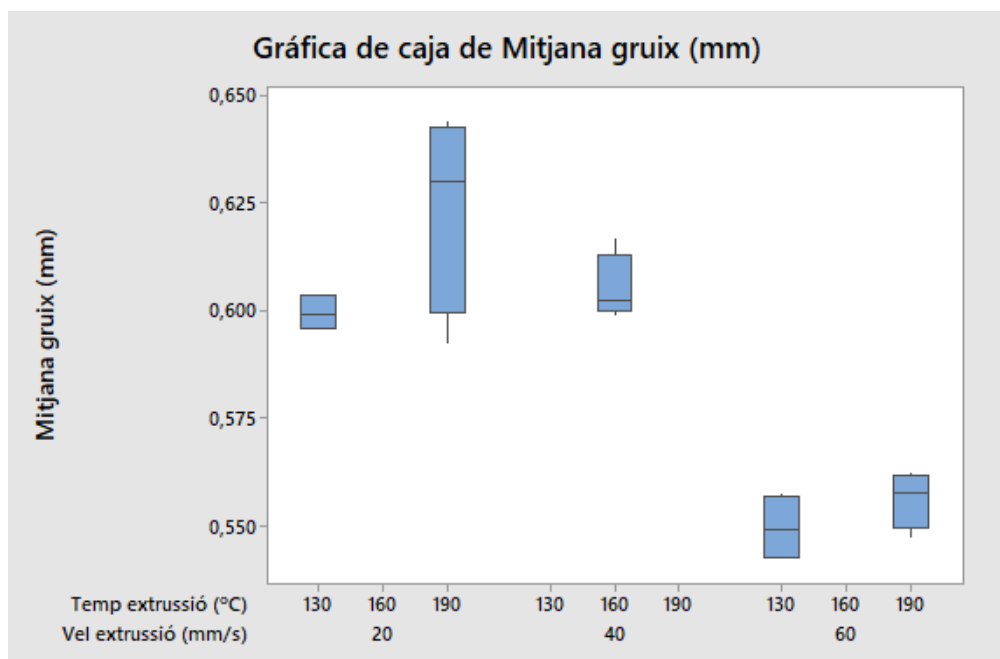


Figura 81: Diagrama de caixes pel gruix de 0,57 mm

Segons el que es pot veure a la Figura 81, sembla que la tendència és que a més velocitat el gruix tendeix a disminuir, i a més temperatura a augmentar. Aparentment hi ha menys

variabilitat de valors que en el cas de 0,37 mm, ja que les caixes són bastant més curtes, tot i això la desviació estàndard és major.

- Estudi factorial

A l'estudi factorial s'ha dissenyat un model amb dos factors (velocitat i temperatura), amb un punt central, i les dades obtingudes han estat les de la Taula 79. Per tant es poden considerar com influents la temperatura i la velocitat. La combinació dels dos no ho serà, ja que $0,923 > 0,05$.

Taula 79: P valors del model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	0,000980	6,74	0,000	SI
<i>Velocitat extrusió (mm/s)</i>	0,01383	95,4	0,02	SI
<i>Temp extrusió* Vel extrusió</i>	0,000313	2,16	0,923	NO

L'ajustament quadràtic del model es el de la Taula 80.

Taula 80: Ajustament quadràtic pel gruix de 0,57 mm

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,01205	88,5%	85,43%	79,55%

I l'equació que defineix el model ha estat la següent:

$$\begin{aligned}
 \text{Gruix} = & 0,5523 + 0,00029 * \text{Vel extrusió} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) + 0,000556 * \text{Temp extrusió} (^\circ\text{C}) \\
 & - 0,000007 * \text{Temp extrusió}(^\circ\text{C}) * \text{Vel extrusió} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) + 0,0227 \\
 & * \text{Punt central}
 \end{aligned}$$

- Interaccions

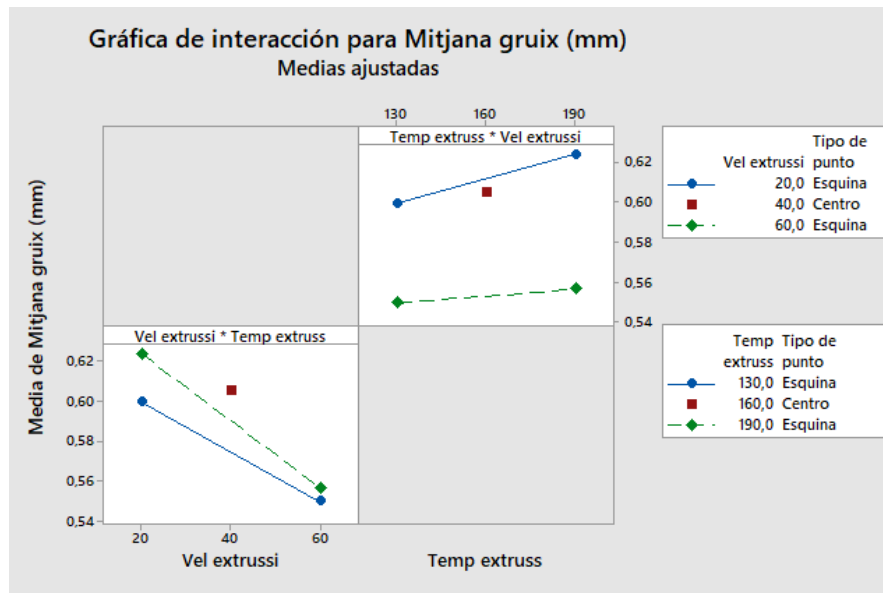


Figura 82: Interaccions pel gruix de 0,57 mm

Tal com es pot veure a la Figura 82 en cap dels dos casos el punt central suposa un mínim o un màxim. I tal com s'ha vist en el P valor, no és significativa la interacció entre la velocitat i la temperatura, les línies són bastant paral·leles.

Part 2

Anàlisi del desnivellat

En aquesta part s'ha realitzat una ANOVA d'un sol factor per cada gruix per separat per les 5 posicions, per tal de veure si hi ha influència de la posició de mesura en els 3 gruixos.

Taula 81: P valors de l'anàlisi de la posició de mesura.

Gruix (mm)	SC Ajustada	Valor F	P valor
0,27	0,00177	0,74	0,565
0,37	0,00142	0,55	0,696
0,57	0,01282	1,94	0,112

Tal com es pot veure a la Taula 81, en cap dels 3 gruixos la posició de mesura surt com a significativa, ja que el P valor en els 3 casos és major a 0,05. A continuació es compararan els histogrames de cada un dels gruixos i els diagrames de caixes.

- Histogrames

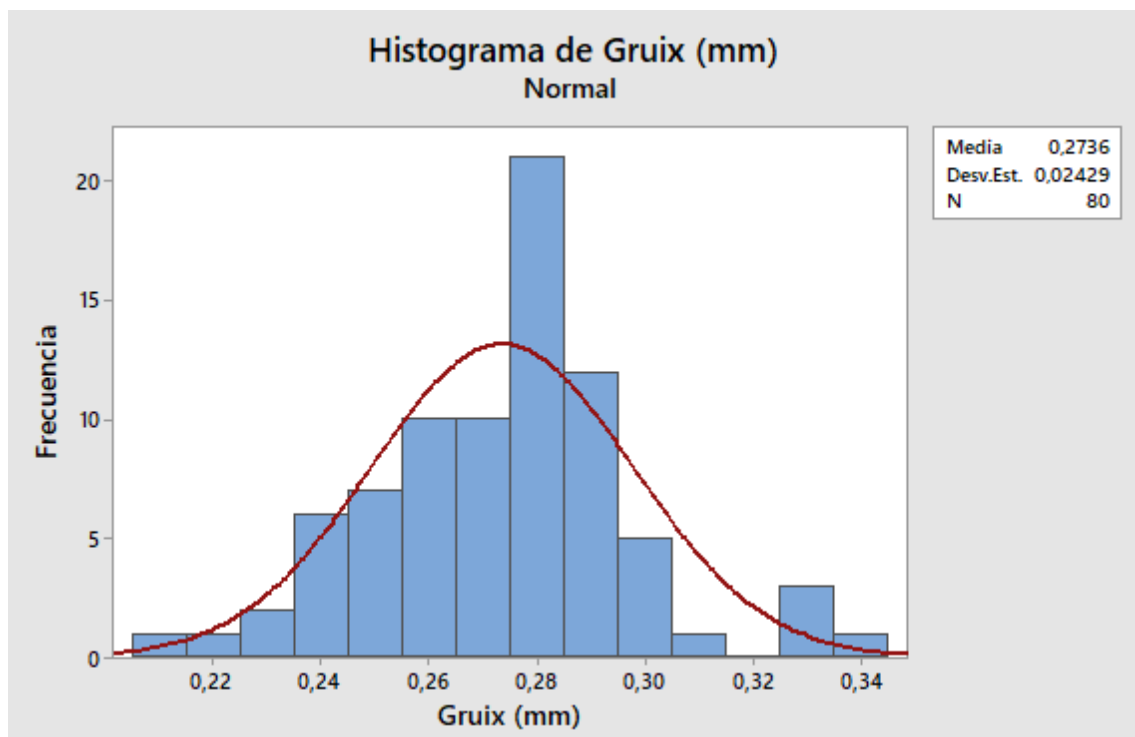


Figura 83: Histograma pel gruix de 0,27 mm

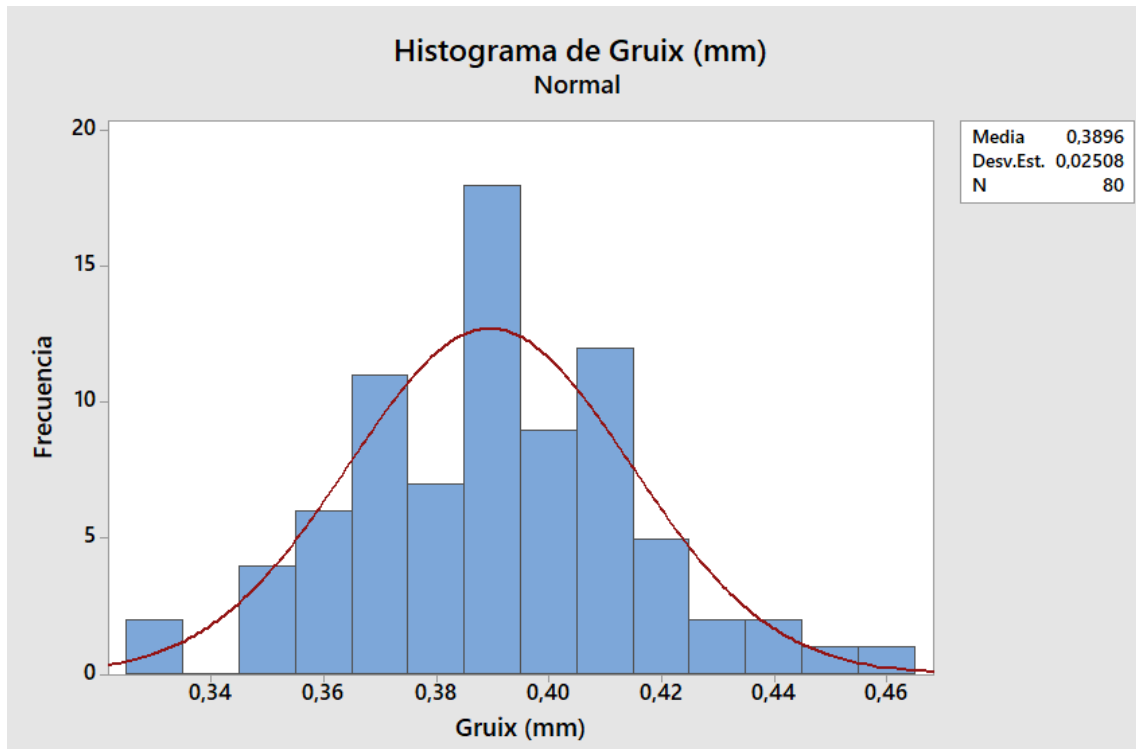


Figura 84: Histograma pel gruix de 0,37 mm

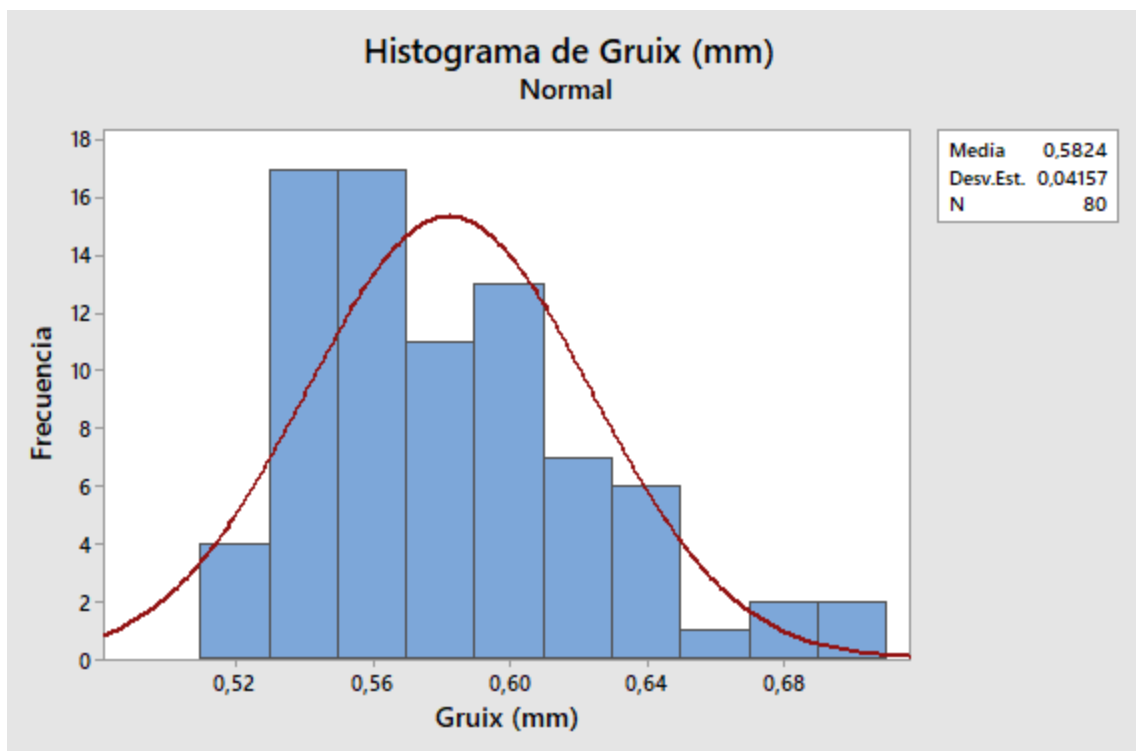


Figura 85: Histograma pel gruix de 0,57 mm

Com es pot veure si es comparen les desviacions estàndard, a mesura que augmenta el gruix, aquesta augmenta.

- Diagrames de caixes

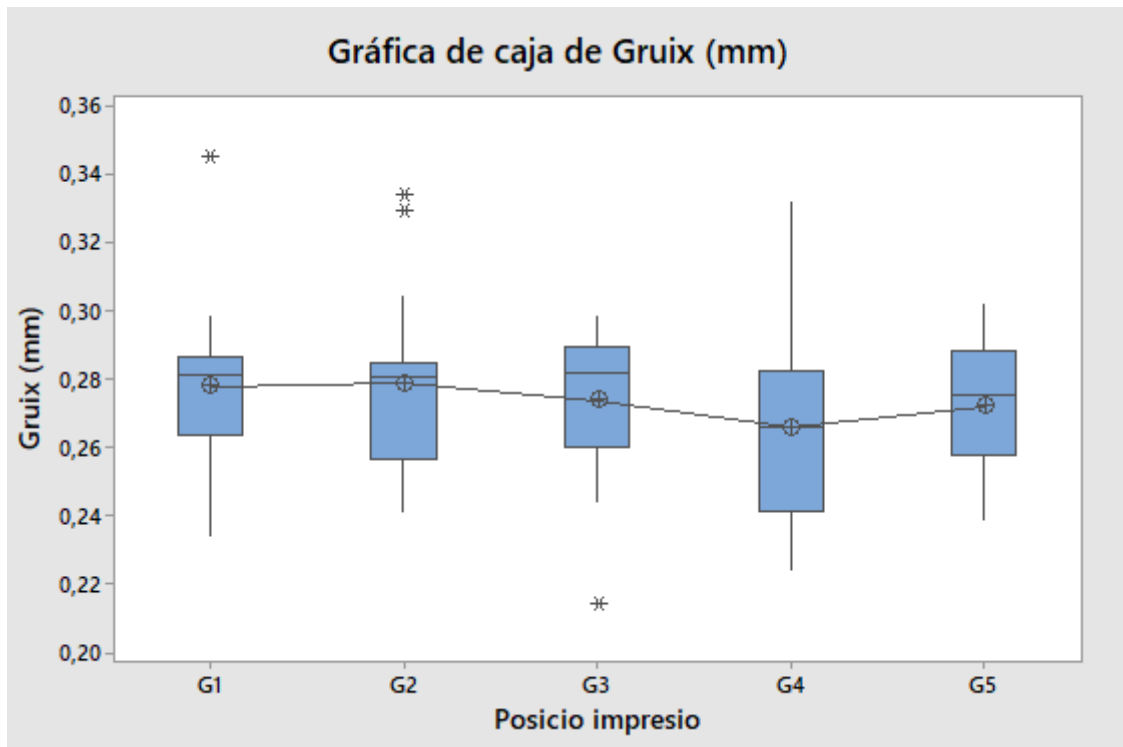


Figura 86: Diagrama de caixes pel gruix de 0,27 mm

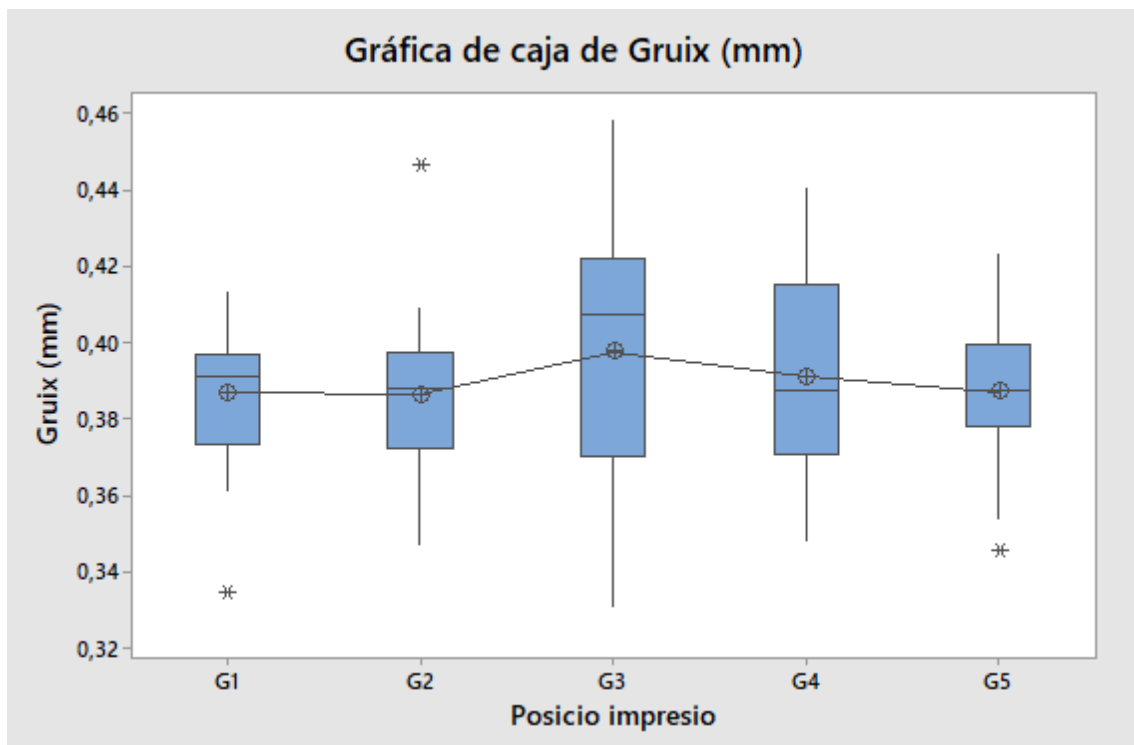


Figura 87: Diagrama de caixes pel gruix de 0,37 mm

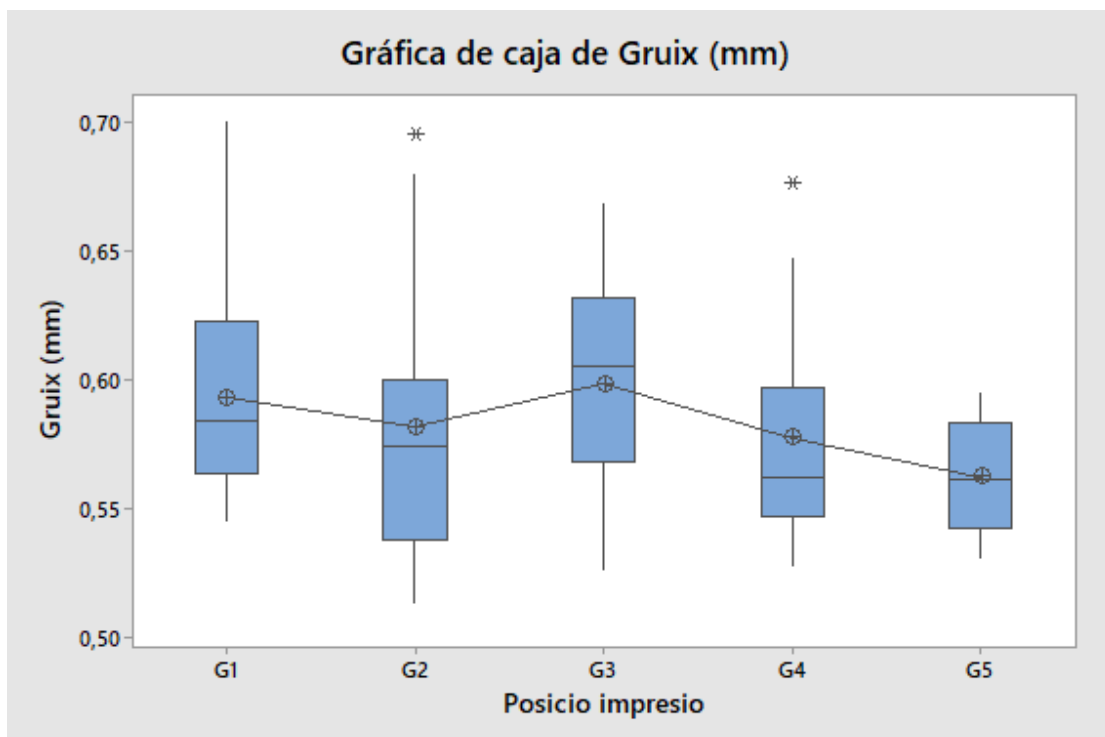


Figura 88: diagrama de caixes pel gruix de 0,57 mm

Com es pot veure a les 3 figures, no hi ha una variació significativa de les mitjanes segons la posició en els 3 gruixos, tal com indicaven els P valors. Cap dels 3 gruixos té algun patró determinat que pogués indicar una certa relació entre la posició i el gruix.

