

Treball final de màster

Estudi: Màster en Enginyeria Industrial

Títol: Optimització del procés de fabricació de materials bicomponents mitjançant la tecnologia FDM.

Document: 1. Memòria i Annexos

Alumne: Marc Martínez i Vecino

Tutor: Dra. Helena Oliver-Ortega / Dr. José Alberto Méndez

Departament: EQATA

Àrea: Enginyeria química - EPS

Convocatòria (mes/any): Setembre 2022

AGRAIMENTS

M'agradaria començar agraint a totes les persones que han contribuït a la realització d'aquest treball final de màster.

Primerament, m'agradaria agrair al departament EQATA de la Universitat de Girona compostat per la Dra. Helena Oliver i el Dr. José Alberto Méndez per l'oportunitat de poder realitzar el treball final de màster. A més a més, em sento grat pels ensenyaments continus, consells i la disposició donada. Al professor Xavier Espinach per la seva ajuda en la fase de posta en marxa de la impressora 3D i de la simulació realitzada durant el treball. Finalment, donar gràcies a totes aquestes persones que m'han donat suport emocional família, parella i amics.

INDEX

1. INTRODUCCIÓ.....	1
1.1 FABRICACIÓ ADDITIVA.....	1
1.1.1 TÈCNiques D'IMPRESSIÓ 3D MÉS UTILITZADES EN L'ACTUALITAT	2
1.1.1.1 Bases líquides.....	3
1.1.1.2 Bases en pols	8
1.1.1.3 Bases sòlides.....	12
1.2 MATERIALS POLIMÈRICS EXISTENTS PER IMPRESSORES 3D AMB TECNOLOGIA FDM.	14
1.2.1 ABS.....	14
1.2.2 PET.....	15
1.2.3 PLA.....	17
1.2.4 Nylon.....	20
2. ANTECEDENTS, OBJECTIUS I ABAST	22
2.1 ANTECEDENTS	22
2.1.1 <i>Tecnologia FDM amb extrusió pèl·lets, filaments i dual.</i>	23
2.2 OBJECTIU	25
2.3 ABAST	25
3. MATERIALS I MÈTODES	26
3.1 MATERIALS.....	26
3.1.1 <i>Fabricació de filament de PLA</i>	27
3.2 METODOLOGIA DE PREPARACIÓ	29
3.2.1 <i>Producció d'un arxiu 3D</i>	29
3.2.2 <i>Creació i manipulació d'arxius STL</i>	30
3.2.2.1 Simplify3D.....	31
3.2.3 <i>Impressió</i>	36
3.2.4 <i>Eliminació de les impressions</i>	37
3.2.5 <i>Post processament</i>	37
3.3 CARACTERITZACIÓ DELS MATERIALS COMPOSTOS.....	37
3.3.1 <i>Densitat dels materials</i>	37
3.3.2 <i>Assaig a tracció</i>	38
3.3.3 <i>Assaig a flexió</i>	42
3.3.3.1 <i>Simulació amb SolidWorks</i>	43
3.3.4 <i>Assaig d'impacte</i>	44
3.3.5 <i>Calorimetria diferencial de rastreig (DSC)</i>	45
3.3.6 <i>Difracció de raig X</i>	46
3.3.7 <i>Microscòpia òptica</i>	47

4	RESULTATS I DISCUSSIONS	49
4.1	ESTUDI DE LA CARACTERITZACIÓ DELS MATERIALS COMPOSTOS	50
4.1.1	<i>Densitats dels materials</i>	50
4.1.2	<i>Assaig a tracció</i>	51
4.1.3	<i>Assaig a flexió</i>	55
4.1.3.1	<i>Simulació amb SolidWorks®</i>	62
4.1.4	<i>Assaig d'impacte</i>	66
4.1.5	<i>Assaig de Calorimetria diferencial de rastreig (DSC)</i>	68
4.1.6	<i>Difracció de raig X (XRD)</i>	71
4.1.7	<i>Microscòpia òptic</i>	73
5.	RESUM DEL PRESSUPOST	81
6.	CONCLUSIÓ.....	82
7.	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	85
8.	REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES	86
9.	GLOSARI	89
	ANNEX A: PRESSUPOST.....	91
	ANNEX B: FITXA TÈCNICA DEL PLA	94

ÍNDIX DE FIGURES

FIGURA 1 HISTÒRIA DELS PROCESSOS ADDITIVS (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	2
FIGURA 2 TIPOLOGIA DE FABRICACIÓ AM (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	3
FIGURA 3 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS IP. (FONT: MURALIDHARA & BANERJEE, N.D.)	4
FIGURA 4 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS (SLA) (FONT: MURALIDHARA & BANERJEE, N.D.)	5
FIGURA 5 APLICACIÓ SLA PER PROTOTIPS DE MANDÍBULA (FONT: GIBSON ET AL., 2021).	5
FIGURA 6 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS DIGITAL LIGHT PROCESSING (DLP) (FONT: MURALIDHARA & BANERJEE, N.D.).	6
FIGURA 7 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS MULTI-JET MODELING (MJM) (FONT: BEN REDWOOD, FILEMON SCHÖFFER, BRIAN GARRET - THE 3D PRINTING HANDBOOK_ TECHNOLOGIES, DESIGN AND APPLICATIONS-3D HUBS (2017), N.D.).....	7
FIGURA 8 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS DEL MJM (FONT: BEN REDWOOD, FILEMON SCHÖFFER, BRIAN GARRET - THE 3D PRINTING HANDBOOK_ TECHNOLOGIES, DESIGN AND APPLICATIONS-3D HUBS (2017), N.D.).....	7
FIGURA 9 APLICACIÓ EN LA PRODUCCIÓ MJM PER LA PRODUCCIÓ ESQUELETS PER A UN MANIQUÍ D'ENTRENAMENT NEONATAL.(FONT: GIBSON ET AL., 2021)	8
FIGURA 10 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS SLS. (FONT: UNIVERSITAT DE GIRONA, N.D.)	9
FIGURA 11 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS EBM.(FONT: MURALIDHARA & BANERJEE, N.D.).....	10
FIGURA 12 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS BI. (FONT: BEN REDWOOD, FILEMON SCHÖFFER, BRIAN GARRET - THE 3D PRINTING HANDBOOK_ TECHNOLOGIES, DESIGN AND APPLICATIONS-3D HUBS (2017), N.D.).....	11
FIGURA 13 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS LOM.(FONT: UNIVERSITAT DE GIRONA, N.D.)	12
FIGURA 14 ESQUEMA REPRESENTATIU DEL PROCÉS FDM. (GIBSON ET AL., 2021)	13
FIGURA 15 COMPOSICIÓ DEL ABS. (FONT: HTTP://WWW.UB.EDU/CMEMATERIALS/ES/CONTENT/ACRILONITRILLO-BUTADIENO-ESTIRENO-ABS),.....	15
FIGURA 16 ESTRUCTURA QUÍMICA DEL TEREFTALAT DE POLIETILÈ. (FONT: HTTPS://WWW.ARAPACK.COM/FAQ/QUE-ES-EL-PET/)	16
FIGURA 17 ESTRUCTURA QUÍMICA DE L'ÀCID POLILÀCTIC (FONT: SERNA C. ET AL., 2011)	17
FIGURA 18 COMPOSICIÓ QUÍMICA DEL NILÓ. (FONT: HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/NAILON)	20
FIGURA 19 MODEL D'UNA PEÇA DE JOC DE TAULA. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA)	26
FIGURA 20 EXTRUSORA DE FILAMENT NEXT 1.0 – ADVANCED. (FONT: HTTPS://WWW.3DEVO.COM/FILAMENT-MAKERS).....	27
FIGURA 21 PUNTS DE TEMPERATURA EN LA EXTRUSORA DE FILAMENT. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	27
FIGURA 22 PROCÉS DE L'EXTRUSORA DE FILAMENT. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	28
FIGURA 23 ESPÈCIMEN TIPUS IV ASTM D638 (FONT: ASTM INTERNATIONAL, 2002)	29
FIGURA 24 ESPÈCIMEN ASTM D790 (FONT: STANDARD TEST METHODS FOR FLEXURAL PROPERTIES OF UNREINFORCED AND REINFORCED PLASTICS AND ELECTRICAL INSULATING MATERIALS, 2002)	30
FIGURA 25 INTERFÍCIE DEL PROGRAMA DE TALL SIMPLIFY3D (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	31
FIGURA 26 CONFIGURACIÓ DE LA PANTALLA DE PROCÉS. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	32
FIGURA 27 PESTANYA SUPORT (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	34
FIGURA 28 IMPRESSORA 3D MODEL NX PRO DUAL (FONT: MANUAL NX PRO DUAL, N.D.)	36
FIGURA 29 MÀQUINA UNIVERSAL D'ASSAJOS MECÀNICS. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	39
FIGURA 30 LA FORMA DE LA PROVETA AL INICI, AL MOMENT D'ARRIBAR A LA CÀRREGA MÀXIMA I DESPRÉS DE LA RUPTURA. (FONT: HTTPS://WWW.AREATECNOLOGIA.COM/MATERIALES/ENSAYO-DE-TRACCION.HTML)	40

