

Treball final de grau

**Estudi: Grau en Enginyeria en Tecnologies
Industrials**

Títol: Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra
contínua en peces per extrusió de filament

Document: Memòria

Alumne: Ferran González Avellí

Tutor: Inés Ferrer Real i Norbert Blanco Villaverde

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria de processos de fabricació / Enginyeria
Mecànica

Convocatòria (mes/any): Juny 2019

Vull agrair al grup de recerca GREP de la Universitat de Girona l'oportunitat de permetre'm desenvolupar aquest estudi, en especial a la Doctora Inés Ferrer Real i el Doctor Norbert Blanco Villaverde, tutors del treball final de grau, per la seva exigència, dedicació i suport. També vull agrair el suport a la Doctora Marina Vives Mestres el seu suport en la part estadística d'aquest projecte.

També m'agradaria expressar el meu agraïment etern a la meva família pel seu recolzament i estima incondicional, en especial a la meva parella i els meus pares, res d'això hauria sigut possible sense ells.

ÍNDIX

Document 1 - Memòria

ÍNDIX	I
ÍNDIX DE TAULES	III
ÍNDIX DE FIGURES	V
1 INTRODUCCIÓ	1
1.1 ANTECEDENTS	1
1.2 OBJECTE	2
1.3 ESPECIFICACIONS I ABAST	2
2 DESCRIPCIÓ DE LA TECNOLOGIA	4
2.1 DESCRIPCIÓ DEL PROCÉS	4
2.2 DESCRIPCIÓ DE LA IMPRESSORA	4
2.3 PARÀMETRES DE PROCÉS	6
3 METODOLOGIA	9
4 EXPERIMENTACIÓ PRELIMINAR	10
4.1 EXPERIMENTACIÓ.....	10
4.1.1 Geometria 1	10
4.1.2 Geometria 2	11
4.1.3 Geometria 3.....	14
4.2 RESULTAT DE L'EXPERIMENTACIÓ PRELIMINAR	16
4.2.1 Geometria 1	16
4.2.2 Geometria 2	22
4.2.3 Geometria 3	27
5 EXPERIMENTACIÓ AMB REFORÇ DE FIBRA CONTÍNUA	29
5.1.1 Geometria de les peces	29
5.1.2 Disseny d'experiments i paràmetres de procés.....	31
5.1.3 Procediment.....	34
5.1.3.1 <i>Assecatge</i>	34
5.1.3.2 <i>Pes</i>	34
5.1.3.3 <i>Gruix</i>	34
5.1.3.4 <i>Amplada</i>	35
5.1.3.5 <i>Assaig a tracció</i>	35
5.1.3.6 <i>Assaig a flexió</i>	36

6 RESULTATS DE L'EXPERIMENTACIÓ AMB REFORÇ DE FIBRA	
CONTÍNUA.....	37
6.1 PES.....	37
6.2 GRUIX I AMPLADA	38
6.3 ASSAIG A TRACCIÓ	40
6.4 ASSAIG A FLEXIÓ	46
7 RESUM DEL PRESSUPOST.....	49
8 CONCLUSIONS.....	50
9 RELACIÓ DE DOCUMENTS	52
10 BIBLIOGRAFIA.....	53
11 ANNEXOS.....	55
ANNEX A. EQUIPAMENT	55
A1. Markforged MarkTwo	55
A2. Heraeus Vötsch VTRK500	56
A3. Mahr Micromar 40 EWV.....	56
A4. Mitutoyo Crysta Apex 544	57
A5. Controls Model 11 – DO628.....	57
A6. Peu de rei Horex.....	58
A7. MTS Insight 50000N.....	58
A8. Extensòmetre Epsilon 3542	59
ANNEX B. MATERIALS	60
B1. Nylon	60
B2. Fibra de carboni.....	61
ANNEX C. RESULTATS	62
C1. Geometria 1.....	62
C2. Geometria 2	65
C3. Geometria 3	70
C4. Pes.....	71
C5. Gruix.....	72
C6. Amplada.....	74
C7. Assaig a tracció	75
C8. Assaig a flexió	79
ANNEX D. TRENCAMENT DE LES PROVETES	81
ANNEX E. PRESSUPOST	86

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Paràmetre fixes de la geometria 1	11
Taula 2. Paràmetres variables de la geometria 1	11
Taula 3. Paràmetres fixes de la geometria 2	14
Taula 4. Paràmetres variables de la geometria 2	14
Taula 5. Paràmetres fixes i variables de la geometria 3	15
Taula 6. Resultat de les mitjanes dels cubs	16
Taula 7. ANOVA del pla X	18
Taula 8. ANOVA del pla Y	20
Taula 9. ANOVA del pla Z	21
Taula 10. Resultats i errors en mitjana dels diàmetres en funció del tipus de geometria	23
Taula 11. Resultats de les mesures dels diàmetres, desviació estàndard i mitjana de la diferència	25
Taula 12. ANOVA de la diferència en funció de paràmetres	26
Taula 13. Paràmetres fixes dels experiments	31
Taula 14. Relació de combinacions i percentatges de fibra	33
Taula 15. Pes en funció del tipus de proveta i combinació	37
Taula 16. Gruixos i amplades en funció de la combinació i provetes	39
Taula 17. Tensió última en funció del tipus de combinació i de proveta	40
Taula 18. ANOVA de la σ_u en funció del tipus de proveta i de la combinació 1 i 3	42
Taula 19. Mòdul de Young en funció de la combinació i tipus de proveta	43
Taula 20. ANOVA del mòdul elàstic en funció del tipus de proveta i de la combinació 1 i 3	44
Taula 21. Elongació al trencament en funció de la combinació i tipus de proveta	45
Taula 22. Tensió de flexió en funció de la combinació	46
Taula 23. Flexió màxima en funció de la combinació	47
Taula 24. Resultats del mòdul de flexió	48
Taula 25. Característiques de la impressora	55
Taula 26. Característiques del forn climàtic	56
Taula 27. Característiques micròmetre digital	56
Taula 28. Característiques màquina de coordenades	57
Taula 29. Característiques principals de la bàscula	58
Taula 30. Característiques del peu de rei digital	58
Taula 31. Característiques màquina MTS Insight	58
Taula 32. Característiques de l'extensòmetre	59
Taula 33. Propietats mecàniques del Nylon	60

Taula 34. Propietats mecàniques de la fibra de carboni.....	61
Taula 35. Resultats de la geometria 1	63
Taula 36. Resultats de l'experiment 1 de la geometria 2	65
Taula 37. Resultats de l'experiment 2 de la geometria 2	67
Taula 38. Resultats de l'experiment 3 de la geometria 2.....	68
Taula 39. Resultats estadístics de l'anàlisi.....	70
Taula 40. Resultats del pes	71
Taula 41. Resultats de gruix.....	73
Taula 42. Resultats d'amplades	74
Taula 43. Resultats de l'assaig de tracció	75
Taula 44. Relació de la combinació amb n ^o de proveta ASTM D638 TYPE I	76
Taula 45. Relació de la combinació amb n ^o de proveta ASTM D3039 BALANCED AND SYMMETRIC	77
Taula 46. Relació de la combinació amb n ^o de proveta ASTM D3039 0 ^o UNIDIRECTIONAL.....	78
Taula 47. Resultat de l'assaig a flexió	79

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. Vistes generals de la impressora.....	5
Figura 2. Accessoris i material.....	6
Figura 3. Tipus d'emplenat de fibra.....	8
Figura 4. Disseny 3D de la geometria 1	10
Figura 5. Descripció sonotrode.....	12
Figura 6. Dimensions acoblaments sonotrode	12
Figura 7. Models 3D dels diferents acoblaments.....	13
Figura 8. Alçades on s'han pres les mesures dels diàmetres dels forats	14
Figura 9. Models 3D de la geometria 3	15
Figura 10. Dimensions dels forats del cub.....	15
Figura 11. Resultats de la impressió de la geometria 1	16
Figura 12. Resultats de la mitjana en funció del pla i el cub.....	17
Figura 13. Anàlisi descriptiva de la mesura del pla X de la geometria 1 en funció dels factors estat poliamida, % infill i posició.....	18
Figura 14. Posició i % d'infill en el pla X.....	19
Figura 15. Anàlisi descriptiva de la mesura del pla Y de la geometria 1 en funció dels factors estat poliamida, % infill i posició.....	20
Figura 16. Anàlisi descriptiva de la mesura del pla Z de la geometria 1 en funció dels factors estat poliamida, % infill i posició.....	21
Figura 17. Resultats de la impressió de la geometria 2.....	22
Figura 18. Diferència en funció de l'alçada de capa per la geometria quadrat.....	24
Figura 19. Diferència en funció del tipus de geometria amb alçada de capa de 0,1 mm	24
Figura 20. Gràfica d'interaccions de la geometria 2.....	25
Figura 21. Resultats de la impressió de la geometria 3	27
Figura 22. Provetas ASTM D638 TYPE I (165 x 13 x 3 mm).....	29
Figura 23. Provetes ASTM D3039	30
Figura 24. Provetas ISO 14125 CLASS IV (100 x 15 x 2 mm).....	31
Figura 25. Distribució de la fibra en les provetes ASTM D638 TYPE I.....	32
Figura 26. Distribució de la fibra en les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMMETRIC	32
Figura 27. Distribució de la fibra en les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	33
Figura 28. Distribució de la fibra en les provetes ISO 14125 CLASS IV	33
Figura 29. Punts on s'han pres les mesures de gruix i amplada dels diferents tipus de proveta.....	35

Figura 30. Gràfiques del (a) gruix i de (b) l'amplada en funció de la combinació	38
Figura 31. σ_u en funció de la combinació	40
Figura 32. Efectes principals de la σ_u en funció del tipus de proveta i de la combinació 1 i 3.....	42
Figura 33. Gràfica del mòdul de Young en funció de la combinació	43
Figura 34. Efectes principals del mòdul elàstic en funció del tipus de proveta i de la combinació 1 i 3	44
Figura 35. Gràfica de la elongació al trencament en funció de la combinació	45
Figura 36. Cambra climàtica.....	56
Figura 37. Micròmetre digital.....	56
Figura 38. Màquina de coordenades	57
Figura 39. Bàscula	57
Figura 40. Peu de rei digital	58
Figura 41. Màquina MTS Insight.....	58
Figura 42. Extensòmetre	59
Figura 43. Nylon	60
Figura 44. Fibra de carboni	61
Figura 45. Resultats de l'experiment 1 de la geometria 1	63
Figura 46. Resultats de l'experiment 2 de la geometria 1.....	63
Figura 47. Resultats de l'experiment 3 de la geometria 1.....	63
Figura 48. Resultats de la geometria 1 en funció del pla	64
Figura 49. Resultats per l'acoblament de 100 micres de l'experiment 1	66
Figura 50. Resultats de l'acoblament de 50 micres de l'experiment 1	66
Figura 51. Resultats de l'acoblament de 100 micres de l'experiment 2.....	67
Figura 52. Resultats per l'acoblament de 50 micres de l'experiment 2.....	68
Figura 53. Resultats de l'acoblament de 100 micres de l'experiment 3	69
Figura 54. Resultats de l'acoblament de 50 micres de l'experiment 3	69
Figura 55. Gràfica de tensió-deformació de les provetes ASTM D638 TYPE I	76
Figura 56. Gràfica tensió-deformació de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMMETRIC	77
Figura 57. Gràfica tensió-deformació de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMMETRIC	77
Figura 58. Gràfica tensió-deformació de les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL.....	78
Figura 59. Gràfica de tensió-deformació de les provetes ISO 14125 CLASS IV	79
Figura 60. Fórmula de la tensió de flexió	80
Figura 61. Fórmula del mòdul de flexió.....	80

Figura 62. Fórmula de la flexió al trencament	80
Figura 63. Trencament de les provetes ASTM D638 TYPE I combinació 1	81
Figura 64. Trencament de les provetes ASTM D638 TYPE I combinació 2.....	81
Figura 65. Trencament de les provetes ASTM D638 TYPE I combinació 3.....	82
Figura 66. Trencament de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC combinació 1.....	82
Figura 67. Trencament de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC combinació 2	82
Figura 68. Trencament de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC combinació 2	83
Figura 69. Trencament de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC combinació 3.....	83
Figura 70. Trencament de les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL combinació 1.....	83
Figura 71. Trencament de les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL combinació 3.....	84
Figura 72. Trencament de les provetes ISO 14125 CLASS IV combinació 1.....	84
Figura 73. Trencament de les provetes ISO 14125 CLASS IV combinació 2	85
Figura 74. Trencament de les provetes ISO 14125 CLASS IV combinació	85

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

La impressió 3D és una de les tecnologies més revolucionàries del segle XXI, però s'ha de remuntar als anys 80 per conèixer els principis d'aquesta tècnica de fabricació.

Durant els anys 80 Chuck Hull va inventar un aparell d'estereolitografia (*Stereolithography*, SLA) que consisteix en un mètode “capa per capa”, que, mitjançant el principi de la fotopolimerització crea models 3D a partir de resines sensibles als raigs UV.

A finals dels anys 80 S. Scott Crump, juntament amb la seva dona, inventen i patenten un nou procés de fabricació additiva anomenat *Fused Deposition Modeling* (FDM). Aquesta tècnica es basa en fondre filaments de polímers i mitjançant el mateix mètode de “capa per capa” crear un objecte 3D.

Durant els anys 90 van aparèixer varies empreses dedicades al desenvolupament de noves aplicacions CAD per treballar més còmodament amb les impressores 3D.

A l'any 2004, Adrian Bowyer, professor d'enginyeria mecànica a la Universitat de Bath als Estats Units, crea el projecte RepRap que consisteix seria un projecte de codi obert amb l'objectiu de fabricar una impressora 3D que pugui imprimir la majoria dels seus propis components amb filaments de PLA, ABS i altres materials polimèrics.

A l'any 2006 es construeix la primera màquina del tipus SLS (Sinterització per Làser Selectiu). Durant el mateix any, l'empresa Object, proveïdor de material i impressores 3D, crea una màquina capaç d'imprimir amb múltiples materials, incloent polímers i elastòmers.

A l'any 2009 va caducar la patent de la tecnologia FDM, fet que va comportar que moltes empreses entressin al mercat i que els preus de les màquines baixessin i fossin més assequibles. A partir del 2010 fins a dia d'avui, s'està vivint l'expansió de les impressores domèstiques i s'ha fet molt de ressò d'aquesta tecnologia entre la població.

Juntament amb aquesta expansió d'impressores domèstiques hi ha hagut una evolució enorme en els materials que es poden utilitzar en les impressores. En els principis de la tecnologia, els materials utilitzats eren materials polimèrics, com el PLA o l'ABS entre d'altres. Actualment, però, hi ha molts altres materials amb els quals es pot imprimir en una màquina 3D, com per exemple els materials compòsits. Dintre dels materials compòsits es pot diferenciar els de fibra curta o fibra llarga. D'aquest últim tipus només hi ha una màquina capaç d'imprimir amb aquest tipus de fibra. L'empresa encarregada de dissenyar aquesta màquina és Markforged.

Es tracta doncs d'una tecnologia molt recent que té un gran ventall de possibilitats en l'àmbit de la producció de components reforçats "personalitzats" però que encara li queda una ampla investigació per tal de que sigui un procés fiable i estabilitzar els diferents paràmetres que hi influeixen.

La problemàtica general és que hi ha pocs estudis realitzats amb impressió FDM amb fibra contínua i menys encara estudis que orientin sobre la quantitat de reforç que s'ha de posar en una peça per assolir una sol·licitació mecànica concreta. D'aquesta necessitat sorgeix el present treball, que consisteix en estudiar els diferents paràmetres de procés, com afecten al resultat sobre la peça obtinguda i determinar quin són els valors més adients dels paràmetres i la quantitat de reforç per complir les necessitats de l'usuari i les sol·licitacions a les que estarà sotmesa la peça.

1.2 Objecte

L'objectiu principal del projecte és elaborar mapes de procés que relacionin la quantitat reforç de fibra que és necessari en funció dels requeriments mecànics al que estan sol·licitats els components que s'imprimeixen amb la tecnologia de FDM amb fibra contínua.

Prèviament, cal estudiar el principi de funcionament d'aquesta tecnologia, fent una caracterització dimensional de diferents components, i una caracterització mecànica del material base sobre el qual s'imprimeix el reforç.

Per tal de realitzar el treball, es duran a terme les següents tasques:

- Experiments preliminars amb material base, Nylon (PA), per tal de conèixer la tecnologia i l'efecte dels paràmetres de procés en el resultat final de la peça. En aquesta fase inicial també es caracteritzarà aquest material base que s'utilitzarà.
- Impressió de provetes estandarditzades amb diferents estratègies i graus de reforçament amb fibra contínua i caracterització de les propietats mecàniques.
- Anàlisi dels resultats obtinguts en l'experimentació preliminar i durant els assajos de les propietats mecàniques de les provetes.
- Extreure les conclusions dels resultats analitzats.

1.3 Especificacions i abast

L'abast del projecte inclou treballar amb poliamida (Nylon) i fibra de carboni proporcionada pel fabricant de Markforged. Els experiments que es faran, seran considerant com a geometries bàsiques les provetes d'assajos universals establerts en les normes de tracció, compressió i flexió, respectivament.

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

La realització d'aquest treball inclou la fabricació de provetes estandarditzades amb poliamida (PA) reforçades amb fibra de carboni contínua, els posteriors assajos per determinar les propietats mecàniques de les provetes en funció del grau de reforç amb el qual han estat impreses i els anàlisis adients dels resultats obtinguts per tal de delimitar els valors dels paràmetres de procés estudiats i que permeti ajustar aquests mateixos per aconseguir peces que tinguin els requeriments de destinatari.

Queda exclosa la caracterització química dels materials utilitzats en les impressions.

Per analitzar les dades estadísticament s'ha fet servir el software Minitab 2017.

Per la creació dels models 3D i dels plànols s'ha utilitzat el software de CAD Solidworks 2017.

2 DESCRIPCIÓ DE LA TECNOLOGIA

2.1 Descripció del procés

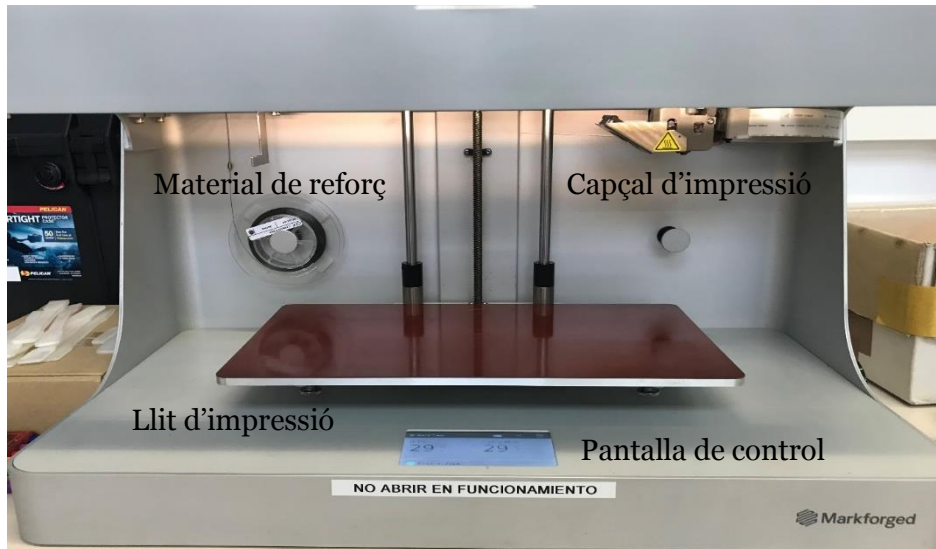
La impressió 3D és un procés de fabricació additiva mitjançant el qual, un cable d'un material polimèric o algun derivat es fos i juntament amb el moviment del capçal d'impressió modelen la peça en tres dimensions. Aquest procés es fa mitjançant la superposició de diferents capes successives del material fins arribar a l'obtenció de la peça final.

Actualment hi ha moltes variants de la impressió 3D, com són la de modelat per deposició fosa (FDM), també coneguda com *Fused Filament Fabrication (FFF)*, estereolitografia (SLA), fotopolimerització amb llum ultra violeta (SGC), sinteritzat selectiu amb làser (SLS), etc. En aquest estudi, s'analitzarà la tecnologia FDM.

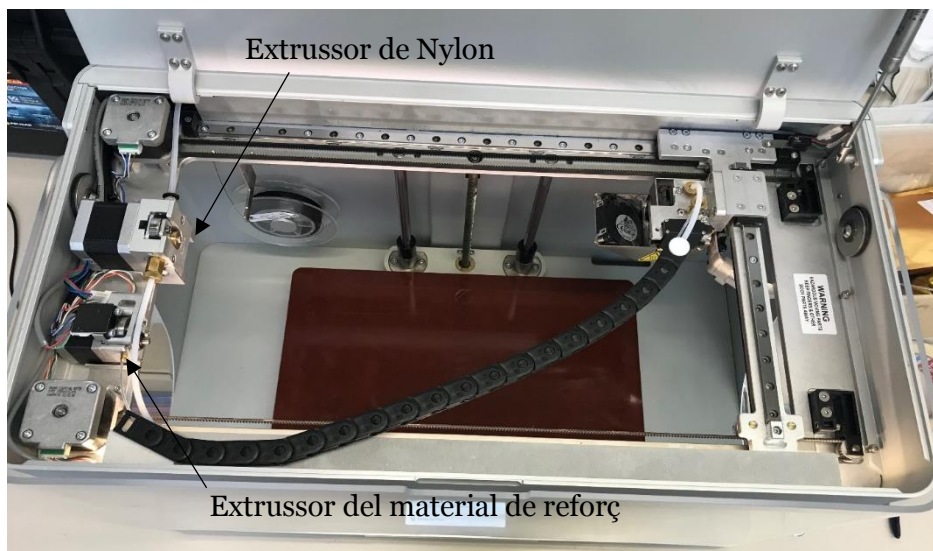
En concret, dins de la tecnologia FDM també hi ha diferents variants i en aquest cas la que s'estudiarà és *Composite Filament Fabrication (CFF)*. Aquesta variant utilitza dos tipus de material, un és un tipus de polímer, que és el material bàsic i l'altre és un tipus de reforç, que és el material que dóna una millora en les propietats mecàniques de la peça final.

2.2 Descripció de la impressora

L'estudi que es realitza està fet amb una impressora de l'empresa Markforged i el model és la Mark Two. Els materials polimèrics que pot imprimir aquesta màquina són poliamida (Nylon) i Onyx (poliamida amb fibra de carboni curta) i els materials de reforç que pot imprimir són fibra de carboni, fibra de vidre, fibra de vidre d'altres prestacions i Kevlar. Per el bon funcionament de la impressora, tots els materials han de ser originals de la marca Markforged.



(a) Vista frontal de la impressora



(b) Vista superior de la impressora

Figura 1. Vistes generals de la impressora



(a) Maletí on es troba el material



(b) Interior del maletí

Figura 2. Accessoris i material

2.3 Paràmetres de procés

Els paràmetres de procés variables per aquesta tecnologia venen donats pel software que ha desenvolupat la mateixa empresa Markforged. Aquest software, Eiger, és una plataforma online que permet realitzar les modificacions dels paràmetres de procés en un navegador web un cop has importat el fitxer en format .STL.

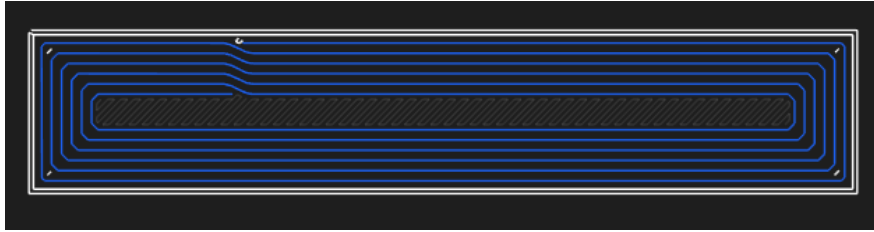
Aquests paràmetres es poden dividir en tres blocs diferenciats: general, que són sobre ajustos globals de la impressió; material base, que són paràmetres específics per el tipus de material; i material de reforç, que són paràmetres específics de la fibra que s'utilitzi en la impressió.

- GENERAL

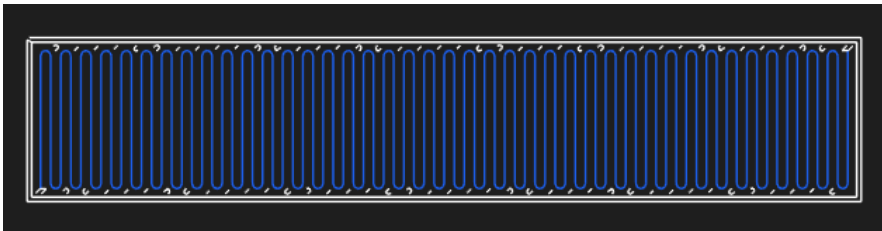
- Material: és el tipus de material amb el qual l'usuari vol imprimir (Nylon o Onyx).
- Material de reforç: és el tipus de material compòsit amb el qual l'usuari pot reforçar la peça. Aquesta màquina permet fer reforços amb quatre tipus de fibres: fibra de carboni, fibra de vidre, fibra de vidre d'altas prestacions i Kevlar.
- Orientació: és la posició de la peça respecte la superfície del llit on es vol imprimir.
- Utilització de suports (Use Supports): és la opció que permet afegir suports a la peça que s'imprimeix. Es possible seleccionar l'opció que afegixi suports a la nostra peça si és necessari degut a que té forats i/o altres característiques que faci que no quedi ben anivellada al llit d'impressió (ON/OFF).

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

- Mantenir zones estretes (*Expand Thin Features*): és la opció que proporciona un acabat superficial de millor qualitat a les zones amb gruixos petits. Es possible seleccionar l'opció en format (ON/OFF).
 - Utilització de contorn (*Use Brim*): és la opció que permet crear un contorn a les primeres capes de la peça que s'imprimeix per tal de tenir més superfície de contacte amb el llit. Es possible seleccionar l'opció en format (ON/OFF).
 - Unitats: són les unitats de mesura amb les que treballarem (sistema Mètric o sistema Imperial)
 - Escala: és la relació de mides de la peça respecte les cotes originals del dibuix.
 - Alçada de capa (*Layer Height*): és l'altura del material de cada capa d'impressió (0.1, 0.125 o 0.2 mm).
- MATERIAL BASE (veure Annex B1)
- Tipus d'emplenament (*Fill Patern*): és el patró que segueix a l'hora de fer l'interior de la peça. Aquest pot ser Triangular, Hexagonal, Rectangular o Sòlid.
 - Densitat d'emplenament (*Fill Density*): és la densitat interior amb la que fa el patró d'emplenat. Pel tipus triangular l'interval és 27%-53%, pel tipus hexagonal l'interval és 17%-56%, pel tipus rectangular l'interval és 0%-92% i pel tipus sòlid és 100%.
 - Capas sòlides als extrems (*Roof & Floor Layers*): és el nombre de capas totalment sòlides que fa al començar i a l'acabar la peça. L'interval total possible és 1-10; de forma que si per exemple, en seleccionem 4, farà 4 capas sòlides al començar i 4 al acabar, per tant, en total seran 8 capas totalment sòlides.
 - Parets sòlides (*Wall Layers*): són les capas laterals que fa a cada capa abans d'emplenar amb el patró (l'interval és 1-4).
- MATERIAL DE REFORÇ (veure Annex B2)
- Capas de fibra (*Total Fiber Layers*): són les capas interiors de fibra que tindrà la peça.
 - Tipus d'emplenament de fibra (*Fiber Fill Type*): és el tipus d'emplenament de les capas de fibra, que pot ser Concèntric (Figura 3 (a)) o Isotròpic (Figura 3 (b)).



(a) Reforç concèntric



(b) Reforç isotròpic

Figura 3. Tipus d'empenat de fibra

- Anells concèntrics de fibra (*Concentric Fiber Rings*): són els anells de fibra que volem que faci quan s'imprimeix amb el tipus concèntric. Si es vol imprimir amb tipus completament isotròpic, aquest valor ha de ser 0.
- Angles de la fibra (*Fiber Angles*): és la orientació amb la que volem que imprimeixi quan seleccionem el tipus d'empenament de fibra isotròpic (0°-180°).

3 METODOLOGIA

En aquesta secció s'explica la metodologia que s'ha seguit per a la realització de la part experimental del treball. Aquesta s'estructura en dos parts clarament diferenciades. Una primera part basada en experimentar amb material verge de poliamida, i una segona, en la que es va experimentar amb reforç de fibra contínua. Posteriorment a l'experimentació, s'analitzen tots els resultats obtinguts.

- a) Experimentació preliminar amb material verge de poliamida. Inicialment s'ha fet una experimentació preliminar per tal d'identificar la influència d'alguns paràmetres de procés sobre el resultat final de la peça. S'han utilitzat geometries bàsiques, com ara cubs i forats, per tal de conèixer els límits de la tecnologia.
- b) Experimentació amb reforç de fibra contínua. S'ha realitzat un seguit d'experiments amb geometries tipus proveta per determinar quina quantitat i quina distribució de la fibra és la òptima per complir unes sol·licitacions específiques. S'han fabricat tres tipus de provetes diferents amb tres combinacions de reforç de fibra contínua pels assajos de tracció, i una quarta proveta pels assajos de flexió.
- c) Anàlisi dels resultats: aquesta part consisteix en avaluar la caracterització realitzada en l'estudi preliminar de l'apartat anterior per determinar quins paràmetres són els més influents a l'hora de fabricar. També s'analitzaran els resultats de les propietats mecàniques de les peces obtingudes en l'etapa anterior de manera que es pugui obtenir quina combinació és la òptima en funció de la sol·licitació mecànica a la que estarà sotmesa la peça.

4 EXPERIMENTACIÓ PRELIMINAR

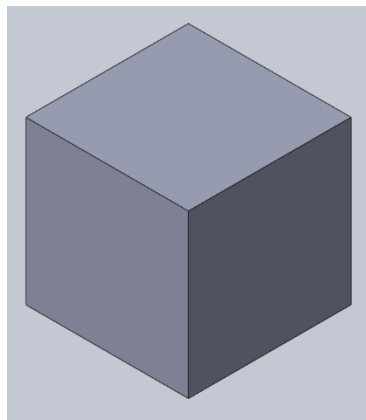
Pel que fa a l'experimentació, en primer lloc es realitza una etapa d'estudi preliminar variant alguns paràmetres de procés per tal de conèixer quin impacte tenen en les peces finals. En aquest estudi preliminar s'han dissenyat tres geometries diferents per tal de conèixer quina és la precisió dimensional, en funció del pla (X, Y o Z), que té la tecnologia en funció de la posició de la peça respecte el llit d'impressió, del grau d'humitat del material, de l'alçada de capa i del percentatge d'emplenament.