- Diagrames de caixes per temperatura i velocitat

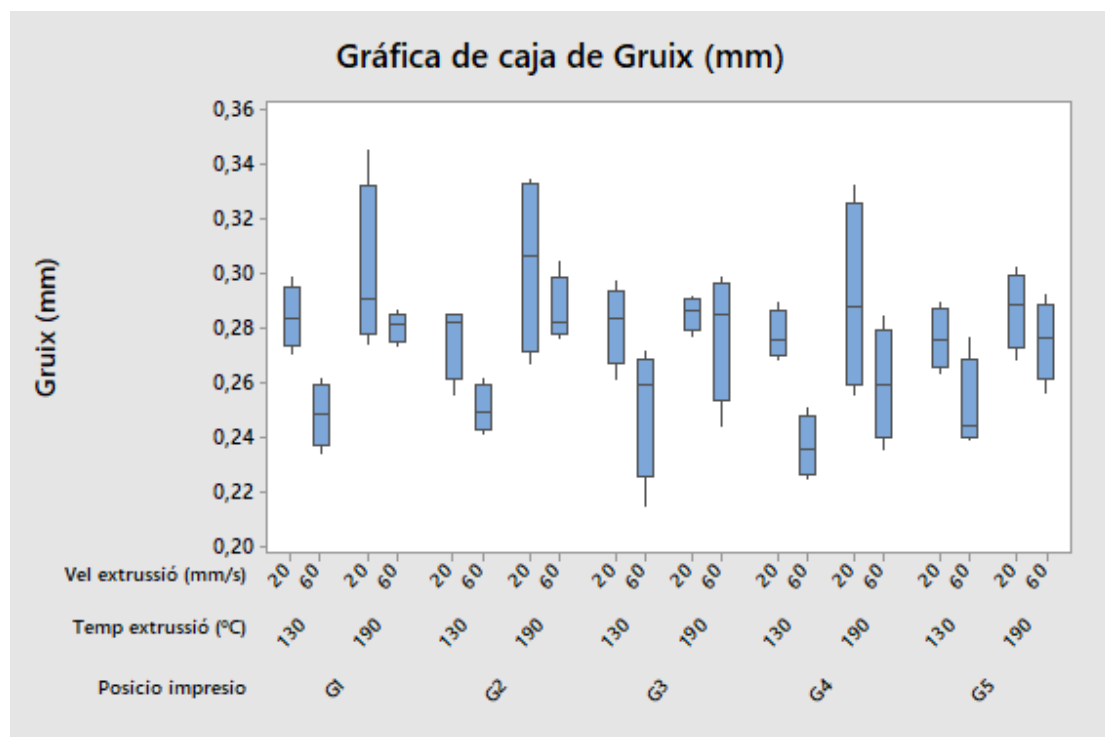


Figura 89: Diagrama de caixes complet pel gruix de 0,27 mm

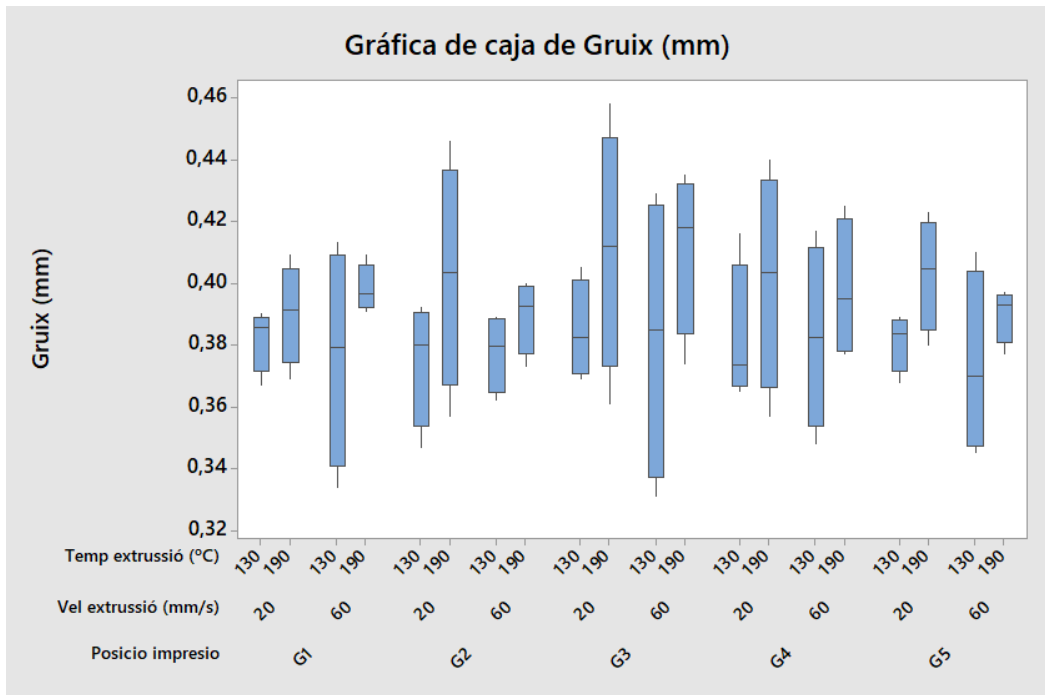


Figura 90: Diagrama de caixes complet pel gruix de 0,37 mm

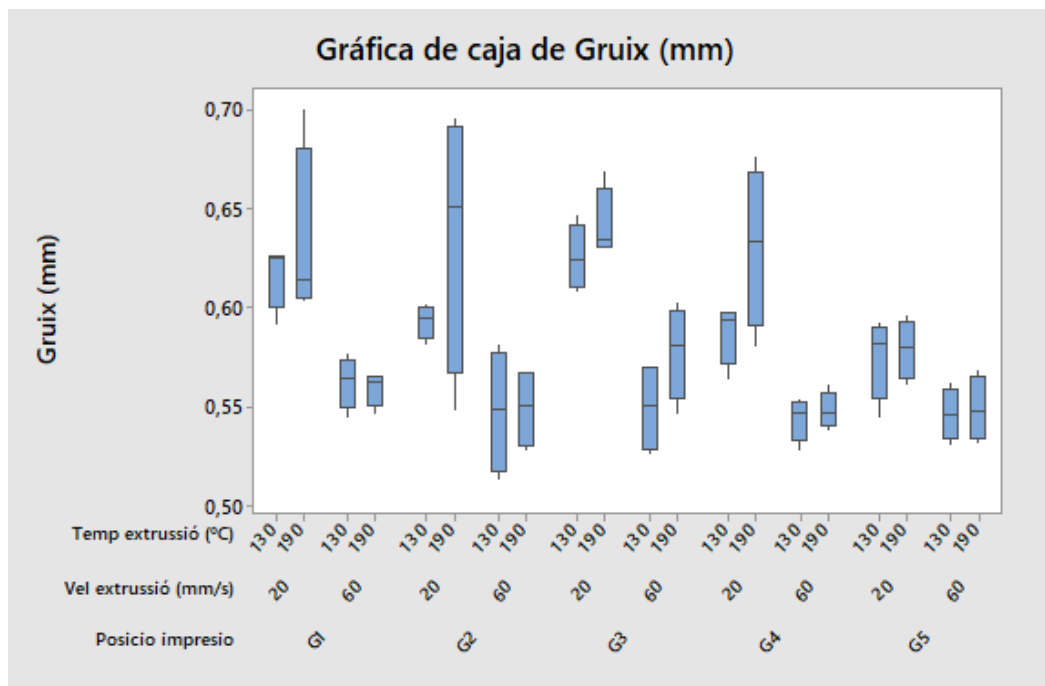


Figura 91: Diagrama de caixes complet pel gruix de 0,57 mm

Per últim en el diagrama de caixes complet, tal com es pot veure a les 3 figures, tampoc mostra cap mena de tendència entre les posicions G1, G2, G3, G4, G5, el que si es pot veure per exemple, és que en la Figura 90 la majoria de caixes són més llargues que en els altres dos casos, fet que podria indicar que hi ha més variabilitat de mesures. Havent vist aquestes gràfiques es pot concloure que la posició de mesura no afecta la presa de mesures i que la taula està perfectament anivellada.

Part 3

Anàlisi de la desviació del gruix

En aquesta part s'ha generat un model 2^k amb punt central, amb 3 factors d'estudi, el gruix, la velocitat i la temperatura. L'objectiu és fer un model per predir la desviació, i aquí si s'eliminen els paràmetres no significatius. S'ha estudiat la influència d'aquests 3 factors sobre la desviació del gruix, que aquí s'anomenarà "diferència gruix imprès", ja que és la diferència del valor mesurat imprès i el generat pel programa. Primerament s'ha fet un estudi descriptiu de les dades, a continuació s'han generat els diagrames de caixes i superfícies i posteriorment s'han extret els valors no significatius i s'ha obtingut l'equació que defineix el model.

- Estadístic bàsics descriptius

En aquest cas s'ha estudiat la desviació o diferencia sobre el gruix imprès, i els estadístics descriptius bàsics de les dades es poden veure a la Taula 82.

Taula 82: Estadístics descriptius de la diferència del gruix

<i>Variable</i>	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
Mitjana gruix (mm)	36	0,0066	0,00439	0,02635	0,0039

- Diagrama de caixes

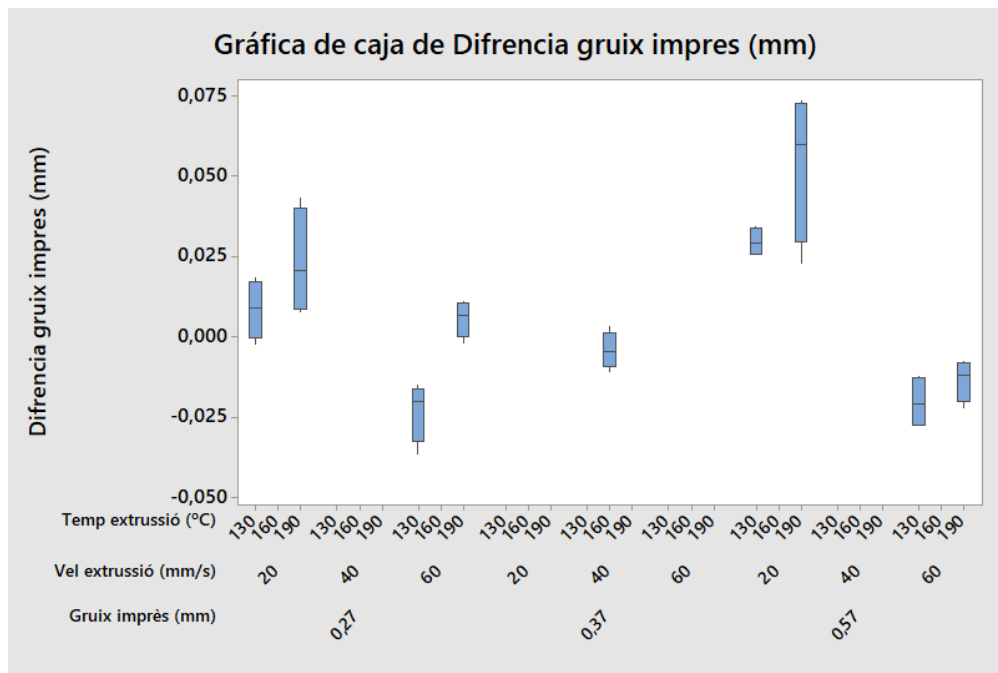


Figura 92: Diagrama de caixes per a la diferència del gruix imprès

Com es pot veure a la Figura 92 hi ha les dades dels dos gruixos extrems , i també apareixen les centrals que seran les que pertocarà al gruix de 0,37 mm.

- Estudi factorial

A l'estudi factorial s'ha dissenyat un model amb tres factors, la velocitat, la temperatura i el gruix, amb un punt central. Aquest punt central correspon al punt experimental 0,37 mm, 40 mm/s i 160 °C i les dades obtingudes han estat les de la Taula 83. Observant els P valors es poden considerar com influents la temperatura, la velocitat, el gruix, i també la combinació de velocitat i gruix.

Taula 83: P valors de la diferència del gruix

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,002775	6,16	0,000	SI
Velocitat extrusió (mm/s)	0,013878	105,61	0,000	SI
Gruix Imprès (mm)	0,000630	4,80	0,037	SI
Vel extrusió*Temp extrusió	0,000006	0,05	0,826	NO
Vel extrusió* Gruix imprès	0,002353	17,91	0,000	SI
Temp extrusió*Gruix imprès	0,000071	0,54	0,469	NO
Vel*Temp*Gruix	0,000506	3,85	0,06	NO

EL P valor del model és 0,0000

L'ajustament quadràtic del model és el de la Taula 84

Taula 84: Ajustament quadràtic de les dades

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0114632	85,40%	81,07%	74,04%

- Efectes principals

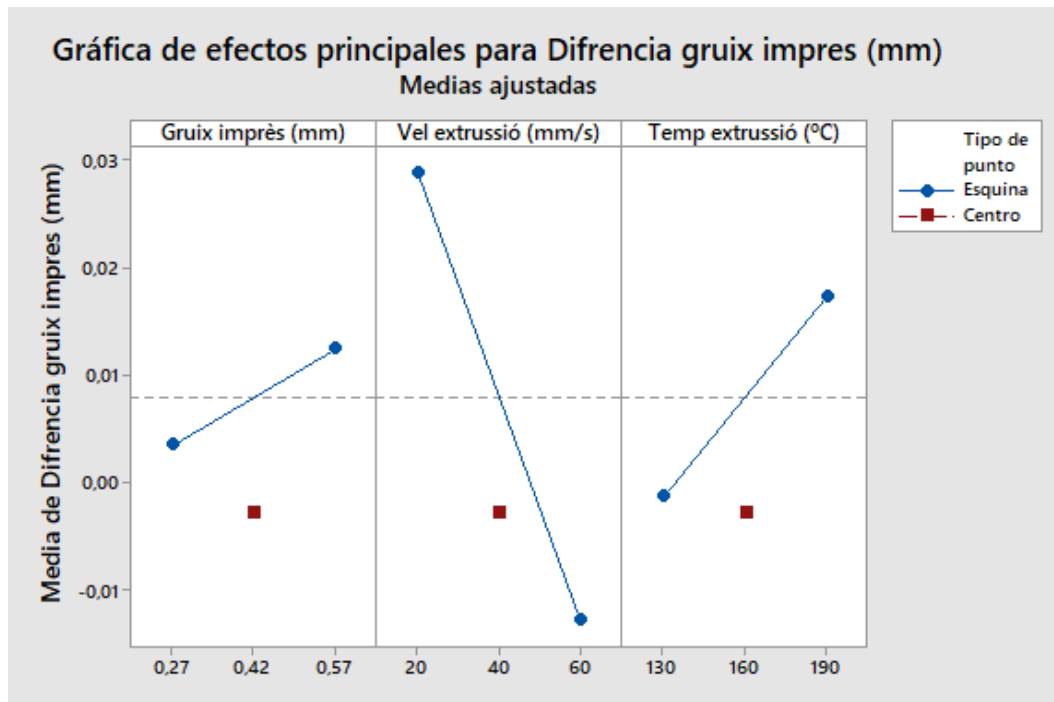


Figura 93: Efectes principals de la diferència del gruix.

Tal com es pot veure a la Figura 93 la tendència que segueix cadascun dels 3 paràmetres, i el que més afecta és la velocitat i la temperatura, que són els que tenen un P valor més petit. Com es pot veure en el cas del gruix i la temperatura el punt central defineix un mínim.

- Interaccions

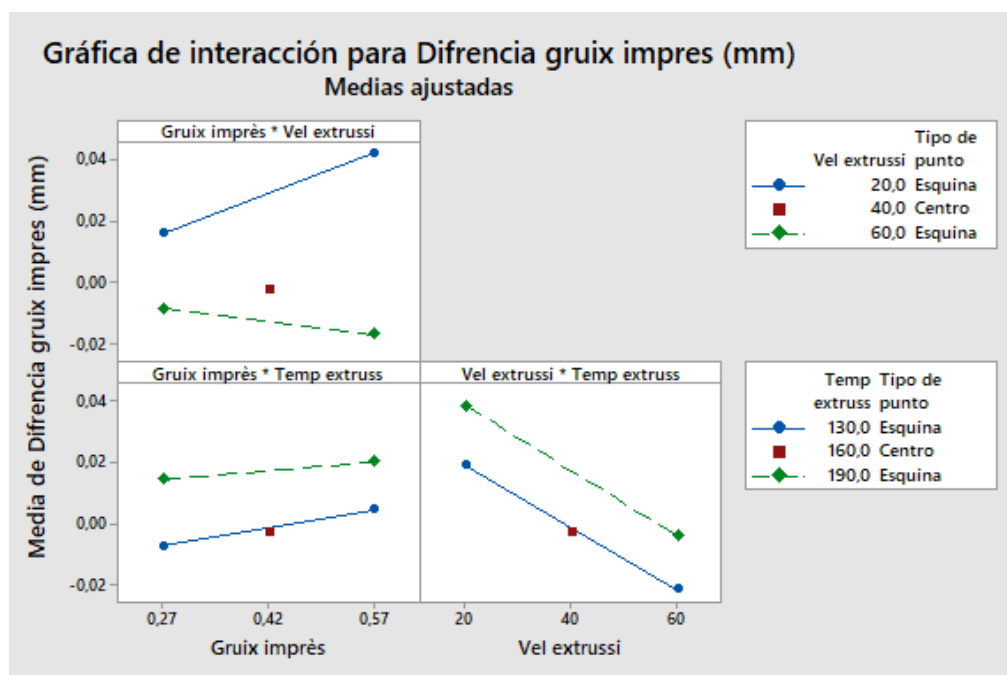


Figura 94: Gràfica d'interaccions per a la diferència del gruix.

A la Figura 94 es pot veure el diagrama d'interaccions del model.

- Superfície

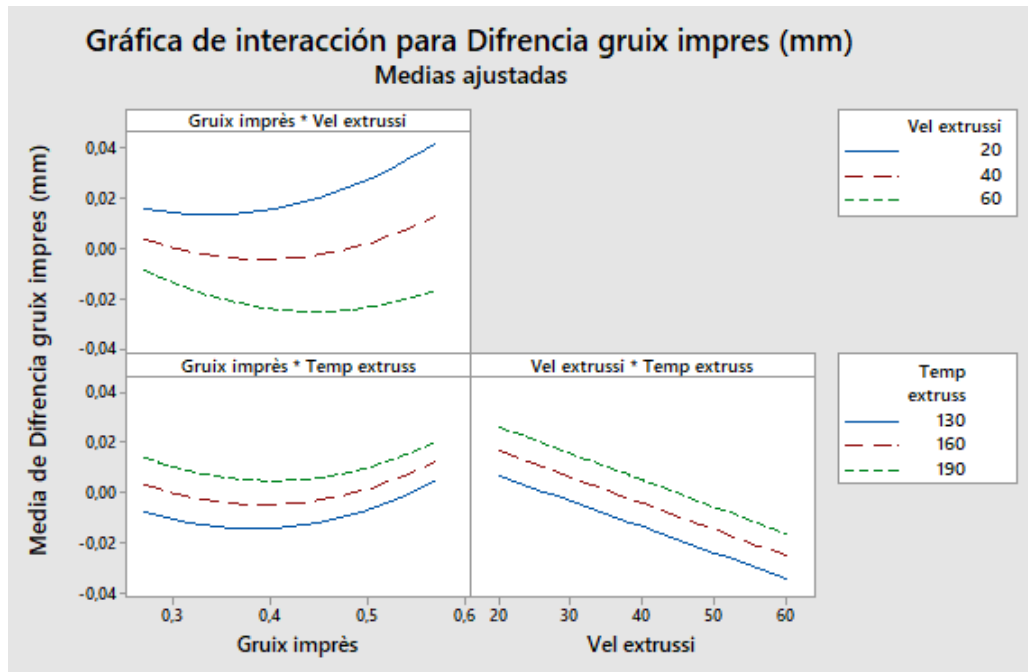


Figura 95: Gràfica d'interacció pel model superfície.

A la Figura 95 es pot veure la gràfica d'interacció pel model superfície.

- CUB

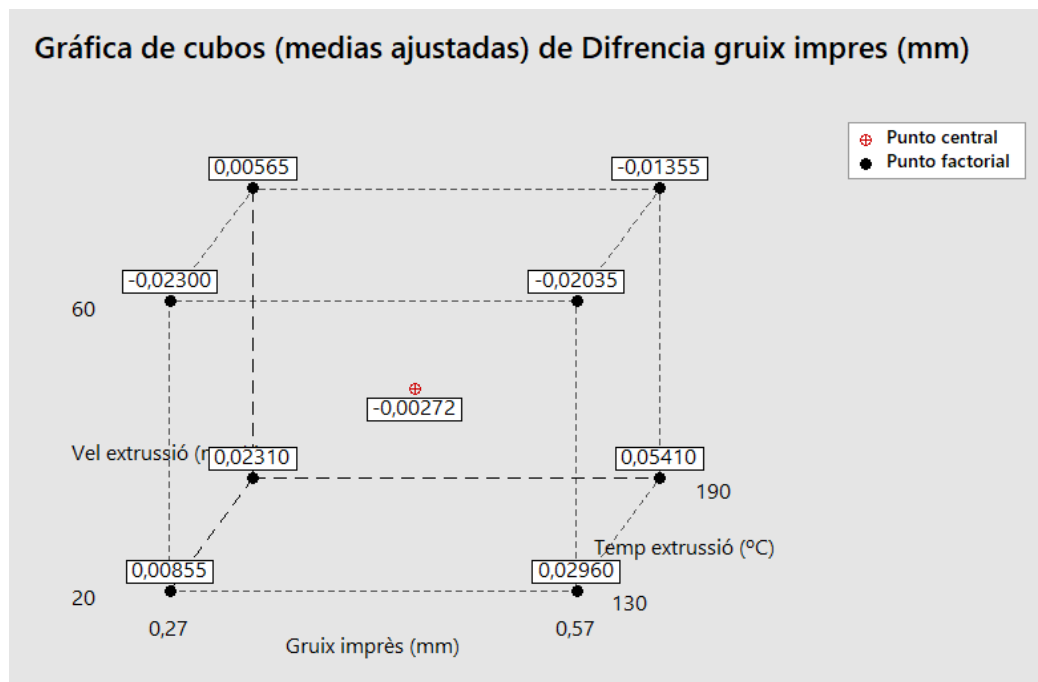


Figura 96: Gràfica de cub per a la diferència del gruix

A la Figura 96 es pot veure el diagrama de cub del model.