FIGURA 31 DIAGRAMA DE RUPTURA PER TRACCIÓ. (FONT: HTTPS://WWW.AREATECNOLOGIA.COM/MATERIALES/ENSAYO-DE-TRACCION.HTML).....	41
FIGURA 32 ASSAIG A FLEXIÓ. (FONT: HTTPS://WWW.PICUINO.COM/ES/ESTRUCTURAS-ESFUERZOS.HTML)	42
FIGURA 33 MODELITZACIÓ DEL MATERIAL BICOMPONENT. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	44
FIGURA 34 MARTELL MODEL RESIL 5,5 CEAST (PIANEZZA, ITÀLIA). (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	44
FIGURA 35 DSC. (FONT: HTTPS://MATERIALS.WATERS.COM/ES/CALORIMETROS-DE-ESCA NEO-DIFERENCIAL/).....	45
FIGURA 36 DIFRACTÒMETRE DE RAIG X BRUKER D8 QUEST ECO. (FONT: HTTPS://WWW.UDG.EDU/CA/STR/APARELLS-TECNiques-DISPONIBLES/ANALISI-QUIMICA-I-ESTRUCTURAL/DIFRACCIO-DE-RAIGS-X-DE-MONOCRISTALL-XRD)	47
FIGURA 37 MICROSCOPI ÒPTIC DIGITAL USB (40-1000X). (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA)	47
FIGURA 38 RESISTÈNCIA A LA TRACCIÓ σ_T SEGONS L'ORIENTACIÓ D'IMPRESSIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	53
FIGURA 39 MÒDUL DE YOUNG SEGONS L'ORIENTACIÓ D'IMPRESSIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	54
FIGURA 40 DEFORMACIÓ MÀXIMA EN % SEGONS L'ORIENTACIÓ D'IMPRESSIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	55
FIGURA 41 RESISTÈNCIA A LA FLEXIÓ (σ_F) SEGONS L'ORIENTACIÓ D'IMPRESSIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	56
FIGURA 42 MÒDUL ELÀSTIC SEGONS L'ORIENTACIÓ D'IMPRESSIÓ PER ASSAJOS A FLEXIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	59
FIGURA 43 DEFORMACIÓ MÀXIMA EN % SEGONS L'ORIENTACIÓ D'IMPRESSIÓ PER ASSAJOS A FLEXIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	60
FIGURA 44 ESPÈCIMEN A FLEXIÓ BICOMPONENT. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	60
FIGURA 45 TENSIONS DE VON MISES DE LA PROVETA BICOMPONENT PLA (0-BAB). (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	63
FIGURA 46 TENSIONS DE VON MISES DE LA PROVETA BICOMPONENT PLA (0-BAD). (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	63
FIGURA 47 LÍNIA NEUTRE EN EL PLA(0-BAB) EN L'ASSAIG A FLEXIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	64
FIGURA 48 LÍNIA NEUTRE EN EL PLA (0-BAD) EN L'ASSAIG A FLEXIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	65
FIGURA 49 ENERGIA FRACTURA EN KJ/M ² SEGONS L'ORIENTACIÓ D'IMPRESSIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	68
FIGURA 50 TERMOGRAMES DE LA SEGONA FUSIÓ AL DSC DEL PLA I ELS ESPÈCIMENS. (ELABORACIÓ PRÒPIA).....	69
FIGURA 51 TERMOGRAMES DE LA PRIMERA FUSIÓ AL DSC DEL PLA FABRICAT AMB EXTRUSORA DE FILAMENT I DE PÈL·LET ON AMB DUES TENEN UNA ORIENTACIÓ DE 0°. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	70
FIGURA 52 DIFRACCIÓ DE RAIG X PER MOSTRES FABRICADES MITJANÇANT FILAMENT ENVERS PÈL·LET. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	72
FIGURA 53 ESTRUCTURA PROVETA A FLEXIÓ FABRICADA MITJANÇANT FILAMENT AMB UNA ORIENTACIÓ 0/90°. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	73
FIGURA 54 ESTRUCTURA PROVETA A FLEXIÓ FABRICADA MITJANÇANT EXTRUSIÓ DE PÈL·LET AMB UNA ORIENTACIÓ 0/90°. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	74
FIGURA 55 ESTRUCTURA PROVETA A FLEXIÓ FABRICADA MITJANÇANT FILAMENT AMB UNA ORIENTACIÓ 90°. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	75
FIGURA 56 UNIÓ DEL CONTORN AMB L'ESTRUCTURA PROVETA A FLEXIÓ FABRICADA MITJANÇANT FILAMENT AMB UNA ORIENTACIÓ 90°. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	76
FIGURA 57 ESTRUCTURA PROVETA A FLEXIÓ FABRICADA MITJANÇANT EXTRUSIÓ DE PÈL·LET AMB UNA ORIENTACIÓ 90°. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	77
FIGURA 58 ESTRUCTURA PROVETA A FLEXIÓ FABRICADA MITJANÇANT FILAMENT AMB UNA ORIENTACIÓ 0°. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	78