4.1 Experimentació

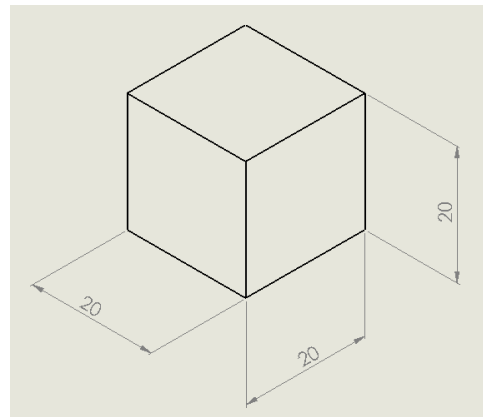
En l'experimentació preliminar s'ha treballat utilitzant només amb poliamida (PA) i s'han dissenyat tres geometries diferents per caracteritzar les seves dimensions.

4.1.1 Geometria 1

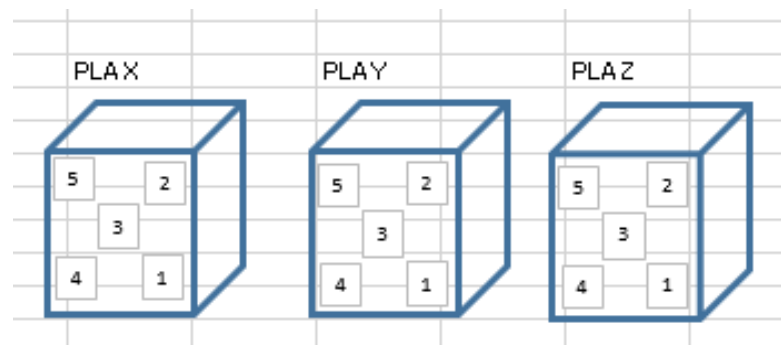
Aquesta primera geometria es tracta d'un cub de mides 20x20x20 mm³ sense cap forat en les seves cares (veure Figura 4 (a) i (b)). Està pensada per veure l'impacte dels paràmetres de procés a la precisió dimensional exterior del cub en els plans X, Y i Z. Es mesuraran 5 distàncies associades a 5 punts de cares oposades, per tal de tenir el màxim de dades possibles i analitzar-ne la variabilitat (veure Figura 4 (c)).



(a) Disseny 3D



(b) Cotes del disseny 3D



(c) Punts de mesura segons el pla

Figura 4. Disseny 3D de la geometria 1

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

Els paràmetres de procés que s'han estudiat es mostren a les Taula 1 i Taula 2. Les variables de procés que es van modificar van ser el percentatge d'emplenament (anomenat “*infill*” durant el projecte), l'alçada de capa i el fet que la poliamida estigués seca a l'hora de fer la impressió. Per analitzar l'impacte que té imprimir en diferents zones del llit es va prendre la decisió d'imprimir un cub a cada extrem de la zona de darrere del llit. En principi, la decisió d'imprimir en diferents zones del llit no hauria de ser un paràmetre a estudiar ja que el llit està calibrat i no hi hauria d'haver diferències en els resultats. Per aquesta primera geometria es van fer tres impressions de dos cubs a cada impressió. Les variables que es van mantenir constant es mostren a la taula Taula 1.

PARAMETRES FIXES	
Tipus infill	Triangular
Brim	Sí
Suports	No
Nº capes sòlides	4
Nº de contorns	2

Taula 1. Paràmetre fixes de la geometria 1

PARAMETRES VARIABLES			
Nº d'experiment	1	2	3
Alçada de capa	0.2	0.1	0.1
% infill	50	100	100
Material	PA Markforged seca	PA Markforged humida	PA Markforged seca
Nº de peces	2	2	2
Posició en el llit	Esquerra i dreta	Esquerra i dreta	Esquerra i dreta

Taula 2. Paràmetres variables de la geometria 1

4.1.2 Geometria 2

La segona geometria està pensada per veure l'impacte dels paràmetres de procés en la tolerància dimensional d'un muntatge mecànic real, és a dir, en un acoblament entre una peça feta amb una altra tecnologia de fabricació (mecanitzat) i una peça feta amb impressió 3D. En aquest cas es va utilitzar un sonotrode, una peça que s'utilitza en el procés d'emmotllament per ultrasons, que s'introdueix dins la cavitat d'un motlle, on fon el material i bloqueja dita cavitat per tal que el material fos pugui fluir dins del motlle gracies a l'empenta del expulsor (veure Figura 5). Aquesta peça té un diàmetre en el seu extrem de mesura nominal 7.985 mm i el joc que hi ha entre el sonotrode i la guia del

sonotrode és de l'ordre de 200 micres. La finalitat d'aquest experiment és veure el joc que tenen les dues peces entre sí, després que l'allotjament del sonotrode estigui fabricat amb FDM.

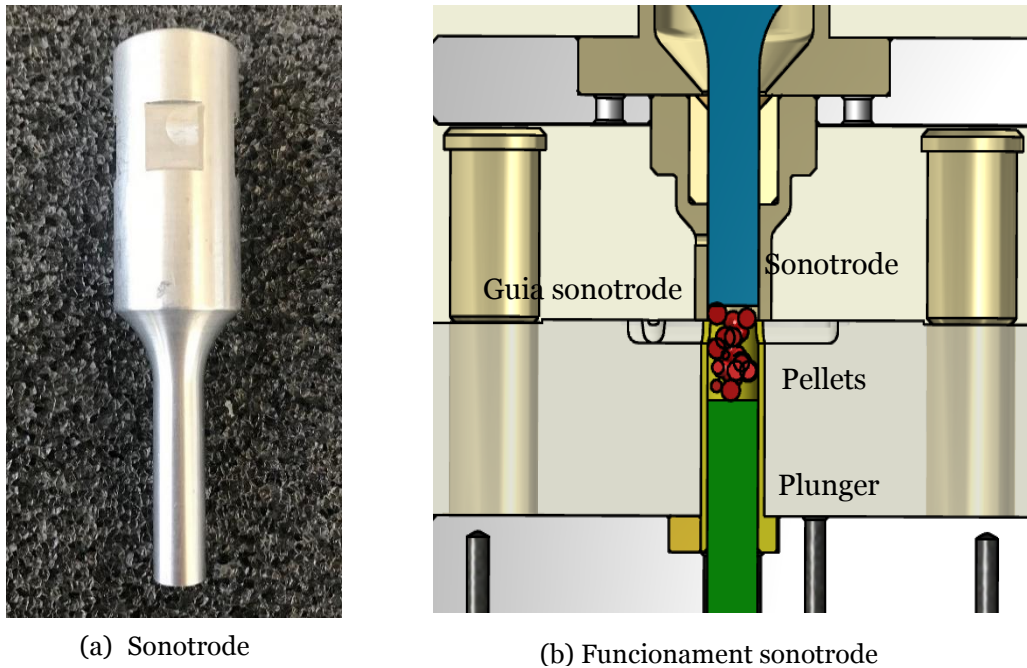


Figura 5. Descripció sonotrode

La peça feta mitjançant impressió 3D conté quatre forats de diferents diàmetres. S'han fet dos tipus de peces, una on els diàmetres varien 50 micres entre ells i l'altre que varien 100 micres. Per la peça on la variació és de 50 micres, els diàmetres dels forats van des de 7.985 mm fins 7.835 mm, i per la de 100 micres, els diàmetres dels forats varien des de 7.985 mm fins a 7.685 mm. La Figura 6 (a) i la Figura 6 (b) mostren la diferència entre els dos tipus d'acoblements dissenyats. Tot i que pot semblar que aquest muntatge està amb serratge, en experiments preliminars es va poder detectar que si es fabricava la peça amb forats amb diàmetres superior a la mesura nominal del Sonotrode, el joc entre les peces augmentava molt degut a la contracció del material, ja que en les mides exteriors la contracció redueix les cotes teòriques però en el cas dels forats les fa més grans. Es pot consultar les mides generals al document Plànols (Plànols nº 1, 2, 3 i 4).

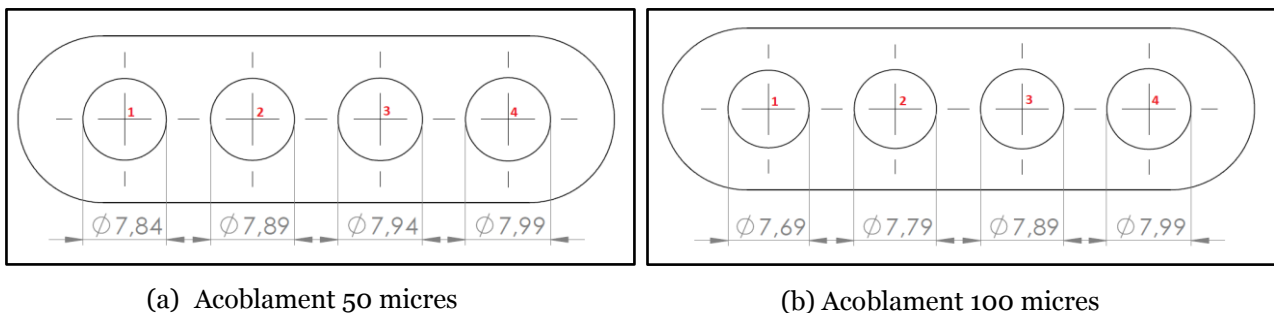
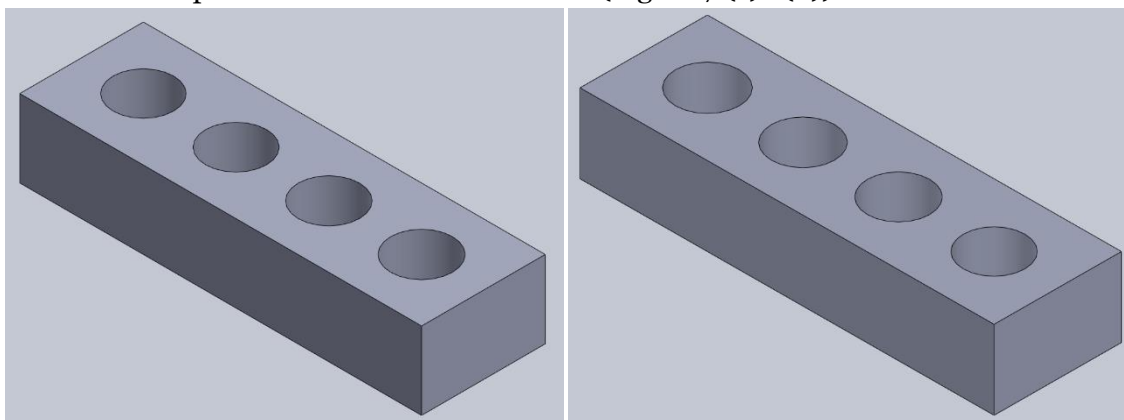


Figura 6. Dimensions acoblaments sonotrode

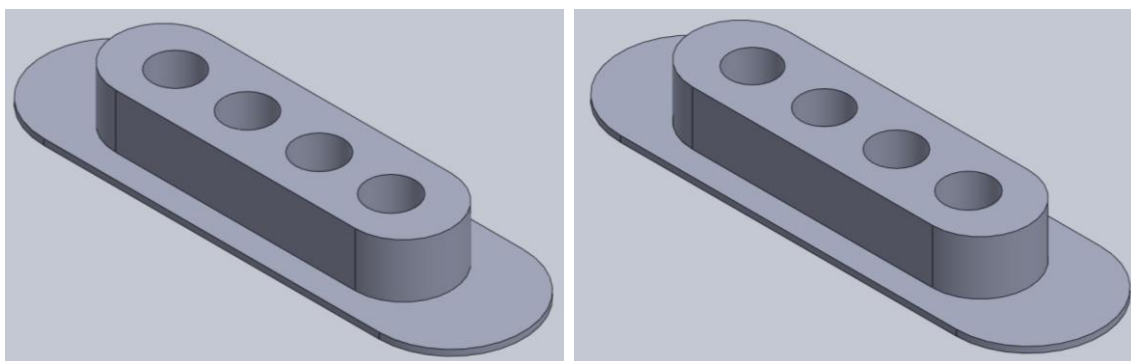
Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

Considerant aquesta configuració de forats s'han fet dos geometries lleugerament diferents. La primera és un rectangle amb els quatre forats sense Brim (Figura 7 (a) i (b)) i la segona és un rectangle amb les cantonades arrodonides i amb el propi "Brim" per tal de tenir més superfície de contacte amb els llit (Figura 7 (c) i (d)).



(a) 50 micres de forma rectangular

(b) 100 micres de forma rectangular



(c) 50 micres amb Brim propi

(d) 100 micres amb Brim propi

Figura 7. Models 3D dels diferents acoblaments

En aquest cas s'ha partit d'una poliamida totalment seca, s'ha fixat la posició d'impressió en el llit a la part esquerra i s'ha mantingut constant en tots els experiments el percentatge d'emplenat al 50% (Veure els paràmetres fixes a la Taula 3).

Per la geometria del rectangle amb les cantonades sense arrodonir s'ha fet dos experiments (1 i 2 de la Taula 4) on només s'ha variat l'alçada de capa per veure la tolerància dimensional en cada cas. Les mides d'aquesta geometria són 52 mm de llargada, 16 mm d'amplada i 10 mm de gruix. Per la geometria rectangle amb les cantonades arrodonides (experiment 3 de la Taula 4) s'ha mantingut l'alçada de capa a 0.1mm de gruix. Les mides d'aquesta geometria són 56 mm de llargada, 16 mm d'amplada i 11 de gruix.

Els paràmetres de procés que s'han mantingut constants en tots els experiments són els que es mostren a la Taula 3.

PARÀMETRES FIXES	
Tipus infill	Triangular
Brim	Sí
Suports	No
Nº capes sòlides	4
Nº de contorns	2
Material	PA Markforged seca
Posició en el llit	Esquerra

Taula 3. Paràmetres fixes de la geometria 2

A la Taula 4 es pot veure la relació dels paràmetres que s'han variat amb el nombre d'experiment que s'ha realitzat:

PARÀMETRES VARIABLES			
Nº d'experiment	1	2	3
Tipus de geometria	Rectangular	Rectangular	Arrodonida amb Brim
Alçada de capa	0.2	0.1	0.1
% infill	50	50	50
Nº de peces	2	2	2

Taula 4. Paràmetres variables de la geometria 2

Posteriorment es van prendre totes les mesures dels diàmetres a tres alçades diferents (P1, P2 i P3) indicades a la Figura 8 amb una màquina de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544 (veure Annex A4). En total es van prendre 72 mesures.



Figura 8. Alçades on s'han pres les mesures dels diàmetres dels forats

4.1.3 Geometria 3

La tercera geometria està pensada per veure la variabilitat de la tolerància dimensional de peces amb forats en els plans X, Y i Z. En aquest experiment es van dissenyar dues geometries diferents que partien d'un cub de 40x40x40 mm³ buidat per una part de manera que les parets tinguessin un gruix de 2 mm i 5 mm respectivament a cada pla. A cada pla se li va aplicar una matriu de forats de 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 i 12 mm de diàmetre. Es pot observar el model en 3D a la Figura 9 (a) i (b) i les dimensions dels forats en la Figura 10. Les mides generals de la Figura 9 són 40 x 40 x 40 mm.

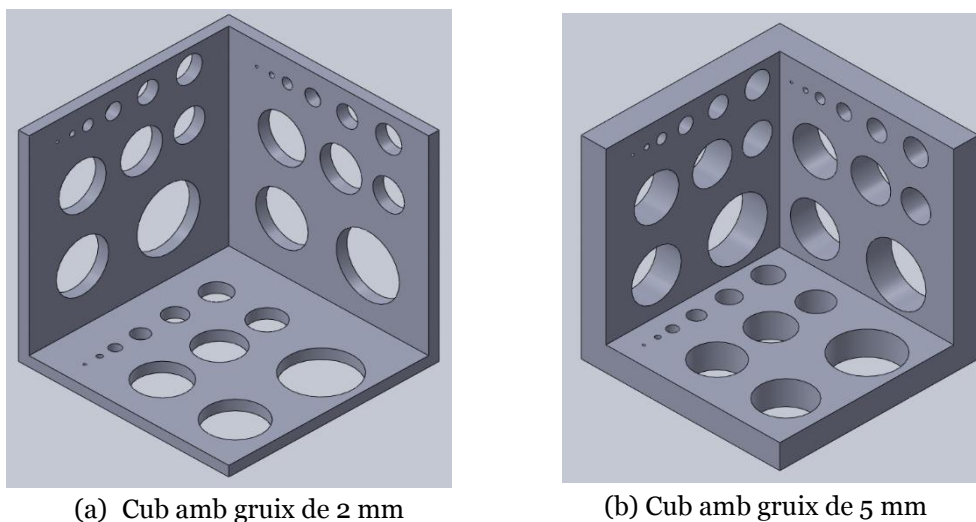


Figura 9. Models 3D de la geometria 3

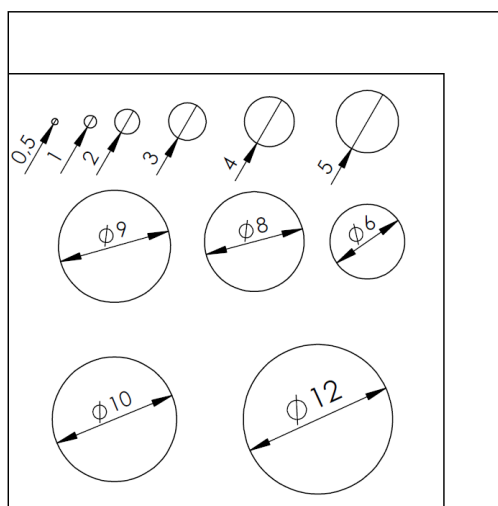


Figura 10. Dimensions dels forats del cub

En els experiments de les dues geometries amb gruix de 2 mm i 5mm es van utilitzar exactament els mateixos paràmetres, partint d'una poliamida totalment seca, són els de la Taula 5.

PARÀMETRES	
Tipus infill	Triangular
Alçada de capa	0.1
% Infill	50
Brim	Sí
Suports	No
Nº capes sòlides	4
Nº de contorns	2
Posició en el llit	Esquerra

Taula 5. Paràmetres fixes i variables de la geometria 3

4.2 Resultat de l'experimentació preliminar

4.2.1 Geometria 1

A la Figura 11 es mostren els resultats de les impressions dels tres experiments per la geometria 1. A la Taula 6 es mostren els resultats en mitjana dels valors obtinguts, així com les diferències respecte el valor objectiu i l'error percentual.

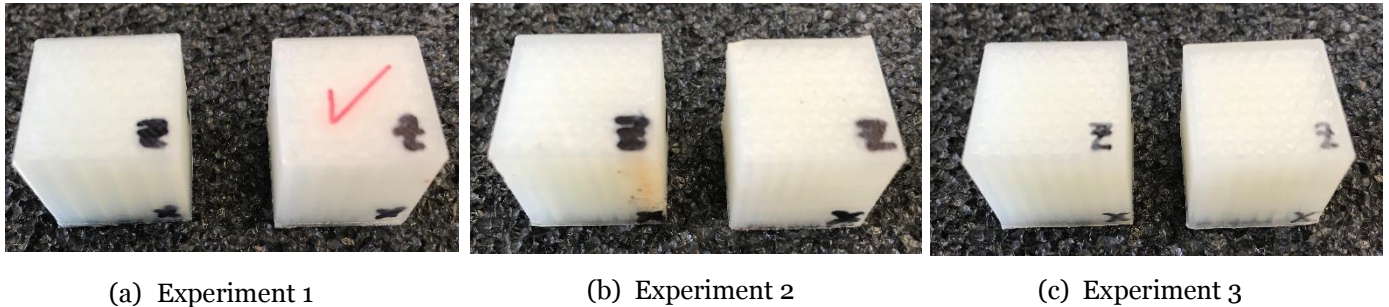


Figura 11. Resultats de la impressió de la geometria 1

Núm. Experiment	Núm. Cub	Mesures (mm)			Diferència (mm)			Error (%)		
		Pla X	Pla Y	Pla Z	Pla X	Pla Y	Pla Z	Pla X	Pla Y	Pla Z
1	1	19,906	19,975	20,046	-0,093	-0,024	0,046	0,468	0,124	0,232
	2	19,849	19,945	19,904	-0,150	-0,054	-0,095	0,753	0,272	0,479
2	3	19,841	19,935	20,01	-0,158	-0,064	0,015	0,793	0,323	0,075
	4	19,804	19,979	19,892	-0,195	-0,020	-0,107	0,978	0,102	0,537
3	5	19,834	19,936	19,862	-0,166	-0,063	-0,138	0,83	0,318	0,690
	6	19,859	19,935	19,989	-0,140	-0,064	-0,010	0,703	0,321	0,054

Taula 6. Resultat de les mitjanes dels cubs

La informació facilitada pel fabricant és que la precisió dimensional és de 120 micres, considerant aquesta informació, ja era de esperar que el cub no arribés a les mides originals de 20x20x20 mm³ i que fos lleugerament més petit degut a la contracció de la poliamida durant el procés de refredament (veure resultats numèrics a l'annex C1).

A la Taula 6 es mostren els resultats en mitjana per a cada experiment. En relació a l'experiment 1, els resultats, en mitjana, obtinguts en aquesta prova tenen una tolerància dimensional de 25 i 150 micres depenent del pla, fet que significa un error d'entre el 0,12% i el 0,75%. En l'experimentació 2, els resultats, en mitjana, obtinguts en aquesta prova tenen una tolerància dimensional d'entre 15 i 200 micres depenent del pla, que traduït a error, equival a un 0,08% i un 0,98% respectivament. Cal destacar que en aquesta prova la poliamida utilitzada es trobava humida, i tot i ajustar els paràmetres d'emprenat i l'alçada de capa a un valor teòricament millor, els resultats són més dispersos. Per últim, els resultats de l'experiment 3, els resultats, en mitjana, obtinguts en aquesta

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

prova tenen una tolerància dimensional d'entre 11 i 160 micres depenent del pla, que significa entre un 0,05% i un 0,83% d'error.

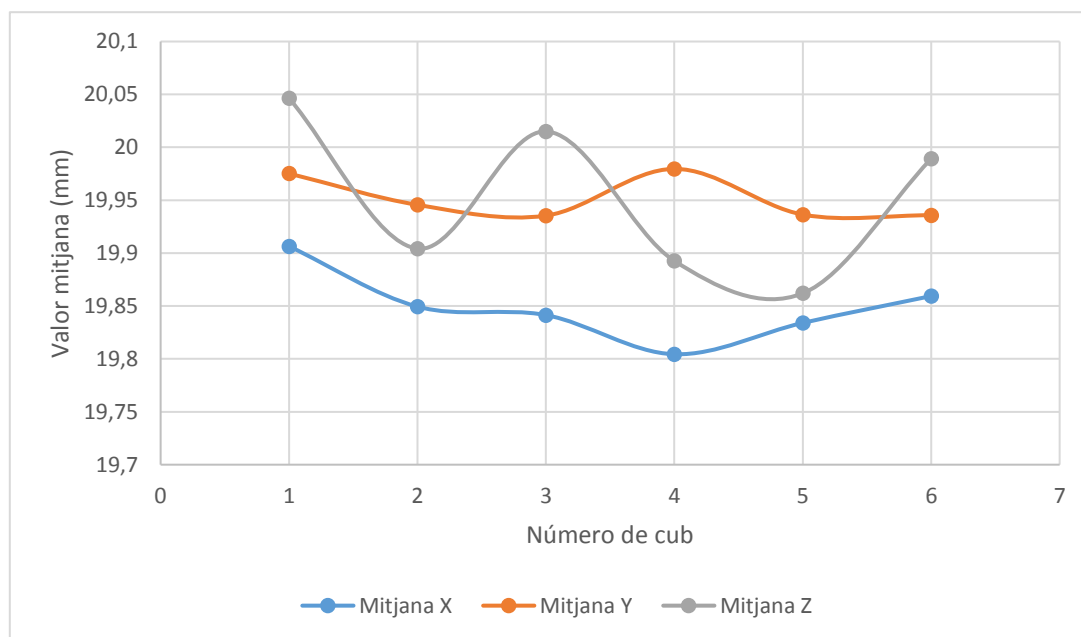


Figura 12. Resultats de la mitjana en funció del pla i el cub

Les mitjanes dels cubs impresos en cada pla (X, Y i Z) es poden veure a la Figura 12. Com s'ha comentat, a cada pla s'han pres cinc mesures, quatre de les quals corresponen a les cantonades del cub i la altra al centre.

Tal i com es pot veure en la Figura 12, les mesures del pla X són les més petites dels tres plans, tot i això són bastant estables, amb una desviació de 0,03 mm. Les mesures del pla Y s'ajusten més al valor objectiu i també són valors amb una desviació de 0,02 mm entre ells. El pla Z és el que té una desviació més gran, de 0,08 mm, amb valors que oscil·len entre diferències més grans del valor objectiu i d'altres de més petits. Les gràfiques d'aquests resultats (veure Annex C1) mostren una certa tendència a obtenir dimensions més petites en la part central, especialment en el plans X i Y.

Com es pot comprovar, en els experiments 1 i 3, quan la poliamida estava seca, les toleràncies s'ajusten més o menys al resultat esperat. També s'ha de tenir en compte que hi pot haver un mínim d'error de l'aparell de mesura i/o un error humà a l'hora de fer les mesures corresponents. Tot i això, els resultats obtinguts s'ajusten bastant a la tolerància facilitada pel fabricant que és de 120 micres.

També es pot veure que els paràmetres de gruix de capa i % d'infill són clau per obtenir una bona tolerància dimensional. En general, la tendència és que totes les mides siguin inferiors a les teòriques, això es degut a la contracció del material durant el procés de refredament, com s'ha comentat anteriorment.

Tot i la limitació de dades experimentals, s'ha fet un anàlisi estadístic exploratori sobre els efectes dels paràmetres de procés sobre les dimensions finals del cub per cada un dels plans X, Y i Z. Es pretén estudiar si hi ha diferències en les mesures de cada pla degut als factors: estat poliamida, % infill, alçada de capa i posició.

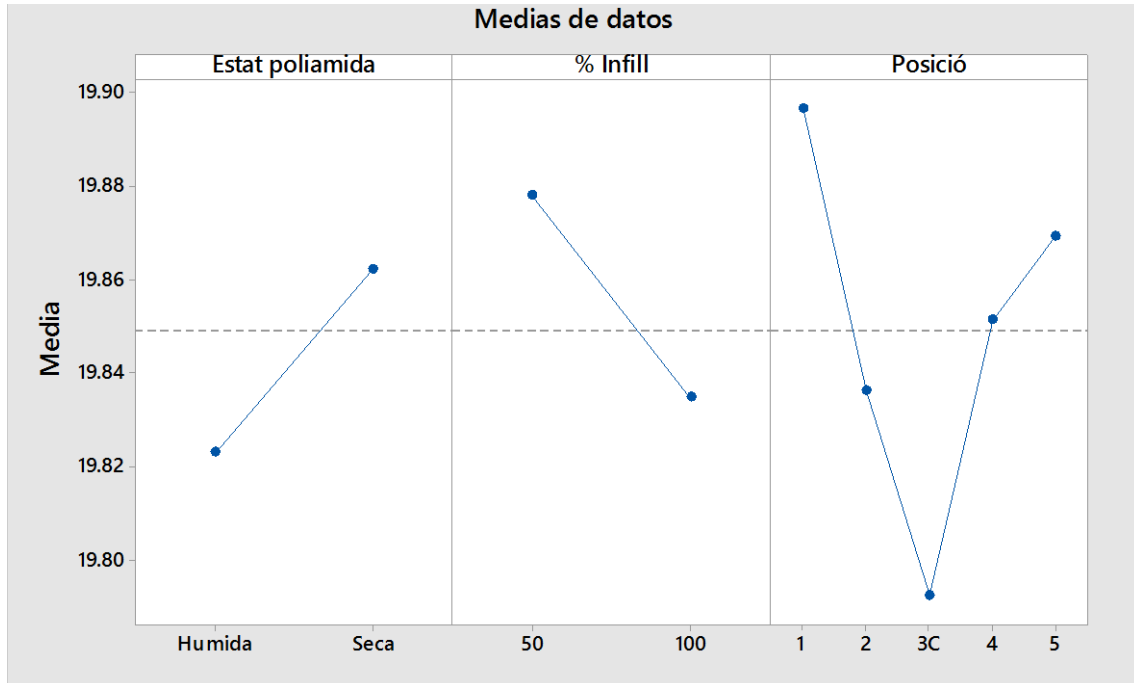


Figura 13. Anàlisi descriptiva de la mesura del pla X de la geometria 1 en funció dels factors estat poliamida, % infill i posició

Fuente	GL	Valor F	Valor p
Estat poliamida	1	1,04	0,318
% Infill	1	1,79	0,194
Posició	4	3,33	0,027

Taula 7. ANOVA del pla X

Gràficament (Figura 13) es pot veure que la influència de que la poliamida estigui seca o humida és un factor a tenir en compte. També es pot veure que un infill inferior dóna uns resultats millors. Finalment si s'analitza la posició on s'ha mesurat la distància, es pot veure clarament que en el punt 3, el punt central, hi ha una disminució de les dimensions si ho comparem amb la resta de punts.

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

La Taula 7 revela que tot i haver-hi diferències entre la poliamida seca o humida i també entre el % d'infill de la peça, el p-valor de l'ANOVA demostra que no hi ha una diferència significativa. En canvi, com es pot veure en el valor de p de la posició de mesura, aquest revela que la posició sí que és significativa i que en tots els casos pel pla X, el punt central és el punt on s'han obtingut mesures més petites.