Havent vist això, es trauran primerament els valors no significatius del model per tal de depurar-lo. Aquests valors no significatius són els recollits a la Taula 85.

Taula 85: Variables no significatives del model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Vel extrusió*Temp extrusió	0,000006	0,05	0,826	NO
Temp extrusió*Gruix imprès	0,000071	0,54	0,469	NO
Vel*Temp*Gruix	0,000506	3,85	0,06	NO

Les variables no significatives del model, que són les de P valor > 0,05 es poden veure a la Taula 85. A la Figura 97 es pot veure com els paràmetres no significatius són extrets del model factorial dins el Minitab 19.

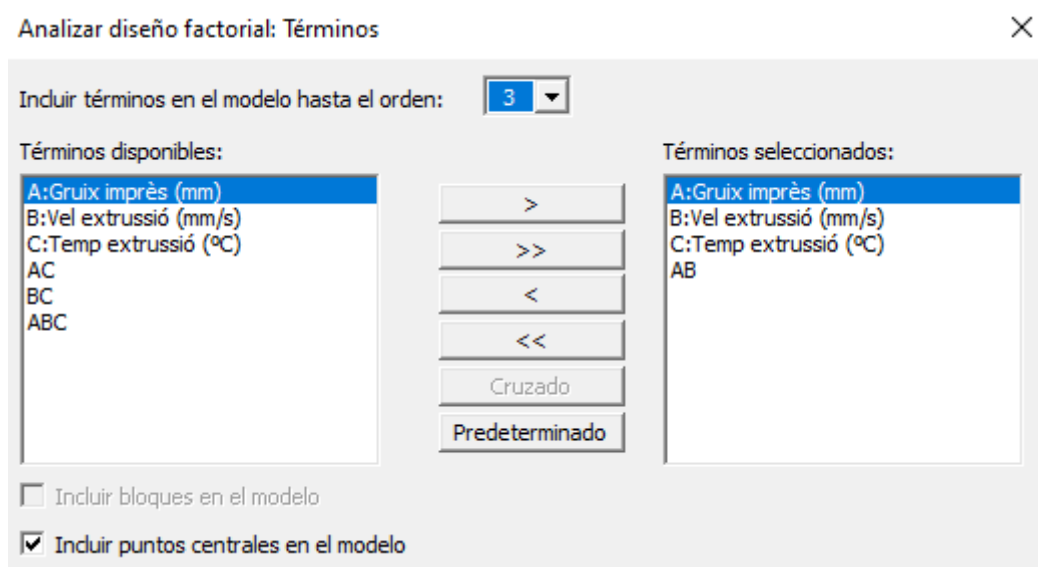


Figura 97: Extracció de les dades no significatives del model

A la Taula 86 es poden veure els valors significatius del nou model, on el P valor del model en si és de 0,000.

Taula 86: P valors del nou model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,002775	20,15	0,000	SI
Velocitat extrusió (mm/s)	0,013878	100,79	0,000	SI
Gruix Imprès (mm)	0,000630	4,58	0,041	SI
Vel extrusió* Gruix imprès	0,002353	17,09	0,000	SI

Per últim a la Taula 87 es pot veure l'ajustament quadràtic del model.

Taula 87: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0117344	83%	80,17%	75,97%

L'equació que defineix el model és:

$$\begin{aligned}
 \text{Desviació} = & -0,0604 + 0,000159 * \text{Vel extrusió} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) + 0,000310 * \text{Temp extrusió} (^\circ\text{C}) \\
 & + 0,1439 * \text{gruix} (\text{mm}) - 0,002858 * \text{gruix} (\text{mm}) * \text{Vel extrusió} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) \\
 & - 0,01073 * \text{Punt central}
 \end{aligned}$$

A continuació es mostraran els diagrames del nou model, amb els elements significatius.

- Efectes principals

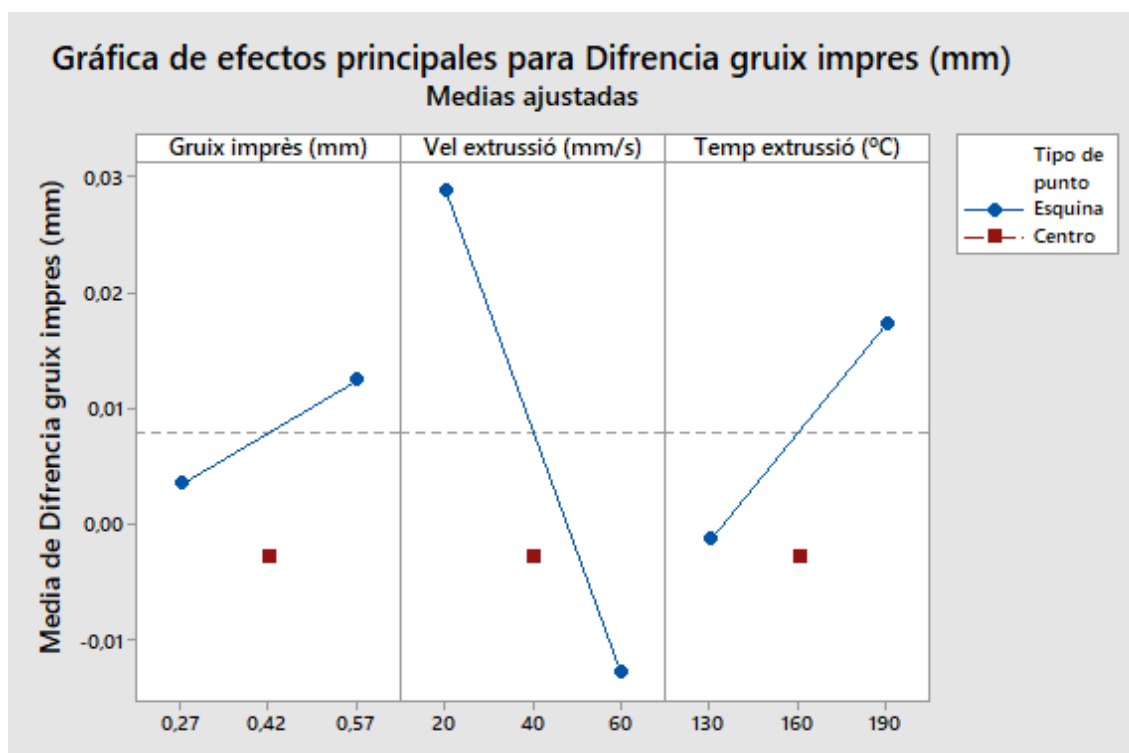


Figura 98: Efectes principals

Com es pot veure a la Figura 98 només en el cas del gruix, el punt central clarament s'estableix com a un mínim en la tendència. Es veu que la velocitat és el que té el pendent més pronunciat, i a mesura que augmenta, l'error disminueix. El punt central queda bastant sobreposat sobre la línia d'error 0, és a dir, la millor que podria ser.

- Interaccions

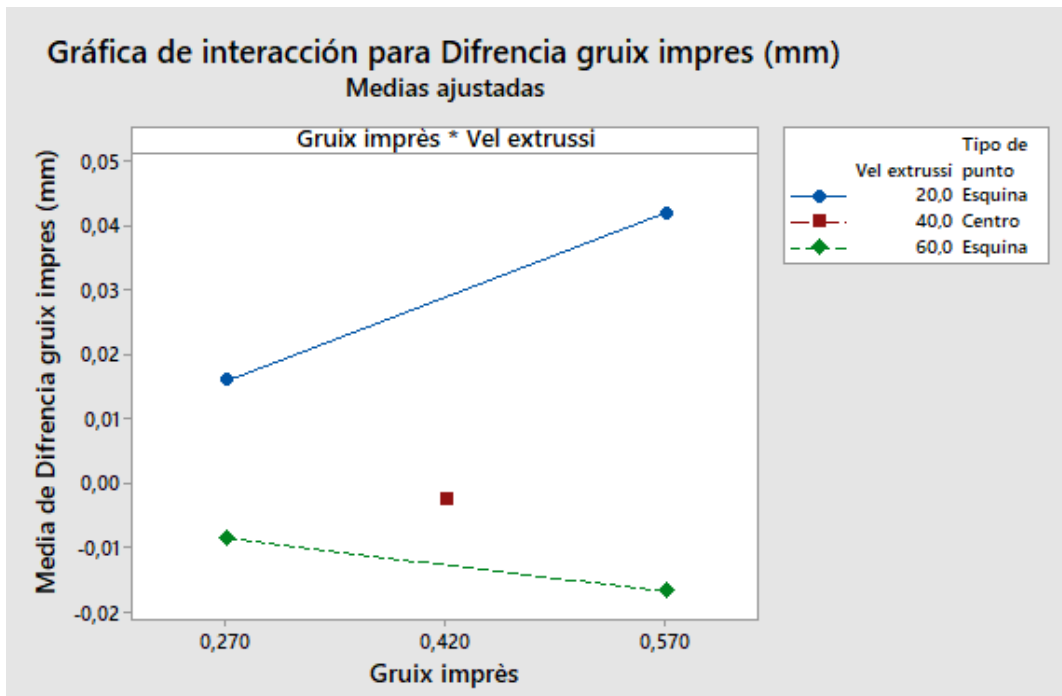


Figura 99: Interacció entre la velocitat i el gruix

A la Figura 99 es pot veure les interaccions entre el gruix i la velocitat.

- Cub

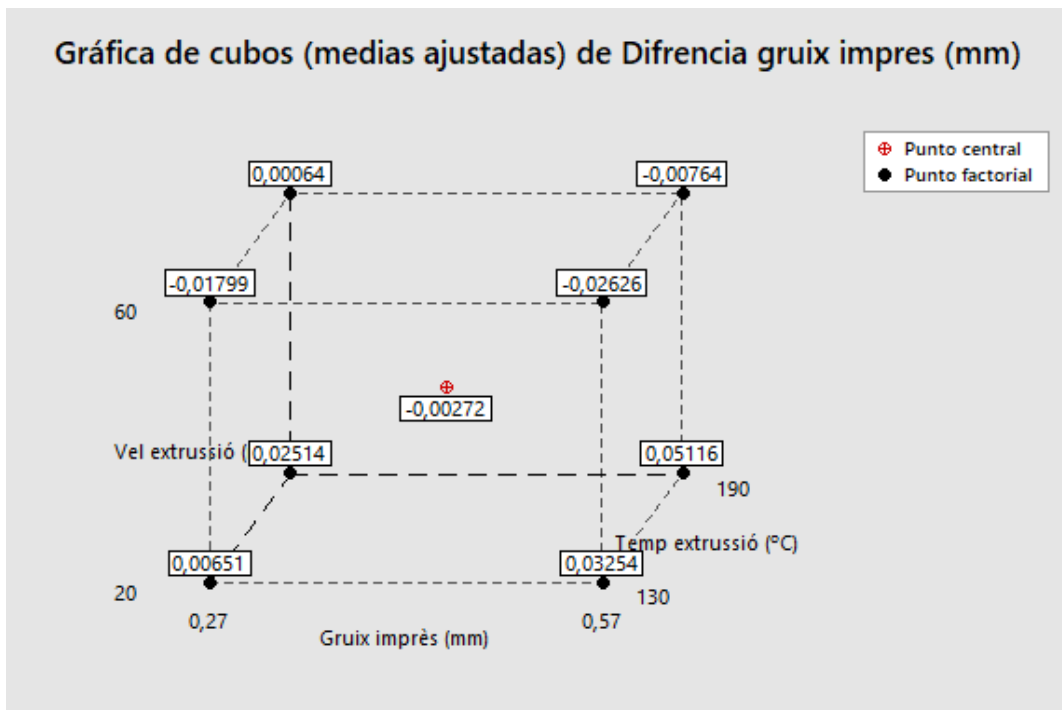


Figura 100: Gràfica de cub del model

A la Figura 100 es pot veure la gràfica de cub del model amb els valors significatius.

- Superfície

En primer lloc s'han extret els valors no significatius del model, que resulten ser els mateixos que en l'assaig factorial, amb uns P valors molt semblants. El P valor del quadrat és de 0,106 i el del model 0,000. Aquests valors es poden veure a la Taula 88.

Taula 88: P valors del model superfície

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,002775	6,16	0,000	SI
Velocitat extrusió (mm/s)	0,013878	105,61	0,000	SI
Gruix Imprès (mm)	0,000630	4,80	0,046	SI
Gruix*Gruix	0,000405	2,79	0,106	NO
Vel extrusió*Temp extrusió	0,000006	0,05	0,826	NO
Vel extrusió* Gruix imprès	0,002353	17,91	0,000	SI
Temp extrusió*Gruix imprès	0,000071	0,54	0,49	NO
Vel*Temp*Gruix	0,000506	3,85	0,06	NO

A la Taula 89 es pot veure l'ajustament quadràtic del model superfície

Taula 89: Ajustament quadràtic del model superfície

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0120321	83,32%	79,15%	72,61%

Si s'eliminen els valors no significatius s'obté la Taula 90.

Taula 90: Valors significatius del model superfície

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,002775	18,97	0,000	SI
Velocitat extrusió (mm/s)	0,013878	94,85	0,000	SI
Gruix Imprès (mm)	0,000756	5,17	0,03	SI
Vel extrusió* Gruix imprès	0,002353	16,08	0,000	SI

El P valor del quadrat és de 0,106 i el del model 0,000. A la Taula 91 es pot veure l'ajustament quadràtic del model.

Taula 91: Ajustament quadràtic del model amb valors significatius

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0120957	81,33%	78,92%%	74,60%%

A continuació s'han representat els diagrames corresponents al model superfície ajustat, extraient els valors no significatius.

- Efectes principals

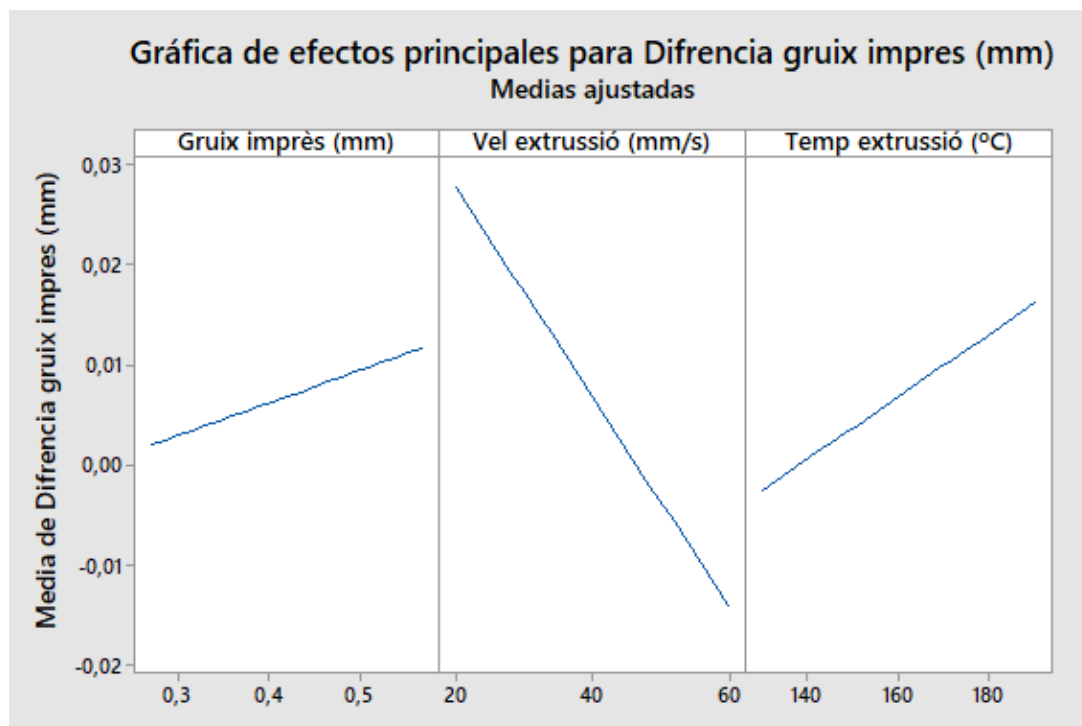


Figura 101: Efectes principals

A la Figura 101 es poden veure els efectes principals del model superfície només amb valors significatius, com es pot veure la velocitat és el més influent i novament al voltant del punt central és on la desviació s'ajusta més a l'error 0.

- Interaccions

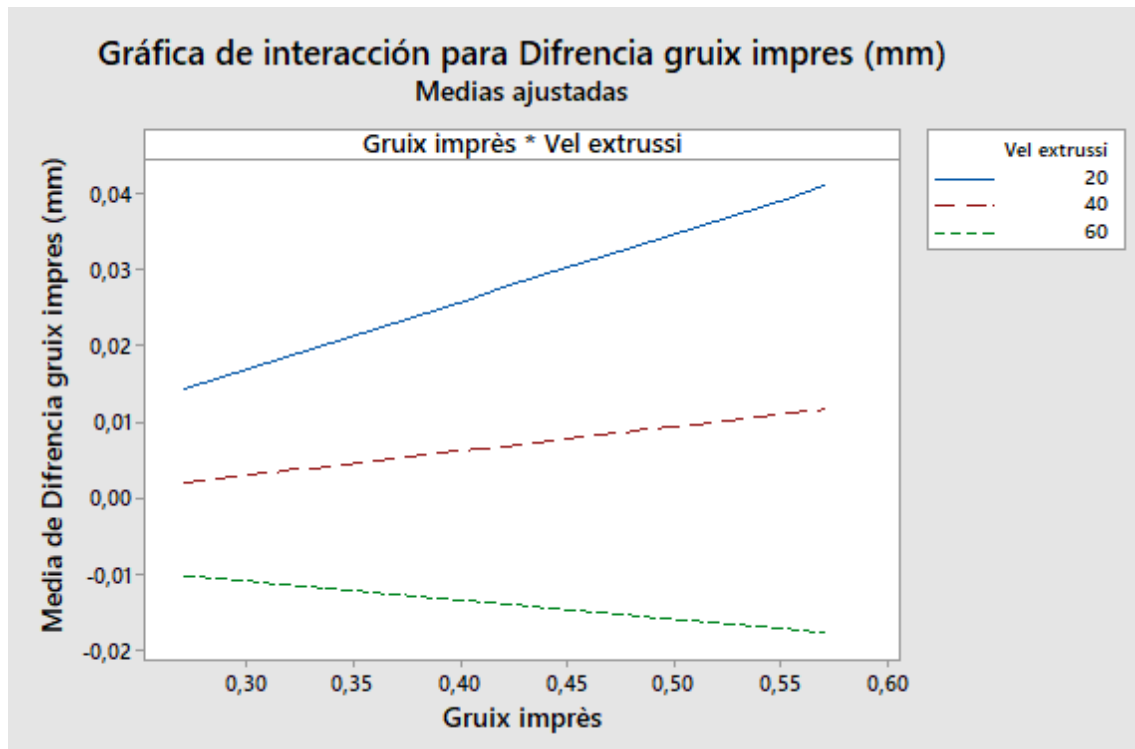


Figura 102: Interaccions pel model superfície

A la Figura 102 es pot veure el diagrama d'interaccions entre la velocitat i el gruix imprès. Es pot veure que la línia que correspon al punt central tendeix a un error 0.

- Superfície

L'equació que defineix el model de la superfície és la següent:

$$\begin{aligned} \text{Desviació} = & -0,0627 + 0,000159 * \text{Vel extrusió} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) + 0,000310 * \text{Temp extrusió} (\text{°C}) \\ & + 0,1465 * \text{gruix} (\text{mm}) - 0,002858 * \text{gruix} (\text{mm}) * \text{Vel extrusió} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) \end{aligned}$$

El model de la superfície no incorpora el punt central, com a un punt central, sino com a un punt intermig. A continuació es troben les gràfiques de la combinació dels dos paràmetres tenint com a resposta la diferència del gruix, és a dir l'error. A la Figura 103, Figura 104 i a la Figura 105 es poden veure les superfícies per a la combinació de dos paràmetres.