FIGURA 59 ESTRUCTURA PROVETA A FLEXIÓ FABRICADA MITJANÇANT EXTRUSIÓ DE PÈL·LET AMB UNA ORIENTACIÓ 0°. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	79
FIGURA 60 ESTRUCTURA PROVETA A FLEXIÓ FABRICADA MITJANÇANT FILAMENT AMB UNA ORIENTACIÓ 0° I FILTRE DE 0,4MM. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	80
FIGURA 61 RESUM DEL PRESSUPOST. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).	81

ÍNDEX DE TAULES

TAULA 1 PROPIETATS DEL PLA. (FONT: SERNA C. ET AL., 2011).....	18
TAULA 2 PROPIETATS DE POLÍMERS UTILITZATS PER IMPRESSIÓ 3D. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	18
TAULA 3 PARÀMETRES EXTRUSORA DE FILAMENT.(FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	28
TAULA 4 LIMITACIONS DE CONSTRUCCIÓ DE LA IMPRESSORA. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	37
TAULA 5 PERCENTATGE DE FARCIMENT SEGONS EL MITJÀ D'IMPRESSIÓ 3D. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	50
TAULA 6 RESULTATS DE L'ASSAIG A TRACCIÓ (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	51
TAULA 7 RESULTATS DE L'ASSAIG A FLEXIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	55
TAULA 8 RENDIMENT DE LES DIFERENTS FORMULACIONS AMB RELACIÓ A L'ESFORÇ A FLEXIÓ I L'ÀREA DE TRENCAMENT SOTMESA A L'ASSAIG A FLEXIÓ. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	57
TAULA 9 RESULTATS DE L'ASSAIG A FLEXIÓ AMB MATERIALS BICOMPONENTS. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	61
TAULA 10 TENSIONS MÀXIMES I MÍNIMES RESPECTE LA CONFIGURACIÓ DEL MATERIAL BICOMPONENT. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	64
TAULA 11 RESULTATS DE L'ASSAIG A IMPACTE. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	66
TAULA 12 ASSAIG DE CALORIMETRIA DIFERENCIAL D'ESCOMBRAT (DSC) DELS MATERIALS SEGONS L'EXTRUSOR PEL QUAL HAN SIGUT FABRICATS. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	69
TAULA 13 RESUM DEL PRESSUPOST. (FONT: ELABORACIÓ PRÒPIA).....	81

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Fabricació additiva

La competició en el mercat mundial en productes i serveis manufacturats s'ha intensificat exponencialment en els últims anys. Actualment s'ha convertit en un tema important a l'hora de llençar nous productes al mercat el més ràpid possible i aconseguir avantatge envers els competidors. Per introduir productes al mercat ràpidament, molt dels processos involucrats en el disseny, test, fabricació, mercat i distribució del producte han estat comprimits en termes de temps i fonts de materials. Per tal de tenir un ús eficient d'aquests recursos es requereixen d'eines més eficients i d'enfocaments alternatius com facilita la fabricació additiva.

Per millor entendre cal fer esment que la majoria de les tècniques de fabricació poden classificar-se en tres tipologies:

- Fabricació formativa: aquesta es denomina quan s'ocupa un motlle per donar forma a una peça. Generalment el material que s'introdueix al motlle serà sotmès a pressions i temperatures altes amb la finalitat de donar forma a aquesta. Cal fer esment que aquesta tècnica de fabricació és la més adequada per a la producció de grans volums d'una mateixa peça, que requereix una gran inversió inicial en utilatge d'eines (motlles), però que permet produir peces ràpidament i a un preu unitari molt baix.
- Fabricació substractiva: se situa entre la formativa i l'additiva, sent la més adequada per a peces amb geometries relativament senzilles, produïdes en volums baixos o mitjans, que solen de materials funcionals (sobretot metàl·lics).
- Fabricació additiva: és la més adequada per a dissenys complexos de baix volum els quals els mètodes formatius o substractives no poden. La fabricació additiva o *Additive Manufacturing* (AM) segons l'*American Society for Testing and Materials* (ASTM) es defineix com a procés d'unió de materials per fer objectes a partir del modelatge en tres dimensions, normalment per capes, en front les metodologies de fabricació substractiva.

Com es pot observar a la Figura 1 els processos additius es defineixen com a tres diferents segons el seu principi d'aplicació.

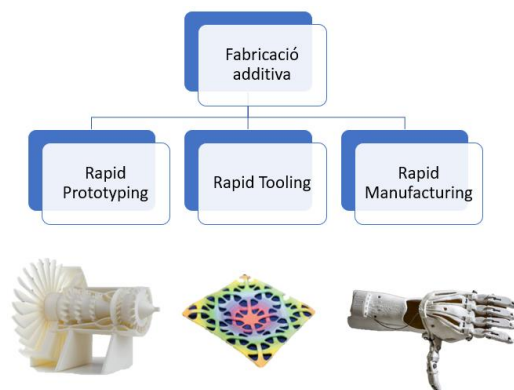


Figura 1 Història dels processos additius (Font: Elaboració pròpia).

1. Prototip ràpid (RP): fa referència a un sòlid fabricat de manera lliure, fabricació d'escriptori o tecnologia constructiva per capes, el qual s'utilitza com un prototip, no com a producte final.
2. Fabricació ràpida d'eines (RP) i (RT): tecnologia que transforma ràpidament els models de disseny assistit per ordinador en models físics, dels que s'utilitzarà com una eina o com un utillatge (motlles i matrius).
3. Fabricació ràpida (MR): segons l' "Asociación española de Rapid Manufacturing (ASERM)" es defineix com a conjunt de tècniques, tecnologies i mètodes que permeten la fabricació ràpida, flexible i competitiva de peces, prototips, motllos, matrius, o productes finals directament a partir de la informació digital.

Cal remarcar que la fabricació additiva és el terme formal utilitzat per descriure "rapid prototyping" i el que és popularment coneguda com a impressió 3D. Aquesta és una família de processos que genera objectes per capes que corresponen a seccions transversals successives d'un model CAD.