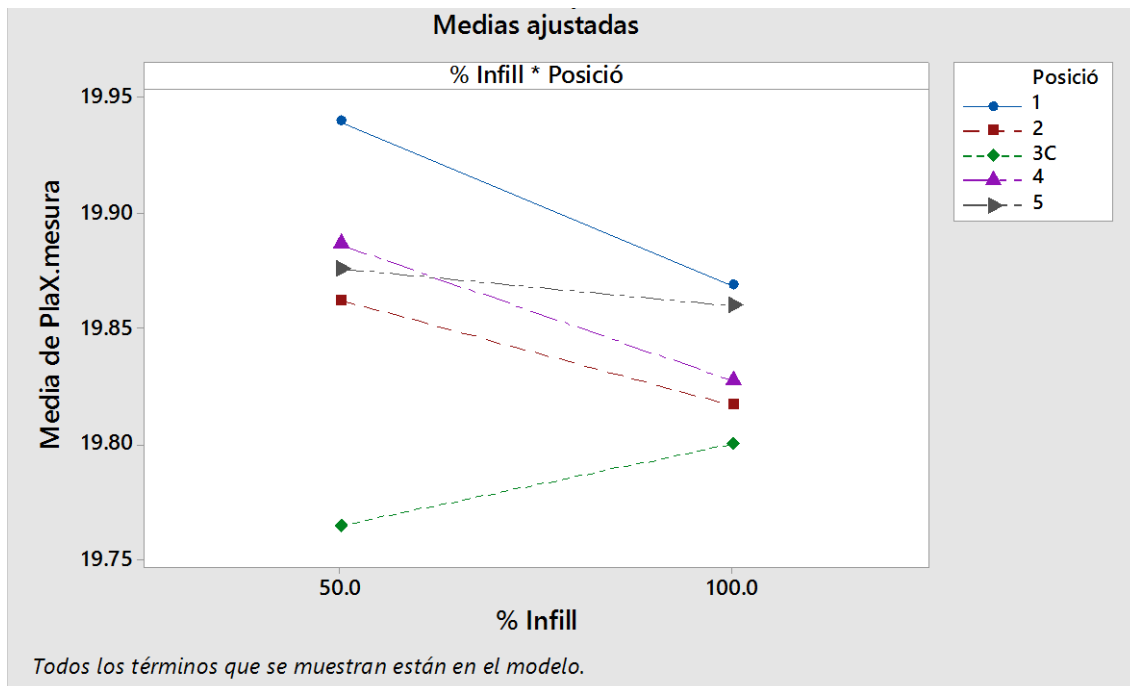


Figura 14. Posició i % d'infill en el pla X

La Figura 14 demostra que amb un infill del 50% les mesures que s'han obtingut, tot i que en alguns casos siguin més properes al valor teòric, tenen una desviació més gran. En canvi si s'analitza amb un infill del 100% es pot veure que els valors, tot i ser més petits en comparació amb els d'infill 50%, la desviació és molt menor.

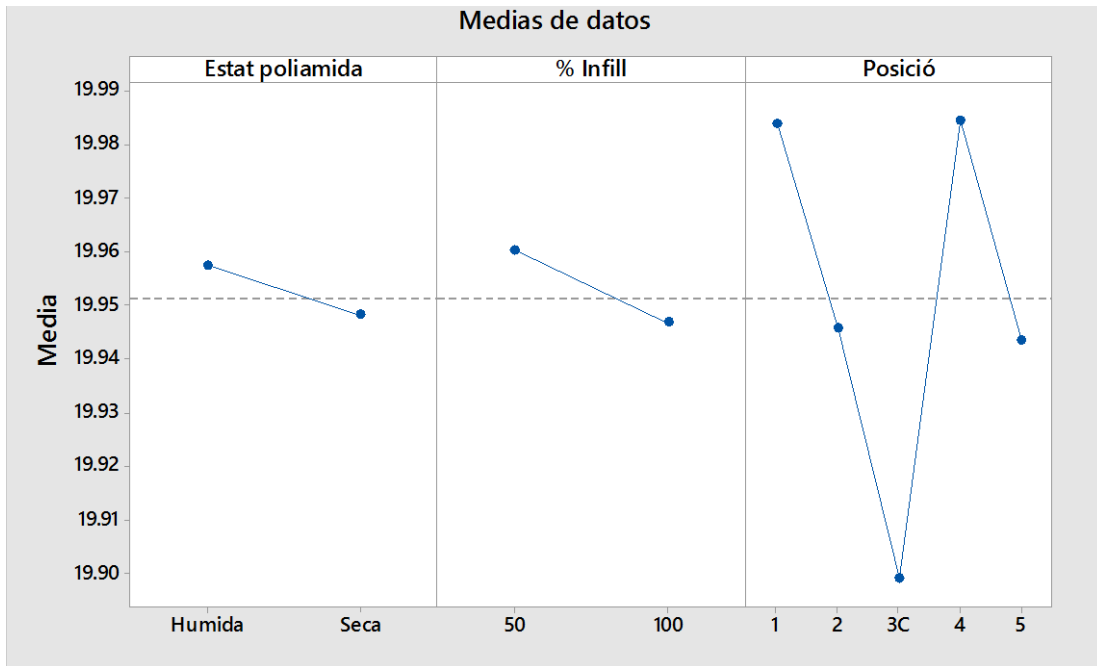


Figura 15. Anàlisi descriptiva de la mesura del pla Y de la geometria 1 en funció dels factors estat poliamida, % infill i posició

Fuente	GL	Valor F	Valor p
Regresión	6	3,89	0,008
Estat poliamida	1	1,59	0,219
% Infill	1	2,06	0,165
Posició	4	5,22	0,004

Taula 8. ANOVA del pla Y

La Figura 15 i la Taula 8 demostren que, igual que passava en el pla X, els factors de l'estat de la poliamida i del % d'infill no són significatius ja que tenen variacions petites entre la poliamida seca i humida i infill del 50% i del 100%, respectivament. Igual que en el cas del pla X, es pot comprovar que el punt central (punt 3) torna a haver-hi una disminució de les dimensions molt notable, així ho revela el valor de p de 0,004 en la Taula 8.

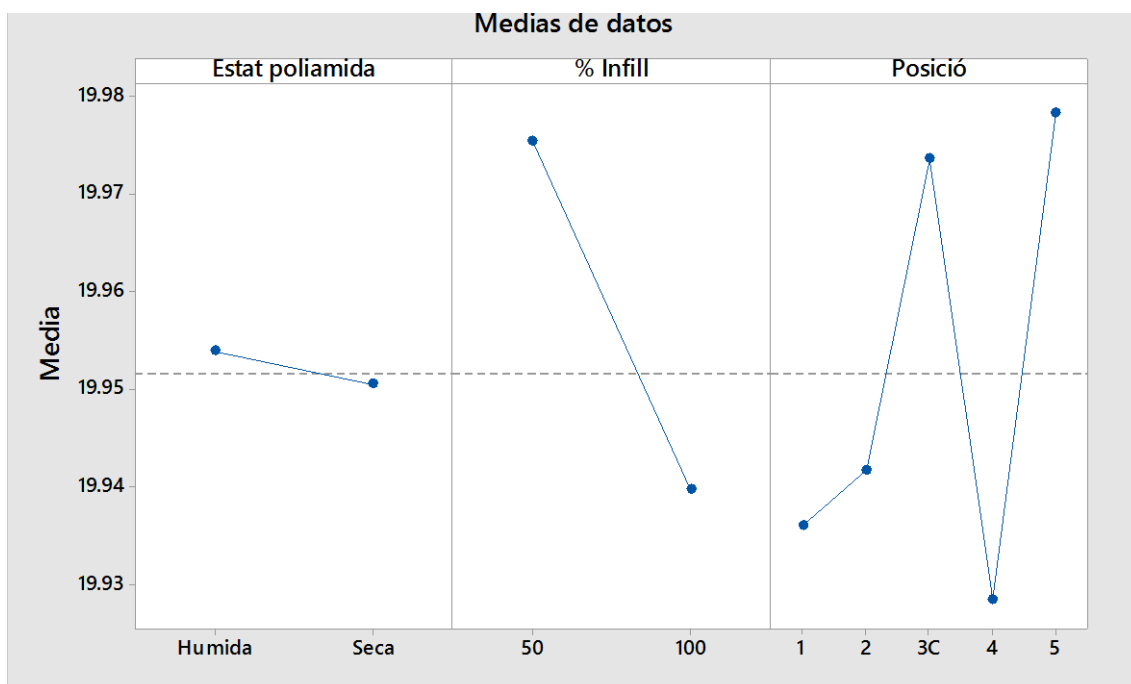


Figura 16. Anàlisi descriptiva de la mesura del pla Z de la geometria 1 en funció dels factors estat poliamida, % infill i posició

Fuente	GL	Valor F	Valor p
Regresión	14	0,28	0,989
Estat poliamida	1	0,03	0,870
% Infill	1	0,55	0,471
Posició	4	0,12	0,973

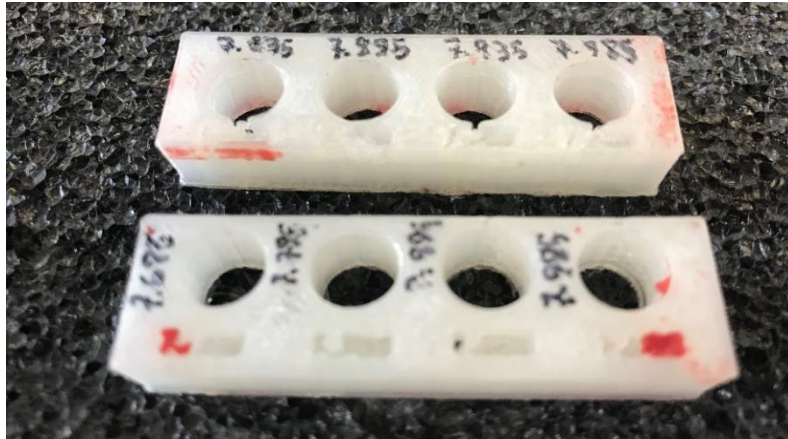
Taula 9. ANOVA del pla Z

La Taula 9 demostren que cap paràmetre, ni l'estat de la poliamida, ni el % d'infill, ni la posició on s'ha pres la mesura és influent sobre els resultats obtinguts perquè el p-valor dels tres paràmetres són superiors a 0,05. Com es pot veure a la Figura 16, l'estat de la poliamida la diferència és insignificant. El % d'infill tot i que pugui semblar que els resultats siguin molt variables, el p-valor de 0,471 revela que aquest paràmetre no és significatiu. Finalment, la posició on s'han pres les mesures tampoc és un paràmetre significatiu ja que es pot veure a la figura Figura 16 que els resultats han estat molt dispersos.

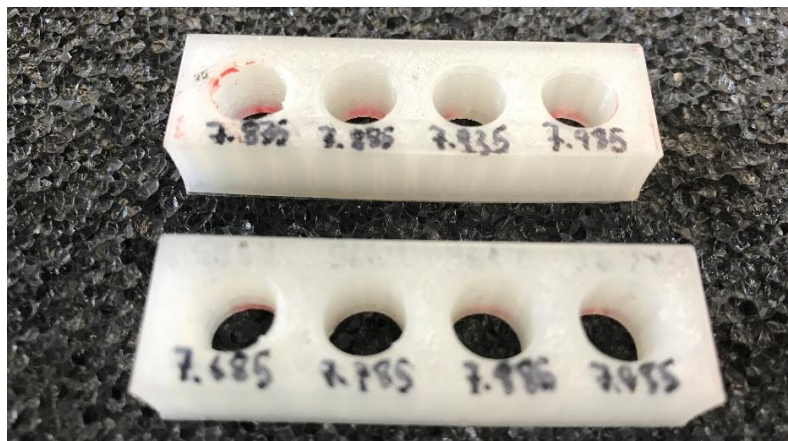
En conclusió a aquest experiment i als resultats obtinguts, s'hauria de destacar que el fet que la poliamida estigui humida o seca és un fet molt influent sobre l'acabat superficial, i els paràmetres més influents sobre la tolerància dimensional són l'alçada de capa i el percentatge d'emplenat.

4.2.2 Geometria 2

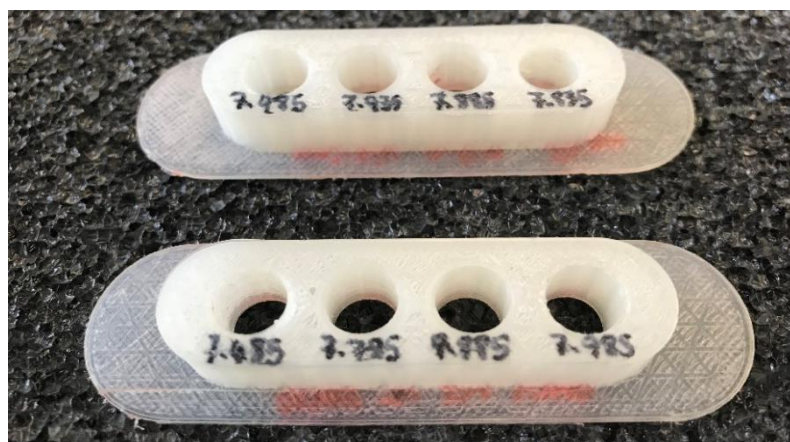
Per analitzar els resultats obtinguts en els experiments amb aquesta segona geometria es podia fer una inspecció ràpida introduint el sonotrode en els diferents forats de diferents diàmetre, així es podia comprovar si entrava o no, i en cas que entrés, el joc quantitatiu (molt o poc) que tenia. Aquesta primera prova va demostrar que el sonotrode entrava en la major part de forats inclús els de diàmetre més petit.



(a) Experiment 1



(b) Experiment 2



(c) Experiment 3

Figura 17. Resultats de la impressió de la geometria 2

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

Per poder analitzar les dades que s'han recopilat de la mesura dels diàmetres dels forats, s'han tractat tots els valors dels diàmetres conjuntament, independentment que fossin de l'acoblament de 50 o 100 micres. La diferència entre el diàmetre teòric i el diàmetre s'ha anomenat Diferència.

Tal i com es pot veure a la Taula 10, els diàmetres en mitjana són superiors al valor objectiu, amb una desviació d'entre 0,10 i 0,16 mm i una diferència respecte el teòric d'entre 0,25 i 0,30 mm. La Diferència sempre és major que 0, és a dir, els forats tendeixen a ser més grans respecte el teòric, tal i com s'ha comprovat en la inspecció preliminar. Es pot veure que l'error més petit s'ha obtingut amb la combinació de la geometria quadrada i una alçada de capa de 0,1 mm.

Geometria	Alçada capa (mm)	Mesures diàmetres (mm)	Desv. Estàndard (mm)	Mitjana Diferència (mm)
Quadrat	0,2	8,1727	0,1129	0,3002
Quadrat	0,1	8,1252	0,1581	0,2527
Rodó	0,1	8,1735	0,1000	0,3010

Taula 10. Resultats i errors en mitjana dels diàmetres en funció del tipus de geometria

En els resultats de la primera prova es va obtenir una mesura mitjana dels diàmetres de 8,17 mm amb una desviació de 0,11 mm. La diferència mitjana respecte el valor teòric va ser 0,30 mm. Els resultats de la segona prova van millorar disminuint la mitjana dels diàmetres a 8,12 mm amb una desviació lleugerament superior. La diferència respecte el teòric d'aquesta prova també va disminuir fins a 0,25 mm. En aquest segon experiment es va detectar que la peça quedava "bombada" degut a la concentració d'esforços a les cantonades. Per aquest motiu es va proposar una solució que tractava de crear un "Brim" i fer les cantonades arrodonides en el disseny de CAD de la peça per minimitzar la concentració de tensions a les cantonades i augmentar la superfície de contacte amb el llit d'impressió. L'últim experiment va millorar en termes d'acabat de la peça però tal i com s'ha vist a la Taula 10 els resultats de les mesures dels diàmetres no va millorar, obtenint uns resultats similars als de la primera prova.

Així doncs, s'ha pogut comprovar que l'alçada de capa és un paràmetre bastant influent a l'hora de buscar bones precisions dimensionals si es necessita fer un muntatge mecànic. També s'ha pogut validar que si hi ha dissenys en els quals tenim problemes de poca adherència durant la impressió, l'usuari pot dissenyar els seus propis "Brims" mitjançant un programa CAD per minimitzar aquest efecte.

Primer de tot, s'ha volgut fer un anàlisi estadístic exploratori per comparar la influència de l'alçada de capa amb una mateixa geometria.

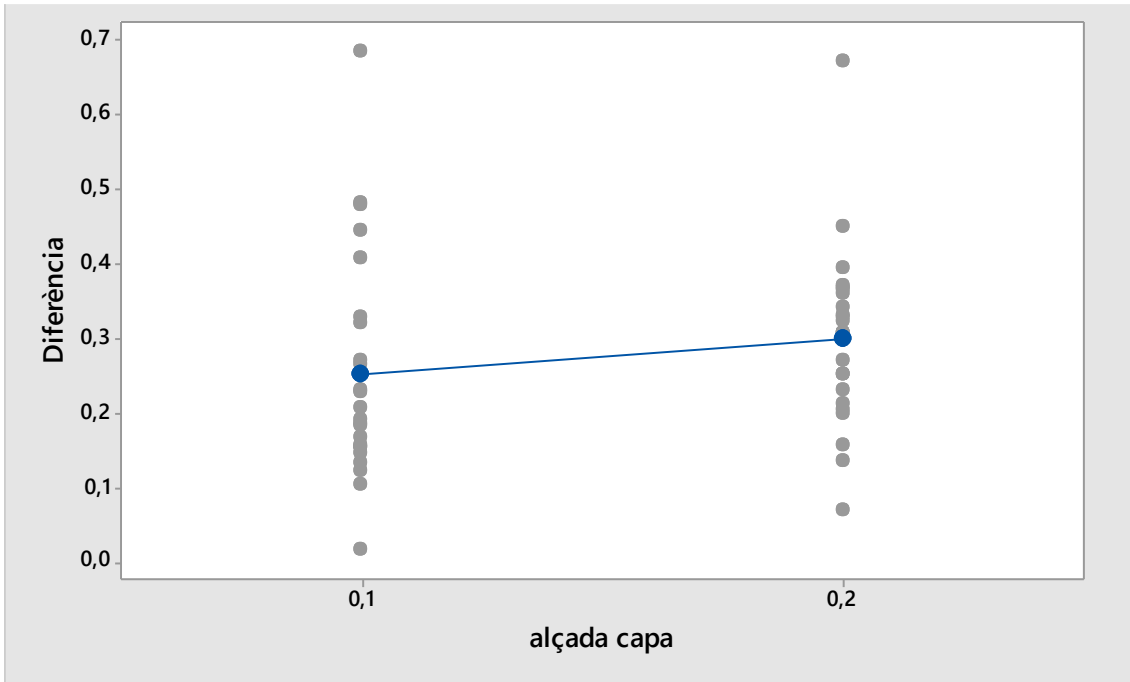


Figura 18. Diferència en funció de l'alçada de capa per la geometria quadrat

Tal i com s'ha vist a la Taula 10, si mantenim una geometria igual i variem l'alçada de capa, s'obté un millor resultat quan l'alçada de capa és menor, en aquest cas de 0,1 mm. Tot i això la diferència no és significativa perquè hi ha molta dispersió en les rèpliques.

En segon lloc s'ha analitzat si, mantenint l'alçada de capa constant i variant la geometria s'obtenen millors resultats.

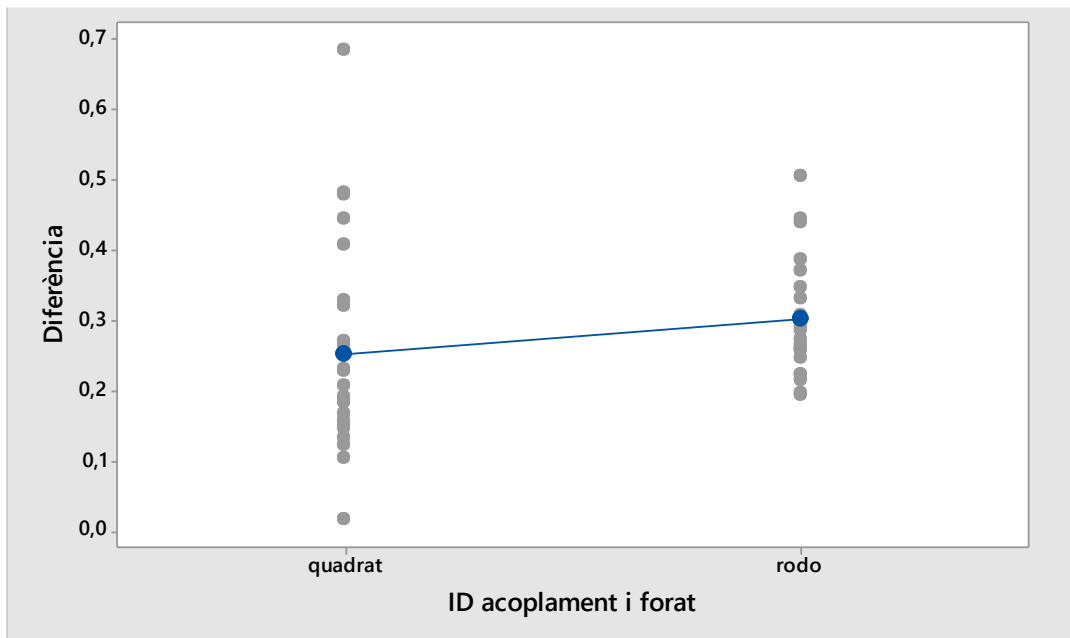


Figura 19. Diferència en funció del tipus de geometria amb alçada de capa de 0,1 mm

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

En aquest cas, i tal com es veu a la Figura 19, la diferència entre la geometria quadrat i la rodó és, en mitjana, de l'ordre de 50 μm . Tot i això, també es pot veure que els resultats de la geometria quadrat són més dispersos que no els de la geometria rodó.

Entre una geometria quadrada amb alçada de capa de 0,2 mm i una geometria rodona amb alçada de capa de 0,1 mm les diferències, en mitjanes, són pràcticament nul·les.

També s'ha analitzat per a cada tipus de geometria i combinació la influència que pot tenir el prendre mesures en tres alçades diferents.

Geometria	Alçada de capa (mm)	Punt mesura	Mitjana Diàmetre (mm)	Desv. Estàndard (mm)	Mitjana Diferència (mm)
Quadrat	0,2	1	8,233	0,122	0,361
		2	8,162	0,101	0,290
		3	8,122	0,097	0,250
Quadrat	0,1	1	8,216	0,196	0,344
		2	8,049	0,138	0,177
		3	8,111	0,091	0,238
Rodó	0,1	1	8,197	0,114	0,324
		2	8,136	0,103	0,263
		3	8,188	0,082	0,315

Taula 11. Resultats de les mesures dels diàmetres, desviació estàndard i mitjana de la diferència

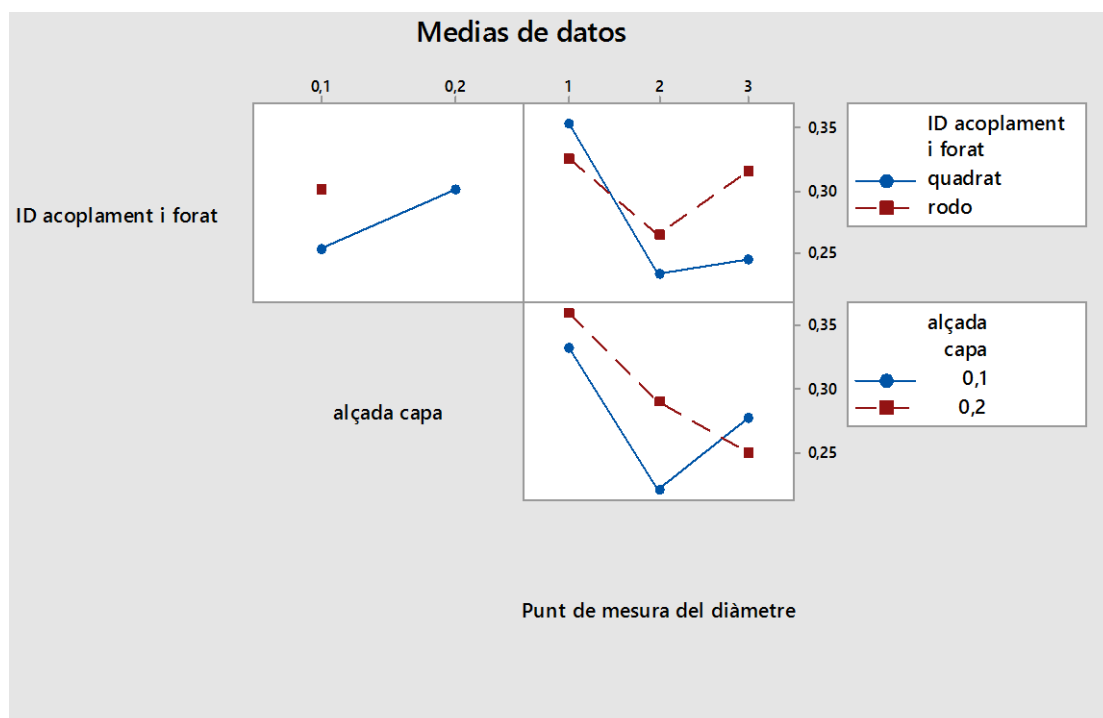


Figura 20. Gràfica d'interaccions de la geometria 2

Fuente	GL	Valor F	Valor p
ID acoplament i forat	1	2,13	0,149
alçada capa	1	2,05	0,157
Punt de mesura del diàmetre	2	4,92	0,010

Taula 12. ANOVA de la diferència en funció de paràmetres

Tal i com es pot veure en la Taula 11, el punt on s'obtenen millors resultats és el punt 3. La diferència entre els punts 2 i 3 respecte el punt 1 és de l'ordre de més de 50 μm . Pel que respecta a la geometria quadrada amb alçada de capa 0,1, el punt que s'han obtingut millors resultats és el 2. En aquest cas la diferència entre el punt 2 i 3 respecte del punt 1 és de 180 i 120 μm respectivament. Per últim, que equival a la geometria rodona amb alçada de capa 0,1 mm, ens mostra que la diferència entre el punt 1 i 3 és pràcticament nul·la entre ells però respecte el punt 2 és, aproximadament, de 60 μm .

Tal i com s'ha pogut veure anteriorment, la Taula 12 demostra que ni el tipus de geometria ni l'alçada de capa són paràmetres significatius pels resultats al tenir un valor de p superior a 0,05. En canvi, el punt de mesura del diàmetre sí que és significatiu amb un p-valor de 0,01.

Així doncs, analitzant aquests resultats s'ha pogut veure que el punt 1 de tots els experiments realitzats és el que dona una diferència més gran. També es pot concloure que els forats sempre seran més grans que el valor teòric que tingui el disseny que s'imprimeixi mitjançant aquesta tecnologia.

4.2.3 Geometria 3

Per analitzar els resultats de les proves fetes amb aquesta tercera geometria només calia validar que les peces obtingudes al final de la impressió estaven ben acabades i en cas que sí, comprovar el diàmetre dels forats.

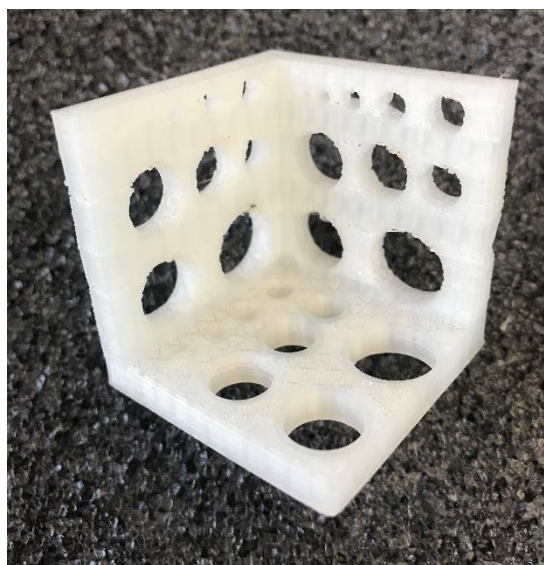
- a) Experiment 1: en la prova realitzada amb aquesta geometria es van tenir problemes en els eixos X i Y durant la impressió degut al poc gruix de la peça i per tant, es va decidir fer la mateixa prova amb un gruix de 5 mm.
- b) Experiment 2: en aquest experiment s'esperaven uns resultats més bons degut a que tenia més superfície de contacte a cada capa. Tot i això, la tolerància dimensional en els eixos X i Y, tot i millorar respecte la prova anterior, no van ser els esperats.

En els dos experiments realitzats amb aquesta geometria, ha coincidit que la tolerància dimensional és molt bona en l'eix Z (pla vertical), similar als resultats de la geometria 2. Els problemes han estat a l'hora de fer els forats en els plans X i Y, veure Figura 21 (a) i (b), ja que la màquina quan havia fet la meitat de forat i començava a tancar-lo, el material que estava extrudint el feia en voladís i no tenia cap mena de suport i per tant, la poliamida no s'adheria a la capa anterior.

Es va provar imprimir les mateixes geometries amb la opció de suports activada, disponible al software de Markforged, però els resultats que s'obtenien eren molt pitjors que sense estar activada, ja que no imprimia bé el material de suport i quedava tot escampat per la peça.



(a) Experiment 1, gruix de 2 mm



(b) Experiment 2, gruix de 5 mm

Figura 21. Resultats de la impressió de la geometria 3

La conclusió que podem extreure d'aquesta prova és que si es necessita imprimir una peça que contingui forats, haurem d'ajustar-la, en la mesura que sigui possible, perquè els forats siguin impresos en l'eix Z per aconseguir una bona tolerància dimensional.

5 EXPERIMENTACIÓ AMB REFORÇ DE FIBRA CONTÍNUA

En aquesta segona fase s'ha realitzat la impressió de varies tipus de provetes estandarditzades i, s'ha caracteritzat la geometria (gruix, amplada i pes) i les corresponents propietats mecàniques (resistència a la tracció, mòdul elàstic, elongació, resistència a la flexió i mòdul de flexió). Les provetes s'han reforçat seguint diferents estratègies i amb diferents percentatges de fibra, de forma que es pugui iniciar el desenvolupament d'un model que permeti determinar quina és la distribució òptima en el reforç de la fibra i quin percentatge de fibra, respecte el volum total de la peça, és necessari per complir les sol·licitacions mecàniques a les que estarà sotmesa la peça final.