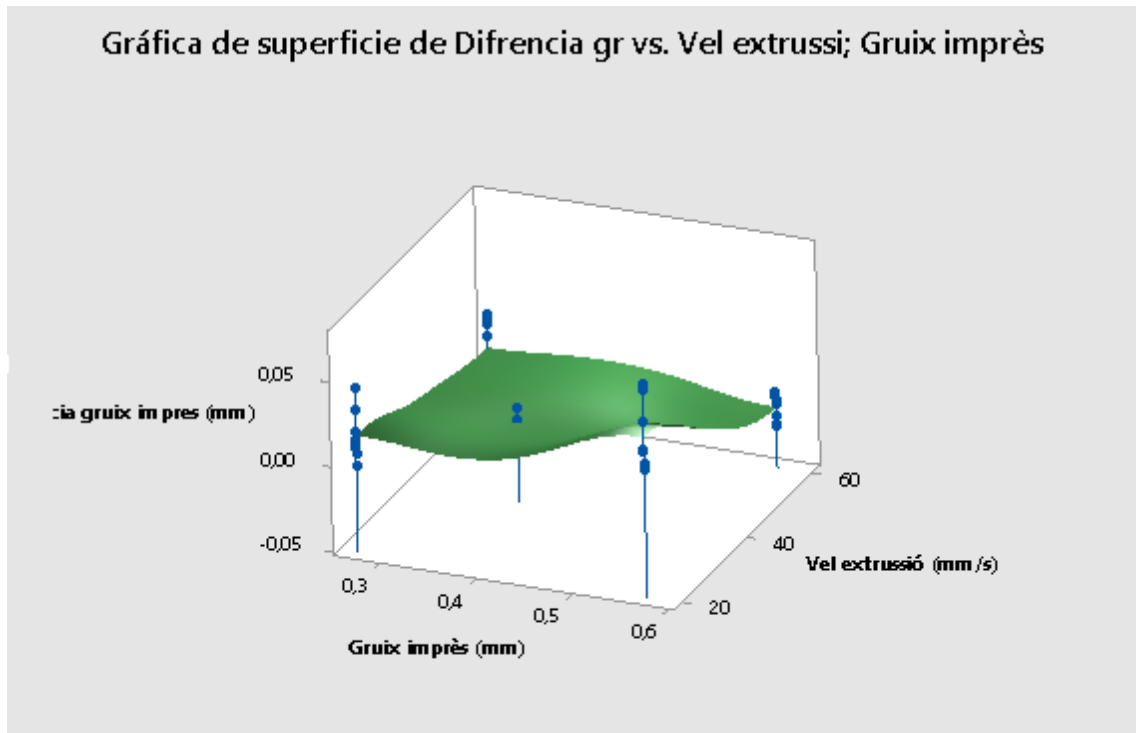


Figura 103: Superfície de la diferència del gruix (Gruix vs velocitat)

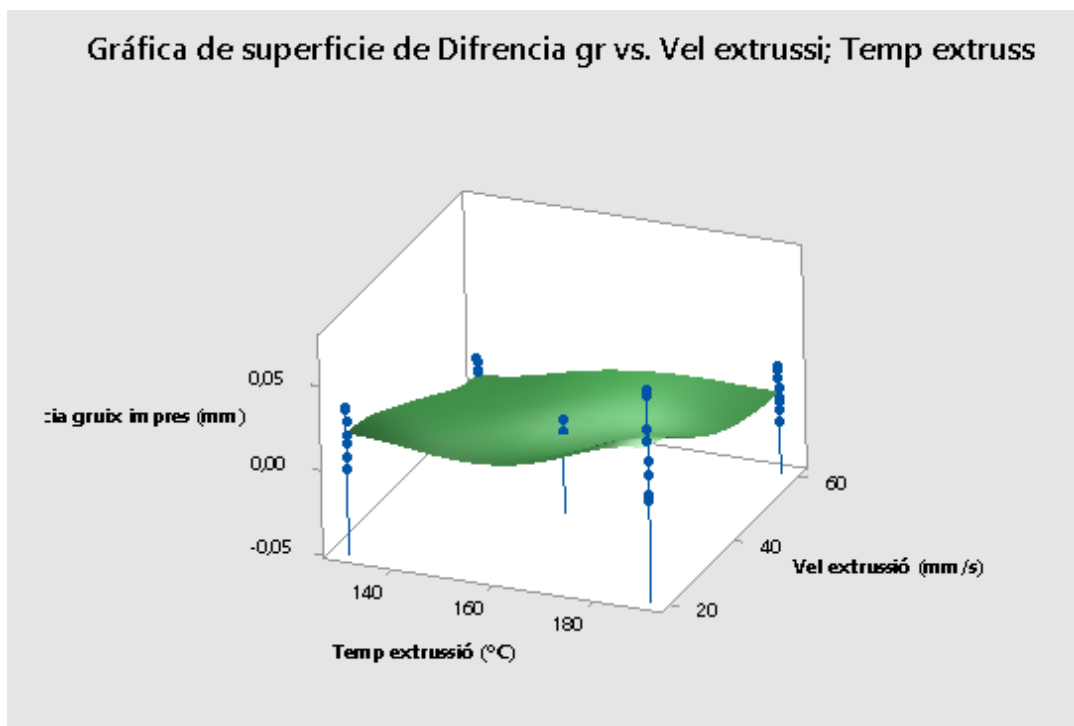


Figura 104: Superfície de la diferència del gruix (Temperatura vs velocitat)

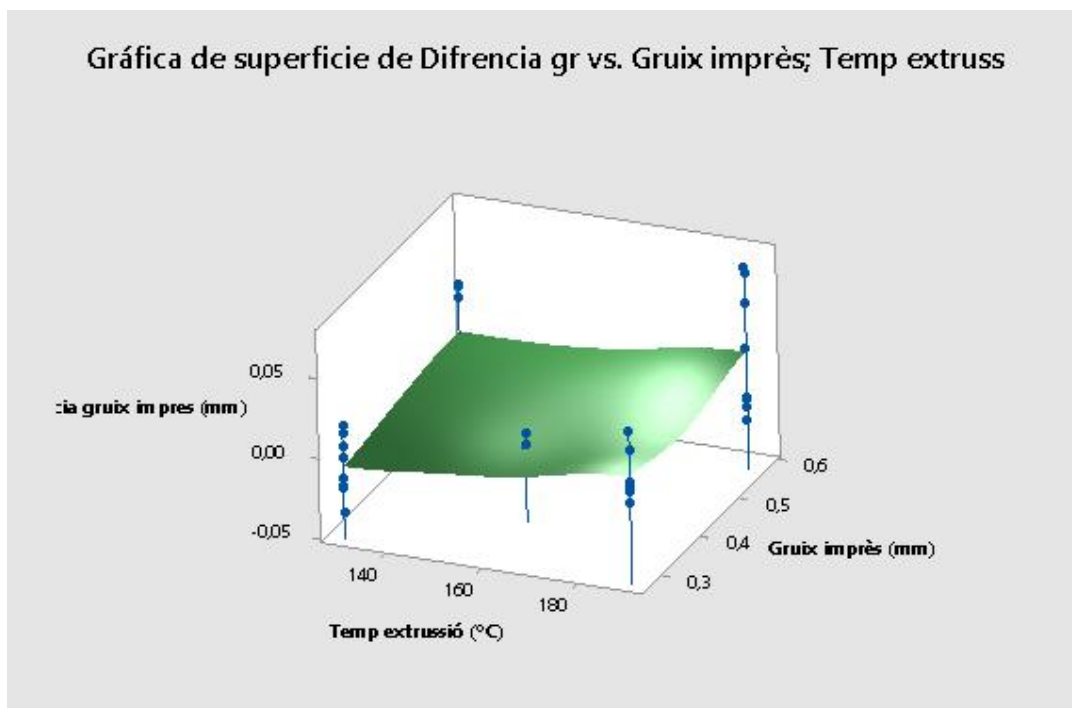


Figura 105: Superfície de la diferència del gruix (Gruix vs Temperatura)

Part 4

Anàlisi de la rugositat

- Estadístics bàsics

Taula 92: Estadístics bàsics de la rugositat

<i>Variable</i>	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard	Desviació estàndard	Mediana
Rugositat (μm)	36	2,229	0,474	2,844	1,341

A la Taula 92 es poden veure els estadístics bàsics de la rugositat, com es pot veure, la desviació estàndard es força elevada degut que hi ha 4 valors que es troben bastant desviats de la mitjana, el que s'ha fet és examinar visualment les provetes i s'ha vist que a la zona de la mesura de la rugositat hi havia malformacions que havien provocat una mala lectura, aquestes provetes s'han descartat per a la mesura de la rugositat.

- Histograma

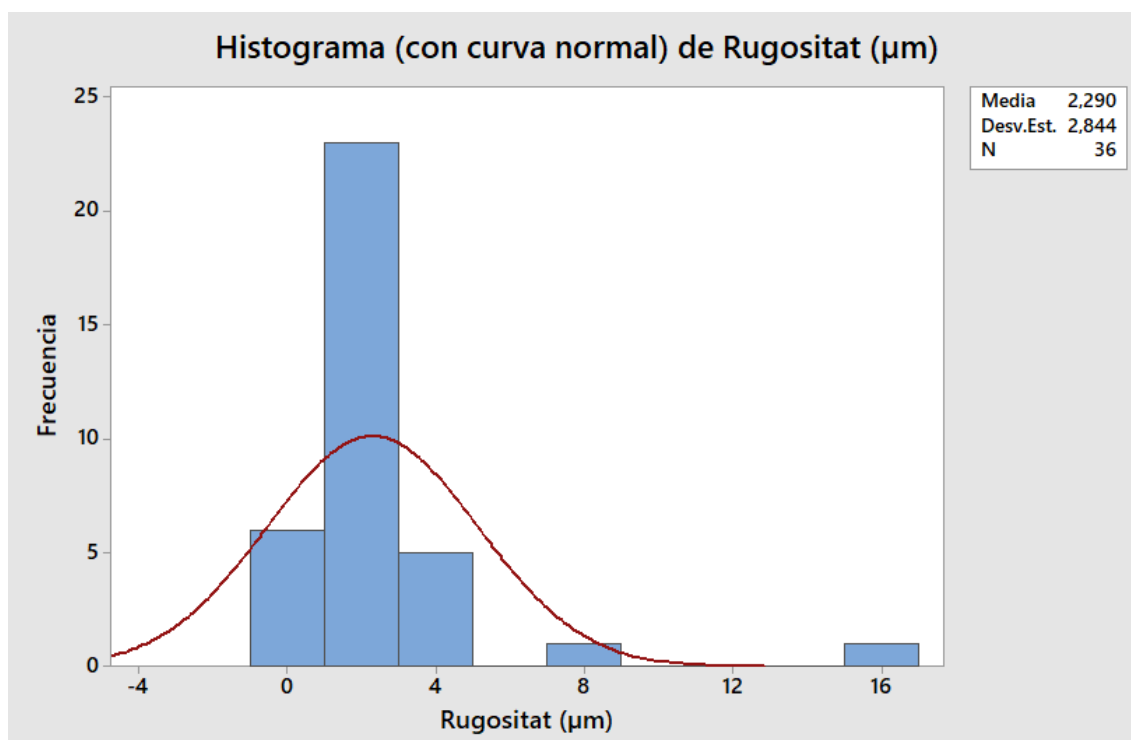


Figura 106: Histograma de la rugositat

Com es pot veure a la Figura 106, hi ha dos valors que no són coherents a la franja de 8 i 16, també ni ha que estan cap al rang de 4. Aquest valors de la rugositat s'han eliminat, per delimitar el model.

Taula 93: Estadístics bàsics

Variable	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
Rugositat (μm)	33	1,625	0,148	0,852	1,314

A la Taula 93 es poden veure els valors, ara sense les mesures incoherents, com es pot veure la desviació estàndard no és tan grossa com la de la Taula 92.

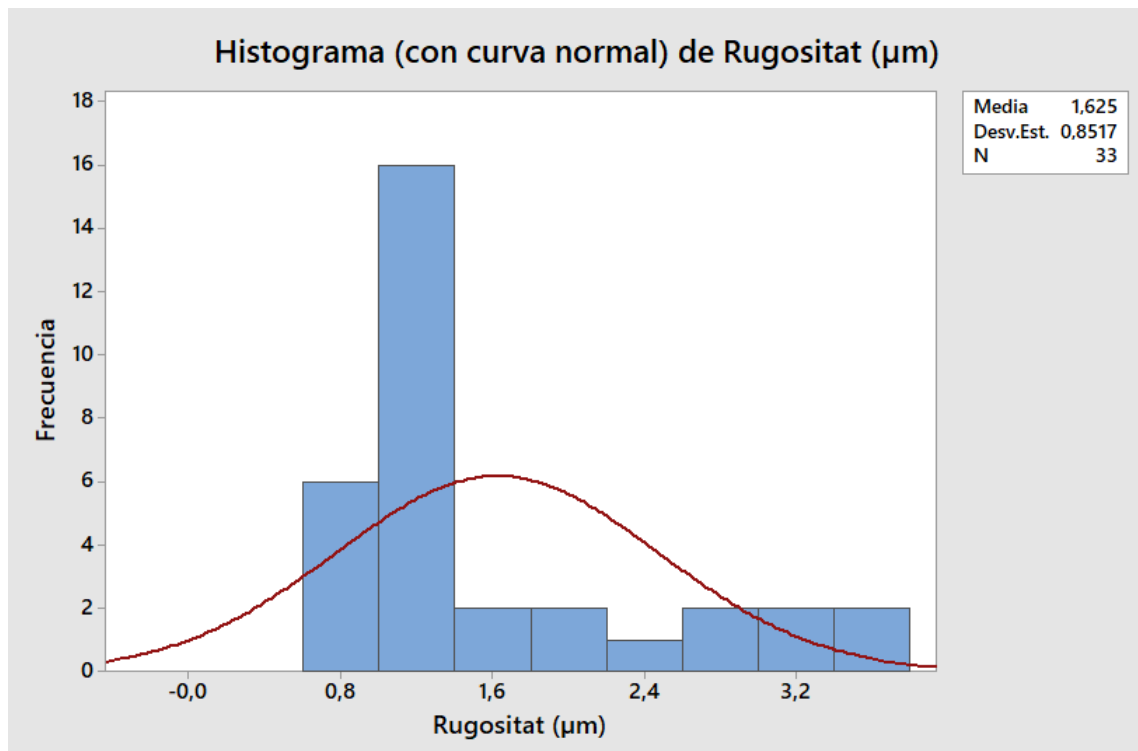


Figura 107: Histograma de la rugositat corregit

A la Figura 107 es pot veure que pràcticament totes les mesures es troben sota la corba de normalitat i molt més agrupades.

- Diagrama de caixes.

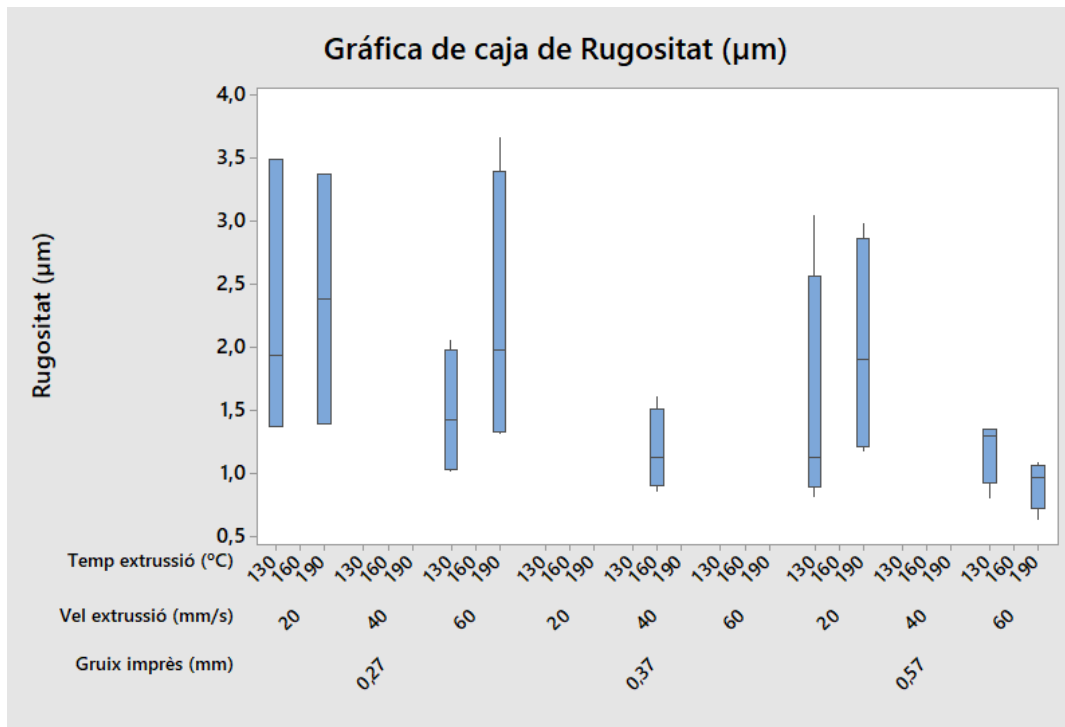


Figura 108: Diagrama de caixes per a la rugositat

A la Figura 108 es pot veure el diagrama de caixes complet pels 3 paràmetres d'estudi. Tal com es pot veure, aparentment a més gruix la rugositat tendeix a millorar, tot i que hi ha bastant dispersió de mesures tal i com indica la gran amplitud de les caixes.

- Efectes principals

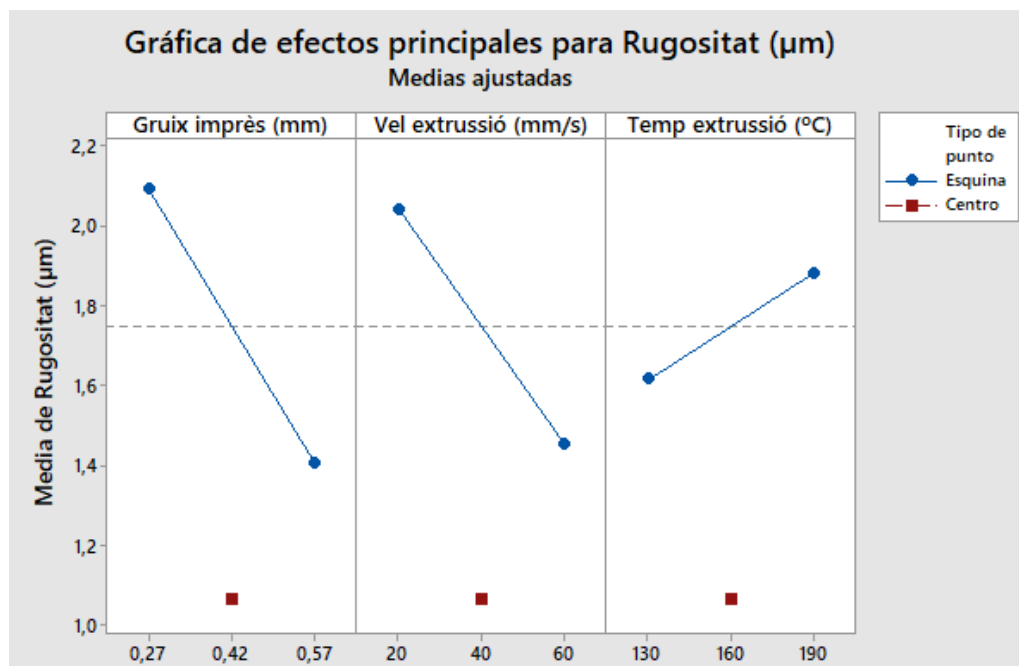


Figura 109: Efectes principals per la rugositat

Si es mira el diagrama d'efectes principals de la Figura 109, es pot veure que el punt central s'estableix com un mínim en els 3 casos.

- Interaccions

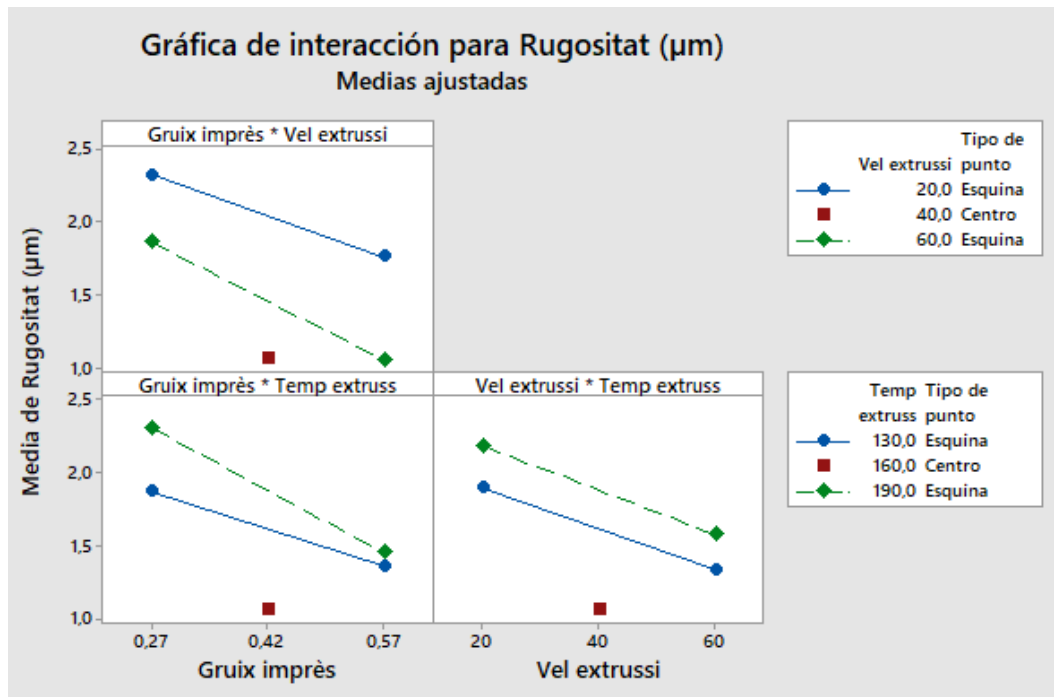


Figura 110: Interaccions per la rugositat

- Estudi factorial

Si s'analitza l'estudi factorial de les dades de la rugositat, s'obté la Taula 94.

Taula 94: P valors del model de la rugositat

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
Temperatura extrusió (°C)	0,4797	0,76	0,391	NO
Velocitat extrusió (mm/s)	2,3619	3,75	0,065	SI
Gruix Imprès (mm)	3,2130	5,11	0,033	SI
Vel extrusió*Temp extrusió	0,0041	0,01	0,936	NO
Vel extrusió*Gruix imprès	0,0991	0,16	0,695	NO
Temp extrusió*Gruix imprès	0,1996	0,32	0,579	NO
Vel*Temp*Gruix	0,8204	1,30	0,265	NO

A la Taula 95 es pot veure l'ajustament quadràtic de les dades de la rugositat.

Taula 95: Ajustament quadràtic de les dades

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,793292	34,93%	13,24%%	0%%

Si s'eliminen els elements no significatius s'obté el següent model, tal i com es veu a la Taula 96. El P valor del model es 0,026.

Taula 96: valors significatius del model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
<i>Velocitat extrusió (mm/s)</i>	2,528	4,32	0,047	SI
<i>Gruix Imprès (mm)</i>	3,421	5,85	0,022	SI

A la Taula 97 es pot veure l'ajustament quadràtic del model, amb les dades significatives

Taula 97: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,764692	26,94%	19,38%%	7,72%

I l'equació que defineix el model és la següent:

$$Rugositat = 3,325 - 0,014949 * Vel\ extrusió \left(\frac{mm}{s}\right) - 2,318 * gruix\ (mm) - 0,692$$

* Punt central

A continuació es representaran els diagrames principals amb els valors significatius.