A continuació s'expliquen diverses tècniques d'impressió 3D classificades segons la matèria primera que s'utilitza com a font d'alimentació.

1.1.1 Tècniques d'impressió 3D més utilitzades en l'actualitat

Les diferents tecnologies de fabricació es poden dividir segons la manera en què s'empra el material base. Es divideixen en 3 tipus: base líquida, base en pols i base de làmines o sòlida.

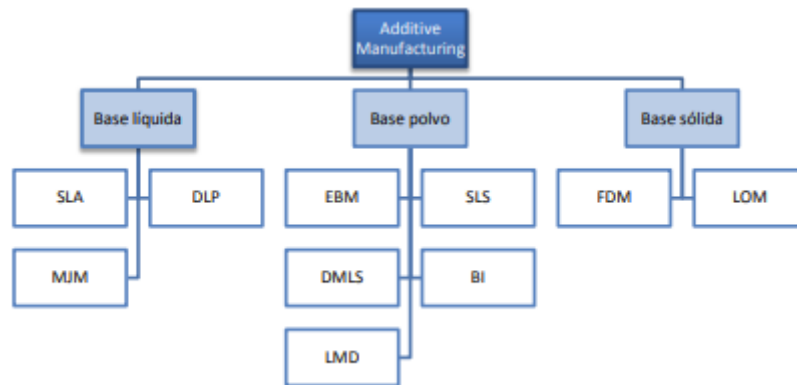


Figura 2 Tipologia de fabricació AM (Font: Elaboració pròpia).

1.1.1.1 Bases líquides

En aquests processos, la peça es forma mitjançant la solidificació del material en crear cada capa. El material base que utilitzen aquests mètodes són fotopolímers com per exemple una resina líquida. Un fotopolímer és una macromolècula que pateix un canvi en les seves propietats (polimerització, reticulació o despolimerització) per acció de la llum, generalment ultraviolada, formant una diferenciació física entre les parts exposades i no exposades.

A continuació es resumeix el funcionament de les següents tecnologies existents desenvolupades.

Inkjet Printing (IP)

La impressió per raig de tinta és una tècnica de deposició de materials en fase líquida. Aquests materials consisteixen en un solut dissolt o dispers en un dissolvent líquid. Cal remarcar que aquesta tècnica és reprogràfica, sense contacte humà, que pren dades digitals d'un ordinador que representen una imatge o un caràcter i els reproduïx en un substrat utilitzant gotes de tinta (Mohebi & Evans, 2002). El procés consisteix essencialment en l'expulsió d'una quantitat fixa de tinta en una cambra, a partir d'un filtre, mitjançant una reducció sobtada, gairebé adiabàtica, del volum de la cambra per acció piezoelèctrica. Una cambra plena de líquid es contrau en resposta a l'aplicació d'una tensió externa. Aquesta reducció sobtada provoca una ona de xoc en el líquid, la qual cosa fa que una gota del líquid sigui expulsada del filtre. La gota expulsada cau sota l'acció de la gravetat i la resistència de l'aire fins que impacta en el substrat, es propaga sota l'impuls adquirit en el moviment, i la tensió superficial ajuda a fluir al llarg de la superfície. Finalment, la gota s'asseca a través de l'evaporació del dissolvent.

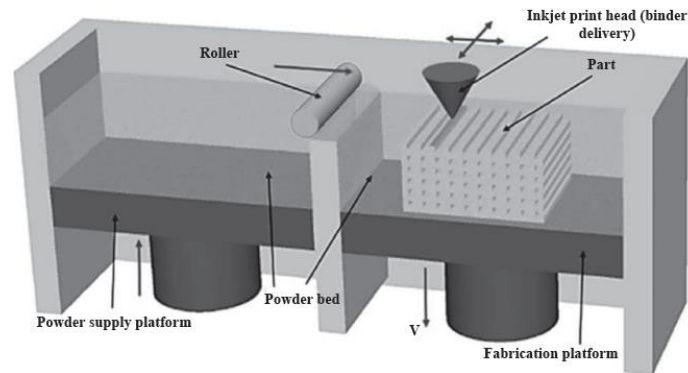


Figura 3 Esquema representatiu del procés IP. (Font: Muralidhara & Banerjee, n.d.)

Les impressores de sobretaula disponibles en el mercat es van modificar per a fer diverses tasques per anar més enllà de la seva coneguda aplicació en el processament de textos com a eina ofimàtica. La tecnologia de injecció de tinta s'ha emprat àmpliament en les indústries de l'electrònica i la microenginyeria per a imprimir materials electrònics (Siringhaus et al., 2000). Amb aquest mètode de fabricació de baix cost, s'han generat complexos circuits integrats com ara els transistors de pel·lícula fina de polímer (J. Z. Wang et al., 2004). La tecnologia de la tinta ha sigut adaptada amb èxit des de finals dels anys 90 fins avui dia (Collier et al., 1996; Hughes et al., 2001). Un clar exemple són les aplicacions en medicina i en enginyeria biomèdica com per exemple la detecció de fàrmacs, la genòmica i els biosensors.

Estereolitografia (SLA)

L'estereolitografia (SLA) és un procés de fabricació per addició que emprà una resina fotopolimèrica, que es cura i solidifica mitjançant llum ultraviolada en el tanc d'impressió, i un làser ultraviolat per a construir els objectes. Aquests són obtinguts mitjançant l'addició de capes fines, impreses una sobre l'altra. Cada capa és una secció transversal de l'objecte que el làser traça en la superfície de la resina, que és el material consumible. La resina líquida cura i es solidifica mitjançant l'exposició al làser de llum ultraviolada, quedant així la capa recentment solidificada enganxada a la capa existent prèviament. El làser no s'aplica directament sobre la resina sense curar, sinó que mitjançant un joc de miralls, coneguts com a galvanòmetres, el llamp és dirigit cap a la part de l'objecte que s'ha de curar per a així crear la figura desitjada. Cal fer esment que la majoria de les màquines SLA utilitzen un làser d'estat sòlid per a curar les peces.

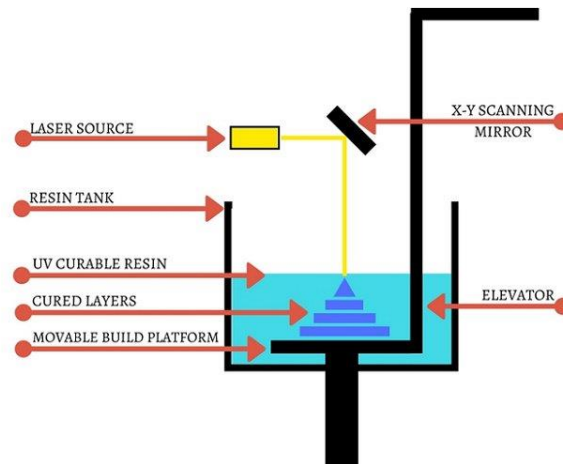


Figura 4 Esquema representatiu del procés (SLA) (Font: Muralidhara & Banerjee, n.d.)