5.1.1 Geometria de les peces

En aquesta part del projecte s'han utilitzat tres tipus de provetes estandarditzades. La primera és una proveta ASTM D638 TYPE I de 165 mm de llargada, 13 mm d'amplada (en la zona central) i un gruix de 3 mm (veure Figura 22), la segona és una proveta ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC de 250 mm de llargada, 25 mm d'amplada i un gruix de 2.5 mm, i la última proveta és una proveta ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL de 250 mm de llargada, 15 mm d'amplada i 1 mm de gruix (veure Figura 23 (a) i (b)).

El fet de que s'hagi optat per fer més d'un tipus de proveta és que alguns articles revelen que les tipus ASTM D638 TYPE I solen trencar per la zona del radi de curvatura on canvia l'amplada, per tant es va decidir fer un altre tipus de proveta rectangular segons la norma ASTM D3039. Dintre les especificacions que marca aquesta norma no estava clar quin tipus de proveta s'havia de fabricar, ja que aquest tipus de barreja entre polímer i fibra no es contempla en dita normativa. Així doncs, i considerant que es variava el percentatge de fibra en secció, es va decidir fer els dos tipus entre els que es tenien dubtes.

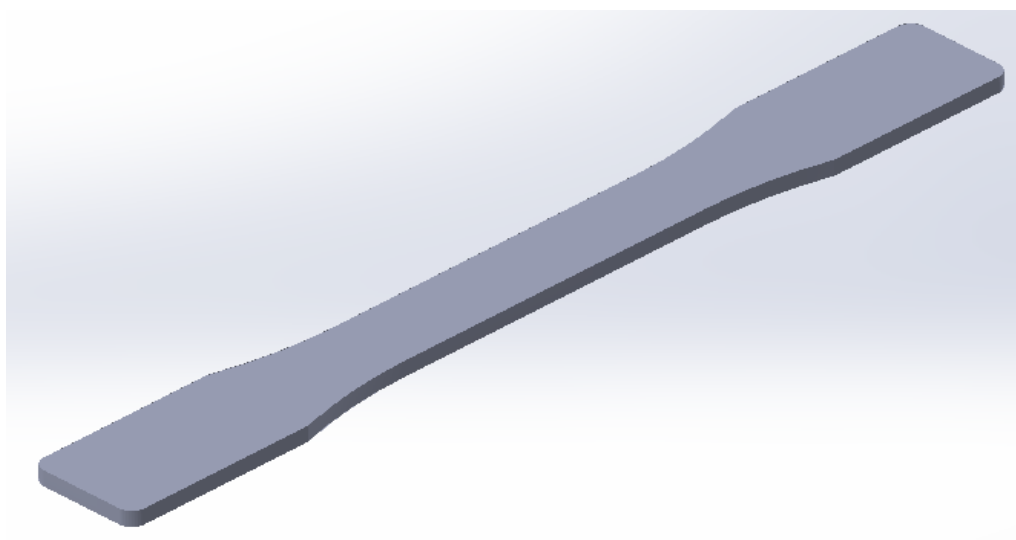
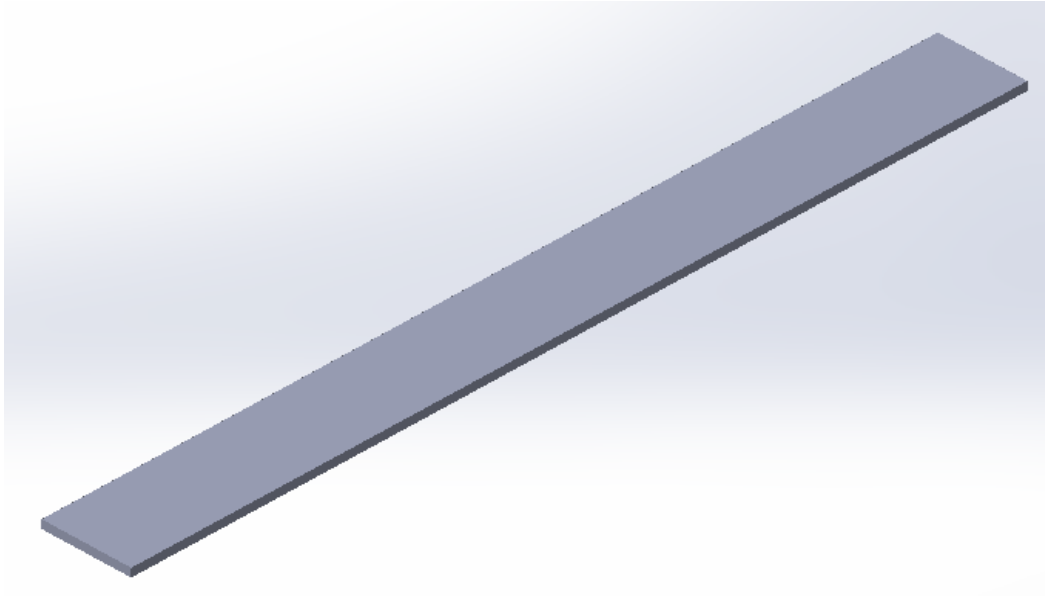
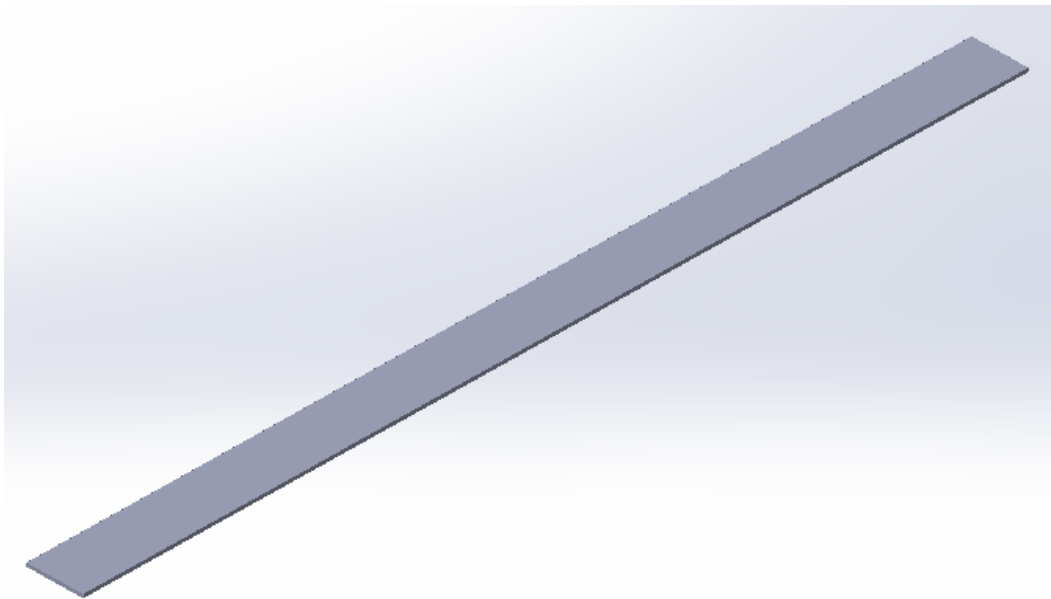


Figura 22. Proveta ASTM D638 TYPE I (165 x 13 x 3 mm)



(a) BALANCED AND SYMETRIC (250 x 25 x 2,5 mm)



(b) 0° UNIDIRECTIONAL (250 x 15 x 1 mm)

Figura 23. Provetes ASTM D3039

Per altra banda, també s'ha inclòs en el projecte un tipus de proveta per dur a terme l'assaig de flexió. Aquesta geometria, anomenada en el present projecte com ISO 14125 CLASS IV, és una proveta rectangular de 100 mm de llargada, 15 mm d'amplada i 2 mm de gruix (veure Figura 24).

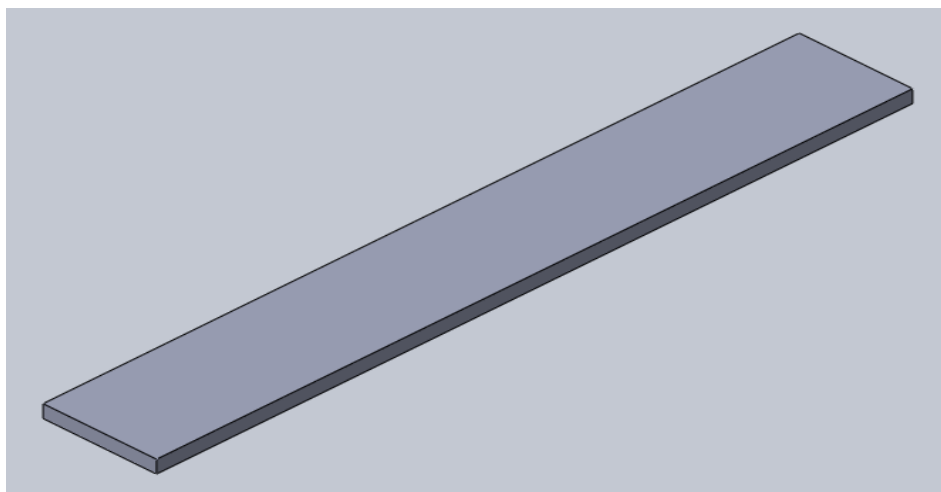


Figura 24. Proveta ISO 14125 CLASS IV (100 x 15 x 2 mm)

5.1.2 Disseny d'experiments i paràmetres de procés

Considerant els paràmetres de Markforged descrits en l'apartat 2.3, en aquesta part de l'experimentació s'han fixat els que es mostren a la Taula 13:

PARÀMETRES FIXES	
Alçada de capa	0.125
Tipus infill	Sòlid
Tipus de reforç	Concèntric
% infill	100
Brim	Sí
Suports	No
Nº capes sòlides	4
Nº de contorns	2
Material	PA Markforged seca

Taula 13. Paràmetres fixes dels experiments

Per a cada tipus de proveta que s'ha descrit en l'apartat anterior s'han fet tres combinacions diferents de reforç de fibra:

- Combinació 1: inclou 10 fils de fibra a les capes extremes, afectant només a 2 capes (inferior i superior).
- Combinació 2: inclou 10 fils de fibra a les capes intermèdies de la secció, afectant només a 2 capes.
- Combinació 3: 1 fil de fibra a les capes més extremes, afectant a 10 capes (5 inferiors i 5 superiors).

En la Figura 25, Figura 26, Figura 27 i Figura 28 s'han il·lustrat les seccions de cada tipus de proveta per mostrar la variació de capes que hi ha entre elles, i per tant, la variació entre percentatge de poliamida i de fibra entre elles. Tal i com mostra la Taula 14, el percentatge de fibra volumètric és la proporció de fibra total de la peça en relació al volum total i varia en funció de cada combinació. En el cas de la combinació 1 i 2 com

que les fibres concèntriques estan en una mateixa capa, les primeres són més llargues perquè el perímetre és major, però a mida que es posen cercles concèntrics el perímetre disminueix i hi ha una mica menys de fibra. De la mateixa manera en la combinació 3 al estar totes les fibres en la capa perifèrica són més llargues i el percentatge total de fibra és una mica major que en la combinació 1 i 2. Per altra banda, el percentatge de fibra en secció és la quantitat de fibra que hi ha si es fa un tall perpendicular per veure l'interior de la proveta. Com s'observa en la taula següent, dintre d'un mateix tipus de proveta, independentment de la combinació, la quantitat de fibra en secció és exactament la mateixa. La única variació que hi ha en aquest cas és la manera de distribuir-la.

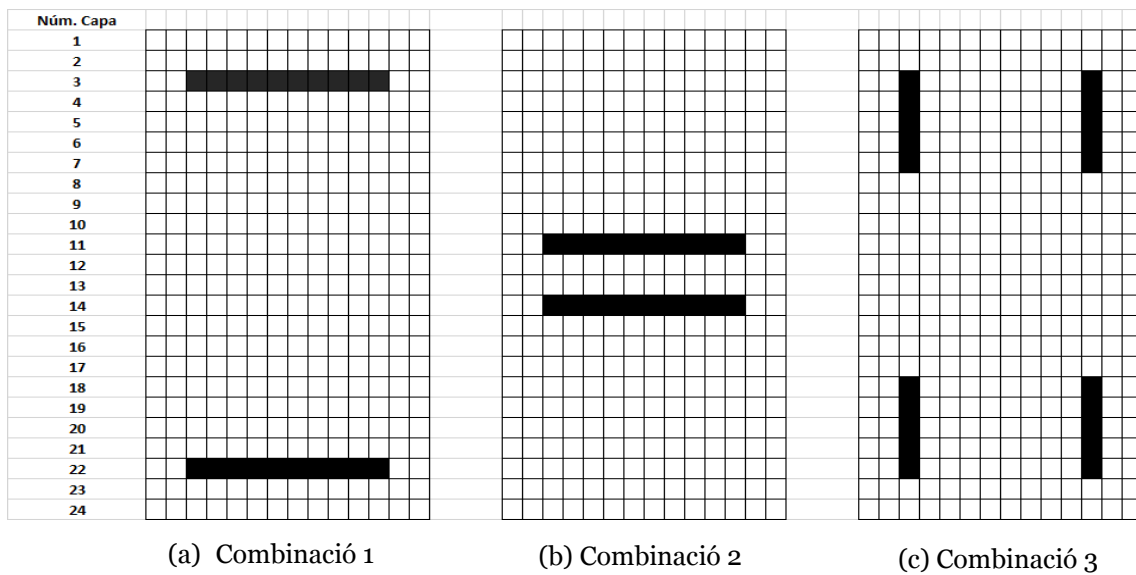


Figura 25. Distribució de la fibra en les provetes ASTM D638 TYPE I

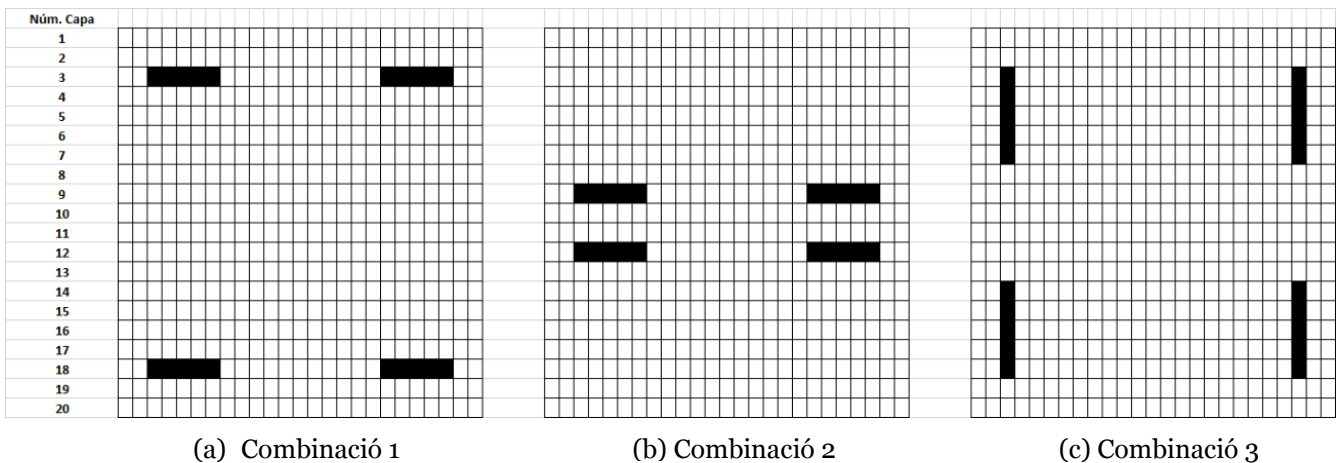


Figura 26. Distribució de la fibra en les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMMETRIC

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

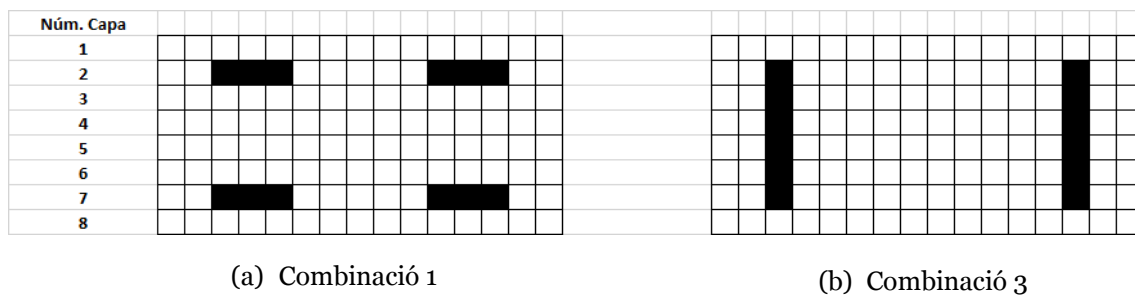


Figura 27. Distribució de la fibra en les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL

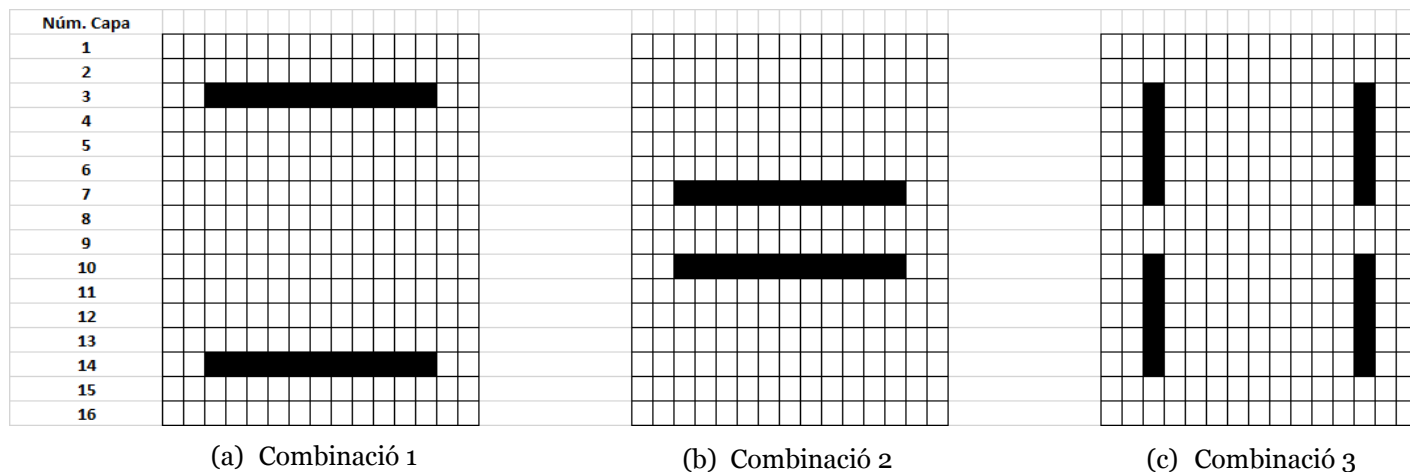


Figura 28. Distribució de la fibra en les provetes ISO 14125 CLASS IV

Com a paràmetres de procés variables s'han considerat els següents:

Tipus de proveta	Nº combinació	Nº de fils de fibra a la capa	Nº de capes on hi ha fibra	Situació de la fibra	% de fibra volumètric	% de fibra en secció
ASTM D638 TYPE I	1	5	2	Extrems	4,71 %	6,05 %
	2	5	2	Interior	4,71 %	6,05 %
	3	1	10	Extrem/Interior	4,74 %	6,05 %
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	5	2	Extrems	3,47 %	3,86 %
	2	5	2	Interior	3,47 %	3,86 %
	3	1	10	Extrem/Interior	3,59 %	3,86 %
ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	1	3	2	Extrems	8,10 %	9,15 %
	3	1	6	Extrem/Interior	9,31 %	9,15 %
ISO 14125 CLASS IV	1	5	2	Extrems	6,65 %	7,72 %
	2	5	2	Interior	6,63 %	7,72 %
	3	1	10	Extrem/Interior	7,60 %	7,72 %

Taula 14. Relació de combinacions i percentatges de fibra

S'han imprès 3 provetes per a cada combinació i tipus de proveta, menys pel tipus de proveta ASTM D3039 o^o UNIDIRECTIONAL que només s'ha pogut imprimir la combinació 1 i 3 perquè la combinació 2 no tenia gaire sentit fer-la ja que al tenir tant poc gruix, era pràcticament igual que la combinació 1. Per les provetes del tipus ISO 14125 CLASS IV també es van fabricar 3 peces per a cada combinació. Degut a la geometria de la peça i la limitació de volum de la impressora, s'han imprès 3 rèpliques de les provetes per a cada tipus de combinació. En total s'han fet 8 impressions de 3 rèpliques cadascuna més les 9 provetes del tipus ISO 14125 , essent un total de 33 provetes impreses amb fibra reforçada.

Després de la impressió, les provetes han estat emmagatzemades dins d'una bossa hermètica per tal d'evitar l'absorció d'humitat. Tot i així, abans de realitzar-ne la corresponent caracterització (geomètrica, pes i assaig de tracció) s'han assecat totes les provetes.

5.1.3 Procediment

En aquest apartat s'estudiarà el procediment seguit per a l'assecatge i l'estudi la caracterització de les provetes. Per caracterització de les provetes s'ha mesurat el gruix, l'amplada, el pes i finalment un assaig a tracció/flexió.

5.1.3.1 Assecatge

L'assecatge s'ha realitzat en un forn Heraeus Vötsch VTRK500 a una temperatura de 80°C durant 48 hores. Les provetes del tipus ASTM D638 TYPE I van ésser assecades en primer lloc i després es van assecat totes les provetes del tipus ASTM D3039. Les provetes ISO 14125 CLASS IV van ser fabricades a posteriori i les 9 provetes s'han assecat durant el mateix període de temps.

5.1.3.2 Pes

El pesatge de les provetes s'ha realitzat amb una balança de precisió Controls Model 11 – D0628, amb una precisió de $\pm 0,01$ grams. Aquesta determinació s'ha realitzat sempre després d'assecat les provetes per evitar falsejar resultats, ja que la poliamida és higroscòpica i tendeix a absorbir molta humitat.

5.1.3.3 Gruix

La determinació del gruix s'ha fet amb la màquina de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544 per les provetes del tipus ASTM D638 TYPE I mentre que el gruix de les provetes del tipus ASTM D3039 s'ha mesurat amb un micròmetre digital Mahr Micromar 40 EWV amb una precisió de $\pm 0,001$ mm.

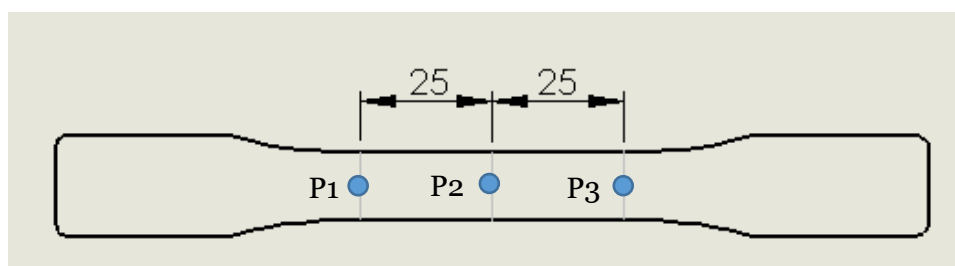
En totes les provetes s'han pres tres punts de mesura (P1, P2 i P3) tal com es veu en la Figura 29. En el cas de les provetes ASTM D638 TYPE I la distància entre els punts

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

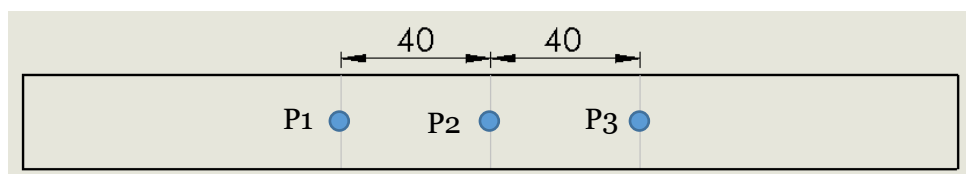
que s'han mesurat són el centre i a 25 mm respecte el centre cap a cada costat. En el cas de les provetes ASTM D3039 s'ha mesurat el punt central i a 40 mm a cada costat partint del centre. Per les provetes ISO 14125 CLASS IV s'ha mesurat el punt central i a 10 mm a cada costat partint de la meitat.

5.1.3.4 Amplada

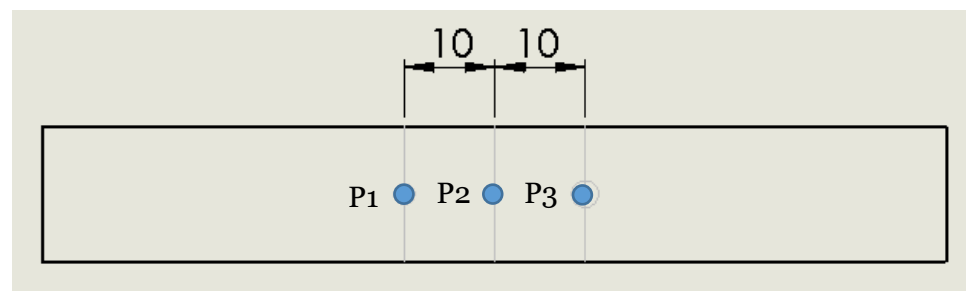
Per determinar l'amplada de les provetes s'ha utilitzat un peu de rei digital Horex amb una precisió de $\pm 0,01$ mm. Les mesures s'han pres en els mateixos punts (P1, P2 i P3) que s'ha mesurat el gruix. La distància entre punts és la mateixa que en l'apartat del gruix.



(a) Proveta ASTM D638 TYPE I



(b) Provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMMETRIC i 0° UNIDIRECTIONAL



(c) Proveta ISO 14125 CLASS IV

Figura 29. Punts on s'han pres les mesures de gruix i amplada dels diferents tipus de proveta

5.1.3.5 Assaig a tracció

L'assaig a tracció s'ha realitzat seguint la norma ASTM D638 per les provetes del tipus ASTM D638 TYPE I.

Durant aquests assajos s'han adquirit les dades del procés per posteriorment tractar les dades per calcular el mòdul elàstic i la resistència a la tracció.

Els assajos s'han realitzat en una màquina de tracció MTS Insight 50 KN amb una velocitat de 2 mm/min. Per al càlcul del mòdul de Young s'ha utilitzat un extensòmetre axial Epsilon 3542.

5.1.3.6 Assaig a flexió

L'assaig a flexió s'ha realitzat seguint la norma ISO 14125. En aquest cas s'han escollit les provetes de la classe IV ja que són les que apliquen en aquest projecte.

Durant els assajos s'han adquirit les dades del procés per poder extreure la tensió de ruptura a flexió i el mòdul a flexió.

Els assajos s'han realitzat en una màquina de tracció MTS Insight 50 KN amb una velocitat de 5 mm/min.

6 RESULTATS DE L'EXPERIMENTACIÓ AMB REFORÇ DE FIBRA CONTÍNUA

6.1 Pes

Primerament s'ha realitzat l'anàlisi del pes de les provetes respecte el pes teòric que proporciona el software Eiger un cop s'han definit tots els paràmetres de la impressió.

Tipus de proveta	Nº combinació	Pes teòric (gr.)	Pes experimental (gr.)	Diferència percentual
ASTM D638 TYPE I	1	9,22	8,193	-11,135 %
	2	9,22	8,223	-10,810 %
	3	9,62	7,700	-19,958 %
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	18,84	16,000	-15,074 %
	2	18,84	16,877	-10,421 %
	3	18,85	16,710	-11,353 %
ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	1	4,73	4,113	-13,0,37 %
	3	4,24	3,907	-7,682 %
ISO 14125 CLASS IV	1	3,89	3,333	-14,310 %
	2	3,87	3,337	-13,781 %
	3	3,69	3,270	-11,382 %

Taula 15. Pes en funció del tipus de proveta i combinació

Tal i com es pot veure a la Taula 15, totes les provetes tenen un pes inferior al teòric.

Cal destacar que durant la impressió de les provetes ASTM D638 TYPE I, en la combinació 3 hi va haver un problema que va fer que algunes capes no quedessin ben emplenades, d'aquí el pes més baix respecte el mateix tipus de proveta, però tot i això, la tendència general és un pes inferior al teòric en aproximadament un 12%. Pel que fa a la resta de les provetes, totes les impressions van ser correctes i les provetes estaven ben acabades.

Per tant, s'observa que en aquesta tecnologia, hi ha una tendència en que la peça fabricada tindrà un pes inferior al teòric que dona el software.

6.2 Gruix i amplada

En aquest estudi es vol comprovar l'homogeneïtat del gruix al llarg de la proveta, per veure si hi ha variacions significatives que puguin afectar posteriorment a les propietats mecàniques. A la Figura 30 (a) i (b) i a la Taula 16 es mostren les mitjanes dels gruixos i de les amplades que s'han mesurat en 3 punts de cada una de les provetes i a les distàncies indicades en l'apartat 5.1.3.3.