- Elements principals

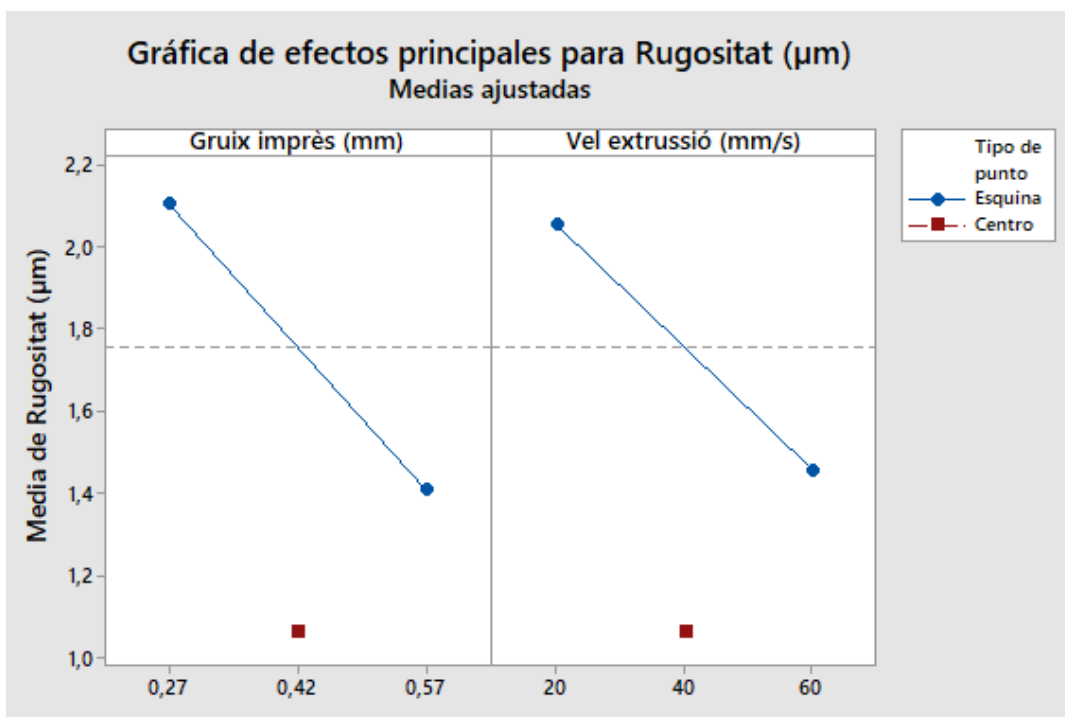


Figura 111: Diagrama d'efectes principals de la rugositat

Tal com es veu a la Figura 111 el punt central s'estableix com a mínim en els dos casos.

- CUB

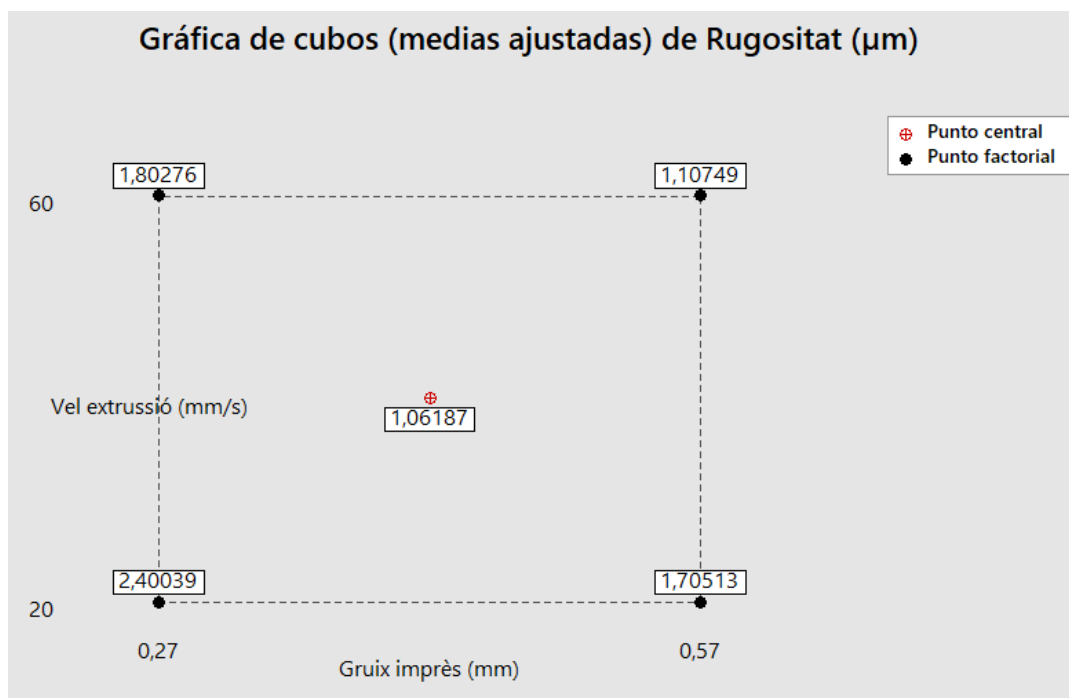


Figura 112: Diagrama de Cub per a la rugositat

A la Figura 112 es pot veure el diagrama de cub per a la rugositat. Figura 112: Diagrama de Cub per a la rugositat

- Superfície

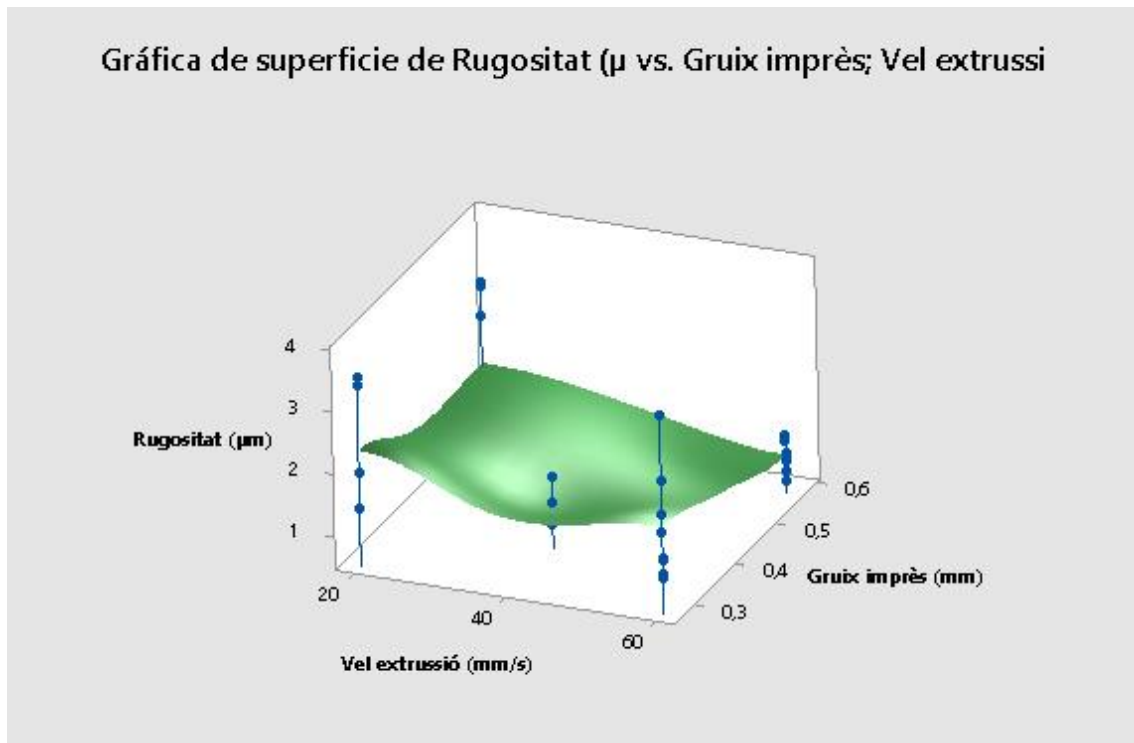


Figura 113: Superfície del model de la rugositat

Tal com es veu el punt central estableix un mínim en la rugositat. La interacció d'aquests 2 paràmetres no és significativa dins el model.

Part 5

En aquesta part es vol veure la tendència que segueix el pes, ja que no és un paràmetre que es vulgui optimitzar. També amb quins dels 3 gruixos hi ha menys variabilitat en el pes, i quins paràmetres hi influeixen.

Gruix de 0,27 mm

A la Figura 114 es pot veure l'histograma del pes pel gruix de 0,27 mm, tal com es pot veure la desviació estàndard és força baixa, de l'ordre de la centèsima, i si es compara la mitja amb el valor teòric (0,77 grams) pel gruix de 0,27 mm, l'error es força baix.

Taula 98: Estadístics bàsics del pes pel gruix de 0,27

Variable	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
Pes (g)	20	0,7330	0,0105	0,04468	0,7450

- Histograma

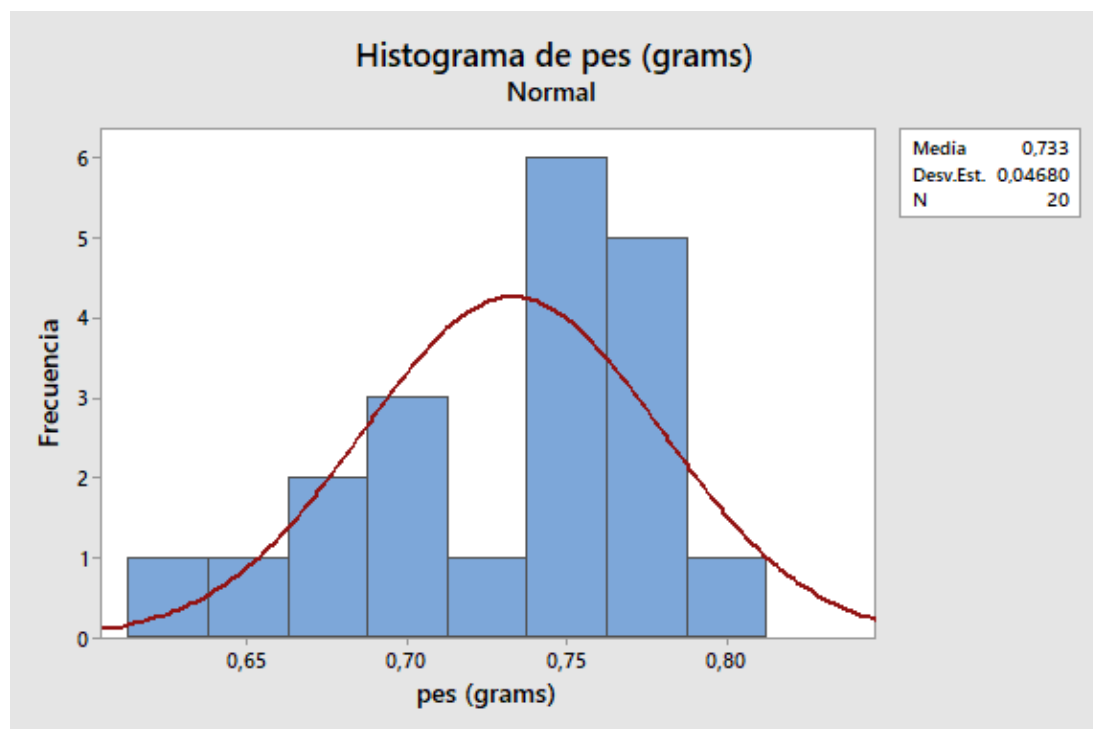


Figura 114: Histograma del pes per a gruix de 0,27 mm

A la Figura 114 es pot veure l'histograma del pes per el gruix de 0,27 mm.

- Caixes

A la Figura 115 es pot veure el diagrama de caixes del model. No s'hi veu una tendència massa clara del pes per cap de les dues variables.

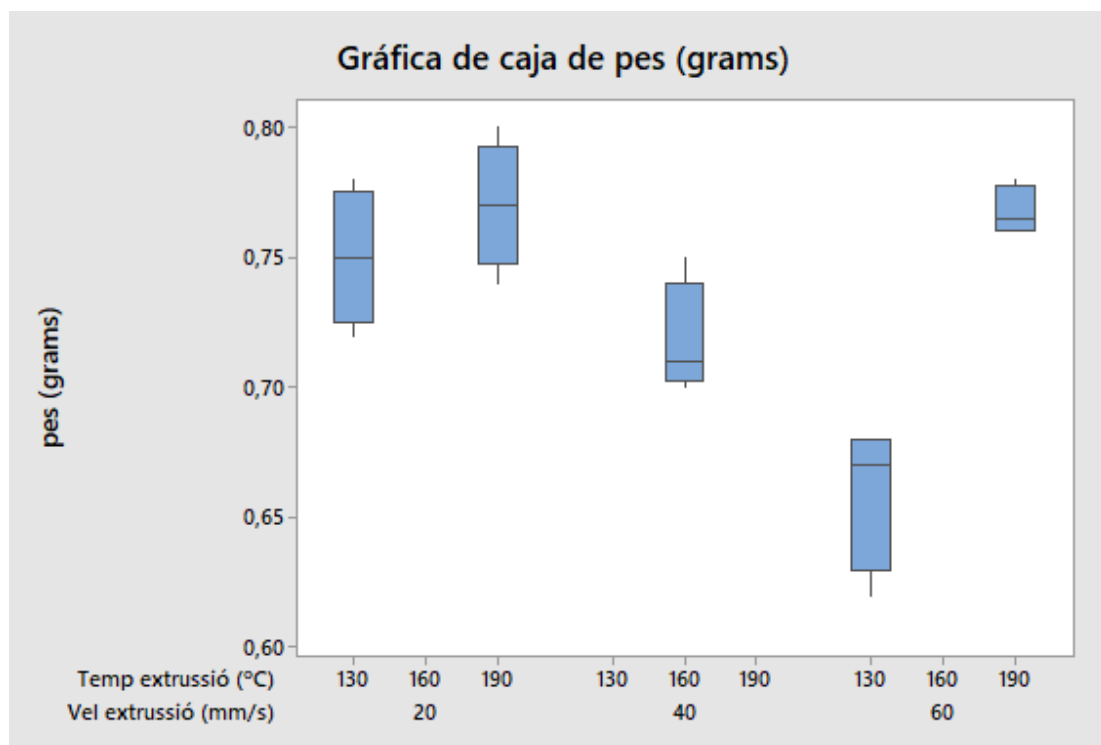


Figura 115: Diagrama de caixes del pes per a gruix de 0,27 mm

- Factorial

A la Taula 99 es poden veure els P valors del model, el P valor del model és 0,000.

Taula 99: P valors del model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	0,01625	30,67	0,000	SI
<i>Velocitat extrusió (mm/s)</i>	0,08556	16,14	0,001	SI
<i>Vel extrusió*Temp extrusió</i>	0,00765	14,45	0,002	SI

A la Taula 100 es pot veure l'ajustament quadràtic de les dades del pes.

Taula 100: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,02302	80,90%	75,80%	66,04%

L'equació que defineix el model és la següent:

$$Pes = 0,8465 - 0,00699 * Vel\ extrusió \left(\frac{mm}{s}\right) + 0,000396 * Temp\ extrusió \text{ (}^{\circ}C\text{)} \\ + 0,000036 Vel\ extrusió \left(\frac{mm}{s}\right) * Temp\ extrusió \text{ (}^{\circ}C\text{)} - 0,0194 Punt\ central$$

A continuació es representen els diagrames principals amb els elements significatius.

- Efectes principals

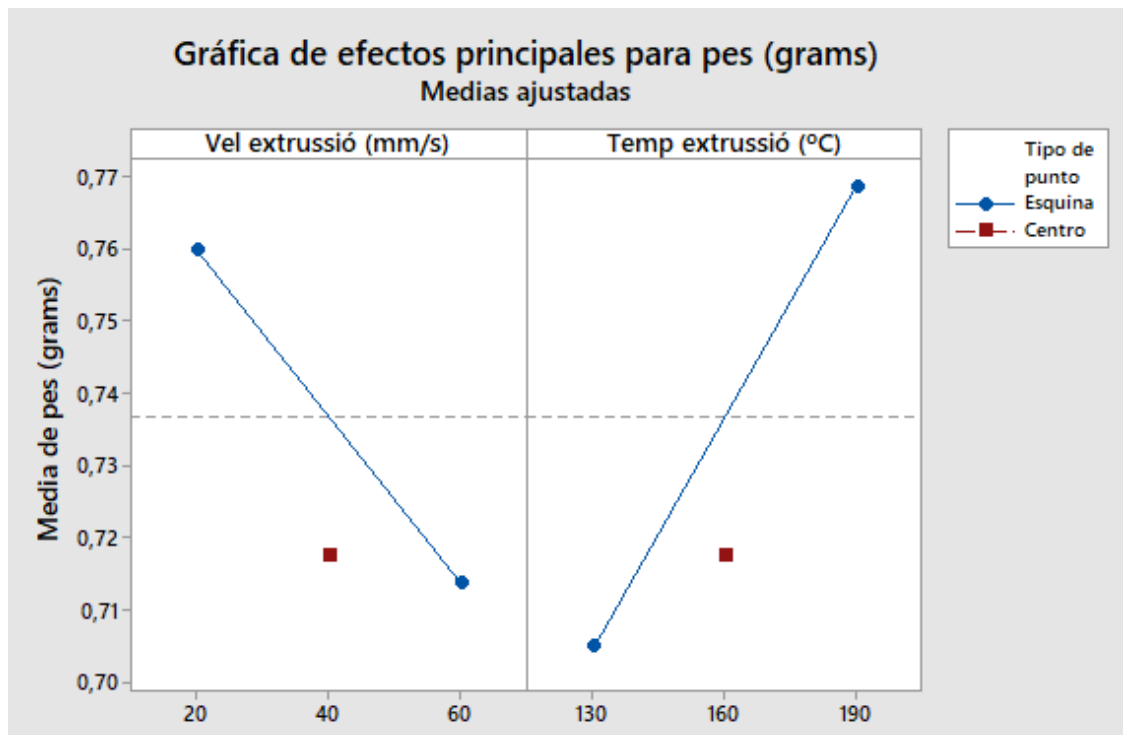


Figura 116: Efectes principals del pes per a gruix de 0,27 mm

A la Figura 116 es poden veure els efectes principals, tal com es veu la temperatura té un pendent més pronunciat. El punt central en els dos casos no estableix cap mínim.

- Interaccions

A la Figura 117 es poden veure les interaccions pel gruix de 0,27 mm pel pes.

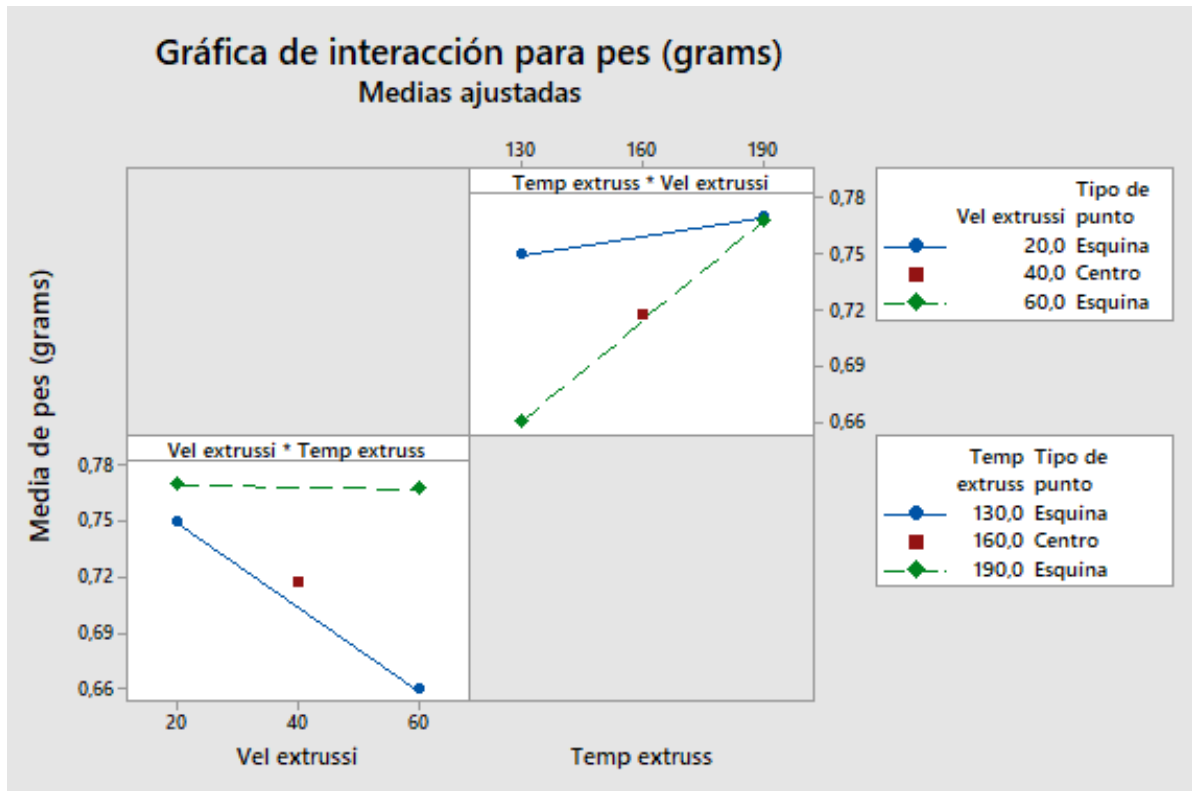


Figura 117: Interaccions del pes per a gruix de 0,27 mm

Gruix de 0,37 mm

- Histograma

A la Figura 118 es pot veure l'histograma del pes pel gruix de 0,37 mm, tal com es pot veure la desviació estàndard és força baixa, de l'ordre de la centèsima, si es compara la mitjana amb el valor teòric (1,06 grams) pel gruix de 0,37 mm, l'error es força baix. En aquest cas les mesures es troben força centrades, més que pel gruix 0,27 mm.