Aquesta tècnica de prototipat i fabricació ràpida, considerada la més antiga de totes, és capaç de produir peces de gran precisió i resistents, a partir de materials com la poliamida així com la capacitat de producció de volums baixos i mitjans. Aquesta flexibilitat envers la producció fa que la tecnologia s'utilitzi per a aplicacions funcionals i d'ús final. Com es mostra a la Figura 5 un clar exemple d'aplicació, d'aquesta metodologia, seria en la indústria mèdica.



Figura 5 Aplicació SLA per prototips de mandíbula (Font: Gibson et al., 2021).

Digital Light Processing (DLP)

El procés d'impressió 3D DLP que es mostra a la Figura 6 es refereix a un mètode d'impressió que utilitza una pantalla de projector digital, que projecta una única imatge de cada capa en tota la plataforma alhora (Mu et al., 2017). No obstant, el DLP segueix un mètode gairebé idèntic de producció de peces comparat amb el de SLA on la principal diferència és la font de llum utilitzada. El DLP utilitza fonts de llum tradicionals com els

llums d'arc en lloc dels làsers. Quan es prepara per a la impressió, el model CAD en 3D es talla al llarg de l'eix Z per a obtenir una imatge de màscara 2D en plans paral·lels. Com el projector és una pantalla digital pantalla, la imatge de cada capa es compon de píxels quadrats, la qual cosa dona lloc a una capa formada per petits maons rectangulars anomenats vòxels en solidificar-se (Wu et al., 2016).

La DLP pot aconseguir temps d'impressió més ràpids en comparació amb la SLA, ja que tota una capa s'exposa d'una sola vegada, en lloc de traçar la secció transversal d'una secció transversal amb un punt de làser. La llum es projecta sobre la resina mitjançant pantalles de diodes emissors de llum (LED) o una font de llum UV que es dirigeix a la superfície de construcció per un dispositiu digital de micromiralls (DMD). Per millor entendre un DMD és una matriu de micromiralls que controla on es projecta la llum i generen el patró de llum en la superfície de construcció.

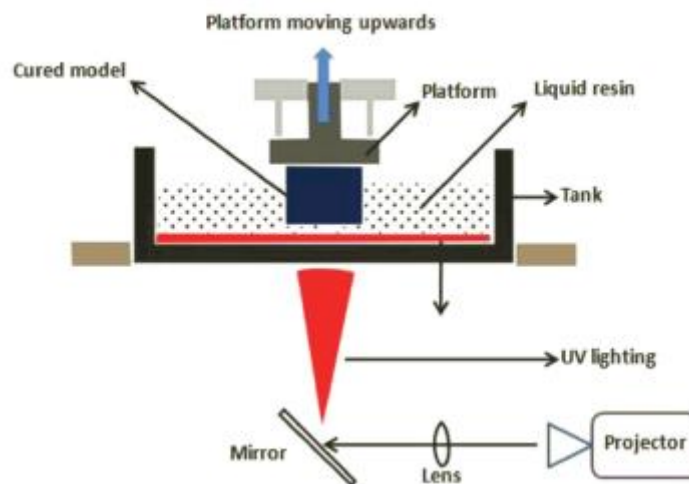


Figura 6 Esquema representatiu del procés Digital Light Processing (DLP) (Font: Muralidhara & Banerjee, n.d.).

Actualment aquesta tecnologia s'utilitza per diverses aplicacions com per exemple en els projectors de cinema, els telèfons mòbils i la impressió en 3D.

Multi-jet Modeling (MJM)

La tècnica de fabricació d'impressió 3D per doll de material es compara sovint amb el procés d'impressió de tinta 2D. Els objectes físics es construeixen capa a capa utilitzant fotopolímers, metalls o cera, que se solidifiquen quan s'exposen a la llum o a la calor, de manera similar al mètode d'estereolitografia. La naturalesa del procés MJM permet imprimir diferents materials i de tot color en la mateixa peça, i com a conseqüent s'utilitza sovint imprimint estructures de suport d'un material diferent durant la fase de construcció.

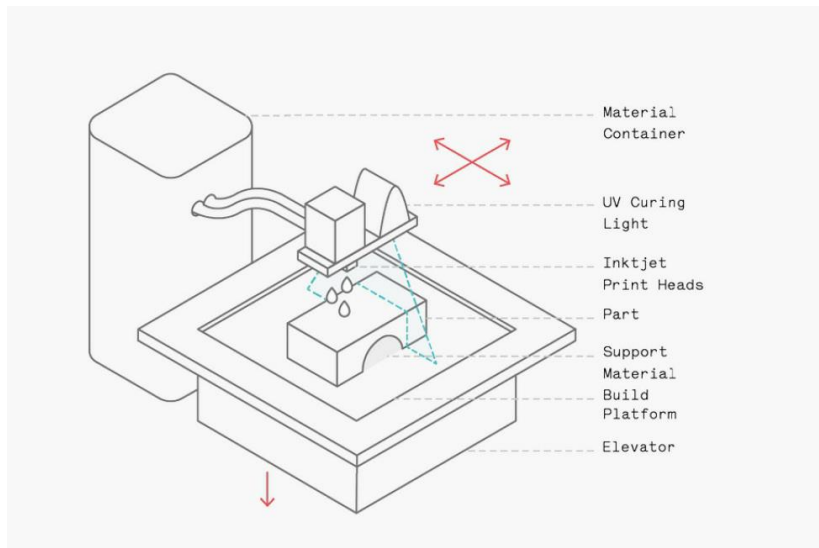


Figura 7 Esquema representatiu del procés Multi-jet Modeling (MJM) (Font: Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret - The 3D Printing Handbook_ Technologies, Design and Applications-3D Hubs (2017), n.d.)

En la Figura 7 es mostra el procés d'injecció de material, en el qual es mostra com s'extrudeix un fotopolímer des d'uns filtres col·locats en el capçal de la impressora per a imprimir el component capa a capa. A diferència d'altres tecnologies de deposició puntual, el material de construcció en el MJM es diposita en línia per a completar la secció transversal de la capa (Gibson et al., 2021) de manera ràpida i lineal, per aquesta raó les impressores MJM són capaces d'imprimir diverses peces en una sola línia sense que això afecti a la velocitat d'aquestes. Les gotes es dipositen, es curen i es solidifiquen utilitzant llum ultraviolada (UV) (Gibson et al., 2021). Les estructures de suport solen estar formades per material dissoluble, que s'elimina en la fase de post processament.