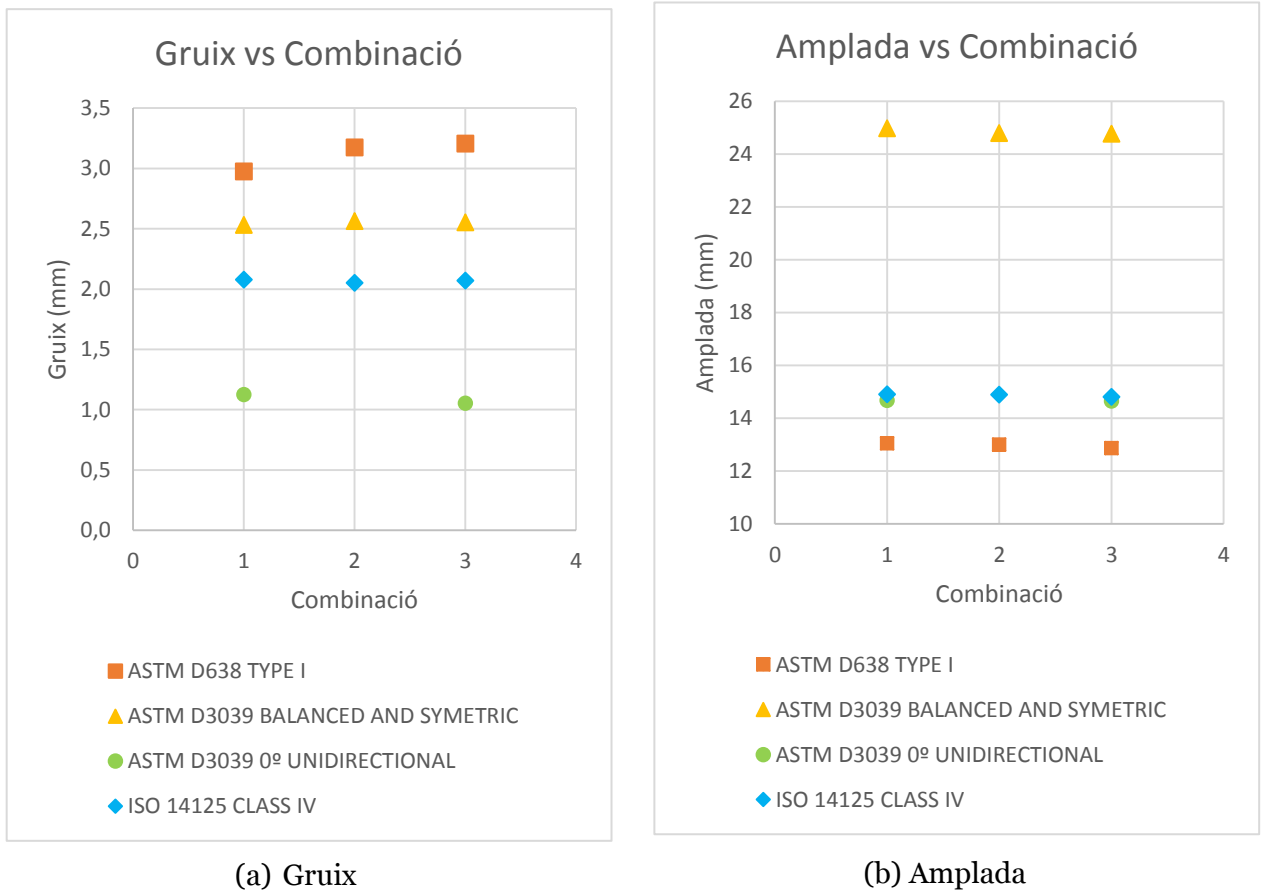


Figura 30. Gràfiques del (a) gruix i de (b) l'amplada en funció de la combinació

Tipus de proveta	Nº combinació	GRUIXOS EXPERIMENTALS		AMPLADES EXPERIMENTALS	
		Gruix (mm)	Desv. Estàndard (mm)	Amplada (mm)	Desv. Estàndard (mm)
ASTM D638 TYPE I	1	3,174	0,111	12,999	0,019
	2	2,975	0,051	13,047	0,057
	3	3,205	0,026	12,866	0,085
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	2,532	0,080	24,989	0,089
	2	2,564	0,049	24,802	0,088
	3	2,554	0,036	24,780	0,047

ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	1	1,126	0,039	14,677	0,112
	3	1,053	0,045	14,653	0,125
ISO 14125 CLASS IV	1	2,079	0,058	14,903	0,020
	2	2,053	0,032	14,891	0,057
	3	2,070	0,051	14,806	0,078

Taula 16. Gruixos i amplades en funció de la combinació i provetes

A partir de la Figura 30 (a) i de la Taula 16 es pot veure que la tendència del gruix és ser major que el teòric. Aquesta diferència no és gaire significativa i la variabilitat tampoc és destacable.

El gruix de les provetes ASTM D638 TYPE I impreses amb la combinació 1 i 3 han superat el valor teòric de 3 mm gairebé en 200 micres. Els gruixos obtinguts per la combinació 2 estan per sota del teòric però no gaire lluny dels 3 mm. Les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC impreses amb un gruix teòric de 2,5 mm, tenen un gruix més regular en el cas de totes tres combinacions. Tot i això, tots els valors estan per sobre del teòric. Les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL, amb un gruix teòric de 1 mm, tenen un gruix experimental lleugerament superior en els casos de la combinació 1 i 3. La combinació 2 en aquest cas no s'ha fabricat per raons que s'han explicat a l'apartat 5.1.2. El gruix de les provetes ISO 14125 CLASS IV s'ha mantingut molt proper al valor teòric, amb una desviació molt petita que és quasi bé insignificant, però per sobre del valor teòric dels 2 mm.

Es pot concloure que la tendència en totes les combinacions és que el gruix sigui lleugerament superior al valor teòric.

Pel que fa a l'amplada de les provetes, tal i com es pot veure a la Figura 30 (b), aquesta es manté molt propera als valors teòrics tal i hi ha poca variabilitat entre les diferents combinacions ja que totes segueixen la mateixa tendència. Les provetes ASTM D638 TYPE I estan impreses amb una amplada teòrica de 13 mm i tal i com podem veure a la Taula 16 els valors experimentals són molt propers, però inferiors al teòric en les dues de les tres combinacions fabricades. Les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC tenen una amplada teòrica de 25 mm, cota de la qual no s'allunyen gaire els valors experimentals de la combinació 1. Les amplades de la combinació 2 i 3 són 0,2 i 0,3 mm inferiors al valor teòric. En tercer lloc, les provetes ASTM D3039 0° BALANCED AND SYMETRIC estan fabricades amb una amplada teòrica de 15 mm però, tal i com podem veure a la Taula 16, els valors experimentals són quasi bé 0,5 mm inferiors a aquesta amplada. Per últim, les provetes ISO 14125 CLASS IV tenen una amplada teòrica de 15 mm però com es pot veure a la Taula 16, aquesta és inferior al valor esperat.

Respecte l'amplada es pot concloure que la tendència en tots els casos és que aquesta sigui inferior a la teòrica independentment del tipus de proveta i de la combinació.

6.3 Assaig a tracció

a) Resistència a la tracció

En primer lloc s'ha calculat la resistència a la tracció. Segons el fabricant, la resistència a la tracció del Nylon és de 54 MPa, mentre que la resistència a la tracció de la fibra de carboni és de 800 MPa. Pel que semblaria, com que les provetes s'han imprès amb una combinació dels dos materials, la resistència hauria d'estar en un valor intermedi entre 54 i 800 MPa.

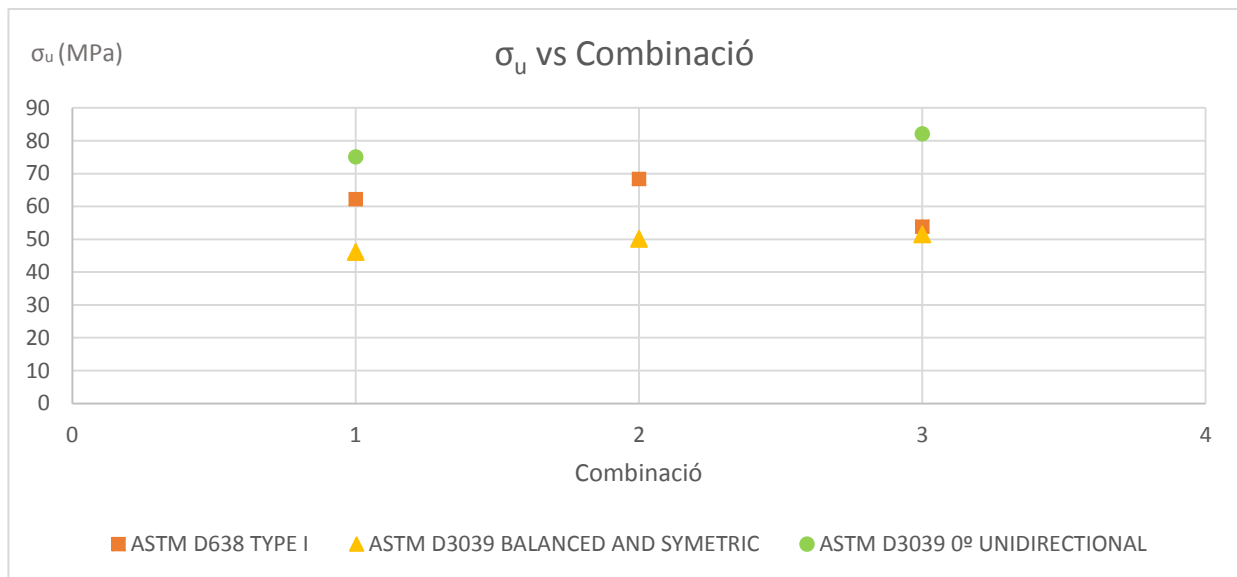


Figura 31. σ_u en funció de la combinació

Tipus de proveta	Nº combinació	% de fibra volumètric	% de fibra en secció	σ_u exp. (MPa)	Desv. Estàndard (MPa)	Ratio σ_u /fibra (MPa/% fibra)
ASTM D638 TYPE I	1	4,71 %	6,05 %	62,221	± 4,335	10,28
	2	4,71 %	6,05 %	68,405	± 2,573	11,31
	3	4,74 %	6,05 %	53,859	± 1,794	8,90
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	3,47 %	3,86 %	46,172	± 2,803	11,96
	2	3,47 %	3,86 %	50,155	± 4,194	12,99
	3	3,59 %	3,86 %	51,511	± 3,069	13,34
ASTM D3039 0° UNIDIRECT IONAL	1	8,10 %	9,15 %	75,149	± 2,539	8,21
	3	9,31 %	9,15 %	82,126	± 11,686	8,98

Taula 17. Tensió última en funció del tipus de combinació i de proveta

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

A la Taula 17 es pot observar la mitjana de la resistència màxima a tracció de les tres provetes per a cada tipus de proveta i combinació de reforç de fibra.

En el cas de les provetes ASTM D638 TYPE I, es pot veure que les combinacions que més resistència a la tracció suporten són la 1 i la 2. La combinació 3 tot i obtenir els resultats més baixos, és la que té una desviació menor de les tres combinacions de reforç. Cal destacar que durant els assajos d'aquestes provetes la gran majoria d'elles trencaven pel radi de curvatura de la peça. Es pot veure que en el cas de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC, la resistència és inferior als 54 MPa del Nylon sense reforçar que indica el fabricant, tot i que la desviació dels resultats obtinguts és inferior al 10% dels valors en totes tres combinacions. Les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL són les que han suportat més resistència a la tracció, tot i que en el cas de la combinació 3 hi ha una desviació molt significativa en els resultats, en concret de $\pm 11,7$ MPa. Si s'observa la última columna de la Taula 17 es pot veure que les provetes que millor aprofiten les propietats de la fibra són les del tipus ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC perquè és la proveta que té la ràtio entre l'esforç al trencament i el percentatge de fibra més gran.

Analitzant els resultats anteriors no es veu una tendència clara entre les combinacions, és a dir, no hi ha una combinació que doni una resistència a la tracció més alta que les altres combinacions perquè al canviar el tipus de proveta, aquests resultats varien. Per exemple, de les provetes tipus ASTM D638 TYPE I la combinació que té una resistència a la tracció més alta és la 2, però en el cas de les provetes tipus ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC és la combinació 3. Es pot veure una tendència clara en que les provetes que tenen major percentatge de fibra en secció són les que més resistència a la tracció han suportat. Això, en certa manera, ja era d'esperar per un assaig a tracció en que, almenys teòricament, el que importa és la quantitat de fibra i no la seva distribució i que, sobretot comparant la tensió màxima respecte a la al percentatge de fibra, es veu que els valors són força similars.

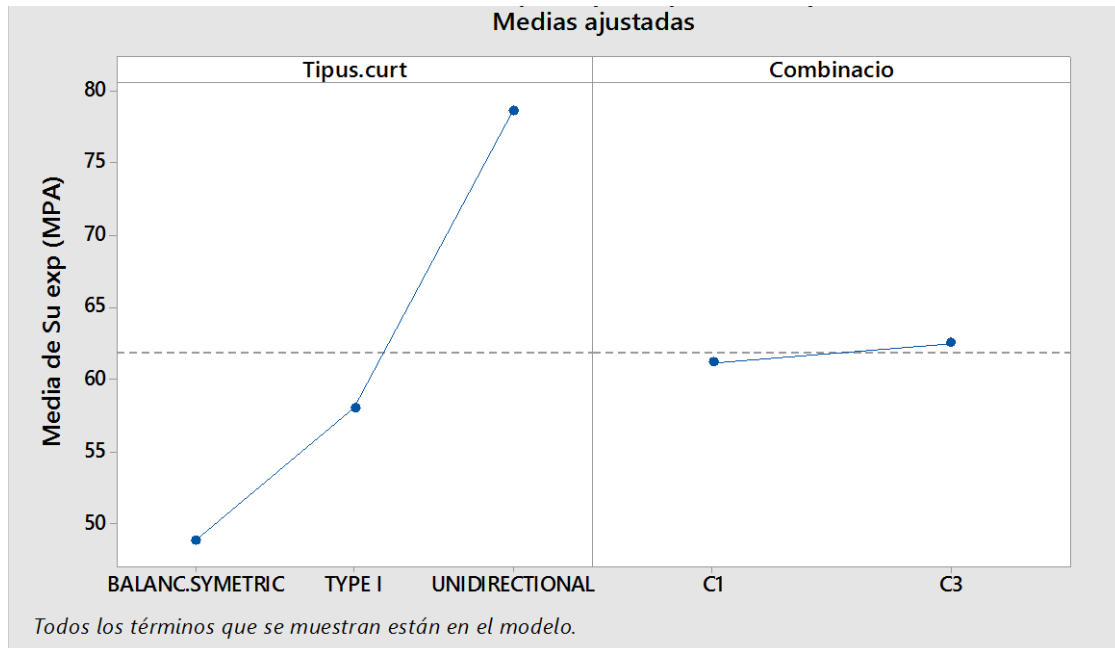


Figura 32. Efectes principals de la σ_u en funció del tipus de proveta i de la combinació 1 i 3

Fuente	GL	Valor F	Valor p
Tipus.curt	2	45,97	0,000
Combinacio	1	0,26	0,621
Tipus.curt*Combinacio	2	3,50	0,063

Taula 18. ANOVA de la σ_u en funció del tipus de proveta i de la combinació 1 i 3

Analitzant la Taula 18 i la Figura 32 es pot veure que el tipus de geometria de la proveta afecta directament al resultat de la resistència última d'aquestes seguint el patró de quanta més fibra en secció té la proveta, més esforços suporta. També es pot veure que no té cap mena d'influència el tipus de combinació, en aquest cas la 1 o la 3, ja que com es pot veure a la Taula 18, té un p-valor superior a 0,05.

En canvi, si analitzem la interacció entre les dues variables, geometria i combinació, veiem que el p-valor està molt a prop de 0,05, el que vol dir que l'efecte de la combinació en σ_u pot dependre del tipus. Tot i això, caldria fer més experiments i tornar a realitzar l'estudi estadístic per poder treure conclusions fermes.

b) Mòdul elàstic

En segon lloc s'ha calculat el mòdul elàstic de tots els tipus de proveta. El fabricant indica a la fitxa tècnica dels materials que el mòdul de Young pel Nylon utilitzat en les impressions és de 0,94 GPa, mentre que el mòdul elàstic de la fibra de carboni utilitzada és de 60 GPa. Com que les provetes s'han fabricat amb una combinació dels dos materials, s'espera que els resultats estiguin entremig d'aquests dos valors.

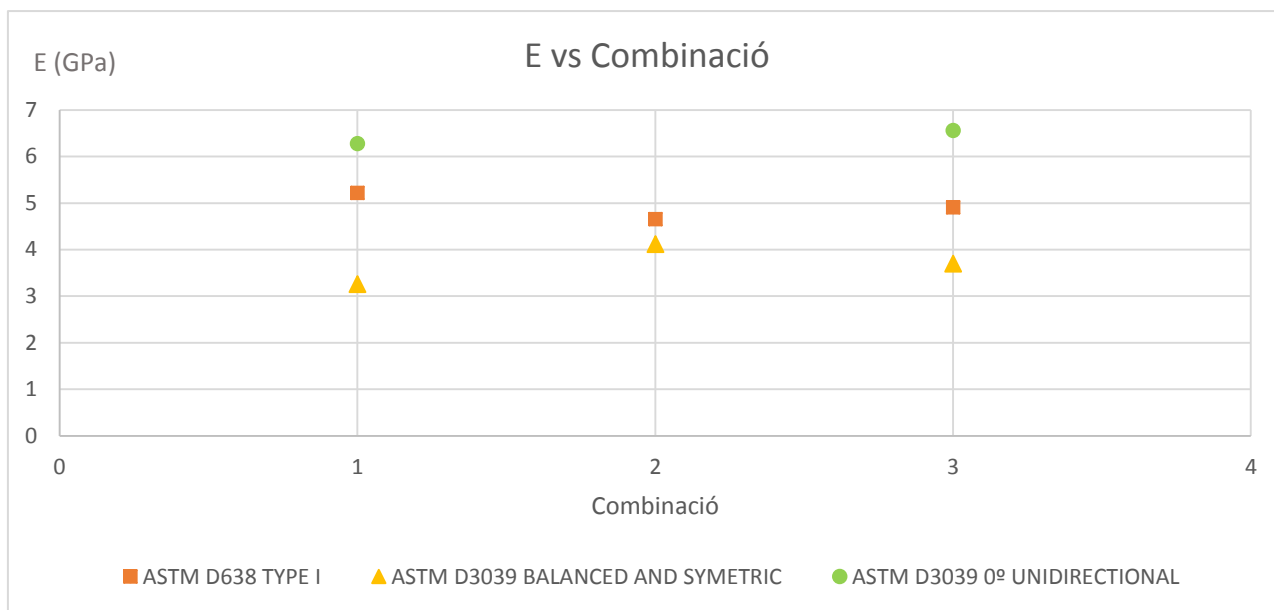


Figura 33. Gràfica del mòdul de Young en funció de la combinació

Tipus de proveta	Nº combinació	% de fibra volumètric	% de fibra en secció	E teòric (GPa)	E exp. (GPa)	Desv. Estàndard (GPa)	Ratio E/fibra (GPa/% fibra)
ASTM D638 TYPE I	1	4,71 %	6,05 %	4,51	5,217	± 0,148	0,86
	2	4,71 %	6,05 %		4,653	± 0,317	0,77
	3	4,74 %	6,05 %		4,910	± 0,156	0,81
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	3,47 %	3,86 %	3,22	3,257	± 0,216	0,84
	2	3,47 %	3,86 %		4,120	± 0,445	1,06
	3	3,59 %	3,86 %		3,700	± 0,667	0,96
ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	1	8,10 %	9,15 %	6,34	6,273	± 0,235	0,69
	3	9,31 %	9,15 %		6,557	± 1,036	0,72

Taula 19. Mòdul de Young en funció de la combinació i tipus de proveta

Tal i com es pot veure a la Taula 19 i la Figura 33, la hipòtesi preliminar de que el valor del mòdul elàstic hauria d'estar entre 0,94 i 60 GPa, degut a que les provetes estan fabricades amb una combinació dels dos materials, és complex.

Es pot veure que els resultats experimentals estan molt a prop dels valors teòrics en la majoria de casos. En el cas de les provetes ASTM D638 TYPE I, el valor experimental del mòdul elàstic està en tots els casos per sobre del valor teòric. En el cas de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC, els valors experimentals també estan en tots les casos per sobre del teòric. Finalment en el cas de les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL, la combinació 1 està per sota del teòric però amb un valor molt

proper i la combinació està per sobre del teòric. Si s'observa la última columna de la Taula 19 es pot veure que les provetes que millor aprofiten les propietats de la fibra són les del tipus ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC perquè és la proveta que té la ràtio entre el mòdul elàstic i el percentatge de fibra més gran, tal com passa en el cas de la tensió última màxima.

Analitzant els resultats es pot veure que no hi ha una desviació molt gran en la majoria de casos, excepte per les provetes de la combinació 3 del tipus ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL. Tot i ser les que tenen un mòdul de Young més gran, també són les que tenen una desviació més gran. Aquest fet pot ser degut a que aquest tipus de proveta té un percentatge de fibra en volum major respecte les altres provetes i una petita variabilitat durant la impressió pot fer augmentar aquesta desviació dels resultats.

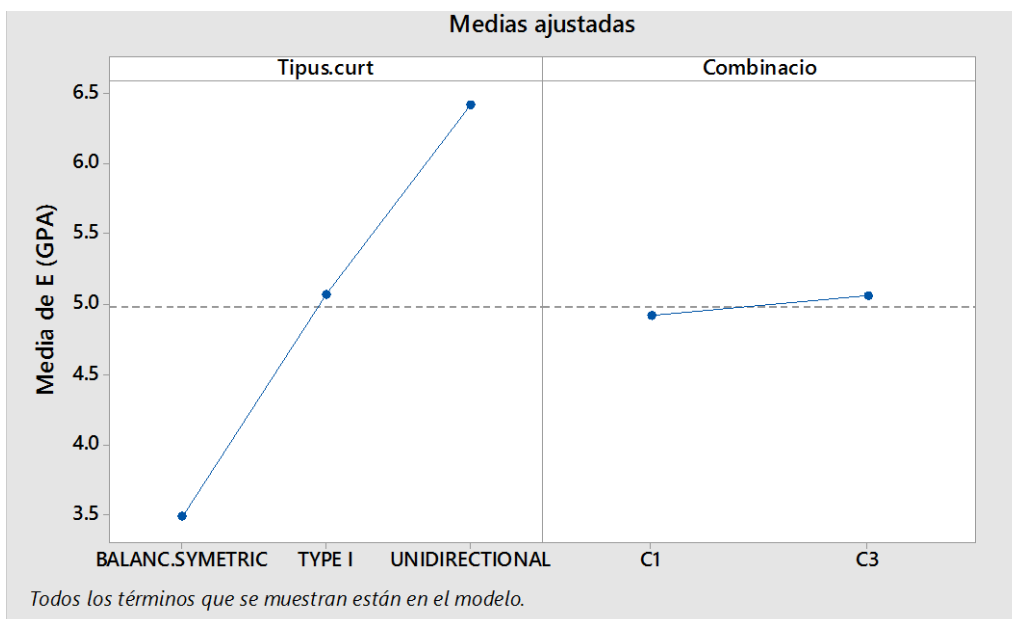


Figura 34. Efectes principals del mòdul elàstic en funció del tipus de proveta i de la combinació 1 i 3

Fuente	GL	Valor F	Valor p
Tipus.curt	2	43.10	0.000
Combinacio	1	0.27	0.613
Tipus.curt*Combinacio	2	0.67	0.531

Taula 20. ANOVA del mòdul elàstic en funció del tipus de proveta i de la combinació 1 i 3

Analitzant la Taula 20 i la Figura 34 es pot veure que el tipus de geometria de la proveta afecta directament al resultat del mòdul elàstic d'aquestes seguint el patró de quanta més fibra en secció té la proveta, més esforços suporta. També es pot veure que

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

no té cap mena d'influència el tipus de combinació, en aquest cas la 1 o la 3, ja que com es pot veure a la Taula 18, té un p-valor superior a 0,05.

Si analitzem les dues variables combinades, geometria i combinació, veiem que el p-valor està molt lluny del valor de 0,05, el que vol dir que no hi ha interacció.

c) Elongació al trencament

Per últim, s'ha mesurat l'elongació al trencament de les provetes durant l'assaig. El fabricant informa que l'elongació al trencament del Nylon és d'un 260% mentre que per la fibra de carboni dona un valor de 1,5%. Per tant, igual que en la tensió de ruptura i el mòdul de Young, s'espera obtenir uns resultats entre aquests dos valors.

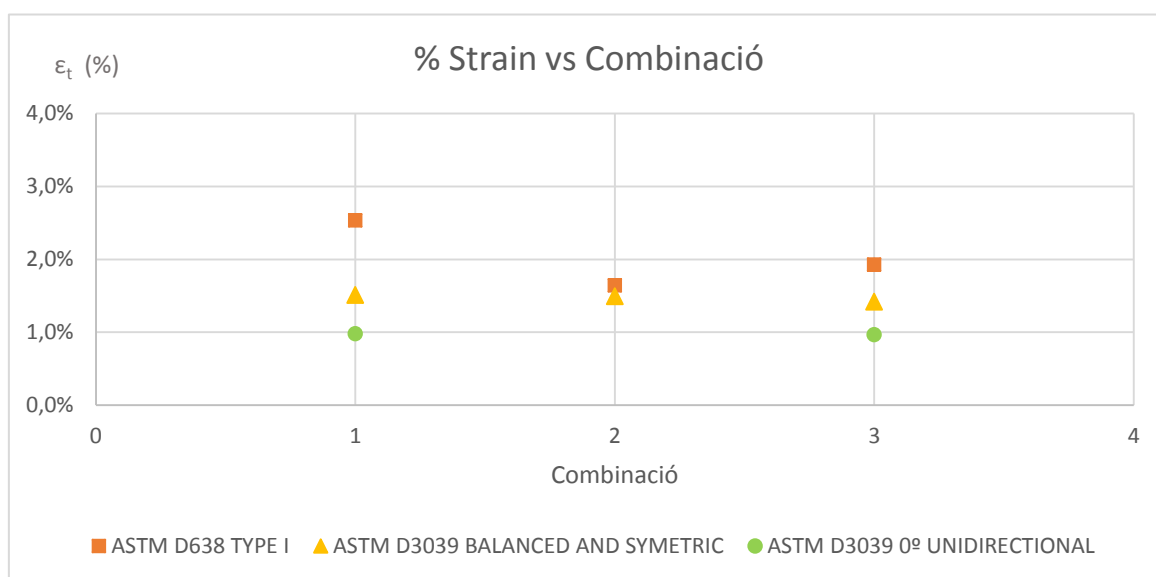


Figura 35. Gràfica de la elongació al trencament en funció de la combinació

Tipus de proveta	Nº combinació	% de fibra volumètric	% de fibra en secció	ϵ_t exp. (%)	Desv. Estàndard (%)	Ratio ϵ_t /fibra (% elong/% fibra)
ASTM D638 TYPE I	1	4,71 %	6,05 %	2,54	± 0,92	0,42
	2	4,71 %	6,05 %	1,64	± 0,27	0,27
	3	4,74 %	6,05 %	1,93	± 0,06	0,32
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	3,47 %	3,86 %	1,51	± 0,11	0,39
	2	3,47 %	3,86 %	1,49	± 0,12	0,37
	3	3,59 %	3,86 %	1,42	± 0,26	0,37
ASTM D3039 0° UNIDIRECT IONAL	1	8,10 %	9,15 %	0,98	± 0,06	0,11
	3	9,31 %	9,15 %	0,97	± 0,13	0,11

Taula 21. Elongació al trencament en funció de la combinació i tipus de proveta

Analitzant la , el valor de la deformació en el moment del trencament és molt proper al valor que ha facilitat el fabricant de 1,5%.

Aquest fet significa doncs que, per poca fibra que s'afegeixi a la peça que es vulgui fabricar, la elongació disminuirà en picat fins al valor teòric de 1,5% indiferentment del percentatge de Nylon que contingui el disseny.

També es pot veure que les provetes ASTM D638 TYPE I són les que han tingut una elongació al trencament major amb una variabilitat important en el cas de la combinació 1. Aquest fet no és lògic veient que les provetes que tenen menys percentatge de fibra, i que per tant, haurien d'haver-se elongat més són les del tipus ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC. Pel que fa a les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL, tenen una elongació inferior a la teòrica facilitada per Markforged. Tot i això, el resultat és lògic perquè han estat les que han tingut una deformació menor durant l'assaig ja que són les que tenen un percentatge de fibra més gran respecte els altres tipus de provetes. Si s'analitza la última columna de la Taula 21, es pot observar que en aquest cas el tipus de proveta que millor aprofita les propietats de la fibra són les ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL, ja que són les que tenen una ràtio més baixa d'elongació al trencament respecte el percentatge de fibra en secció.

6.4 Assaig a flexió

En el cas de les provetes ISO 14125 CLASS IV, fabricades segons la normativa de flexió, s'ha analitzat la resistència a flexió, flexió al trencament de les provetes i el mòdul elàstic.

a) Resistència a flexió

Segons el fabricant, el Nylon té una tensió de flexió a ruptura de 32 MPa, mentre que la de la fibra de carboni és de 470 MPa. Analitzant aquestes dades, es pot suposar que en aquest cas el valor de la tensió estarà comprès entre 32 i 470 MPa.

Tipus de proveta	Nº combinació	% de fibra volumètric	% de fibra en secció	σ_f exp. (MPa)	Desv. Estàndard (MPa)	Ratio σ_f /fibra (MPa/% fibra)
ISO 14125 CLASS IV	1	6,65 %	7,72 %	79,19	9,162	10,26
	2	6,63 %	7,72 %	*16,24*	*2,508*	*2,10*
	3	7,60 %	7,72 %	40,42	1,918	5,24

Taula 22. Tensió de flexió en funció de la combinació

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

Tal i com es pot veure a la Taula 22, les combinacions 1 i 3 compleixen la suposició feta prèviament segons les dades facilitades pel fabricant. En canvi, en la combinació 2 s'ha obtingut un valor de tensió de 16,24 MPa, la meitat de la del Nylon. En aquest cas concret, es pot atribuir a que tot i que aquestes provetes tinguessin fibra, aquesta es trobava concentrada al centre de la secció i per tant, el seu efecte va ser mínim. Donada la poca rigidesa del Nylon, la deformació va ser excessiva arribant al límit del que permetia el muntatge sense aconseguir el trencament. Vist que la rigidesa resultant en aquest cas és tan baixa, seria millor fer servir una proveta més curta de manera que la deformació a flexió fos molt inferior.

La combinació 1 és la que va més tensió va suportar al realitzar els assajos. Tot i això, també ha estat la combinació que ha donat una dispersió més gran en els resultats. També cal destacar que, tot i no ser la combinació que més fibra té respecte el volum total, ha estat la que més tensió ha suportat degut a que les fibres estan situades a les capes externes de la proveta.

La combinació 3 és la que té una desviació menor en els resultats amb una tensió mitjana de 40,42 MPa, valor proper als 32 MPa del Nylon verge.

b) Flexió al trencament

Pel que fa a la flexió, el fabricant no dóna valor en el cas del Nylon però en el cas de la fibra de carboni és de 1,2%. Per tant, es pot suposar que l'elongació serà superior al 1,2%.

Tipus de proveta	Nº combinació	% de fibra volumètric	% de fibra en secció	ϵ_f exp. (%)	Desv. Estàndard (%)	Ratio ϵ_f /fibra (% flexió/% fibra)
ISO 14125 CLASS IV	1	6,65 %	7,72 %	2,10	1,039	0,27
	2	6,63 %	7,72 %	*5,14*	*0,378*	*0,67*
	3	7,60 %	7,72 %	2,88	0,389	0,37

Taula 23. Flexió màxima en funció de la combinació

Pel que fa a l'elongació màxima de la proveta durant l'assaig, es pot dir que els resultats van directament lligats amb els analitzats anteriorment de la tensió que han suportat les provetes ISO 14125 CLASS IV.