Taula 101: Estadístics bàsics del pes pel gruix de 0,37 mm

<i>Variable</i>	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
Pes (g)	20	1,0385	0,0132	0,0591	1,0400

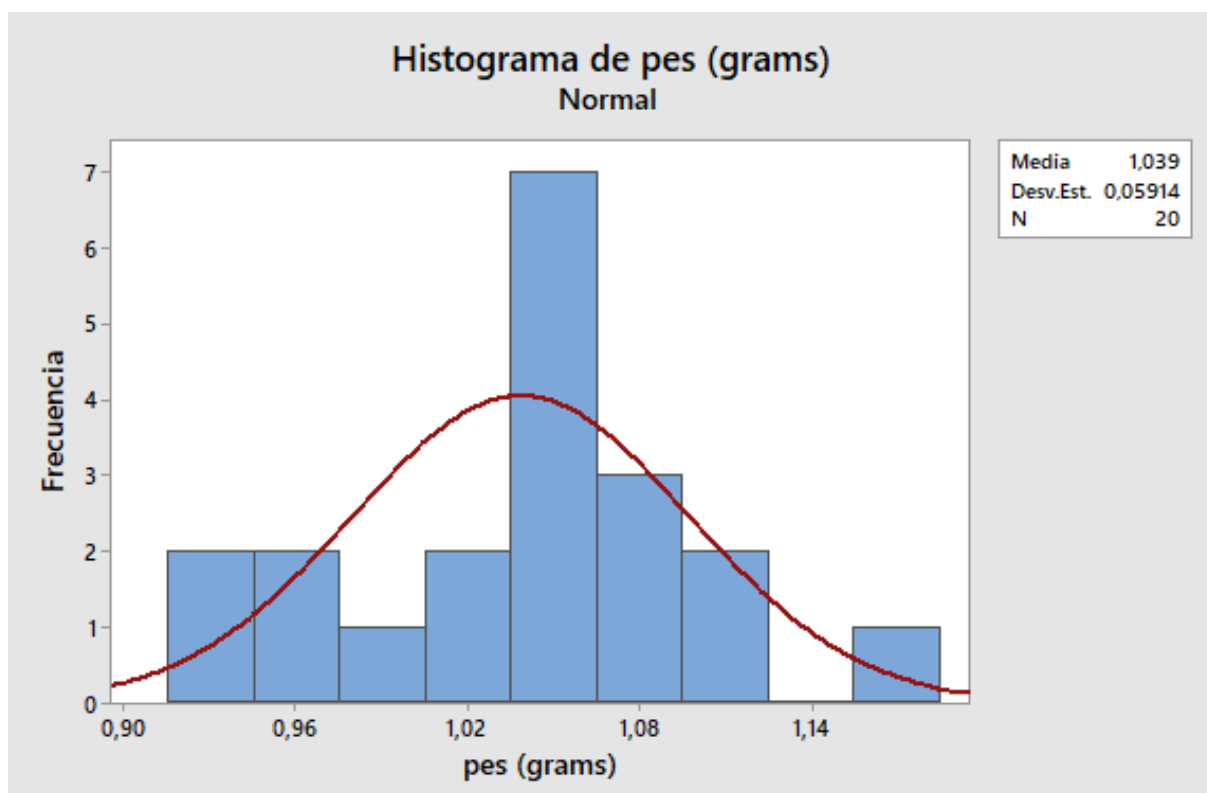


Figura 118: Histograma del pes per a gruix de 0,37 mm

- Caixes

A la Figura 119 es pot veure el diagrama de caixes del model. A més velocitat es veu una tendència que el pes disminueix. Amb la temperatura passa el contrari, al augmentar-la el pes augmenta.

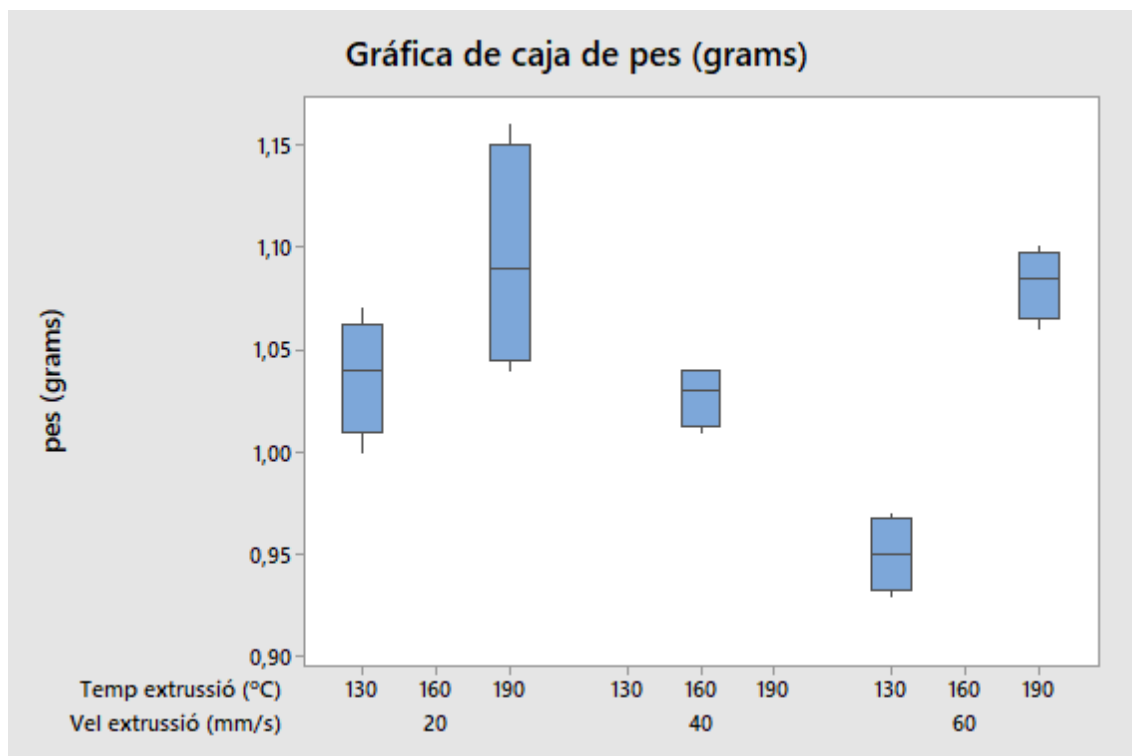


Figura 119: Diagrama de caixes del pes per a gruix de 0,37 mm

- Factorial

A la Taula 102 es poden veure els P valors del model, el P valor del model és 0,000.

Taula 102: P valors del model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	0,03610	38,34	0,000	SI
<i>Velocitat extrusió (mm/s)</i>	0,01000	10,62	0,005	SI
<i>Vel extrusió*Temp extrusió</i>	0,005625	5,97	0,027	SI

A la Taula 103 es pot veure a la l'ajustament quadràtic de les dades del pes.

Taula 103: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0306866	78,75%	73,08%	62,21%

L'equació que defineix el model és la següent:

$$Pes = 1,0379 - 0,00625 * Vel\ extrusió \left(\frac{mm}{s}\right) + 0,000333 * Temp\ extrusió\ (^{\circ}C) \\ + 0,000031 Vel\ extrusió \left(\frac{mm}{s}\right) * Temp\ extrusió\ (^{\circ}C) - 0,0137 Punt\ central$$

A continuació es representen els diagrames principals amb els elements significatius.

- Efectes principals

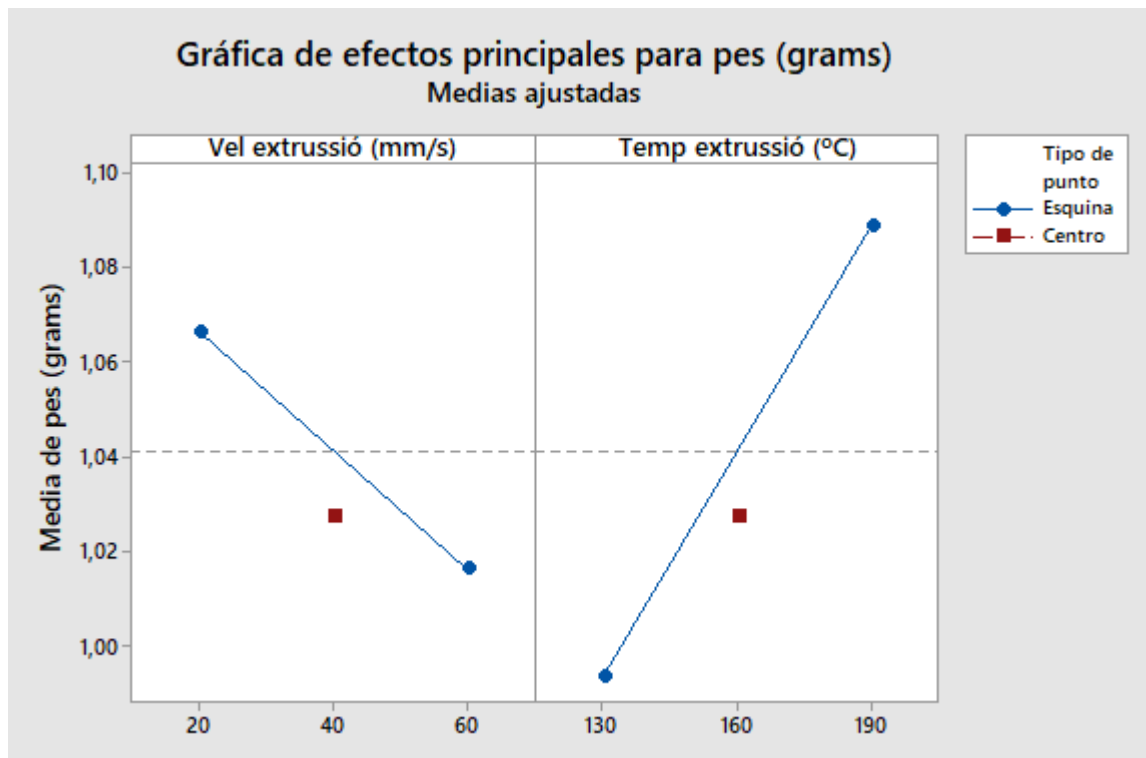


Figura 120: Elements principals del pes pel gruix de 0,37 mm

A la Figura 120 es poden veure els efectes principals, tal com es veu la temperatura té un pendent més pronunciat. El punt central en els dos casos no estableix cap mínim.

- Interaccions

A la Figura 121 es poden veure les interaccions del pes pel gruix de 0,37 mm.

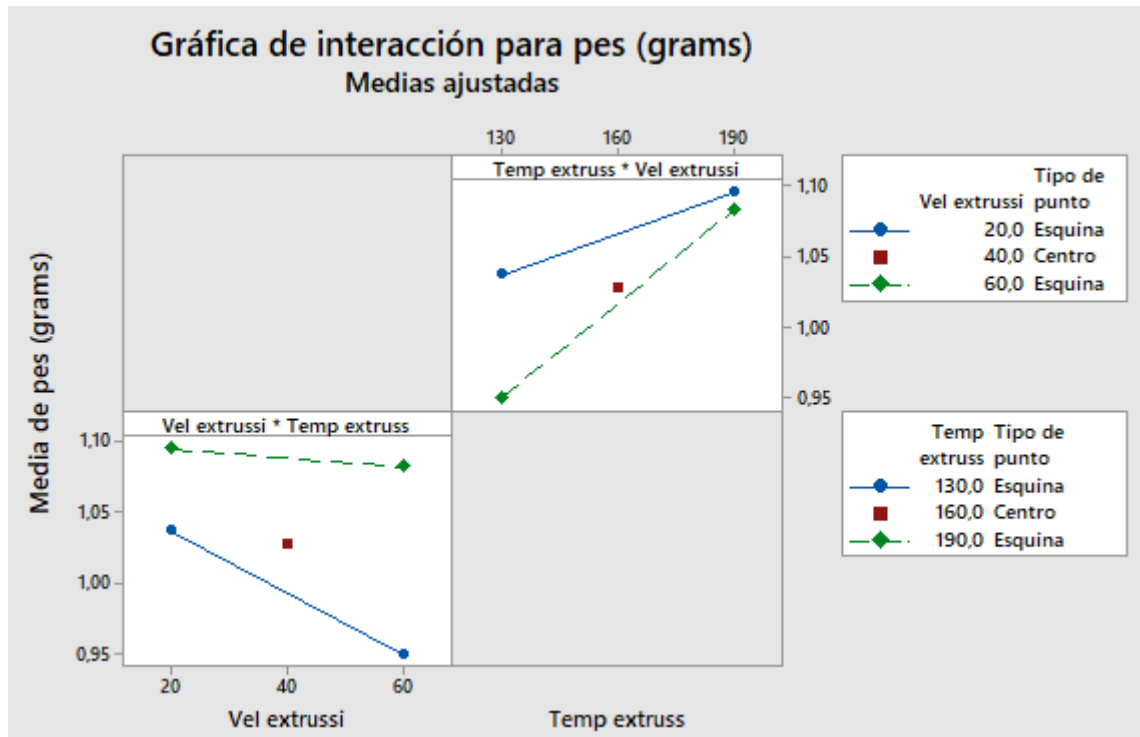


Figura 121: Interaccions del pes pel gruix de 0,37 mm

Gruix de 0,57 mm

- Histograma

A la Figura 122 es pot veure l'histograma del pes pel gruix de 0,57 mm, tal com es pot veure la desviació estàndard és força baixa, de l'ordre de la centèsima, si es compara la mitjana amb el valor teòric (1,63 grams) per el gruix de 0,57, l'error es força baix. Es pot veure que a mesura que s'augmenta el gruix l'error respecte al pes teòric es redueix.

Taula 104: Estadístics bàsics del pes per a gruix de 0,57 mm

Variable	Numero mostres	Mitjana	Error estàndard mitjana	Desviació estàndard	Mediana
Pes (g)	20	1,6425	0,0186	0,0830	1,6450

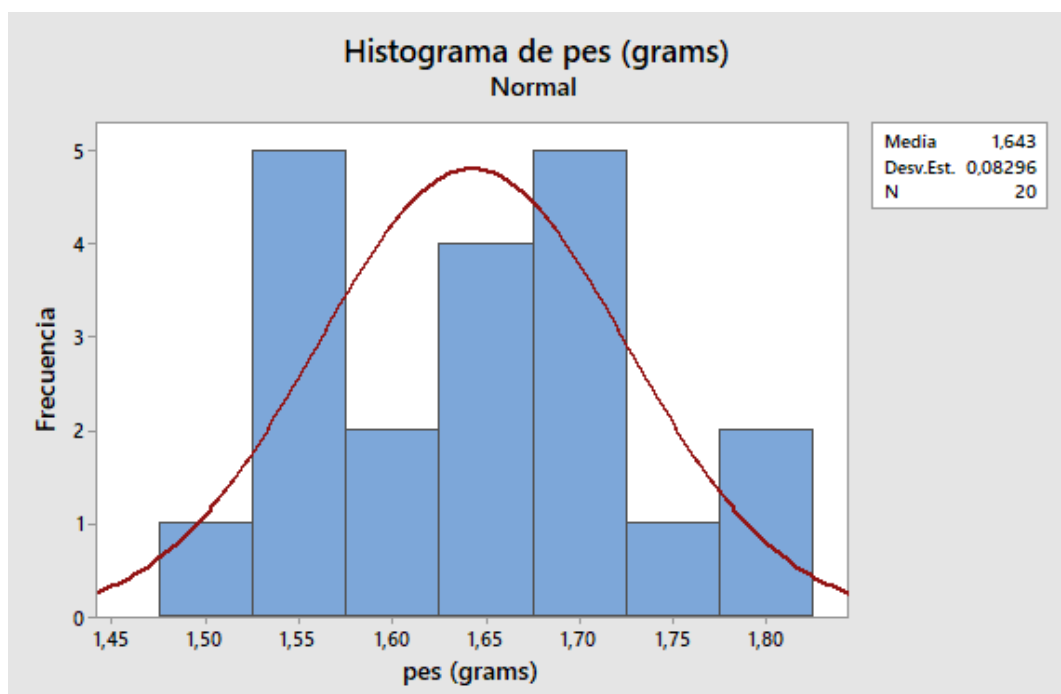


Figura 122: Histograma del pes pel gruix de 0,57 mm

- Caixes

A la Figura 123 es pot veure el diagrama de caixes del model. A més velocitat es veu que la tendència del pes és a disminuir, en aquest cas l'augment de temperatura pràcticament no aporta variació.

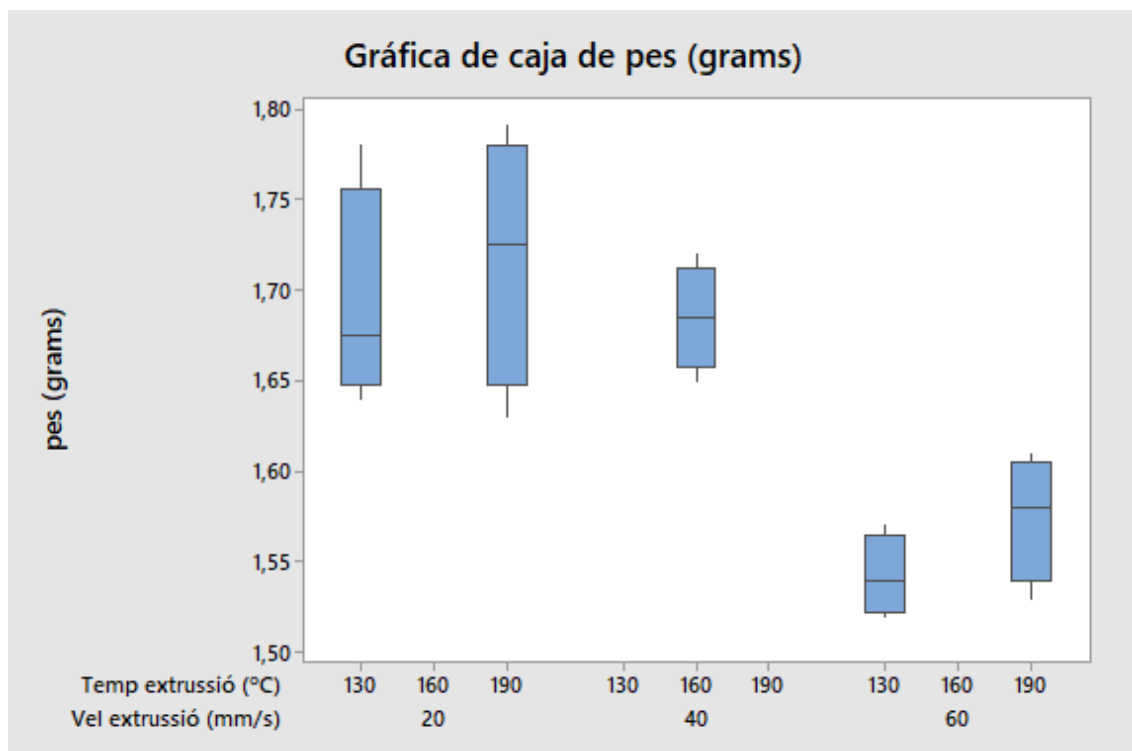


Figura 123: Diagrama de caixes del pes pel gruix de 0,57 mm

- Factorial

A la Taula 105 es poden veure els P valors del model, el P valor del model és 0,000.

Taula 105: P valors del model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
<i>Temperatura extrusió (°C)</i>	0,003306	1,51	0,238	NO
<i>Velocitat extrusió (mm/s)</i>	0,085556	39,10	0,000	SI
<i>Vel extrusió*Temp extrusió</i>	0,000056	0,03	0,875	NO

A la Taula 106 es pot veure l'ajustament quadràtic de les dades del pes.

Taula 106: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0467796	74,90%	68,21%	55,38%

Si s'extreuen els valors no significatius i s'obté la Taula 107, el P valor del model és 0,000.

Taula 107: P valors del model

Paràmetre	SC Ajustada	Valor F	Valor P	Significatiu
<i>Velocitat extrusió (mm/s)</i>	0,085556	40,19	0,000	SI

A la Taula 108 es pot veure l'ajustament quadràtic.

Taula 108: Ajustament quadràtic del model

S	R-Quadrat	R-Quadrat ajustat	R-Quadrat predeterminat
0,0461376	772,33%	69,07%	62,96%

L'equació que defineix el model és la següent:

$$Pes = 1,7781 - 0,003656 * Vel\ extrusió \left(\frac{mm}{s}\right) + 0,0531 Punt\ central$$

A continuació es representen els diagrames principals amb els elements significatius.

- Efecte principal

A la Figura 124 es poden veure els efectes principals, tal com es veu la temperatura té un pendent més pronunciat. EL punt central no estableix cap mínim.

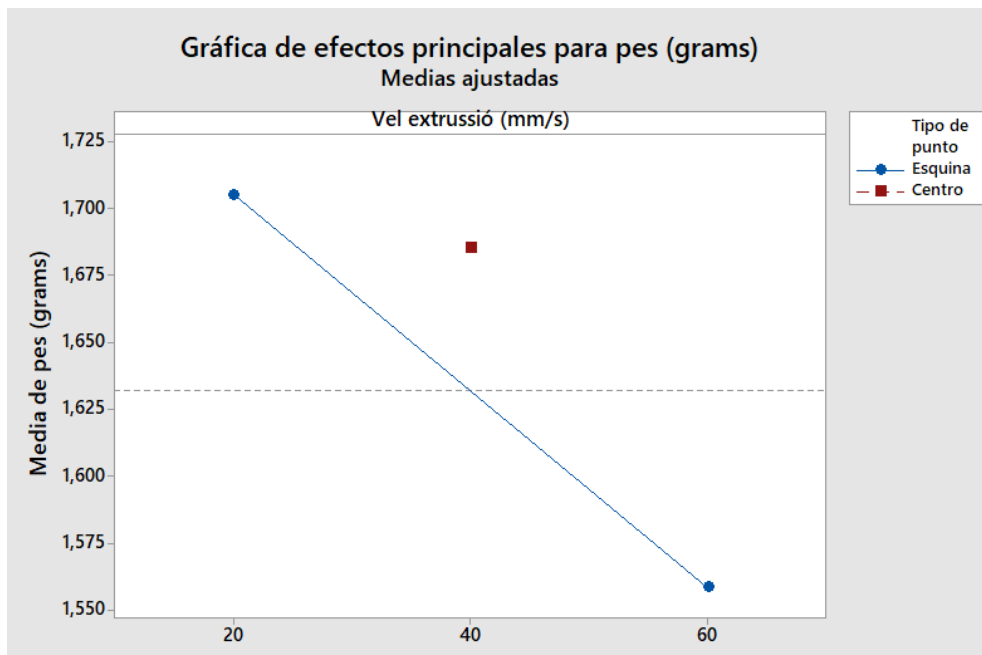


Figura 124: Efectes principals pel pes pel gruix de 0,57 mm

En aquest cas no hi ha interaccions significatives.