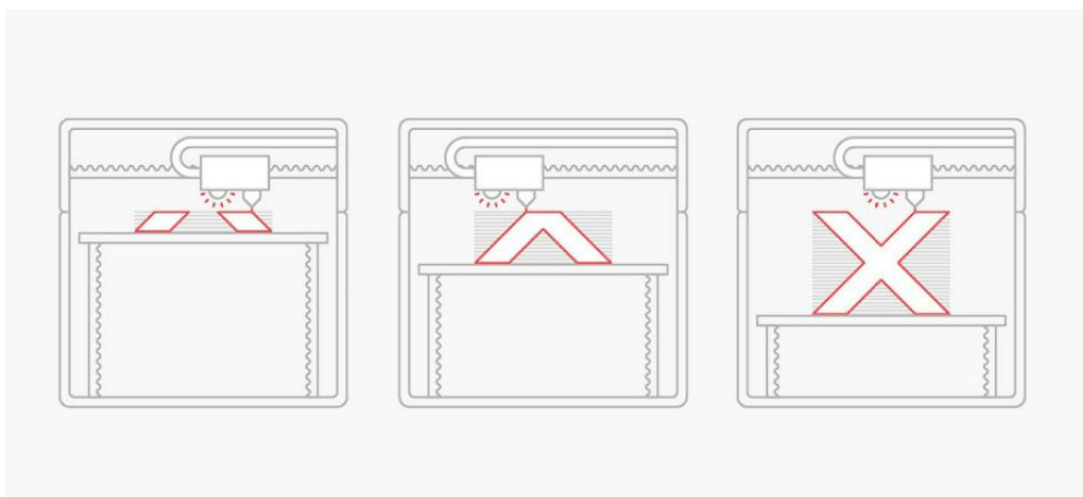


Figura 8 Esquema representatiu del procés del MJM (Font: Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret - The 3D Printing Handbook_ Technologies, Design and Applications-3D Hubs (2017), n.d.)

La capacitat de produir peces de diferents materials, juntament amb una aparença suau de les peces fabricades per MJM, produeix que aquesta tecnologia es pugui adaptar per a una àmplia gamma d'aplicacions com per exemple la producció d'esquelets per a un maniquí d'entrenament neonatal.



Figura 9 Aplicació en la producció MJM per la producció esquelets per a un maniquí d'entrenament neonatal.(Font: Gibson et al., 2021)

1.1.1.2 Bases en pols

En aquest segon bloc les tecnologies desenvolupades utilitzen material en base pols, unint les capes mitjançant fusió o usant algun aglomerant. Els materials amb els quals treballen aquestes tecnologies abasten polímers, ceràmics i metalls. Les tecnologies en base pols són les més comunes i presenten l'avantatge que no és necessari la construcció de material de suport, pel fet que la pròpia pols restant ja fa la seva funció. A continuació, es resumeix el funcionament dels diferents sistemes existents.

Selective Laser Sintering (SLS)

El SLS és un mètode d'impressió 3D en el qual la pols es sinteritza aplicant un raig làser de diòxid de carboni (CO₂) (Muralidhara & Banerjee, n.d.). La cambra es sotmet a una calor pròxima al punt de fusió de la mostra. La pols es fon en llocs específics de cada capa per l'acció del raig. S'utilitza un pistó per a controlar les partícules soltes que es troben en el llit i es baixa proporcionalment al gruix de les capes completades. El SLS és compatible amb plàstics, metalls, compostos metàl·lics, composts de metall-polímer i composts de metall-ceràmica. Els desavantatges del SLS són la falta de mètodes d'impressió 3D d'objectes de precisió definida per la grandària de la peça, la necessitat d'atmosferes

inertes i el manteniment d'una temperatura fixa gairebé en el punt de fusió de la mostra per a evitar l'oxidació.

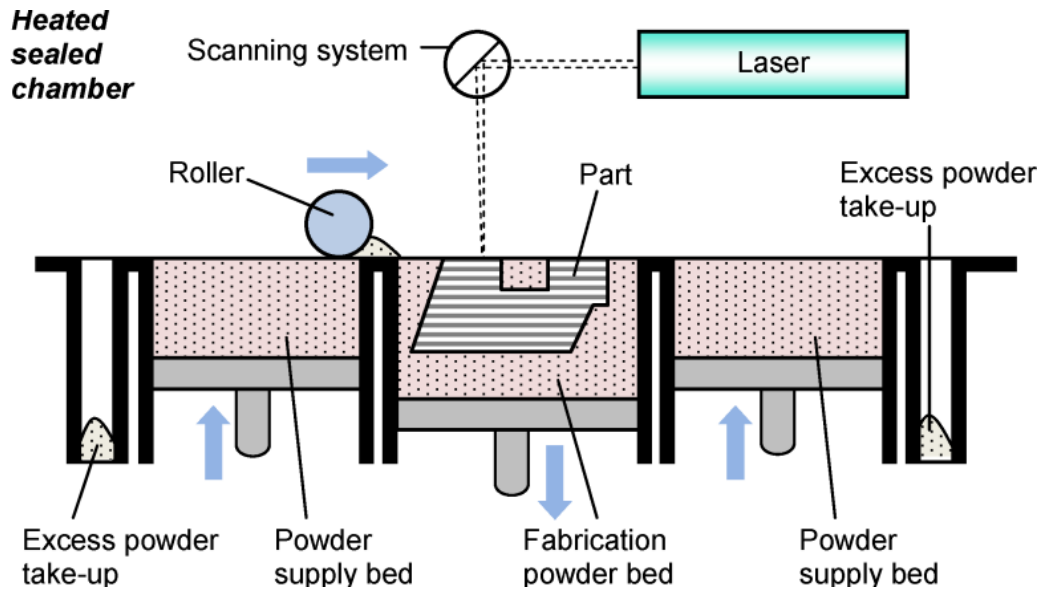


Figura 10 Esquema representatiu del procés SLS. (Font: Universitat de Girona, n.d.)

La versatilitat del procés SLS fa que s'utilitzi per a una àmplia gamma d'aplicacions com per exemple el disseny de la construcció d'una càmera personalitzada o per la fabricació d'accessoris de bicicletes. Per això, el SLS s'utilitza sovint per a la producció de peces que estaran sotmeses a baixa càrrega en el moment que es posin en servei, inclús permeten geometries complexes que poden imprimir-se fàcilment.

A més a més, el SLS facilita una producció de peces en series curtes, ja que sempre imprimeix un contenidor de pols completa, i es poden fabricar diverses peces en una sola, la qual cosa ofereix economies d'escala viables.

Altrament, la naturalesa de la tecnologia SLS, basada en la pols, permet crear peces amb seccions buides, fet que altres tecnologies no poden fer. Un clar exemple d'aquesta característica és la producció de sèries curtes de conductes i canonades complexes.

Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

El DMLS és un procés d'impressió en 3D de PBF basat en el làser. El DMLS consisteix a formar peces complexes fonent amb un làser fines capes de pols metàl·lica procedents de la unitat dispensadora i solidificant-les capa a capa. S'utilitza un recubridor per a revestir una capa uniforme de pols metàl·lica sobre plaques base d'acer (Duda & Raghavan, 2016). El DMLS és similar al SLS, amb la principal diferència de la mena de pols utilitzada (Duda & Raghavan, 2016).

Electron Beam Melting (EBM)

A diferència d'altres tecnologies de fusió en llit de pols, la fusió per feix d'electrons (EBM) utilitza un feix d'alta energia (electrons), un voltatge típic de 30-60 kV, en lloc d'un làser (fotons) per a induir la fusió entre les partícules de metall pols. Un feix d'electrons enfocat recorre una fina capa de pols, provocant una fusió i solidificació localitzada en una àrea transversal específica. Cal recordar que aquestes capes s'acumulen per a crear una peça sòlida.

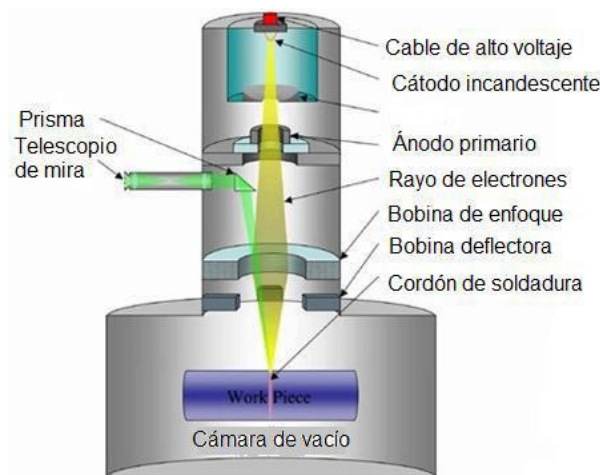


Figura 11 Esquema representatiu del procés EBM. (Font: Muralidhara & Banerjee, n.d.)

En comparació amb el SLM i el DMLS, el EBM té una velocitat de construcció major, a causa de la seva major densitat d'energia. No obstant això, la grandària mínima de la peça, la grandària de les partícules de pols, el gruix de la capa i l'acabat de la superfície són normalment majors. Les peces de EBM es fabriquen en buit i el procés només pot utilitzar-se amb materials conductors. Aquest mètode pot utilitzar-se per a processar diversos tipus de metalls pre aliats i amb un acabat d'alta qualitat. De fet, la EBM amb titani pot aconseguir millors resultats en comparació amb el mecanitzat tradicional

(Murr et al., 2012). La EBM s'utilitza àmpliament en aplicacions aeroespacials i mèdiques.

Binder jetting (BI)

La tecnologia d'injecció d'aglutinant es va desenvolupar per primera vegada en l'Institut Tecnològic de Massachusetts (MIT) al 1993 (Gibson et al., 2021). Aquesta tècnica d'impressió 3D consisteix a utilitzar dos materials; una base en pols i un aglutinant líquid per a la impressió. El material base en pols pot ser de ceràmica o de metall. Un doll d'aglutinant típic estén una capa uniforme del material base (dins de la cambra de construcció) sobre la qual es polvoritzen gotes d'aglutinant per enganxar les partícules en la forma final. Quan es completa una capa, el llit de pols es mou cap avall i es diposita la següent capa de pols. Aquest procés es repeteix fins que s'imprimeix tot el component. Després de la impressió, la peça verda o inacabada s'esterilitza en autoclau per a sinteritzar la pols i obtenir el producte final.

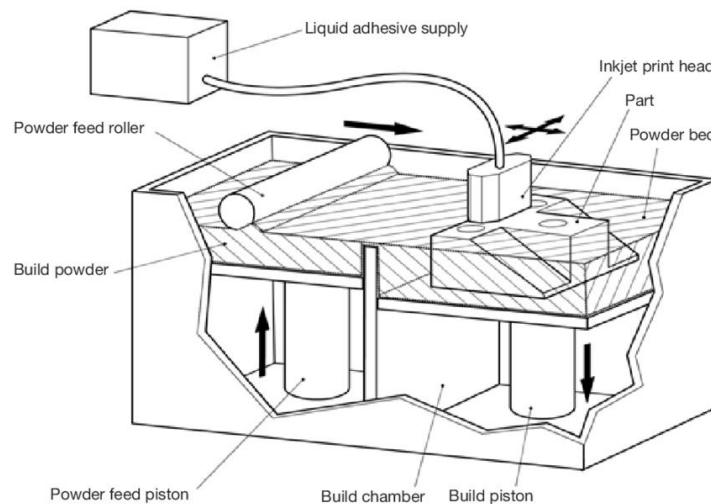


Figura 12 Esquema representatiu del procés BI. (Font: Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret - The 3D Printing Handbook_ Technologies, Design and Applications-3D Hubs (2017), n.d.)

Un clar exemple d'aquesta tecnologia és la producció de prototips realistes, és a dir models a tot color que permeten mostrar l'aspecte d'una peça final abans d'invertir en producció.

Un altre ús dels més comuns és la producció de grans patrons de fosa en sorra. El baix cost i la rapidesa del procés el converteixen en una excel·lent solució per a dissenys de patrons elaborats que serien molt difícils o impossibles de produir amb les tècniques tradicionals.

1.1.1.3 Bases sòlides

A continuació es resumeix el funcionament dels diferents sistemes més populars actualment, i més econòmics, com són el Laminated Object Manufacturing (LOM) i el Fused Deposition Modeling (FDM).

Laminated Object Manufacturing (LOM)

El mètode *Laminated Object Manufacturing* (LOM) es basa en la combinació de processos additius i sostractives, per a crear components en forma de capes. Les capes de làmines recobertes d'adhesiu tèrmic s'uneixen en un substrat sota pressió i calor aplicats. A continuació, s'obtenen capes de la forma requerida mitjançant el tall amb un làser de CO₂ (amb l'ajuda d'un model CAD i un arxiu STL) (Ngo et al., 2018).