Es pot veure a la Taula 23 que la combinació 1, que ha estat la que ha suportat una tensió més gran de les tres combinacions, és la que té una elongació inferior. Cal destacar que, igual que en el cas de la tensió, aquesta combinació ha estat la que ha donat uns resultats més dispersos entre ells. En canvi, les provetes impreses amb la combinació 2, que han estat les que han tingut un valor molt inferior al teòric del Nylon, són les que

s'han elongat més durant l'assaig i tenen la desviació més petita de les tres combinacions. L'assaig es va haver d'aturar perquè les provetes de la combinació 2 es van flexionar fins al màxim que permetia el muntatge, però si s'hagués pogut seguir l'assaig, aquestes provetes s'haurien pogut flexionar més fins a la ruptura. Per tant, igual que s'ha comentat amb la tensió de flexió, aquests resultats no es poden utilitzar per treure conclusions.

Pel que fa a les provetes impreses amb la combinació 3 tenen una elongació intermèdia entre les altres combinacions, tal i com passava amb la tensió que suportava aquest tipus de combinació.

c) Mòdul de flexió

En el cas del mòdul de flexió, el fabricant proporciona un valor de 0,84 GPa en el cas del Nylon i un valor de 51 GPa per la fibra de carboni. Seguint les suposicions fetes anteriorment, els valors que esperem estaran compresos entre 0,84 i 51 GPa.

Tipus de proveta	Nº combinació	% de fibra volumètric	% de fibra en secció	E _f exp. (GPa)	Desv. Estàndard (GPa)	Ratio E _f /fibra (GPa/% fibra)
ISO 14125 CLASS IV	1	6,65 %	7,72 %	5,81	1,718	0,75
	2	6,63 %	7,72 %	*0,65*	*0,238*	*0,08*
	3	7,60 %	7,72 %	3,22	0,117	0,42

Taula 24. Resultats del mòdul de flexió

Tal i com es pot veure a la Taula 24, en el cas de la combinació 1 s'han obtingut els valors més grans del mòdul de flexió amb una mitja de 5,81 GPa però amb una desviació molt gran, concretament de 1,72 GPa. Tal i com ha passat en el cas de la resistència a flexió i el desplaçament analitzats anteriorment, els resultats de la combinació 2 no són vàlids perquè malgrat les fibres estiguin al mig i es flexioni la proveta fins al màxim del que permetia la màquina, el mòdul a flexió, relacionat amb el de Young, no pot ser inferior al del Nylon. L'explicació està en que al tenir tota la fibra concentrada en les capes centrals, la impressora ha posat moltes capes amb només Nylon i malgrat que siguin sòlides, les posa a $\pm 45^\circ$, disminuint la rigidesa respecte a la que tindria si tot fos imprès a 0° . En el cas de la combinació 3, s'han obtingut uns valors molt similars en les tres rèpliques, amb una mitja de 3,22 GPa i una desviació molt petita de 0,12 GPa.

7 RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost ascendeix a la quantitat de QUATRE MIL SIS-CENTS TRENTA TRES EUROS AMB UN CÈNTIM (4.633,01 €). El desglossat del pressupost es pot veure a l'Annex D.

8 CONCLUSIONS

En aquest apartat es resumeixen les principals conclusions obtingudes en el present projecte. En l'estudi preliminar s'han volgut analitzar els paràmetres d'alçada de capa, % infill, estat de la poliamida i la capacitat per realitzar forats en diferents plans.

Amb la geometria 1 s'ha pogut comprovar que els plans que s'obtenen unes mesures més regulars són l'X i l'Y, mentre que el pla Z és el més estable. També s'ha pogut constatar que el fet que la poliamida estigui humida és un punt en contra ja que fa augmentar la dispersió dels resultats. Per últim, s'ha pogut comprovar que l'alçada de capa i el % d'infill són paràmetres influents a l'hora de mantenir una bona precisió dimensional. Amb la geometria 2 s'ha pogut verificar que sempre que fabriquem forats en el pla Z, aquests seran més grans que el valor teòric que es dissenyi degut a la contracció del material en el procés de refredament. També s'ha verificat que si durant les impressions es tenen problemes d'adherència amb el llit d'impressió, una bona solució és crear el propi "Brim" en un software CAD. Finalment, amb la geometria 3 s'ha pogut comprovar que la precisió dimensional d'aquesta tecnologia per fabricar peces que tenen forats en els plans X i Y és pràcticament nul·la perquè els resultats no són gens bons.

En segon lloc, s'ha realitzat l'estudi de les geometries tipus proveta amb reforç de fibra. En aquest cas s'ha realitzat la caracterització geomètrica i mecànica de les provetes.

- Pes: en tots els casos el pes ha estat inferior al teòric que dona per defecte el software Eiger.
- Gruix: en la gran majoria de casos el gruix és superior al valor teòric.
- Amplada: igual que el pes, l'amplada sempre és inferior al valor objectiu, independentment del tipus de proveta i de combinació.
- Resistència a la tracció: en tots els casos s'ha pogut constatar que a més percentatge de fibra en secció, les propietats són millors. Tot i això, no hi ha cap tendència clara en cap tipus de combinació de fibra. En el cas de la resistència última i del mòdul elàstic, les provetes que millor han aprofitat les propietats de la fibra han estat les tipus ASTM D3039 BALANCED AND SYMMETRIC, en canvi en el cas de l'elongació al trencament, les que han tingut un comportament millor han estat les tipus ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL.

Cal destacar que els valors experimentals del mòdul de Young de tots els tipus de proveta estan molt a prop del valor teòric d'aquestes. També cal destacar que, per poca fibra que s'afegeixi a les peces, l'elongació al trencament disminueix molt respecte l'elongació que té el Nylon.

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

- Resistència a la flexió: en el cas de la resistència a flexió, s'ha pogut comprovar que la combinació que té uns millors resultats és la combinació de fibra número 1. Tot i això, cal destacar que també és la combinació que té una dispersió més gran en els seus resultats. En canvi, la combinació 3, tot i no tenir uns valors tan bons com la combinació 1, té una desviació molt petita en els seus resultats.

Sobre la combinació 2 no s'han pogut extreure conclusions degut a que no van trencar les provetes durant l'assaig que es va realitzar.

El present projecte suposa un primer pas en la caracterització del procés de la impressió 3D amb reforç de fibra contínua, ja que com s'ha dit, es tracta d'una tecnologia molt nova amb un ampli ventall de línies d'investigació que cal explorar.

El primer pas a seguir després de la realització d'aquest projecte consisteix en repetir l'experimentació amb fibra contínua amb un major nombre de rèpliques per veure si hi ha alguna tendència dels resultats i que d'aquesta manera es puguin extreure mapes de procés per aquesta tecnologia.

A partir d'aquí també caldria aplicar aquesta metodologia per altres tipus de reforç de fibra contínua per tal de comprovar que aquesta metodologia és vàlida per a altres materials amb diferents característiques que la fibra de carboni. En concret, s'hauria de treballar amb fibra de vidre i Kevlar perquè són els materials que proporciona l'empresa fabricant de la impressora 3D.

9 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document 1 – Memòria

Memòria

Annexos a la Memòria

Document 2 - Plànols

10 BIBLIOGRAFIA

1. MARKFORGED (2019), *Mark Two Desktop Carbon Fiber 3D printer for manufacturing*. Consultat el 18 de maig de 2019
<https://markforged.com/mark-two/>
2. MARKFORGED (2019), *Types of Metal and Composite Materials Used by Markforged 3D printers*. Consultat el 18 de maig de 2019
<https://markforged.com/materials/>
3. Mahr GmbH (2019), *Micromar 40 EWR – Micrómetro digital para exteriores*. Consultat el 19 de maig de 2019
<https://www.mahr.com/es/Prestaciones/Metrología-industrial/Productos/Metrología-manual/Micromar---Micrómetros/Micromar--Micrómetros-para-exteriores/Micromar---Micrómetro-digital-para-exteriores/Micromar---Micrómetro-digital-para-exteriores/>
4. Mitutoyo America (2019), *Mitutoyo Crysta ApexS*. Consultat el 22 de maig de 2019
https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2013/01/2097_CRYSTA_ApexS.pdf
5. Test Systems (2019), *3542 – Extensómetro axial tracción/compresión*. Consultat el 18 de maig de 2019
<https://test-systems.es/productos/extensometros-epsilon-para-ensayo-de-materiales/3542-extensometro-axial-traccion-compresion/>
6. CONTROLS (2019), *Testing equipment for the construction industry*. Consultat el 19 de maig de 2019.
http://www.controls-group.com/DownloadFileUrl.php?url=backend@@download@@file_upload@@file@@120503193170_10_15_english.pdf/nomefile=10_15_english.pdf
7. UPC (2017), *Documents equipament*. Consultat el 30 de maig de 2019
https://www.upc.edu/sct/documents_equipament/d_69_id-423.pdf

8. HOFFMANN GROUP (2019), *HOLEX Pie de rey digital IP67 150 mm*. Consultat el 18 de maig de 2019
<https://www.hoffmann-group.com/ES/es/hoer/T%C3%A9cnica-de-medic%C3%B3n/Pies-de-rey/Pie-de-rey-digital-IP67/p/412751-150>
9. 3D FILAMENTS (2019), *Historia 3D*. Consultat el 12 de març de 2019.
https://www.3dfils.com/de/blog/20_historia3d
10. Digital Trends Español (2018), *Historia de la impresión en 3D contada en unos pocos hitos*. Consultat el 17 de febrer de 2019
<https://es.digitaltrends.com/fotografia/historia-de-la-impresion-en-3d/>
11. Impresoras 3D (2019), *Breve historia de la impresión 3D*. Consultat el 24 de febrer de 2019
<https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
12. Wikipedia (2019), *Fused filament fabrication*. Consultat el 2 de març de 2019
https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication
13. 3D Printing Blog (2019), *The history of 3D Printing: from the 80s to today*. Consultat el 27 de febrer de 2019.
<https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>
14. Al Abadi, H., Thai H., Paton-Cole V., Patel V.I., (2018), *Elastic properties of 3D printed fibre-reinforced structures*. Composite Structures
15. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Plaza E., Nuñez P.J., García-Moreno I., Rodríguez G.P., (2017), *Fabricación aditiva de estructuras 3D reforzadas: efectos de los parámetros de impresión en el comportamiento mecánico*. Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos
16. Justo J., Távora L., García-Guzmán L., París F., (2018), *Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites*. Composite Structures

11 ANNEXOS

Annex A. Equipament

A1. Markforged MarkTwo

A la Taula 25 es mostra la fitxa tècnica de la impressora MarkTwo de Markforged.

Propietats de la impressora	<i>Procés</i>	Fabricació filament fos, Fabricació contínua amb filament
	<i>Volum d'impressió</i>	320 x 132 x 154 mm
	<i>Pes</i>	16 kg
	<i>Dimensions</i>	584 x 330 x 355 mm
	<i>Llit d'impressió</i>	
	<i>Potència</i>	100-240 VAC, 150 W
Propietats de les peces	<i>Alçada de capa</i>	100 µm per defecte, 200 µm màxim
	<i>Tensió última</i>	700 MPa
	<i>Rigidesa màxima a flexió</i>	51 GPa
	<i>Emplenat</i>	Multiples geometries disponibles
Software	<i>Software incorporat</i>	Markforged software – cloud storage – local storage
	<i>Connectivitat</i>	Ethernet, Wi-Fi, USB
	<i>Seguretat</i>	Factor de doble autenticació
Materials	<i>Plastic</i>	Onyx, Nylon
	<i>Fibres</i>	Carboni, vidre, Kevlar, vidre d'alta resistència

Taula 25. Característiques de la impressora

A2. Heraeus Vötsch VTRK500

A la Taula 26 es poden veure les característiques principals de la cambra climàtica utilitzada per assecat les provetes.

Tipus	Cambra climàtica
Dimensions interiors	750 x 880 x 765 mm
Pes	500 kg
Rang de temperatura	10-90 °C
Capacitat	1430 L

Taula 26. Característiques del forn climàtic



Figura 36. Cambra climàtica

A3. Mahr Micromar 40 EWW

A la Taula 27 es mostra la fitxa tècnica del micròmetre digital per exteriors Mahr Micromar 40 EWW.



Figura 37. Micròmetre digital

Interval de mesura	0-25 mm
Resolució	0.001 mm
Límit d'error	4 µm
Diàmetre del cargol	6.5 mm
Pas del cargol	0.635 mm

Taula 27. Característiques micròmetre digital

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

A4. Mitutoyo Crysta Apex 544

A la Taula 28 es troben indicades les característiques tècniques més rellevants de la màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544.

Rang de mesura	505 x 405 x 405 mm
Resolució	0.1 µm
Precisió	1.7 µm
Consum d'aire	50 l/min
Velocitat màxima	520 mm/s

Taula 28. Característiques màquina de coordenades



Figura 38. Màquina de coordenades

A5. Controls Model 11 – D0628

A la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** hi ha indicades les característiques principals de la màquina de mesura de coordenades Model 11 – D0628.

bàscula Controls



Figura 39. Bàscula

Lectura màxima	330 g
Dimensió	110 mm (diàmetre)
Precisió	0,001 g
Pes	6,5 kg
Potència	110 V, 60 Hz

Taula 29. Característiques principals de la bàscula

A6. Peu de rei Horex

A la Taula 30 hi ha indicades les característiques principals del peu de rei digital Horex.



Figura 40. Peu de rei digital

Interval de mesura	0-150 mm
Resolució	0.01 mm
Límit d'error	3 µm

Taula 30. Característiques del peu de rei digital

A7. MTS Insight 50000N

A la Taula 31 hi ha indicades les característiques principals de la màquina d'assajos universals.

Interval de mesura	0 – 50.000 N
Recorregut màxim	1050 mm
Velocitat d'assaig	0,001 – 500 mm/min

Taula 31. Característiques màquina MTS Insight



Figura 41. Màquina MTS Insight

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

A8. Extensòmetre Epsilon 3542

A la Taula 32 hi ha indicades les característiques principals de l'extensòmetre Epsilon 3542.

Tipus	Clip-On
Recorregut de mesura	1 mm
Error d'indicació	0.1 0,15 %
Sensibilitat	2 - 4 mV/V
Resistència nominal del pont	350 Ω
Rang de temperatura	-40 - 100 °C

Taula 32. Característiques de l'extensòmetre



Figura 42. Extensòmetre

Annex B. Materials

B1. Nylon

A la Taula 33 hi ha indicades les propietats mecàniques del material Nylon fabricat per Markforged.

Properties	Value	Test
Tensile Modulus (GPa)	0,94	ASTM D638
Tensile Stress at Yield (MPa)	31	ASTM D638
Tensile Strain at Yield (%)	27	ASTM D638
Tensile Stress at Break (MPa)	54	ASTM D638
Tensile Strain at Break (%)	260	ASTM D638
Flexural Strength (MPa)	32	ASTM D790
Flexural Modulus (GPa)	0,84	ASTM D790
Heat Deflection Temperature (°C)	49	ASTM D648 B
Izod Impact – notched (J/m)	1000	ASTM D256-10A
Density (g/cm ³)	1,1	-

Taula 33. Propietats mecàniques del Nylon



Figura 43. Nylon

B2. Fibra de carboni

A la Taula 34 hi ha indicades les propietats mecàniques del material Fibra de carboni fabricat per Markforged.

Properties	Value	Test
Tensile Modulus (GPa)	60	ASTM D3039
Tensile Strength (MPa)	800	ASTM D3039
Tensile Strain at Break (%)	1,5	ASTM D3039
Flexural Strength (MPa)	470	ASTM D790
Flexural Modulus (GPa)	51	ASTM D790
Flexural Strain at Break (%)	1,2	ASTM D790
Compressive Strength (MPa)	320	ASTM D6641
Compressive Modulus (MPa)	54	ASTM D6641
Compressive Strain at Break (%)	0,7	ASTM D6641
Heat Deflection Temperature (°C)	105	ASTM D648 B
Izod Impact – notched (J/m)	960	ASTM D256-10A
Density (g/cm ³)	1,4	-

Taula 34. Propietats mecàniques de la fibra de carboni



Figura 44. Fibra de carboni

Annex C. Resultats

C1. Geometria 1

A la Taula 35 es poden veure les mesures de cada cub fabricat per la geometria 1, la diferència amb el valor teòric i l'error percentual d'aquesta diferència.

	Posició	Mesures (mm)			Diferència (mm)			Error (%)		
		Pla X	Pla Y	Pla Z	Pla X	Pla Y	Pla Z	Pla X	Pla Y	Pla Z
CUB 1	1,000	19,997	20,067	20,077	-0,003	0,067	0,077	0,015	0,335	0,385
	2,000	19,966	19,970	20,028	-0,034	-0,030	0,028	0,170	0,150	0,140
	3,000	19,794	19,877	20,066	-0,206	-0,123	0,066	1,030	0,615	0,330
	4,000	19,905	20,010	20,019	-0,095	0,010	0,019	0,475	0,050	0,095
	5,000	19,870	19,952	20,042	-0,130	-0,048	0,042	0,650	0,240	0,210
	Mitjana	19,906	19,975	20,046	-0,094	-0,025	0,046	0,468	0,124	0,232
CUB 2	1,000	19,906	20,023	19,879	-0,094	0,023	-0,121	0,470	0,115	0,605
	2,000	19,783	19,922	19,860	-0,217	-0,078	-0,140	1,085	0,390	0,700
	3,000	19,760	19,877	19,924	-0,240	-0,123	-0,076	1,200	0,615	0,380
	4,000	19,892	19,955	19,938	-0,108	-0,045	-0,062	0,540	0,225	0,310
	5,000	19,906	19,951	19,920	-0,094	-0,049	-0,080	0,470	0,245	0,400
	Mitjana	19,849	19,946	19,904	-0,151	-0,054	-0,096	0,753	0,272	0,479
CUB 3	1,000	19,899	19,920	19,986	-0,101	-0,080	-0,014	0,505	0,400	0,070
	2,000	19,824	19,894	20,025	-0,176	-0,106	0,025	0,880	0,530	0,125
	3,000	19,767	19,908	20,059	-0,233	-0,092	0,059	1,165	0,460	0,295
	4,000	19,812	20,014	19,982	-0,188	0,014	-0,018	0,940	0,070	0,090
	5,000	19,905	19,941	20,023	-0,095	-0,059	0,023	0,475	0,295	0,115
	Mitjana	19,841	19,935	20,015	-0,159	-0,065	0,015	0,793	0,323	0,075
CUB 4	1,000	19,763	19,995	19,860	-0,237	-0,005	-0,140	1,185	0,025	0,700
	2,000	19,755	20,047	19,909	-0,245	0,047	-0,091	1,225	0,235	0,455
	3,000	19,772	19,925	19,943	-0,228	-0,075	-0,057	1,140	0,375	0,285
	4,000	19,842	19,991	19,808	-0,158	-0,009	-0,192	0,790	0,045	0,960
	5,000	19,890	19,940	19,943	-0,110	-0,060	-0,057	0,550	0,300	0,285
	Mitjana	19,804	19,980	19,893	-0,196	-0,020	-0,107	0,978	0,102	0,537
CUB 5	1,000	19,890	19,956	19,859	-0,110	-0,044	-0,141	0,550	0,220	0,705
	2,000	19,854	19,916	19,865	-0,146	-0,084	-0,135	0,730	0,420	0,675
	3,000	19,812	19,902	19,856	-0,188	-0,098	-0,144	0,940	0,490	0,720
	4,000	19,801	19,952	19,815	-0,199	-0,048	-0,185	0,995	0,240	0,925
	5,000	19,813	19,956	19,915	-0,187	-0,044	-0,085	0,935	0,220	0,425
	Mitjana	19,834	19,936	19,862	-0,166	-0,064	-0,138	0,830	0,318	0,690
CUB 6	1,000	19,924	19,943	19,955	-0,076	-0,057	-0,045	0,380	0,285	0,225
	2,000	19,835	19,925	19,963	-0,165	-0,075	-0,037	0,825	0,375	0,185
	3,000	19,850	19,905	19,993	-0,150	-0,095	-0,007	0,750	0,475	0,035
	4,000	19,856	19,985	20,009	-0,144	-0,015	0,009	0,720	0,075	0,045

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

	5,000	19,832	19,921	20,026	-0,168	-0,079	0,026	0,840	0,395	0,130
Mitjana	19,859	19,936	19,989	-0,141	-0,064	-0,011	0,703	0,321	0,054	

Taula 35. Resultats de la geometria 1

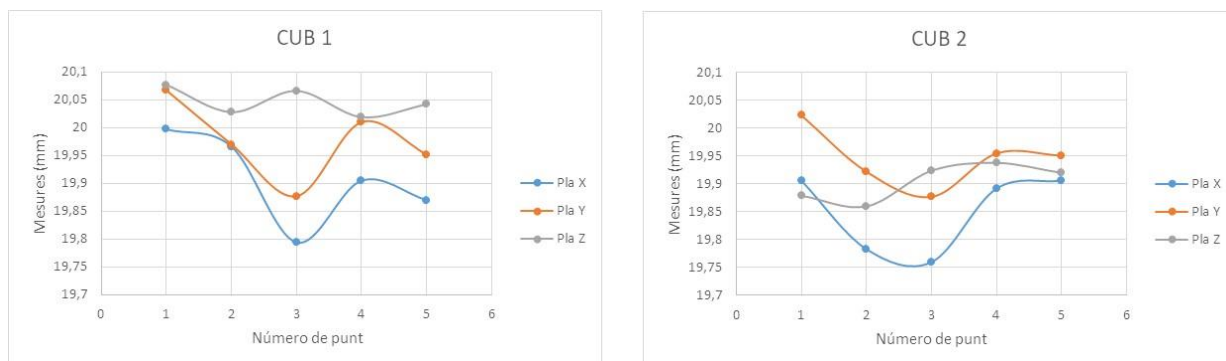


Figura 45. Resultats de l'experiment 1 de la geometria 1

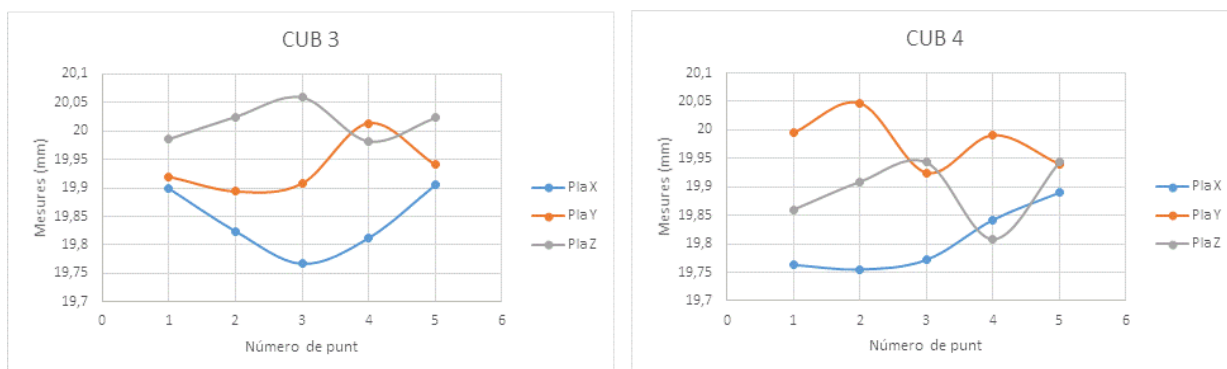


Figura 46. Resultats de l'experiment 2 de la geometria 1

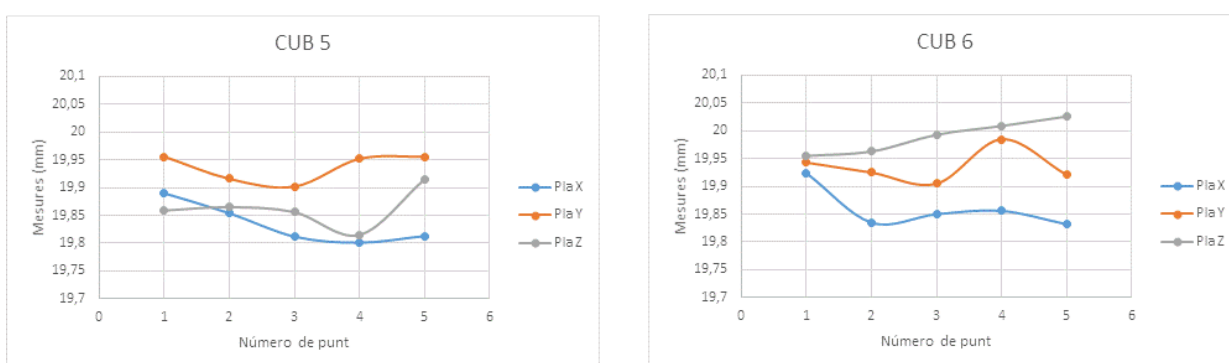


Figura 47. Resultats de l'experiment 3 de la geometria 1

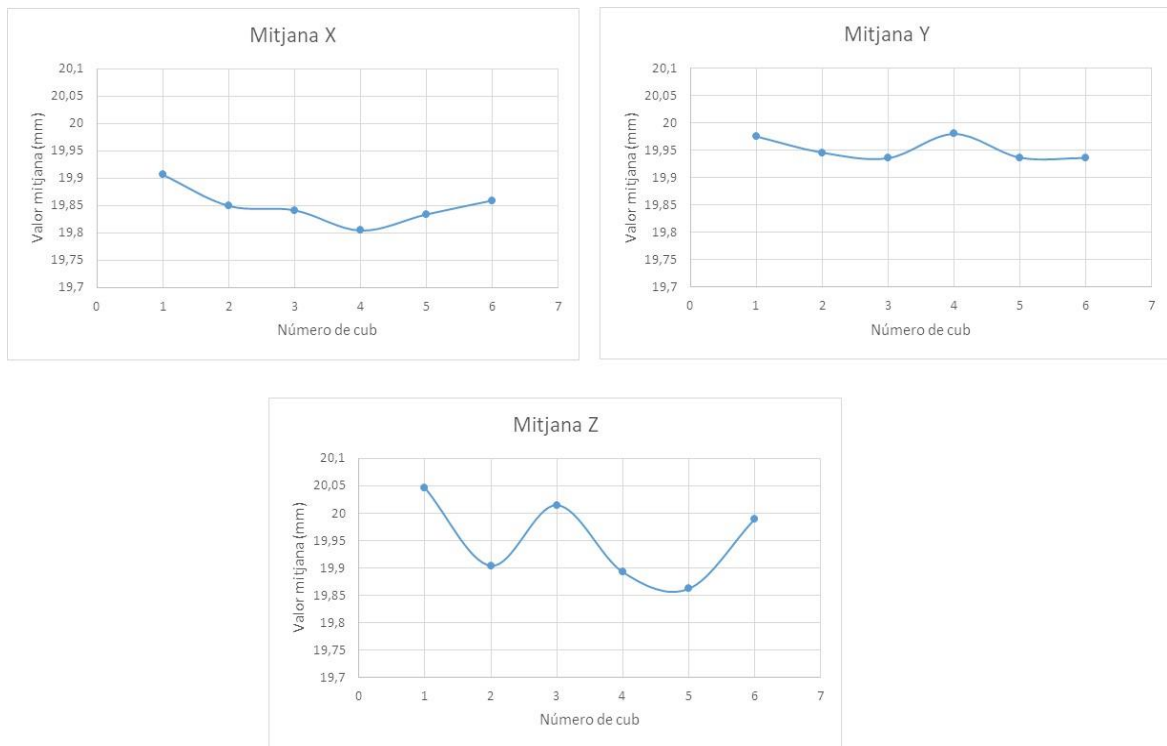


Figura 48. Resultats de la geometria 1 en funció del pla

C2. Geometria 2

- Experiment 1

A la Taula 36 es poden veure els resultats de les mesures preses per l'experiment 1 de la geometria 2 i l'error respecte el valor teòric.