B.2 Dades experimentals

Taula 109: Dades experimentals

Proveta	Gruix (mm)	Velocitat (mm/s)	Tª capçal (°C)	G1 (mm)	G2 (mm)	G3 (mm)	G4 (mm)	G5 (mm)	pes (g)	Rug (µm)	Temps (min)
1.1	0,2	20	130	0,27	0,255	0,283	0,268	0,263	0,72	1,37	15
1.2	0,2	20	130	0,298	0,285	0,297	0,289	0,272	0,78	4,073	15
1.3	0,2	20	130	0,284	0,283	0,283	0,277	0,289	0,76	1,94	15
1.4	0,2	20	130	0,282	0,28	0,261	0,273	0,279	0,74	3,492	15
1.13	0,2	20	190	0,294	0,267	0,291	0,269	0,268	0,74	3,374	15
1.14	0,2	20	190	0,345	0,329	0,284	0,306	0,302	0,8	7,967	15
1.15	0,2	20	190	0,287	0,284	0,288	0,255	0,289	0,77	1,388	15
1.16	0,2	20	190	0,274	0,334	0,277	0,332	0,287	0,77	16,78	15
1.5	0,2	60	130	0,245	0,241	0,271	0,25	0,245	0,68	2,053	6
1.6	0,2	60	130	0,251	0,261	0,258	0,238	0,239	0,66	1,015	6
1.7	0,2	60	130	0,261	0,253	0,26	0,224	0,276	0,68	1,089	6
1.8	0,2	60	130	0,234	0,245	0,214	0,232	0,242	0,62	1,76	6
1.17	0,2	60	190	0,286	0,282	0,298	0,264	0,275	0,76	3,664	6
1.18	0,2	60	190	0,282	0,281	0,29	0,284	0,256	0,78	1,314	6
1.19	0,2	60	190	0,273	0,276	0,28	0,235	0,277	0,76	1,36	6
1.20	0,2	60	190	0,28	0,304	0,244	0,254	0,292	0,77	2,605	6
1.9	0,2	40	160	0,263	0,244	0,278	0,255	0,254	0,7	0,86	8
1.10	0,2	40	160	0,248	0,288	0,291	0,261	0,271	0,75	1,583	8
1.11	0,2	40	160	0,261	0,26	0,271	0,255	0,267	0,71	1,648	8
1.12	0,2	40	160	0,25	0,264	0,25	0,249	0,255	0,71	1,924	8
2.1	0,4	20	130	0,367	0,347	0,389	0,365	0,368	1	1,523	30
2.2	0,4	20	130	0,39	0,386	0,405	0,416	0,385	1,07	2,477	30
2.3	0,4	20	130	0,385	0,374	0,376	0,372	0,382	1,04	1	30
2.4	0,4	20	130	0,386	0,392	0,369	0,375	0,389	1,04	2,949	30
2.13	0,4	20	190	0,391	0,398	0,458	0,413	0,4	1,12	1,729	30
2.14	0,4	20	190	0,409	0,446	0,414	0,44	0,423	1,16	0,901	30
2.15	0,4	20	190	0,392	0,357	0,41	0,394	0,409	1,04	1,267	30
2.16	0,4	20	190	0,369	0,409	0,361	0,357	0,38	1,06	1,445	30
2.5	0,4	60	130	0,397	0,372	0,429	0,417	0,386	0,93	34,003	12
2.6	0,4	60	130	0,334	0,362	0,355	0,348	0,345	0,94	0,947	12
2.7	0,4	60	130	0,413	0,389	0,415	0,395	0,41	0,97	29,587	12
2.8	0,4	60	130	0,361	0,387	0,331	0,37	0,354	0,96	3,206	12
2.17	0,4	60	190	0,391	0,373	0,424	0,409	0,392	1,1	0,834	12
2.18	0,4	60	190	0,397	0,396	0,435	0,425	0,377	1,08	1,809	12
2.19	0,4	60	190	0,396	0,389	0,412	0,381	0,397	1,09	0,944	12
2.20	0,4	60	190	0,409	0,4	0,374	0,377	0,394	1,06	1,321	12
2.9	0,4	40	160	0,36	0,344	0,391	0,376	0,354	1,01	1,608	16
2.10	0,4	40	160	0,353	0,377	0,377	0,403	0,355	1,04	1,048	16
2.11	0,4	40	160	0,372	0,362	0,367	0,352	0,377	1,04	1,199	16
2.12	0,4	40	160	0,364	0,37	0,345	0,342	0,375	1,02	0,856	16

3.1	0,6	20	130	0,626	0,582	0,618	0,595	0,592	1,67	3,048	55
3.2	0,6	20	130	0,625	0,593	0,63	0,593	0,58	1,78	1,122	55
3.3	0,6	20	130	0,592	0,596	0,608	0,598	0,584	1,68	0,813	55
3.4	0,6	20	130	0,624	0,601	0,646	0,564	0,545	1,64	1,128	55
3.13	0,6	20	190	0,608	0,548	0,632	0,581	0,595	1,63	1,297	55
3.14	0,6	20	190	0,604	0,622	0,668	0,62	0,587	1,7	2,505	55
3.15	0,6	20	190	0,7	0,68	0,63	0,647	0,561	1,75	1,183	55
3.16	0,6	20	190	0,62	0,695	0,636	0,676	0,572	1,79	2,983	55
3.5	0,6	60	130	0,564	0,53	0,57	0,553	0,561	1,57	1,277	21
3.6	0,6	60	130	0,576	0,581	0,533	0,548	0,55	1,55	1,323	21
3.7	0,6	60	130	0,565	0,513	0,567	0,528	0,541	1,53	0,803	21
3.8	0,6	60	130	0,545	0,566	0,526	0,545	0,531	1,52	1,361	21
3.17	0,6	60	190	0,563	0,534	0,587	0,538	0,556	1,59	0,982	21
3.18	0,6	60	190	0,547	0,566	0,547	0,547	0,532	1,53	1,086	21
3.19	0,6	60	190	0,566	0,528	0,602	0,547	0,568	1,61	0,951	21
3.20	0,6	60	190	0,561	0,567	0,574	0,56	0,539	1,57	0,639	21
3.9	0,6	40	160	0,616	0,573	0,634	0,588	0,602	1,69	2,378	30
3.10	0,6	40	160	0,614	0,605	0,601	0,602	0,574	1,65	1,351	30
3.11	0,6	40	160	0,598	0,592	0,618	0,638	0,637	1,72	1,049	30
3.12	0,6	40	160	0,627	0,602	0,587	0,596	0,599	1,68	3,068	30

ANNEX C DESCRIPCIÓ DE LES IMPRESSORES UTILITZADES

C.1 Impressora Ultimaker 3

La impressora de FDM utilitzada en la part experimental és la Ultimaker 3, degut a la seva gran versatilitat, genera un codi de fàcil comprensió i és una de les millors en relació qualitat-preu. Aquesta impressora s'utilitzarà per imprimir les làmines fines de PCL en el cas d'estudi.

Les parts principals de la Ultimaker 3 són les descrites a la Figura 125. A la part superior de la màquina es troben els capçals (1), que en aquesta màquina en particular només es poden moure en el pla X-Y. El que permet el moviment en l'eix Z és la taula (2), ja que va baixant el gruix de l'alçada de capa cada vegada que ha acabat la capa anterior. Per últim, la interfície de control amb la màquina (3) està format per una pantalla i un control giratori que també és un polsador. Per tal de transferir els programa a la màquina, a la part esquerra de la pantalla es troba una connexió tipus USB.

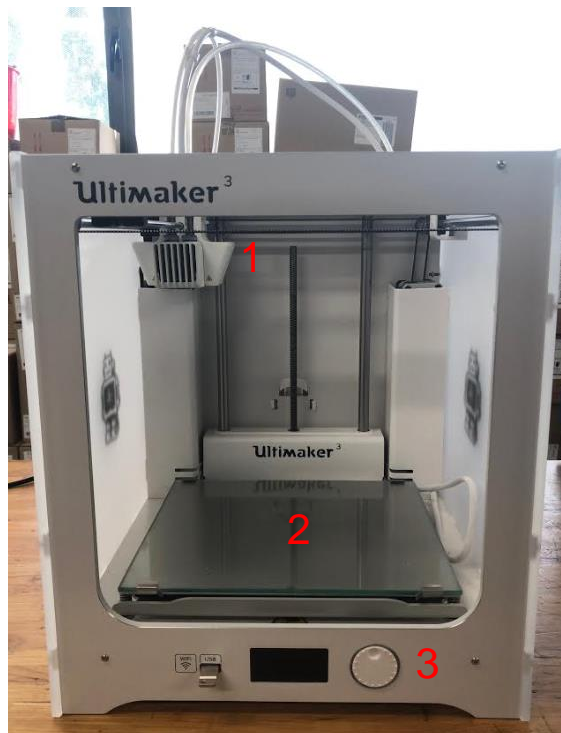


Figura 125: Vista frontal Ultimaker 3

Les dimensions principals de la màquina són de 342 mm x 380 mm x 389 mm, i un pes aproxima de 10,6 kg sense filaments. El preu és aproximadament de 3000 euros. El capçal d'aquesta impressora inclou 2 extrusors, per tal de poder extrudir amb la combinació de 2 materials, ja sigui per utilitzar un material de suport, o per extrudir un material per donar diferents propietats mecàniques a la peça. Les dimensions d'impressió per a un sol extrusor, són de 215 mm x 215 mm x 200 mm i per 2 extrusors són de 197 x 215 x 200 mm. Les especificacions tècniques principals de la Impressora són les recollides a la Taula 110.

Taula 110: Especificacions tècniques Ultimaker 3 (Font: [3W.4])

Resolució de capa	Amb capçal de 0,25 mm 150 - 60 μm Amb capçal de 0,40 mm 200-20 μm Amb capçal de 0,8 mm de 600 a 20 μm
Temperatura del llit	Entre 20 i 100 $^{\circ}\text{C}$
Anivellat del llit	Anivellat automàtic
Tecnologia d'impressió	FDM
Tipologia del capçal	Capçal amb 2 extrusors
Velocitat dels capçals	Entre 30 i 300 mm/s
Volum d'extrusió	Màxim de 24 mm ³ /s
Resolució en XYZ	X = 12,5 μm Y = 12,5 μm Z = 2,5 μm
Diàmetre del capçal	0,25 mm 0,4 mm i 0,8 mm
Temperatura del capçal	Entre 180 i 280 $^{\circ}\text{C}$
Temps escalfament capçal	Aproximadament 2 minuts
Temps escalfament llit	Aproximadament 4 minuts
Soroll de treball	Uns 50 dB

Com es pot veure a les especificacions de la màquina, és força versàtil, però no té l'opció de poder escalfar la cambra d'impressió a causa del fet que la impressora no està aïllada ni coberta. Hi ha models superiors amb una tecnologia molt semblant, del mateix fabricant que si ho permeten.



Figura 126: Capçals de la Ultimaker 3

A la Figura 126 s'hi poden veure les diferents parts del capçal. Cada un dels extrusors està indicat per una tipologia de materials determinada. L'extrusor 1, de referència del fabricant "AA", únicament pot extrudir materials plàstics no abrasius com per exemple PLA o ABS. Per altra banda el capçal 2 amb referència "BB", només pot extrudir PVA, que correspon al material de suport soluble proporcionat per Ultimaker. El punt 3 és el ventilador.



Figura 127: Posicionament bobines Ultimaker 3

A la Figura 127 es pot veure el posicionament de les bobines de filament a la part posterior de la impressora, cal tenir en compte que les bobines han de poder girar lliurement, ja que no hi ha res que les faci girar i no duen cap coixinet.

Afinitat de materials

A l'hora de fer combinacions de material amb aquest tipus d'impressora cal tenir molt en compte si els dos materials que es vol combinar són susceptibles a ser combinats. A la Figura 128 es pot veure el quadre de compatibilitats de materials proporcionat pel fabricant de la impressora Ultimaker 3.

	PLA	Tough PLA	ABS	Nylon	CPE	CPE+	PC	TPU 95A	PP	PVA	Breakaway
PLA	✓	ⓘ	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Tough PLA		✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
ABS			✓	✗	✗	✗	✗	ⓘ	✗	ⓘ	✓
Nylon				ⓘ	✗	✗	✗	ⓘ	✗	✓	✓
CPE					✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓
CPE+						ⓘ	✗	✗	✗	ⓘ	✓
PC							ⓘ	ⓘ	✗	✗	ⓘ
TPU 95A								ⓘ	✗	ⓘ	ⓘ
PP									ⓘ	✗	✗
PVA										N/A	N/A
Breakaway											N/A

✓ Officially supported ⓘ Experimental ✗ Not supported

[Index](#)

Figura 128: Taula de compatibilitat de materials Ultimaker (font: [3W.4])

Normalment els 2 materials a ser combinats han de tenir temperatures d'extrusió semblants, ja que quan se n'extrudís un sobre l'altre o en contacte amb l'altre el deformaria, ja que la temperatura l'afectaria molt notablement. Les fitxes tècniques de tots aquests materials es poden consultar a la pàgina web d'Ultimaker [3W.4].

Paràmetres del procés

El programari que utilitza la Ultimaker 3 és l'Ultimaker Cura", on hi ha una sèrie de paràmetres del procés que són modificables. Cal dir que el programa porta predeterminats els paràmetres per cada material, tot i això els paràmetres poden ser alterats sempre que es trobin dins els límits de les especificacions de la impressora. A continuació es presentaran les variables d'impressió que poden ser modificades.

- Qualitat

La qualitat ve a fer referència a l'alçada de capa que es vol donar al model. A més alçada de capa aconseguim una velocitat d'acumulació de capes molt més alta, és a dir, la cota Z més alta de la peça s'aconsegueix més ràpidament. Per contrapartida provoca un acabat superficial pitjor i també la precisió dimensional no és tan bona. Per alçades de capa baixes l'acabat superficial és més bo i la precisió dimensional és més acurada, però alenteix el procés de generació de gruix en l'eix Z. L'alçada de capa pot fer variar notablement les propietats mecàniques de la peça.

- Carcassa

S'entén com a carcassa el nombre de capes amb densitat pràcticament del 100% en les 3 dimensions de la peça, que formaran part de les parets que marcaran la geometria de la peça. El programari permet triar quantes capes es volen de paret, a la part inferior (en contacte amb el llit), a la part superior i als laterals. A major nombre de capes, més rígida es farà la paret, però més tardarà el model a imprimir-se. El programari deixa modificar el nombre de capes i el gruix de la capa.

- Emplenat

L'emplenat fa referència a quin patró i quina densitat es vol per aquest patró que omplirà el cos de la peça dins la carcassa. L'emplenat pot anar des d'un nombre molt baix fins al 100%, depenent de les propietats mecàniques que es vulgui donar a la peça. A més emplenat més pes tindrà i més rigidesa i susceptible a resistir esforços. Pel que fa al patró, el programari permet generar més de 10 trajectòries diferents, les principals i més utilitzades són les de línies rectes perpendiculars entre capes, les de quadrats i les de formes hexagonals. També és un dels factors que macarà les propietats mecàniques del model.

- Material

A la part del material, és on s'introduiran els paràmetres relacionats amb les propietats físiques i químiques del material per a una correcta impressió. Els possibles paràmetres a ajustar són

-Temperatura d'extrusió

-Refrigeració del capçal

-Temperatura del llit

-Temperatura de la cambra d'impressió

En la majoria d'ocasions aquests 4 paràmetres els proporciona el fabricant del filament, ja que tot i tractar-se de materials iguals, les condicions d'impressió varien entre els diferents fabricats. A més temperatura d'extrusió més fluidament sortirà el material, i millor serà l'adhesió entre capes, però al ser més líquid hi haurà menys control sobre cap a on flueix el material, i per tant, la precisió dimensional serà pitjor. Pel que fa a la temperatura del llit, a més temperatura hi haurà una millor unió entre el material i la base, interessa que sigui així, ja que degut a la solidificació tendeix a contraure's i aixecar-se de les puntes, provocant imperfeccions. Aquests 2 paràmetres afecten directament el gruix i l'acabat del model.

La temperatura de la cambra només és modificable en la 3NTR (explicada l'apartat de l'annex C.2), i és un factor clau en la difusió entre capes i en mantenir la temperatura del material entre que surt del capçal i se solidifica. El mateix succeeix amb la refrigeració del

capçal, el capçal incorpora un ventilador per tal de solidificar el més ràpid possible el material que està sent extrudit pel capçal. Si es vol que el material es mantingui més temps líquid quan entra en contacte amb el material ja extrudit es pot variar la velocitat d'aquest ventilador o arribar a parar-lo.

- Velocitat

Es refereix a la velocitat amb la qual el capçal recorre les direccions X i Y mentre està extrudint material. Aquest paràmetre afecta directament el gruix de la capa, a més velocitat menys material acumulat per unitat de temps, per tant menys gruix. El fabricant del filament també sol proporcionar aquest paràmetre d'acord amb les especificacions del material.

- Recorregut

Aquest paràmetre és un factor de seguretat, per tal que quan el capçal es mou sense extrudir per sobre el model, retregui per tal de no contactar amb cap fil extrudit. No afecta l'acabat final de la peça ni la precisió geomètrica.

- Suport

Normalment aquesta opció s'utilitza per quan la geometria requereix un suport per tal d'aguantar el material que queda en voladís a una certa distància de la taula. Aquest suport es pot generar amb el mateix material d'extrusió i retirar-lo manualment un cop s'ha imprès. L'altra opció és fer-lo amb el segon capçal amb un material de suport soluble, ja que facilita molt l'extracció. El programari deixa triar on es vol el suport i amb quin capçal generar-lo.

- Tipus d'adhesió al llit

Aquest paràmetre no té un efecte significatiu sobre la precisió geomètrica de la peça, la seva funció és la d'assegurar la perfecta adhesió del model sobre el llit durant tot el procés d'impressió. Una de les altres funcions que té és la de preparar el capçal per la impressió, fent que el fil surti del tot fluid, abans de començar a imprimir el model. Hi ha 3 tipus diferents d'adhesió a la taula:

-Tipus "Skirt": Tal com indica el seu nom fa una faldilla al voltat de la peça, sol ser 4 o 3 cordills junts que l'envolten, però no hi entren en contacte. Serveix només per preparar el capçal.

-Tipus "Brim": El tipus "brim" és força semblant a l'"skirt", però el material entra en contacte amb el model, serveix per preparar el capçal i ajudar a aguantar la peça al llit aconseguint més superfície de contacte. Sota el model no hi ha material.

-Tipus "Raft": Fa un llit sota el model, és dels 3 el que millor suporta la peça a la taula. L'únic inconvenient que comporta és que tarda força temps, i depèn de quin material s'utilitzi afectarà l'acabat de la cara que hi està en contacte.

- Extrusió dual

Dins el mode d'extrusió dual, és a dir, amb més un material a la vegada, el programari permet activar 2 opcions diferents de preparació del capçal per a optimitzar l'acabat de la peça i evitar imperfeccions durant el mode de doble extrusió. En aquesta impressora en particular, només pot estar extrudint amb un dels 2 capçals a la vegada, fet que provoca que el capçal que no s'utilitza es vagi refredant i escalfant cada cop que fa una capa. Això provoca que el fil a vegades s'obstrueixi i quedi a vegades enganxat una mica a la puntera de l'extrusor. Aquestes 2 opcions que proporciona el programari, serveixen per evitar que això succeeixi.

La opció "prime tower", tal com indica el seu nom és una torre circular, on abans de començar a extrudir, el capçal hi fa una trajectòria per sobre per tal d'eliminar el possible material que ha quedat penjat de l'extrusor en l'anterior extrusió.

La opció "Ooze shield", fa una carcassa envoltant la peça també per preparar el capçal entre canvis de material i també per mantenir millor la temperatura dels materials, tot i que és difícil si la temperatura ambiental és molt més baixa que la del llit.

Amb el correcte ajustament d'aquests paràmetres per a cada material, geometria i situació, es pot assegurar l'èxit en la impressió.

C.2 Impressora 3NTR A4-V4

L'altra impressora que s'ha utilitzat, amb una aplicació més encarada a l'àmbit industrial, és la 3NTR A4-V4. Els paràmetres bàsics de funcionament i de programari són molt semblants als de la Ultimaker 3, esmentats a l'apartat C.1. La diferència principal que hi ha amb la Ultimaker 3, és que incorpora un tercer capçal, té la capacitat d'escalfar la cambra i treballar a temperatures més altes, fent possible que pugui extrudir un ventall més ample de materials amb punts de fusió més elevats. Les dimensions principals de la màquina són de 600 mm x 700 mm x 600 mm, i un pes aproximat de 45 kg sense filaments. El preu és aproximadament de 24000 euros. A la Figura 129 es pot veure la impressora 3NTR A4-V4.



Figura 129: Impressora 3NTR

El capçal d'aquesta impressora inclou 3 extrusors, per tal de poder extrudir amb la combinació de 3 materials, ja sigui per utilitzar un material de suport, o per extrudir un material per donar diferents propietats mecàniques a la peça. A la Figura 130 es pot veure la col·locació de les bobines a la part posterior de la impressora. Les dimensions d'impressió són de 295 mm en X, 295 mm en Y i 200 mm en Z .