ID acoplament i forat	Precisió	Punt de mesura del diàmetre	Valor teòric	Valor experimental	Error
quadrat_100_02_7985	100 micres	1	7,985	8,2159	0,2309
		2	7,985	8,1406	0,1556
		3	7,985	8,1964	0,2114
quadrat_100_02_7885	100 micres	1	7,885	8,2534	0,3684
		2	7,885	8,1364	0,2514
		3	7,885	7,9536	0,0686
quadrat_100_02_7785	100 micres	1	7,785	8,4563	0,6713
		2	7,785	8,092	0,307
		3	7,785	8,0914	0,3064
quadrat_100_02_7685	100 micres	1	7,685	8,1346	0,4496
		2	7,685	8,0074	0,3224
		3	7,685	8,0272	0,3422
quadrat_50_02_7985	50 micres	1	7,985	8,2915	0,3065
		2	7,985	8,2369	0,2519
		3	7,985	8,1208	0,1358
quadrat_50_02_7935	50 micres	1	7,935	8,2664	0,3314
		2	7,935	8,3002	0,3652
		3	7,935	8,1388	0,2038
quadrat_50_02_7885	50 micres	1	7,885	8,2144	0,3294
		2	7,885	8,2798	0,3948
		3	7,885	8,2446	0,3596
quadrat_50_02_7835	50 micres	1	7,835	8,0346	0,1996
		2	7,835	8,1045	0,2695
		3	7,835	8,2064	0,3714

Taula 36. Resultats de l'experiment 1 de la geometria 2

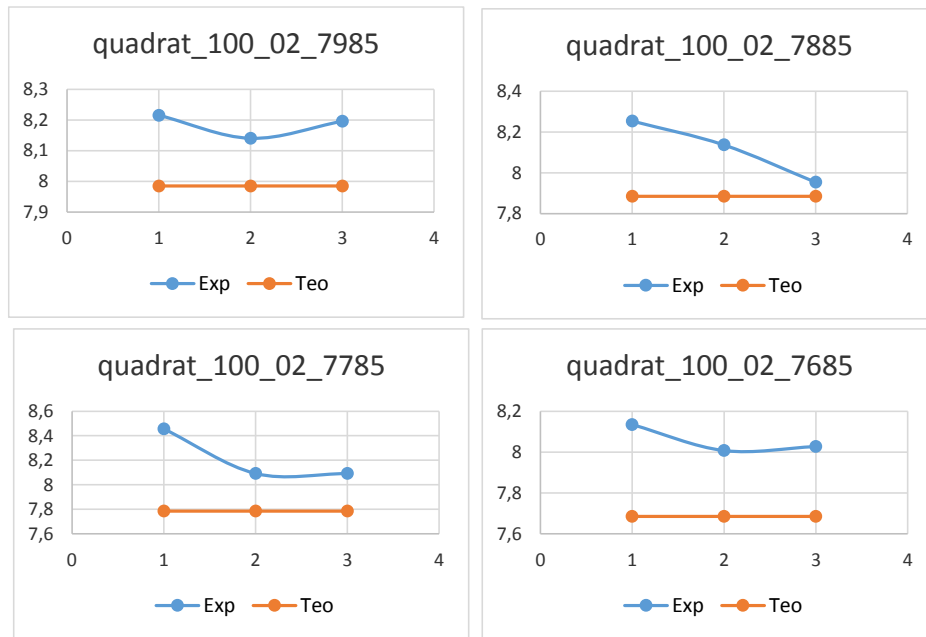


Figura 49. Resultats per l'acoblament de 100 micres de l'experiment 1

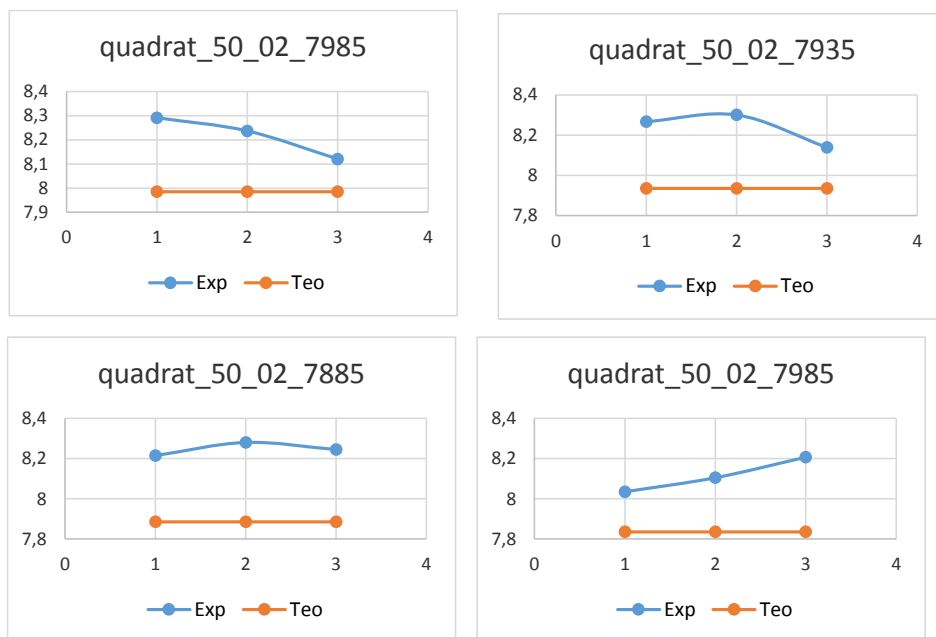


Figura 50. Resultats de l'acoblament de 50 micres de l'experiment 1

- Experiment 2

A la Taula 37 es poden veure els resultats de les mesures preses per l'experiment 2 de la geometria 2 i l'error respecte el valor teòric.

ID acoplament i forat	Precisió	Punt de mesura del diàmetre	Valor teòric	Valor experimental	Error
quadrat_100_01_7985	100 micres	1	7,985	8,1757	0,1907
		2	7,985	8,1719	0,1869
		3	7,985	8,1915	0,2065
quadrat_100_01_7885	100 micres	1	7,885	8,2053	0,3203
		2	7,885	8,1553	0,2703
		3	7,885	8,1159	0,2309
quadrat_100_01_7785	100 micres	1	7,785	8,2636	0,4786
		2	7,785	8,0492	0,2642
		3	7,785	8,193	0,408
quadrat_100_01_7685	100 micres	1	7,685	8,1297	0,4447
		2	7,685	7,8181	0,1331
		3	7,685	8,1656	0,4806
quadrat_50_01_7985	50 micres	1	7,985	8,3133	0,3283
		2	7,985	8,2135	0,2285
		3	7,985	8,1531	0,1681
quadrat_50_01_7935	50 micres	1	7,935	8,6194	0,6844
		2	7,935	8,0919	0,1569
		3	7,935	8,1195	0,1845
quadrat_50_01_7885	50 micres	1	7,885	8,0324	0,1474
		2	7,885	7,9023	0,0173
		3	7,885	8,0084	0,1234
quadrat_50_01_7835	50 micres	1	7,835	7,989	0,154
		2	7,835	7,99	0,155
		3	7,835	7,9379	0,1029

Taula 37. Resultats de l'experiment 2 de la geometria 2

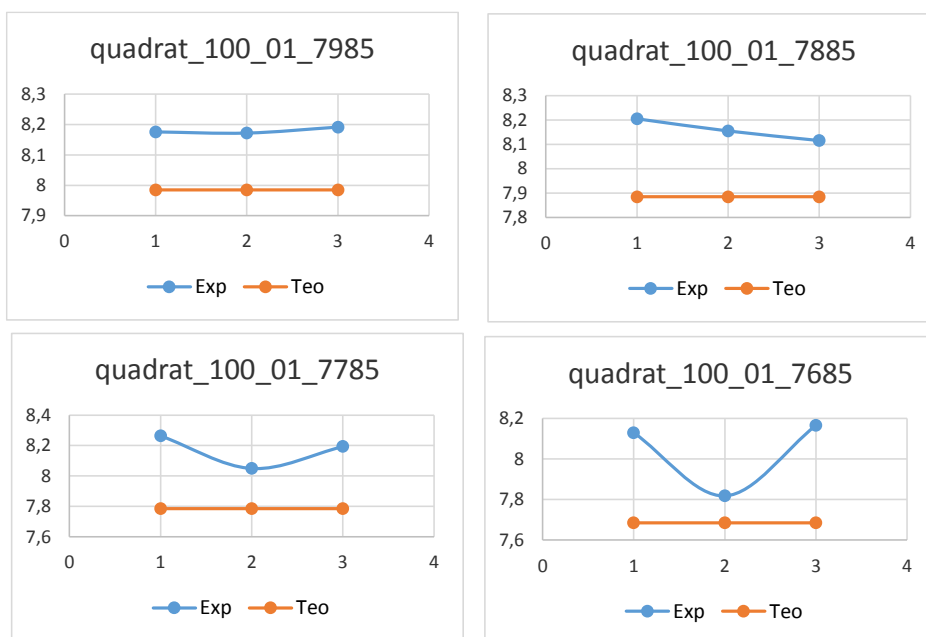


Figura 51. Resultats de l'acoblament de 100 micres de l'experiment 2

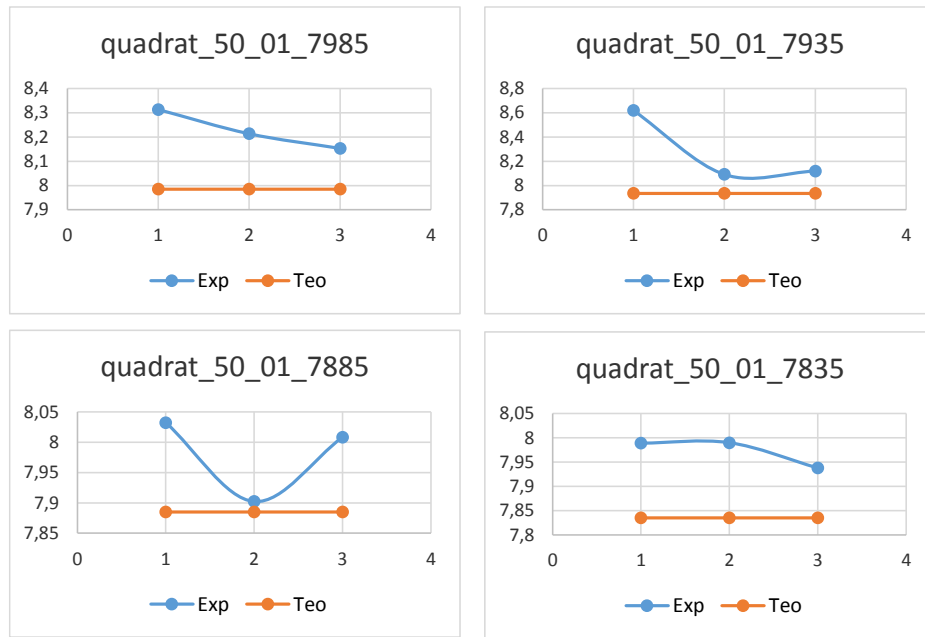


Figura 52. Resultats per l'acoblament de 50 micres de l'experiment 2

- Experiment 3

A la Taula 38 es poden veure els resultats de les mesures preses per l'experiment 3 de la geometria 2 i l'error respecte el valor teòric.

ID acoplament i forat	Precisió	Punt de mesura del diàmetre	Valor teòric	Valor experimental	Error
rodo_100_01_7985	100 micres	1	7,985	8,3317	0,3467
		2	7,985	8,2717	0,2867
		3	7,985	8,257	0,272
rodo_100_01_7885	100 micres	1	7,885	8,1504	0,2654
		2	7,885	8,0784	0,1934
		3	7,885	8,1453	0,2603
rodo_100_01_7785	100 micres	1	7,785	8,009	0,224
		2	7,785	8,0079	0,2229
		3	7,785	8,0922	0,3072
rodo_100_01_7685	100 micres	1	7,685	8,1297	0,4447
		2	7,685	8,1231	0,4381
		3	7,685	8,072	0,387
rodo_50_01_7985	50 micres	1	7,985	8,2867	0,3017
		2	7,985	8,2813	0,2963
		3	7,985	8,3149	0,3299
rodo_50_01_7935	50 micres	1	7,935	8,1812	0,2462
		2	7,935	8,192	0,257
		3	7,935	8,2265	0,2915
rodo_50_01_7885	50 micres	1	7,885	8,1459	0,2609
		2	7,885	8,1012	0,2162
		3	7,885	8,1892	0,3042
rodo_50_01_7835	50 micres	1	7,835	8,3391	0,5041
		2	7,835	8,0323	0,1973
		3	7,835	8,2058	0,3708

Taula 38. Resultats de l'experiment 3 de la geometria 2

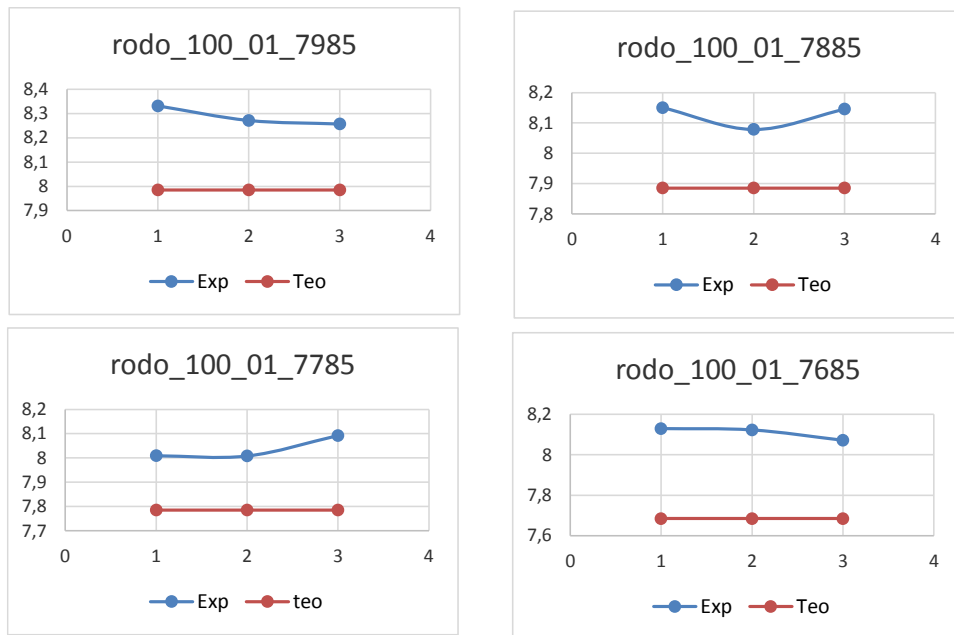


Figura 53. Resultats de l'acoblament de 100 micres de l'experiment 3

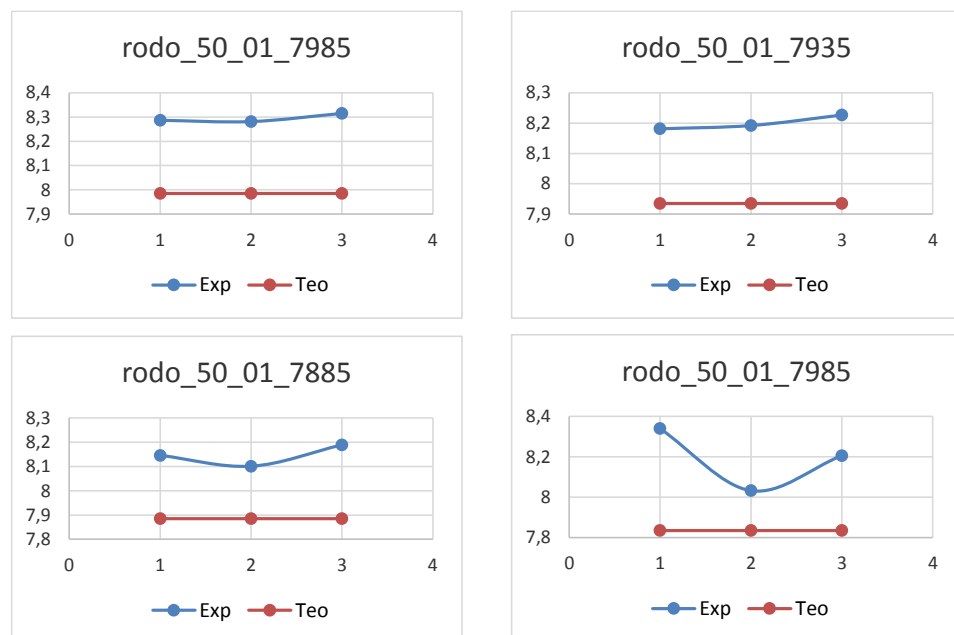


Figura 54. Resultats de l'acoblament de 50 micres de l'experiment 3

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
ID acoplament i forat	1	0,02799	0,02799	2,13	0,149
alçada capa	1	0,02701	0,02701	2,05	0,157
Punt de mesura del diàmetre	2	0,12935	0,06468	4,92	0,010
Error	67	0,88141	0,01316		
Falta de ajust	4	0,05260	0,01315	1,00	0,415
Error puro	63	0,82881	0,01315		
Total	71	1,04743			

Taula 39. Resultats estadístics de l'anàlisi

C3. Geometria 3

Sobre la geometria 3 no hi ha resultats numèrics ja que tal i com s'ha exposat en l'apartat 4.2.3, les impressions realitzades no van tenir un resultat correcte.

C4. Pes

A la Taula 40 es poden veure els resultats del pes de cada tipus de proveta.

Tipus proveta	Combinació	Núm. proveta	Pes
ASTM D638 TYPE I	Verge	1	8,52
	Verge	2	8,47
	Verge	3	8,34
	2	24	8,54
	2	25	8,23
	2	26	7,9
	1	27	8,27
	1	28	8,07
	1	29	8,24
	3	30	7,61
	3	31	7,68
	3	32	7,81
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	36	16,44
	1	37	15,33
	1	38	16,23
	2	39	17,15
	2	40	16,78
	2	41	16,70
	3	42	16,69
	3	43	16,63
	3	44	16,81
ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	1	45	4,05
	1	46	4,18
	1	47	4,11
	3	48	3,79
	3	49	3,92
	3	50	4,01
ISO 14125 CLASS IV	1	51	3,28
	1	52	3,38
	1	53	3,34
	2	54	3,31
	2	55	3,36
	2	56	3,34
	3	57	3,28
	3	58	3,30
	3	59	3,23

Taula 40. Resultats del pes

C5. Gruix

A la Taula 41 es poden veure els resultats de les mesures dels gruixos pels diferents tipus de proveta i les mitjanes dels punts i la mitjana total.

Tipus proveta	Combinació	Núm. proveta	Alçada punt 1	Alçada punt 1	Alçada punt 1	Mitja alçada 1	Alçada punt 2	Alçada punt 2	Alçada punt 2	Mitja alçada 2	Alçada punt 3	Alçada punt 3	Alçada punt 3	Mitja alçada 3	Mitja total
ASTM D638 TYPE I	Verge	1	3,2012	3,2873	3,2267	3,2384	3,1756	3,3058	3,2685	3,2500	3,3003	3,4002	3,3116	3,3374	3,2752
	Verge	2	3,002	3,1395	3,0766	3,0727	3,0709	3,1602	3,1351	3,1221	3,1382	3,2504	3,1872	3,1919	3,1289
	Verge	3	3,1532	3,2115	3,1568	3,1738	3,1613	3,2382	3,1471	3,1822	3,188	3,4682	2,9707	3,2090	3,1883
	2	24	2,9877	3,1897	3,3206	3,1660	3,2115	3,2324	3,3311	3,2583	3,2182	3,1622	3,291	3,2238	3,2160
	2	25	3,1803	3,2989	3,3521	3,2771	2,9963	3,3284	3,4362	3,2536	3,2458	3,4102	3,0784	3,2448	3,2585
	2	26	3,0677	2,9748	3,6812	3,2412	3,5116	2,5507	3,2051	3,0891	3,1735	2,2178	3,0477	2,8130	3,0478
	1	27	3,1921	2,8157	3,0948	3,0342	3,1244	2,8212	3,0646	3,0034	2,9129	2,8881	3,0877	2,9629	3,0002
	1	28	3,0149	2,8308	3,0853	2,9770	2,7591	2,8409	3,0867	2,8956	2,6017	2,9055	3,1219	2,8764	2,9163
	1	29	2,871	3,0061	3,1387	3,0053	3,0286	2,8807	3,1135	3,0076	2,9433	2,9564	3,1364	3,0120	3,0083
	3	30	3,2082	3,287	3,1119	3,2024	3,2152	3,2998	3,063	3,1927	3,28	3,3481	3,1589	3,2623	3,2191
	3	31	3,148	3,266	3,1276	3,1805	3,1178	3,24	3,1191	3,1590	3,1863	3,2515	3,1144	3,1841	3,1745
	3	32	3,2679	3,3237	3,1462	3,2459	3,2158	3,3019	3,1818	3,2332	3,1006	3,2843	3,1666	3,1838	3,2210
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	36	2,626	2,704	2,637	2,6557	2,544	2,715	2,477	2,5787	2,295	2,697	2,809	2,6003	2,6116
	1	37	2,047	2,534	2,647	2,4093	2,141	2,564	2,653	2,4527	2,295	2,614	2,57	2,4930	2,4517
	1	38	2,523	2,541	2,442	2,5020	2,544	2,58	2,54	2,5547	2,554	2,559	2,523	2,5453	2,5340
	2	39	2,621	2,588	2,615	2,6080	2,651	2,632	2,608	2,6303	2,605	2,615	2,608	2,6093	2,6159
	2	40	2,555	2,647	2,589	2,5970	2,614	2,601	2,307	2,5073	2,567	2,569	2,577	2,5710	2,5584
	2	41	2,547	2,525	2,507	2,5263	2,538	2,522	2,515	2,5250	2,524	2,495	2,494	2,5043	2,5186
	3	42	2,539	2,538	2,501	2,5260	2,545	2,519	2,517	2,5270	2,529	2,501	2,495	2,5083	2,5204
	3	43	2,542	2,581	2,544	2,5557	2,371	2,599	2,587	2,5190	2,572	2,638	2,526	2,5787	2,5511
3	44	2,582	2,597	2,528	2,5690	2,706	2,637	2,431	2,5913	2,597	2,614	2,63	2,6137	2,5913	

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	1	45	1,107	1,087	1,097	1,0970	1,089	1,075	1,098	1,0873	1,067	1,047	1,062	1,0587	1,0810
	1	46	1,187	1,139	1,147	1,1577	1,198	1,149	1,137	1,1613	1,179	1,113	1,115	1,1357	1,1516
	1	47	1,137	1,109	1,122	1,1227	1,157	1,152	1,151	1,1533	1,183	1,146	1,153	1,1607	1,1456
	3	48	1,013	0,993	1,006	1,0040	1,014	0,997	1,022	1,0110	1,021	0,979	0,984	0,9947	1,0032
	3	49	1,092	1,066	1,071	1,0763	1,059	1,056	1,086	1,0670	1,05	1,044	1,051	1,0483	1,0639
	3	50	1,091	1,105	1,107	1,1010	1,109	1,107	1,095	1,1037	1,077	1,072	1,067	1,0720	1,0922
ISO 14125 CLASS IV	1	51	2,015	2,021	2,024	2,0200	2,013	2,019	2,041	2,0243	2,002	2,016	2,021	2,0130	2,0191
	1	52	2,129	2,156	2,149	2,1447	2,101	2,129	2,147	2,1257	2,112	2,142	2,158	2,1373	2,1359
	1	53	2,083	2,123	2,075	2,0937	2,094	2,084	2,076	2,0847	2,046	2,064	2,096	2,0687	2,0823
	2	54	2,022	2,021	2,012	2,0183	2,015	2,010	2,004	2,0097	2,021	2,026	2,015	2,0207	2,0162
	2	55	2,076	2,074	2,056	2,0687	2,087	2,075	2,064	2,0753	2,067	2,080	2,061	2,0693	2,0711
	2	56	2,074	2,092	2,034	2,0667	2,081	2,092	2,073	2,0820	2,069	2,077	2,048	2,0647	2,0711
	3	57	2,132	2,153	2,051	2,1120	2,113	2,159	2,121	2,1310	2,116	2,163	2,114	2,1310	2,1247
	3	58	2,073	2,091	2,068	2,0773	2,069	2,065	2,045	2,0597	2,049	2,059	2,026	2,0447	2,0606
	3	59	2,044	2,048	2,039	2,0437	2,028	2,028	2,002	2,0193	2,030	2,000	2,001	2,0103	2,0244

Taula 41. Resultats de gruix

C6. Amplada

A la Taula 42 es poden veure els resultats de les mesures de l'amplada per cada tipus de proveta i la mitjana total.

Tipus proveta	Combinació	Núm. proveta	Amplada punt 1	Amplada punt 2	Amplada punt 3	Mitja amplada
ASTM D638 TYPE I	Verge	1	-	-	-	-
	Verge	2	-	-	-	-
	Verge	3	-	-	-	-
	2	24	13,03	13,07	12,96	13,02
	2	25	13,00	12,98	13,00	12,99
	2	26	13,00	12,93	13,02	12,98
	1	27	13,12	13,12	13,09	13,11
	1	28	13,09	13,03	12,97	13,03
	1	29	13,01	13,04	12,95	13,00
	3	30	12,93	12,85	12,82	12,87
	3	31	12,88	12,87	13,10	12,95
	3	32	12,74	12,78	12,82	12,78
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	36	24,78	25,18	25,16	25,04
	1	37	25,13	25,02	24,97	25,04
	1	38	24,91	24,87	24,88	24,89
	2	39	24,79	24,76	24,74	24,76
	2	40	24,77	24,77	24,68	24,74
	2	41	24,90	24,96	24,85	24,90
	3	42	24,79	24,85	24,80	24,81
	3	43	24,75	24,82	24,83	24,80
	3	44	24,70	24,79	24,69	24,73
ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	1	45	14,77	14,67	14,85	14,76
	1	46	14,71	14,70	14,74	14,72
	1	47	14,54	14,58	14,53	14,55
	3	48	14,74	14,76	14,73	14,74
	3	49	14,49	14,51	14,53	14,51
	3	50	14,67	14,71	14,74	14,71
ISO 14125 CLASS IV	1	51	14,87	14,92	14,89	14,89
	1	52	14,83	15,06	14,89	14,93
	1	53	14,75	14,93	14,99	14,89
	2	54	14,95	14,98	14,94	14,96
	2	55	14,89	14,87	14,84	14,87
	2	56	14,86	14,84	14,85	14,85
	3	57	14,78	14,66	14,75	14,73
	3	58	14,76	14,81	14,83	14,80
	3	59	14,88	14,90	14,88	14,89

Taula 42. Resultats d'amplades

C7. Assaig a tracció

A la Taula 43 es poden veure els resultats dels assajos de tracció. En ells es pot veure el mòdul elàstic, la deformació al trencament i la resistència última per cada tipus de proveta.

Tipus proveta	Combinació	Núm. proveta	Mòdul elàstic (GPa)	ϵ_t (%)	σ_u (MPa)
ASTM D638 TYPE I	Verge	1	-	-	39,076
	Verge	2	1,35	-	40,353
	Verge	3	1,35	-	39,589
	2	24	4,99	1,33	71,134
	2	25	4,36	1,85	68,056
	2	26	4,61	1,75	66,024
	1	27	5,09	1,92	57,439
	1	28	5,38	2,10	63,332
	1	29	5,18	3,59	65,892
	3	30	5,02	1,98	52,536
	3	31	-	1,87	53,140
	3	32	4,8	1,94	55,901
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	36	3,28	1,44	43,654
	1	37	3,03	1,64	49,192
	1	38	3,46	1,46	45,669
	2	39	4,04	1,37	45,696
	2	40	4,6	1,51	50,749
	2	41	3,72	1,61	54,021
	3	42	4,19	1,57	54,832
	3	43	2,94	1,57	50,925
	3	44	3,97	1,12	48,777
ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	1	45	6,46	0,98	75,305
	1	46	6,01	1,04	77,606
	1	47	6,35	0,92	72,535
	3	48	5,5	1,10	95,302
	3	49	7,57	0,85	73,019
	3	50	6,6	0,95	78,055

Taula 43. Resultats de l'assaig de tracció

Les Figura 57, Figura 55 i Figura 58 mostren les gràfiques tensió-deformació dels assajos de tracció, agrupades per cada tipus de proveta.