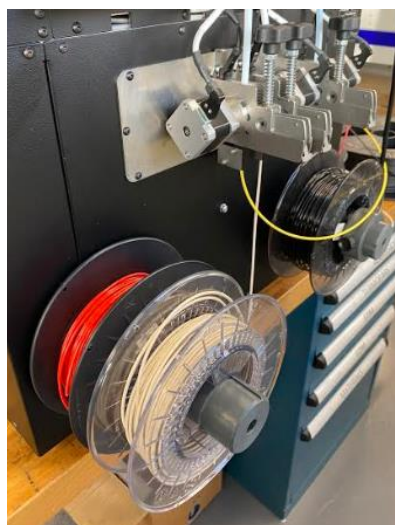


Figura 130: Posicionament bobines a la 3NTR

Les especificacions tècniques principals de la Impressora són les recollides a la Taula 111:

Taula 111: Especificacions tècniques 3NTR (Font: [3W.5])

Temperatura del llit	Entre 20 i 160 °C
Temperatura de la cambra	Entre 30 i 90 °C
Anivellat del llit	Anivellat automàtic
Tecnologia d'impressió	FDM
Tipologia del capçal	Capçal amb 3 extrusors
Velocitat dels capçals	Entre 30 i 300 mm/s
Volum d'extrusió	Màxim de 24 mm ³ /s
Resolució en XYZ	X = 11,0 µm Y = 11,0 µm Z = 2,5 µm
Diàmetre del capçal	0,2 mm 0,4 mm i 0,6 mm
Temperatura del capçal	Entre 150 i 450 °C
Temps escalfament capçal	Aproximadament 40 segons
Temps escalfament llit	Aproximadament 10 minuts
Soroll de treball	Uns 35 dB

Com es pot veure a les especificacions de la màquina, és força versàtil i a diferència de la Ultimaker 3, pot escalfar la cambra de treball. També en incorporar un tercer capçal permet utilitzar un segon material a part del principal i del de suport. També permet escalfar molt més els capçals, i per tant treballar amb materials amb una temperatura de fusió més elevada. En aquesta impressora els 3 capçals poden imprimir amb material de suport, ja que la tipologia dels extrusors ho permet. A l'hora de voler fer combinacions de material amb aquest tipus d'impressora cal tenir molt en compte si els dos materials que es volen combinar són susceptibles a ser combinats d'igual manera que amb la Ultimaker 3. Les fitxes tècniques de tots els materials i la seva compatibilitat es poden consultar a la pàgina web del fabricant dels filaments Filoalfa [3W.6].

ANNEX D EQUIPAMENT

D.1 Impressora Ultimaker 3

La impressora Ultimaker 3 del fabricant dels Països Baixos Ultimaker, és la impressora utilitzada per a la fabricació de les provetes en format làmina de l'assaig experimental. A la Figura 131 es pot veure la Ultimaker 3. El volum d'impressió és de 215 mm x 215 mm x 200 mm.



Figura 131: Impressora Ultimaker 3

Les seves característiques principals són les recollides a la Taula 112

Taula 112: Fitxa tècnica de la Ultimaker 3 (Font: [3W.4])

Resolució de capa	Amb capçal de 0,25 mm 150 - 60 μm Amb capçal de 0,40 mm 200 - 20 μm Amb capçal de 0,8 mm de 600 a 20 μm
Temperatura del llit	Entre 20 i 100 °C
Anivellat del llit	Anivellat automàtic
Tecnologia d'impressió	FDM
Tipologia del capçal	Capçal amb 2 extrusors
Velocitat dels capçals	Entre 30 i 300 mm/s
Volum d'extrusió	Màxim de 24 mm ³ /s
Resolució en XYZ	X=12,5 μm Y=12,5 μm Z=2,5 μm
Diàmetre del capçal	0,25 mm 0,4 mm i 0,8 mm
Temperatura del capçal	Màxim de 280 °C
Temps escalfament capçal	Aproximadament 2 minuts
Temps escalfament llit	Aproximadament 4 minuts
Soroll de treball	Uns 50 dB

D.2 Balança Kern PFB

La balança Kern PFB serveix per mesurar masses de fins a 1200 grams. S'utilitzarà per pesar les provetes.

- Rang de 0,01 grams a 1200 grams
- Resolució de 0,01 grams.



Figura 132: Balança Kern PFB

A la Figura 132 es pot veure la Balança Kern PFB.

D.3 Càmera tèrmica Image LR

La càmera tèrmica Image LR serveix per veure la fluctuació tèrmica d'un material o un fluid. S'utilitzarà per observar el gradient tèrmic de les provetes durant el procés d'impressió.



Figura 133: Càmera tèrmica Image LR

A la Figura 133 es pot veure la Càmera tèrmica Image LR

D.4 Màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544

La màquina de coordenades Mitutoyo està equipada amb un capçal Renishaw i té una alta resolució de mesura a alta velocitat i gran versatilitat de mesures en superfícies. La màquina de coordenades s'utilitzarà per a verificar dimensionalment els models estudiats en els casos industrials.

- Resolució de 0,001 mm
- Dimensions de la taula 500x400x400 mm



Figura 134: Màquina de coordenades Mitutoyo

A la Figura 134 es pot veure la màquina de coordenades Mitutoyo.

D.5 Micròmetre Mahr Micromar 40 EWW

Aquest micròmetre té una resolució de mil·lèsimes de mm, adequada pels requeriments de mesura de les provetes de l'assaig experimental, i molt versàtil gràcies a la seva facilitat d'ús. Per a les mesures realitzades s'hi van acoblar els palpadors circulars plans de 5 mm. El micròmetre s'utilitzarà per a la realització de mesures de gruixos de les provetes de l'estudi experimental.

- Resolució 0,001 mm
- Interval de mesura de 0 a 25 mm



Figura 135: Micròmetre Micromar 40 EWW

A la Figura 135 es pot veure el Micrometre Micromar 40 EWW.

D.6 Rugosímetre Mitutoyo Surftest SV 2100

El rugosímetre Mitutoyo Surftest SV 2100 és el rugosímetre que s'ha utilitzat per a mesurar la rugositat de les provetes en format làmina. La màquina adquireix les mesures a través d'un palpador prèviament calibrat.

- Resolució de 0,001 mm
- Dimensions de mesura X=100 mm i Z =350 mm



Figura 136: Rugosímetre Mitutoyo Surftest SV 2100

A la Figura 136 es pot veure el rugosímetre Mitutoyo Surftest.

D.7 Impressora 3ntr

La impressora 3NTR A4-V4 del fabricant Italià 3ntr, és la impressora utilitzada per a la fabricació de les peces dels casos industrials. A la Figura 137 es pot veure la 3NTR A4-V4. El volum d'impressió és de 295 mm x 295 mm x 200 mm.

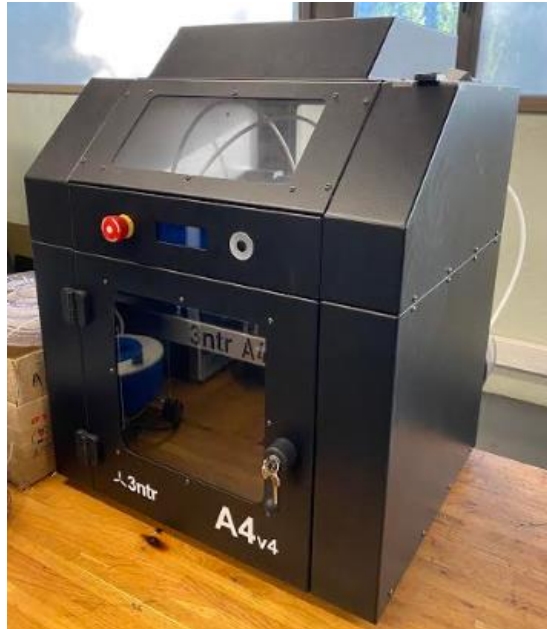


Figura 137: Impressora 3NTR

Les seves característiques principals són les recollides a la Taula 113.

Taula 113: Fitxa tècnica de la 3NTR A4-V4 (font: [3W.5])

Temperatura del llit	Entre 20 i 160 °C
Temperatura de la cambra	Entre 30 i 90 °C
Anivellat del llit	Anivellat automàtic
Tecnologia d'impressió	FDM
Tipologia del capçal	Capçal amb 3 extrusors
Velocitat dels capçals	Entre 30 i 300 mm/s
Volum d'extrusió	Màxim de 24 mm ³ /s
Resolució en XYZ	X 11,0 µm Y 11,0 µm Z 2,5 µm
Diàmetre del capçal	0,2 mm 0,4 mm i 0,6 mm
Temperatura del capçal	Màxim de 450 °C
Temps escalfament capçal	Aproximadament 40 segons
Temps escalfament llit	Aproximadament 10 minuts
Soroll de treball	Uns 35 dB

ANNEX F PRESSUPOST

Material	Quantitat (kg)	Preu unitari (euros/kg)	Preu total (euros)
PCL assajos previs	0,04	140	5,6
PCL treball experimental	0,071	140	9,94

Ma obra	Hores (h)	Preu unitari (euros/h)	Preu total (euros)
Anàlisi de la literatura	25	6	150
Adquisició coneixements funcionament equips	25	0	0
Experimentació impressora Ultimaker	30	20	600
Mesura gruixos, pesos i rugositats	20	10	200
Anàlisi de resultats	50	12	600
Tractament de dades	120	10	1200
Casos industrials	5	6	30
Redacció del projecte	140	6	840

Maquinaria i eines	Hores (h)	Preu unitari (euros/h)	Preu total (euros)
Impressora Ultimaker	30	20	600
Rugosímetre	5	50	250
Màquina de coordenades	1	50	50
Micròmetre	5	40	200

Material	15,54
Ma obra	3620
Maquinaria	1100
Total	4.735,54

ANNEX G FITXES TÈCNIQUES MATERIALS

Thermec-ZED

<u>PROPERTIES</u>			
PROPERTIES	VALUE	METOD AND CONDICTION	
PHYSICAL & MECHANICAL	Density	1,27 g/cm ³	ISO 1183
	Tensile strength	60 Mpa	ISO 527 - 23°C
	Tensile Elongation	>20%	ISO 527 - 23°C
	Tensile Modulus	2500 Mpa	ISO 527 - 23°C
	Charpy Impact, notched	42.0 kJ/m ²	ISO 179 - 23°C
THERMAL	Heat Deflection Temperature	105°C	1.82 MPa ISO 75
	Melt Point	280°C	ISO 3146
	Flammability:	UL94 V-0 Class	
<u>SUGGESTED PRINTER SETTING</u>			
	VALUE	UNIT	
Extruder Temperature	310 - 340	°C	
Print Speed	30 - 50	mm/s	
Bed Material	80 - 100	°C	
Drying Temperature	110 ° C for 4-6 hr		
<u>PRODUCT DETAILS & CERTIFICATION</u>			
Diameter	1,75 mm 2,85 mm	Tolerance ± 0,05mm Tolerance ± 0,10mm	

Figura 138: Fitxa tècnica Thermec-ZED (font:[3W.6])

ABS

PROPERTIES			
PROPERTIES	VALUE	METOD AND CONDICTION	
PHYSICAL & MECHANICAL	Density	1,05 g/cm ³	ISO 1183/b
	Yield Stress	35 Mpa	ISO 527-1,2
	Tensile Modulus	1820 Mpa	ISO 527-1,2
	Flexural Strength	58 MPa	ISO 178
	Izod notched impact strength	23°C = 42 KJ/m ² / -30°C = 17 KJ/m ²	ISO 180-1A
THERMAL	Heat deflection temperature	97 °C	ISO 75
	Burning behavior	HB	UL 94
SUGGESTED PRINTER SETTING			
	VALUE	UNIT	
Extruder Temperature	250 - 290	°C	
Print Speed	30 - 60	mm/s	
Printbed temperature	80 -100	°C	
Drying Temperature	80 - 90	°C for 2-4 hr	
PRODUCT DETAILS & CERTIFICATION			
Diameter	1,75 mm 2,85 mm	Tolerance ± 0,05mm Tolerance ± 0,05mm	
Major Benefits	<ul style="list-style-type: none"> - Super high impact - Polishable - Resistant to low temperature - Good printability and resolution - Post processable 		

Figura 139: Fitxa tècnica ABS (font: [3W.6])

PCL

MATERIAL PROPERTIES	TYPICAL VALUE	TEST METHOD
Density	1.1 g/cm ³	ISO 1183-1
Tensile Strength	45 MPa	ISO 527
Elongation at yield	15 %	ISO 527
Tensile Modulus	350 MPa	ISO 527
Flexural Strength		ISO 178:2010
Flexural Modulus		ISO 178:2010
Izod impact strength (notched)	8 kJ/m ²	ASTM D256
Shore D Hardness	46	ASTM 2240
Heat Deflection Temperature	57°C	ISO 75 [0,45 MPa]
PRINT RECOMMENDATIONS		
Nozzle Temperature	130 - 170 °C	
Bed Temperature	30 - 45 °C	
Print Speed	20 - 40 mm/s	
Bed Adhesion	Smoothpaper / PEI Sheet	

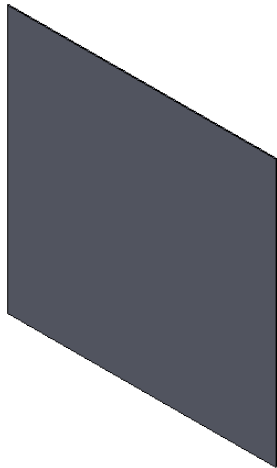
Figura 140: Fitxa tècnica PCL (font:[3W.7])

ANNEX H PLÀNOLS

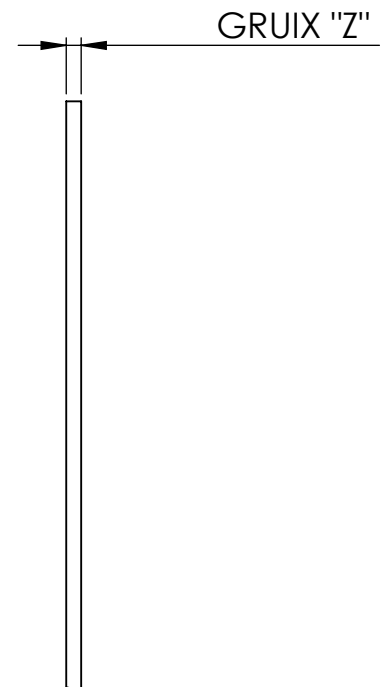
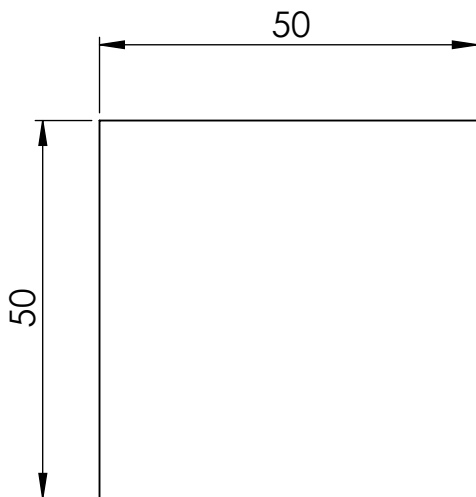
Plànol 1: Làmina de PCL

Plànol 2: Trompetes d'admissió


Plànol 3: Pròtesi de Canell

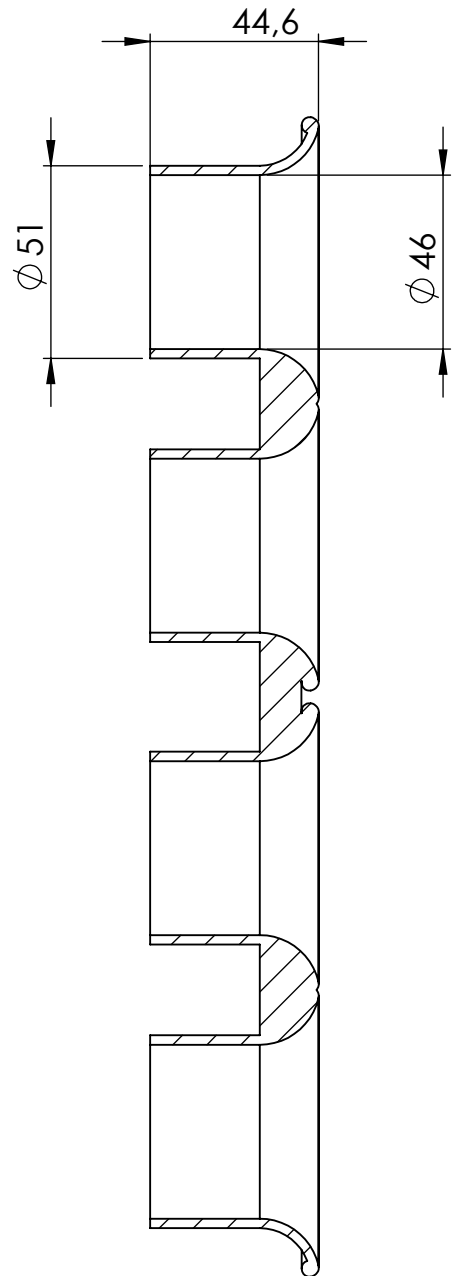
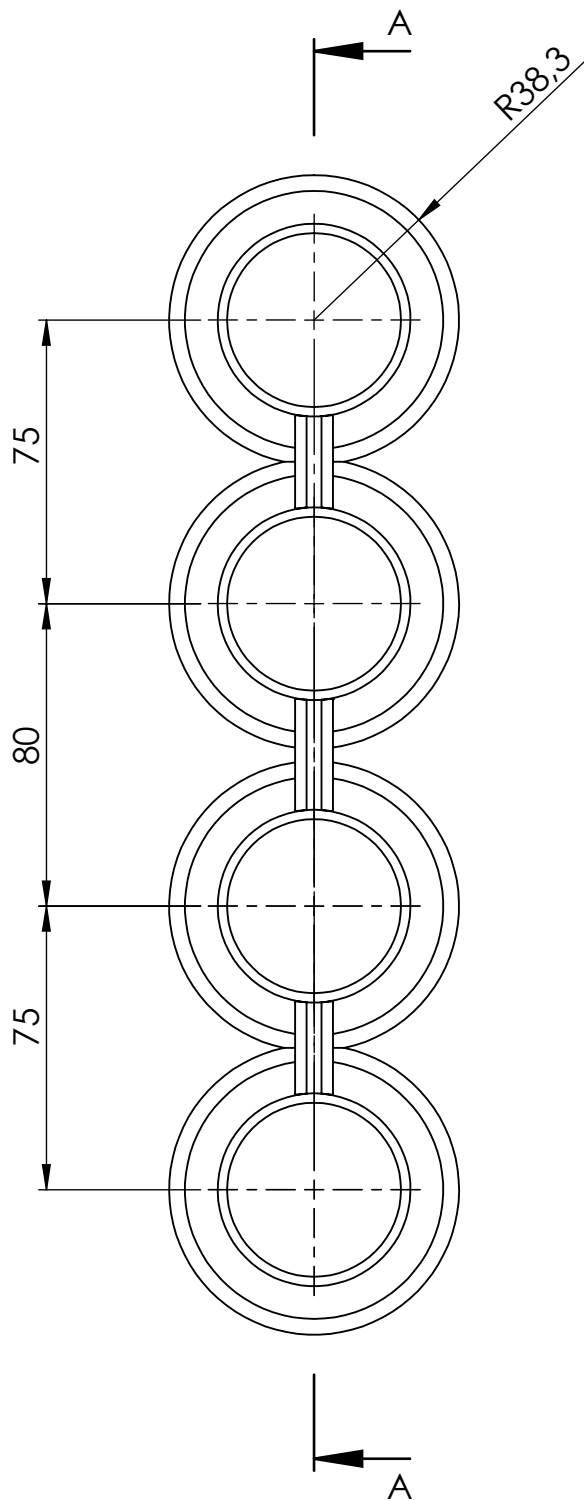


El gruix Z depen de cada eperimentació i te un rang de 0,1 a 0,6 mm




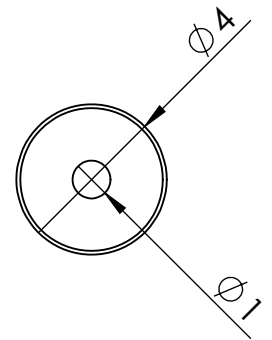
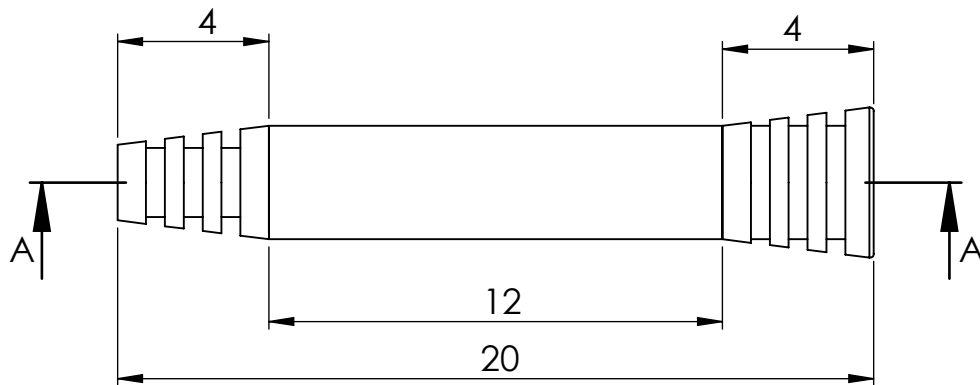
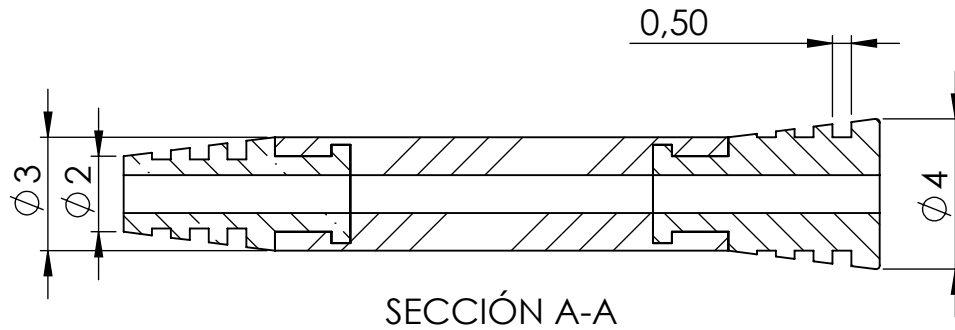
DETALLE A
ESCALA 10 : 1


	Data	Nom	Cognom	
Dibuixat	18/05/2020	Marc	Gudayol	
Comprov.				
id.s.norm			ISO-UNE	
Escala	<i>Làmina de PCL</i>			Nº plànol: 1
1:1				Material: PCL
				Especialitat: MEI



SECCIÓ A-A

	Data	Nom	Cognom	
Dibuixat	19/05/2020	Marc	Gudayol	
Comprov.				
id.s.norm			ISO-UNE	
Escala	<i>Trompetes admissió</i>			Nº plànol: 2
1:2				Material: ABS
				Especialitat: MEI



	Data	Nom	Cognom				
Dibuixat	26/05/2020	Marc	Gudayol				
Comprov.							
id.s.norm			ISO-UNE				
Escala	<i>Pròtesi lligament canell</i>			Nº plànol: 3			
5:1							Material: ABS
							Especialitat: MEI