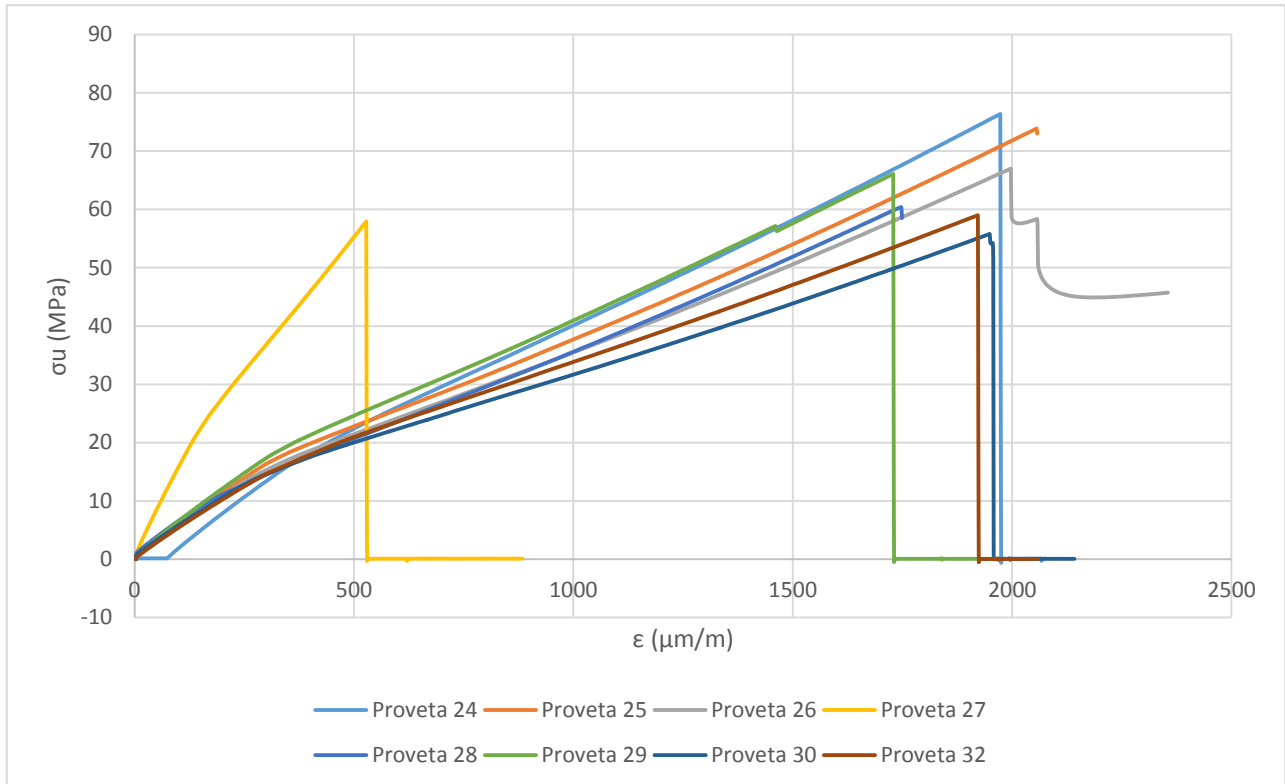


Figura 55. Gràfica de tensió-deformació de les provetes ASTM D638 TYPE I

Tipus proveta	Combinació	Núm. proveta
ASTM D638 TYPE I	2	24
	2	25
	2	26
	1	27
	1	28
	1	29
	3	30
	3	31
	3	32

Taula 44. Relació de la combinació amb n° de proveta ASTM D638 TYPE I

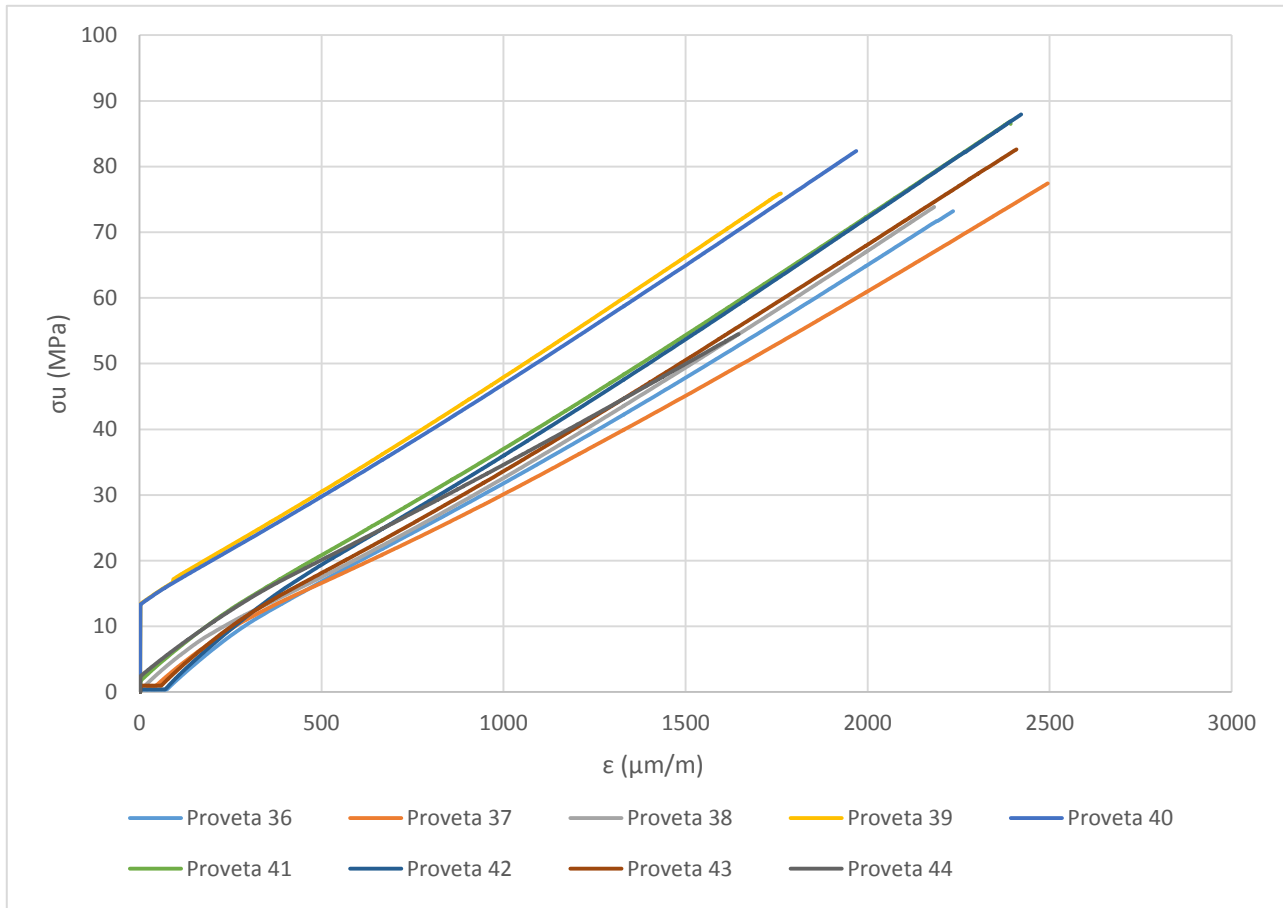


Figura 56. Gràfica tensió-deformació de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC

Tipus proveta	Combinació	Núm. proveta
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	36
	1	37
	1	38
	2	39
	2	40
	2	41
	3	42
	3	43
	3	44

Taula 45. Relació de la combinació amb n° de proveta ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC

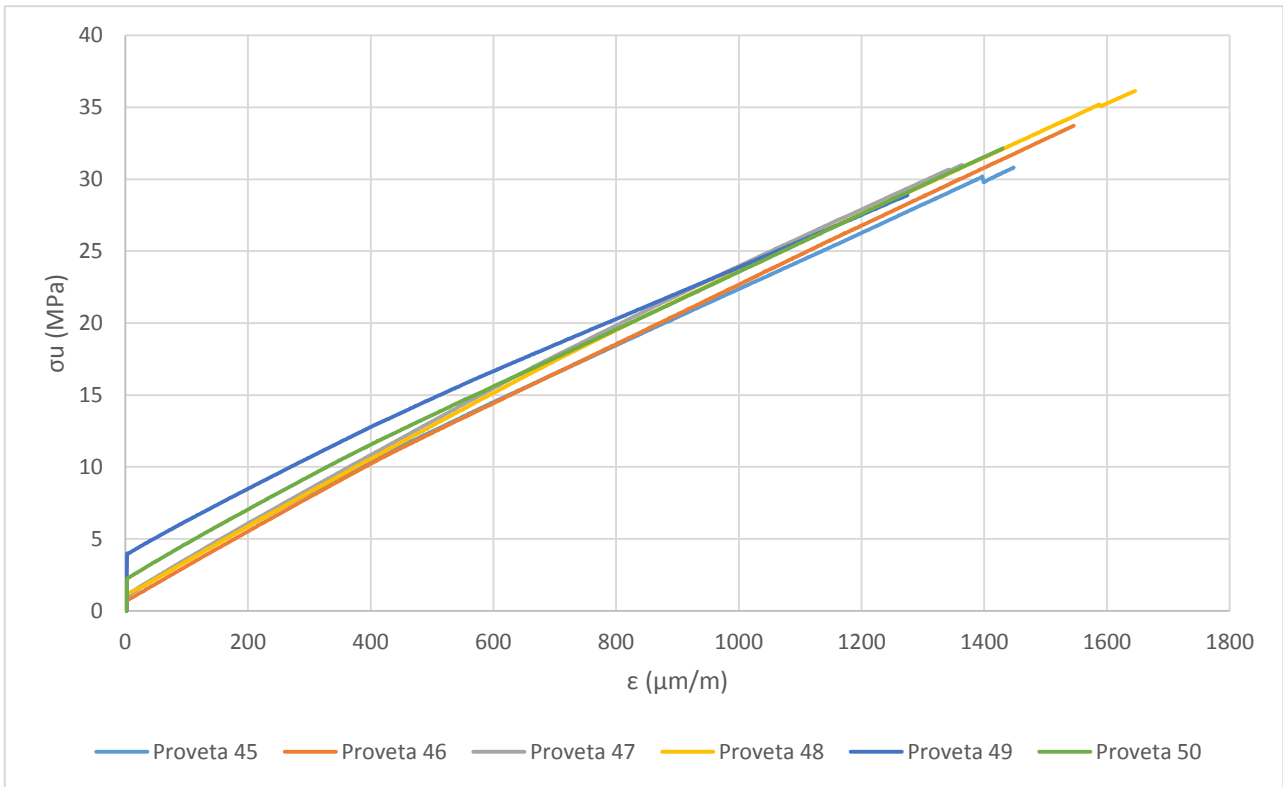


Figura 58. Gràfica tensió-deformació de les provetes ASTM D3039 o° UNIDIRECTIONAL

Tipus proveta	Combinació	Núm. proveta
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	1	36
	1	37
	1	38
	2	39
	2	40
	2	41
	3	42
	3	43
	3	44

Taula 46. Relació de la combinació amb n° de proveta ASTM D3039 o° UNIDIRECTIONAL

C8. Assaig a flexió

A la Taula 47 es poden veure els resultats dels assajos de flexió per cada tipus de combinació. En ells es pot veure la deformació màxima a trencament i la tensió màxima de flexió.

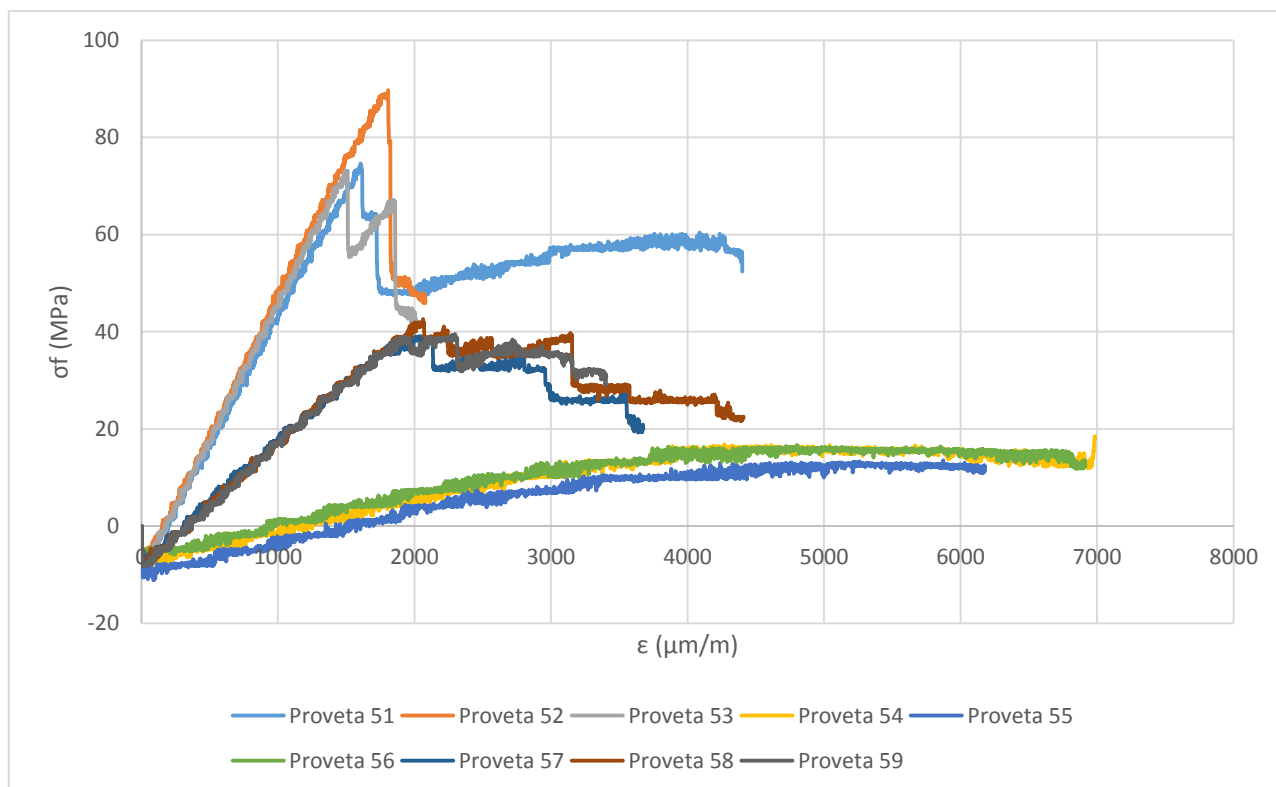


Figura 59. Gràfica de tensió-deformació de les provetes ISO 14125 CLASS IV

Tipus proveta	Combinació	Núm. proveta	ϵ_f (%)	σ_f (MPa)	E (GPa)
ISO 14125 CLASS IV	1	51	3,30	74,64	7,146
	1	52	1,49	89,74	6,403
	1	53	1,51	73,20	3,870
	2	54	5,42	18,50	0,912
	2	55	4,71	13,54	0,594
	2	56	5,29	16,67	0,446
	3	57	2,74	39,10	3,138
	3	58	3,32	42,62	3,159
	3	59	2,58	39,54	3,350

Taula 47. Resultat de l'assaig a flexió

Per calcular la tensió de flexió, el mòdul de flexió i la flexió al trencament s'han utilitzat les fórmules proporcionades en la norma ISO 14125 i són les següents:

- Tensió de flexió

10.1.1 The flexural stress σ_f is given by the following equation:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3)$$

where

- σ_f is the flexural stress, in megapascals (MPa);
- F is the load in newtons (N);
- L is the span, in millimetres (mm);
- h is the thickness of the specimen, in millimetres (mm);
- b is the width of the specimen, in millimetres (mm).

Figura 60. Fórmula de la tensió de flexió

- Mòdul de flexió

10.1.2 For the measurement of the flexural modulus, calculate the deflections s' and s'' , which correspond to the given values of flexural strain $\epsilon_i' = 0,0005$ and $\epsilon_i'' = 0,0025$, by the following equation:

$$s' = \frac{\epsilon_f' L^2}{6h} \text{ and } s'' = \frac{\epsilon_f'' L^2}{6h} \quad (4)$$

where

- s' and s'' are the beam mid-point deflections, in millimetres (mm);
- ϵ_i' and ϵ_i'' are the flexural strains, whose values are given above.

The flexural modulus is calculated from equation 5 or 6:

(i) Using equation 5

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (5)$$

where

- E_f is the flexural modulus of elasticity, expressed in megapascals (MPa);
- Δs is the difference in deflection between s'' and s' ;
- ΔF is the difference in load F'' and load F' at s'' and s' respectively.

Figura 61. Fórmula del mòdul de flexió

- Flexió al trencament

10.1.3 Calculate the strain in the outer surface of the specimen as follows:

$$\epsilon = \frac{6sh}{L^2} \quad (7)$$

Figura 62. Fórmula de la flexió al trencament

Annex D. Trencament de les provetes



Figura 63. Trencament de les provetes ASTM D638 TYPE I combinació 1



Figura 64. Trencament de les provetes ASTM D638 TYPE I combinació 2



Figura 65. Trencament de les provetes ASTM D638 TYPE I combinació 3

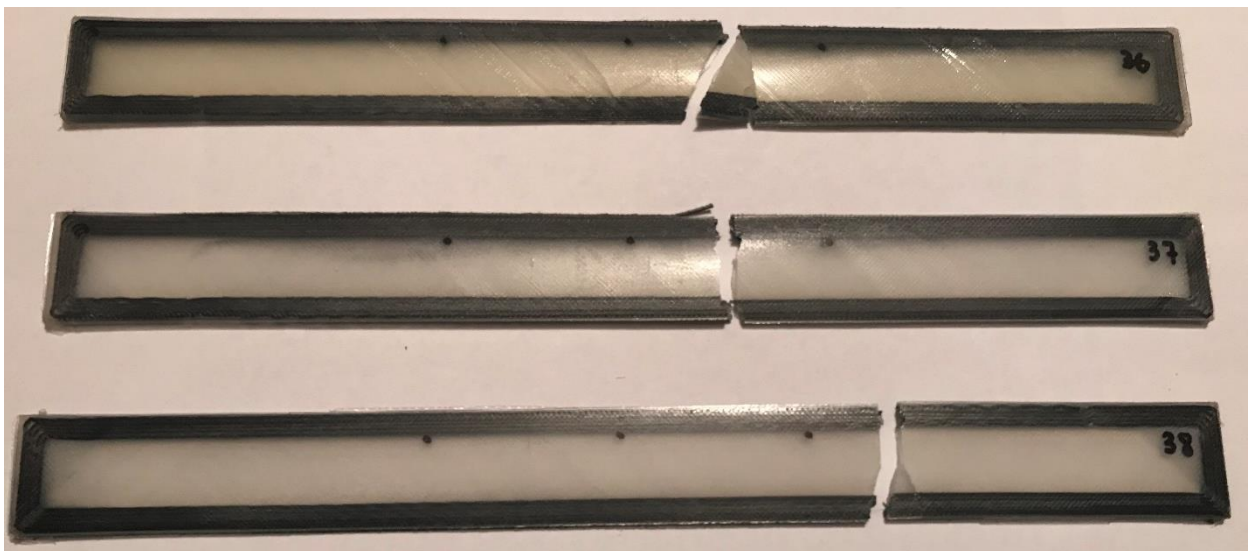


Figura 66. Trencament de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC combinació 1

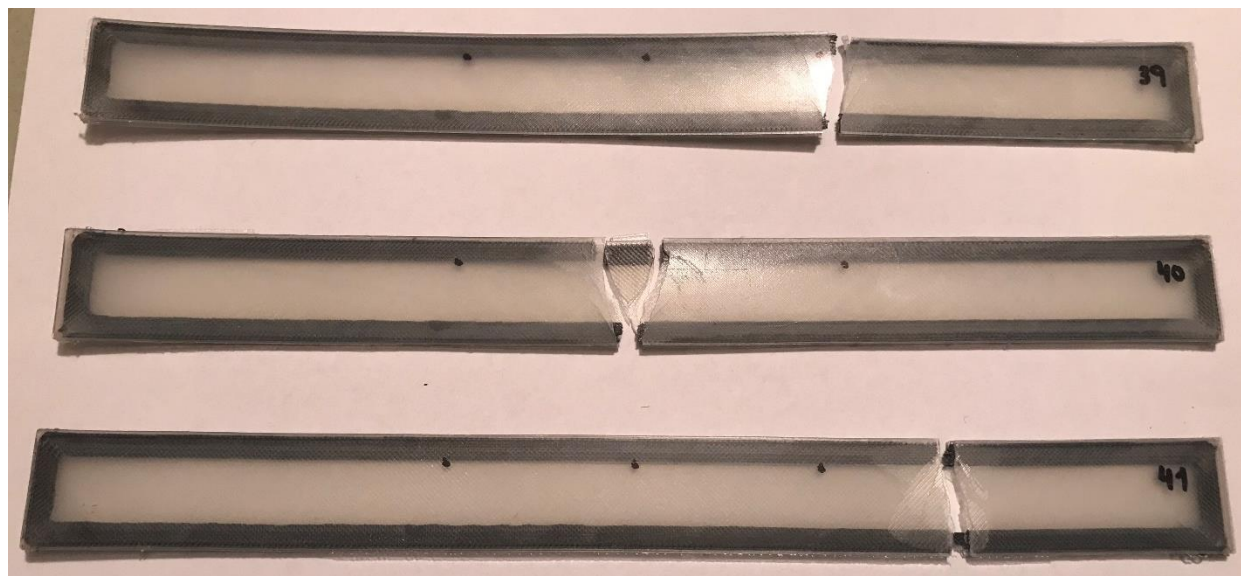


Figura 68. Trencament de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC combinació 2



Figura 69. Trencament de les provetes ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC combinació 3

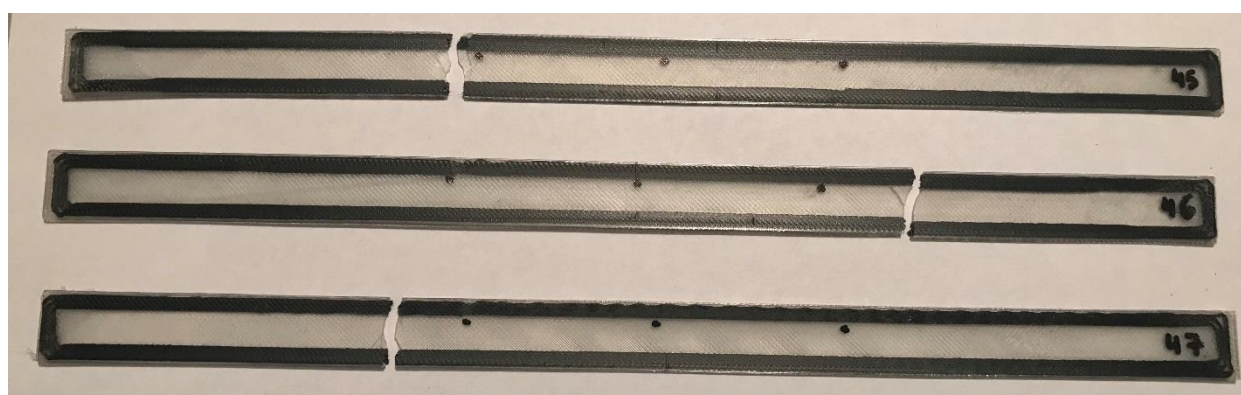


Figura 70. Trencament de les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL combinació 1

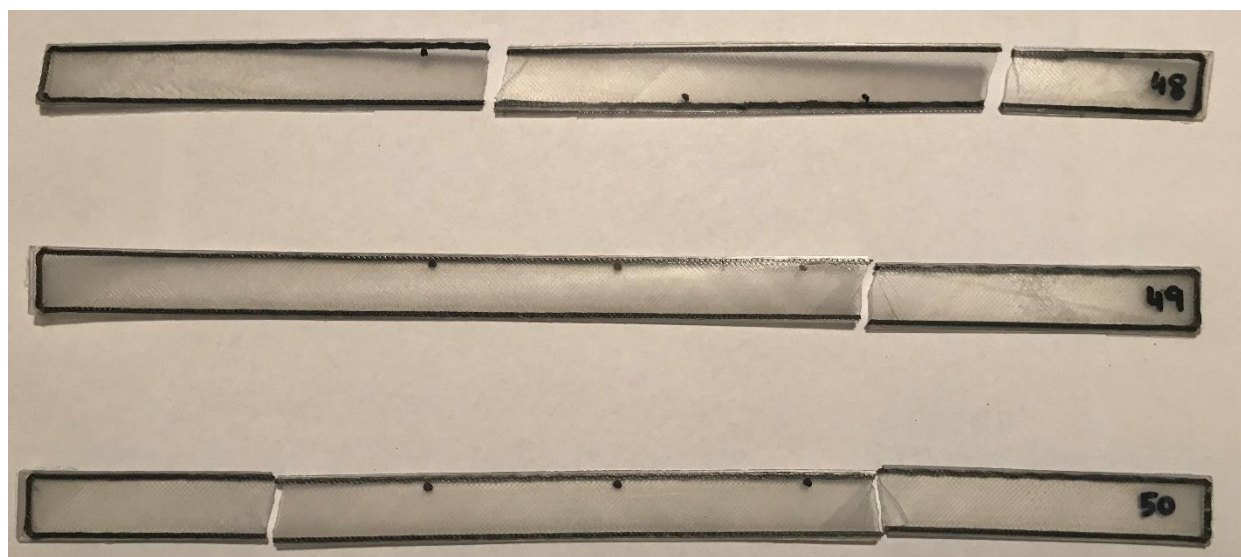


Figura 71. Trencament de les provetes ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL combinació 3

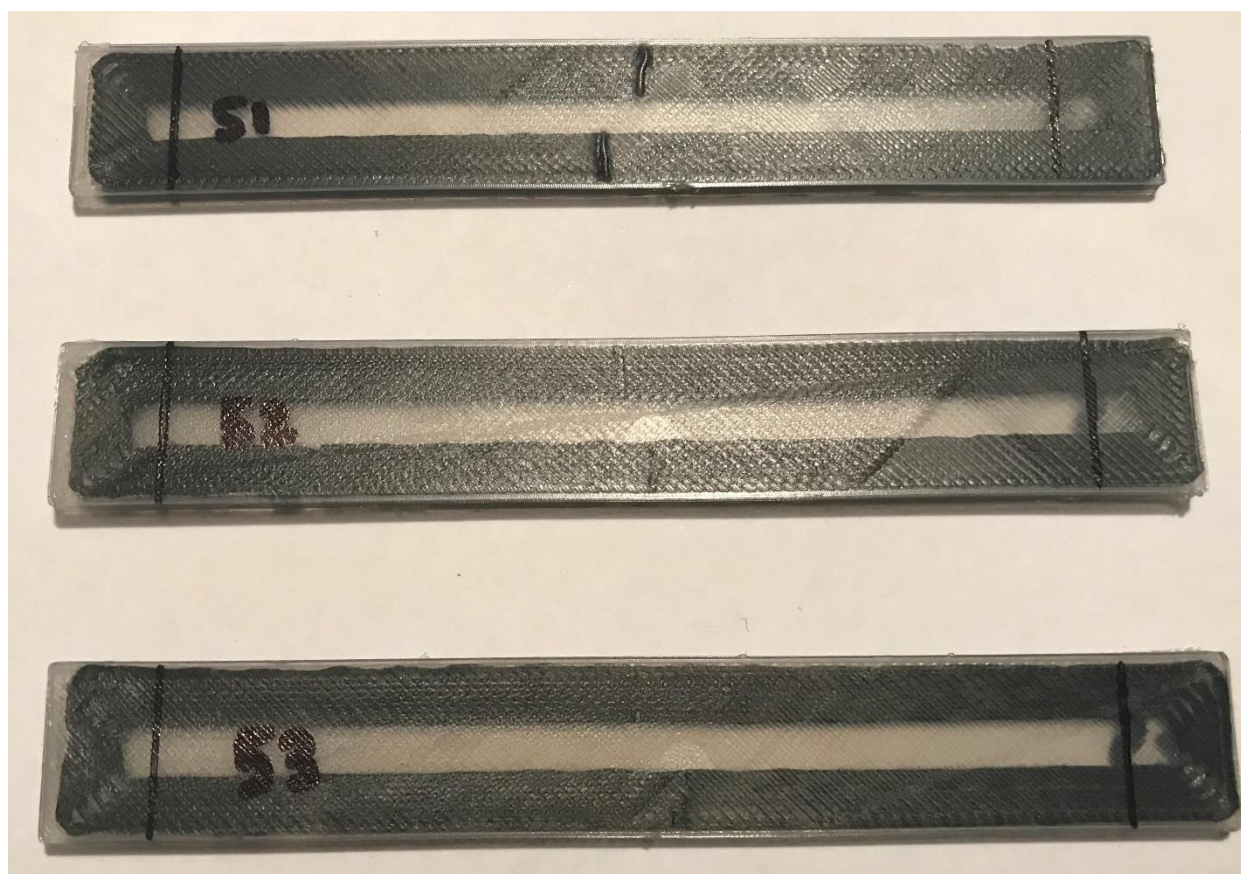


Figura 72. Trencament de les provetes ISO 14125 CLASS IV combinació 1



Figura 73. Trencament de les provetes ISO 14125 CLASS IV combinació 2

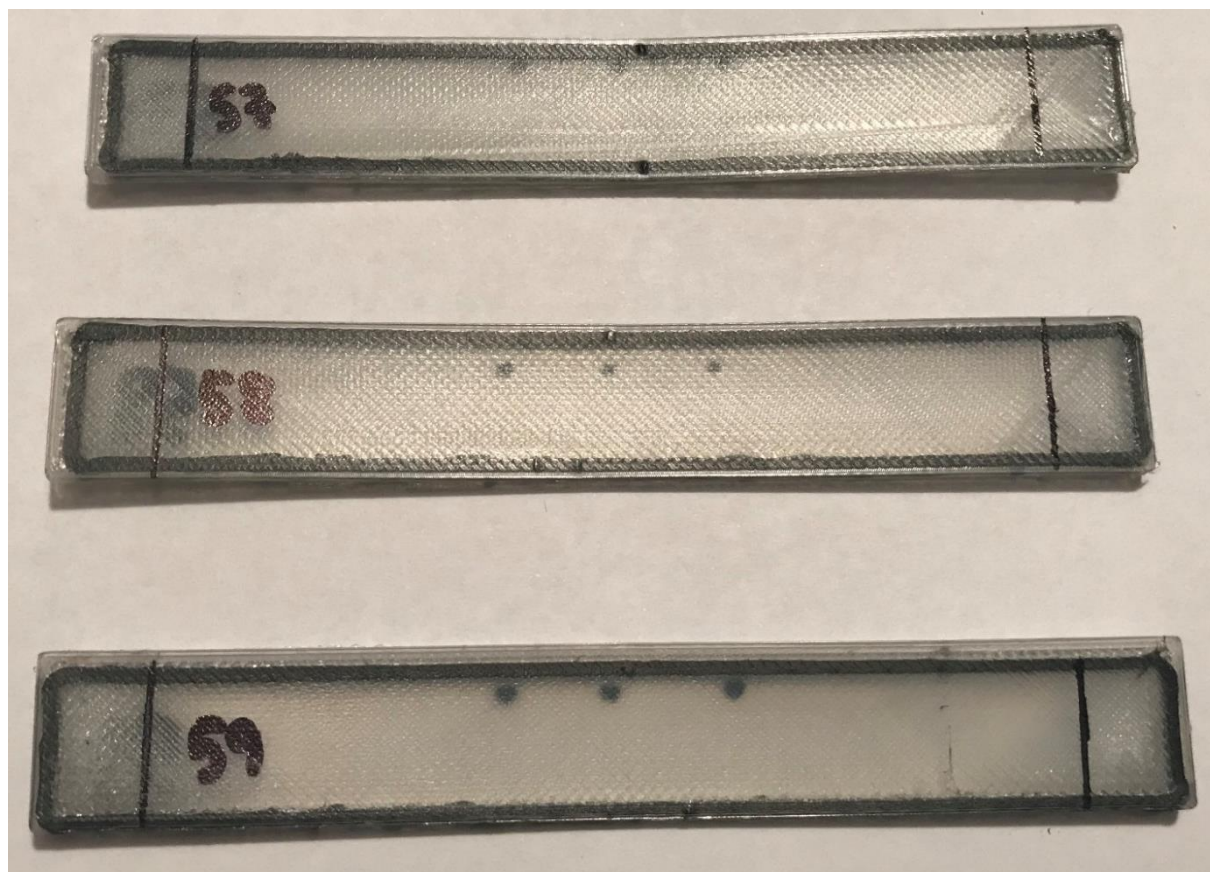


Figura 74. Trencament de les provetes ISO 14125 CLASS IV combinació

Annex E. Pressupost

Mà d'obra	Hores (h)	Preu unitari (€/h)	Preu total (€)
Recopilació d'informació	10,00	8,00	80,00
Experimentació			
Fase 1			
Disseny model 3D geometries	5,00	8,00	40,00
Impressió Markforged	23,00	15,00	345,00
Assecatge	0,00	3,00	0,00
Mesura gruix	1,50	13,00	19,50
Mesura diàmetres	10,00	22,00	220,00
			329,20
Fase 2			
Disseny model 3D geometries	2,00	8,00	16,00
Impressió Markforged	55,50	15,00	832,50
Assecatge	96,00	3,00	288,00
Mesura gruix	3,00	13,00	39,00
Mesura amplada	4,00	13,00	52,00
Pesatge	1,00	13,00	13,00
Assaig a tracció	12,00	25,00	300,00
Assaig a flexió	5,00	25,00	125,00
Anàlisi de resultats	15,00	10,00	150,00
Tractament de dades	30,00	12,00	360,00
Redacció del projecte	90,00	8,00	720,00
TOTAL	363,00		3929,20

Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament

Material	Quantitat PA (cm3)	Quantitat fibra (cm3)	Cost PA (€)	Cost Fibra (€)	Cost total (€)
Fase 1					
Geometria 1	30,00	-	5,16	0,00	5,16
Geometria 2	38,28	-	6,58	0,00	6,58
Geometria 3	17,49	-	3,01	0,00	3,01
Fase 2					
ASTM D638 TYPE I	81,21	3,54	13,97	8,59	22,56
ASTM D3039 BALANCED AND SYMETRIC	161,16	5,37	27,72	13,03	40,75
ASTM D3039 0° UNIDIRECTIONAL	30,54	2,10	5,25	5,10	10,35
ISO 14125 CLASS IV	34,44	2,13	5,92	5,17	11,09
TOTAL	393,12	13,14	67,62	31,89	99,51

TOTAL MATERIAL	99,51 €
TOTAL MÀ D'OBRA	3.929,20 €
DESPESES GENERALS (15%)	604,31 €
TOTAL	4.633,01 €