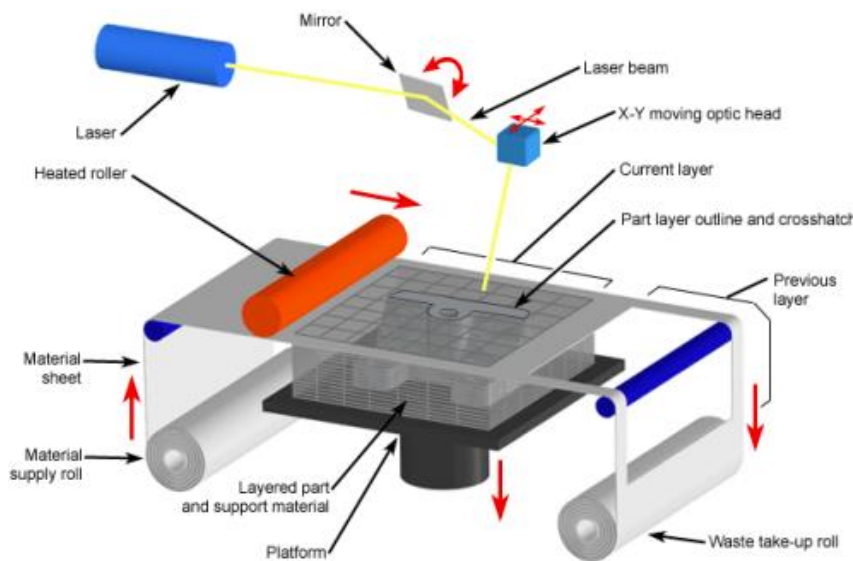


Figura 13 Esquema representatiu del procés LOM.(Font: Universitat de Girona, n.d.)

El LOM és avantatjós pel cost més reduït, ja que el post processament és opcional i no hi ha necessitat d'estructures de suport. A més a més, no hi ha canvis de fase associats i gaudeix d'una gran capacitat de fabricar peces. Les limitacions del procés inclouen la generació de residus a causa de la naturalesa sostractiva de la tècnica, la mala definició de la superfície, la dependència direccional del substrat per a les propietats estructurals i la dificultat per a fabricar peces complicades amb cavitats internes. El LOM és útil per a construir models de papers, metalls i materials composts (Park et al., 2000).

Fused Deposition Modeling (FDM)

La tecnologia FDM va ser encunyada per primera vegada per S. Scott Crump a la fi de la dècada de 1980, abans de ser comercialitzada en 1990 per una empresa anomenada

Stratasys. Actualment, és una de les tècniques més utilitzades a causa de la competitivitat de preus tant de les impressores, com de la producció. A més a més, és la utilitzada en el treball.

Com es pot observar en la Figura 14 aquest tipus d'impressió utilitza un filament de plàstic o metall enrotllat que s'escalfa fins arribar a la temperatura de fusió del material en qüestió i s'extrudeix a través d'un capçal controlat numèricament per a formar capes. Cal remarcar que es parteix d'un model 3D, prèviament dissenyat, capaç de ser imprès. El material extruït s'endureix immediatament després de sortir del capçal. Aquesta tecnologia s'utilitza sobretot amb dos filaments de plàstic per a impressores 3D: el acrílonitril butadiè estirè (ABS) utilitzat en la indústria aeronàutica i automobilística; i poliàcid làctic (PLA), el més demandat a nivell privat a causa del seu baix cost, encara que usualment no cobreix els mínims tècnics requerits d'estabilitat tèrmica i química. El procés també pot estendre's a una àmplia gamma de filaments inclosos com per exemple: de fusta, els flexibles i fins i tot els conductors (X. Wang et al., 2017). Tot i així, aquesta tecnologia presenta inconvenients relacionats amb el procés i també defectes al producte final, on aquests factors són explicats en el capítol 2.1.

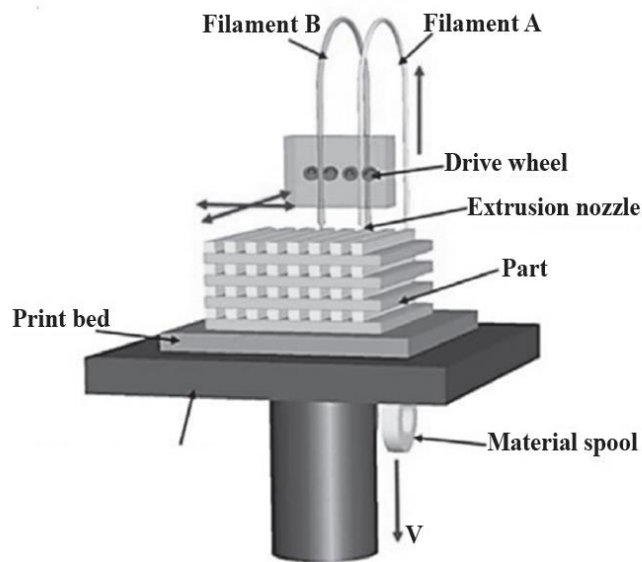


Figura 14 Esquema representatiu del procés FDM. (Gibson et al., 2021)

El modelatge per deposició fosa (FDM) realitzat en màquines professionals facilita l'obtenció de peces de qualitat amb materials finals i homologats. Aquesta tecnologia additiva s'aplica en sectors com la indústria, la medicina o l'aeronàutica. Aquestes són algunes de les seves aplicacions:

- Models per a la validació dimensional i funcional del producte
- Peces amb material homologat per a aeronàutica
- Possibilitat de cromar peces d'ABS
- Fabricació de sèries curtes (fabricació de baix volum) de peces
- Fabricació de peces de menor cost

1.2 Materials polimèrics existents per impressores 3D amb tecnologia FDM.

La tecnologia FDM ha evolucionat molt amb el pas d'aquests últims anys, a causa de la proximitat entre la societat i la impressió 3D que ha anat en augment. Aquest fet ha repercutit sobre els materials usats en aquesta tècnica de fabricació mitjançant addició degut que molts fabricants han estudiat l'ús de diferents materials i fins i tot combinacions d'aquests per a satisfer les necessitats de tots els camps d'aplicació de la impressió 3D.

El material emprat és un filament enrotllat en una bobina. Segons la impressora pot ser d'un diàmetre o un altre, els més comuns són de 3 mm, 2,85 mm i 1,75 mm. D'altra banda en forma de grana emmagatzemant en una tremuja. Aquesta tecnologia de tremuja és més incipient i simula els sistemes habituals de transformació i no necessita de la preparació del filament. Cal remarcar que és important vigilar amb els materials que es seleccionen, ja que han de ser els que la impressora 3D accepti pel bon funcionament.

A continuació s'exposen els materials més emprats actualment per la impressió 3D amb un tecnologia FDM.

1.2.1 ABS

El acrílonitril butadiè estirè és un dels polímers termoplàstics d'enginyeria amorfs que té una excel·lent resistència a l'impacte a baixes temperatures. Els polímers ABS estan composts de més del 40% d'estirè i quantitats variables de butadiè i acrílonitril, on cadascun dels tres blocs aporta característiques diferents: L'estirè aporta rigidesa i facilitat de processament, el butadiè ofereix duresa i resistència a l'impacte, i el acrílonitril proporciona resistència química i estabilitat a la calor.

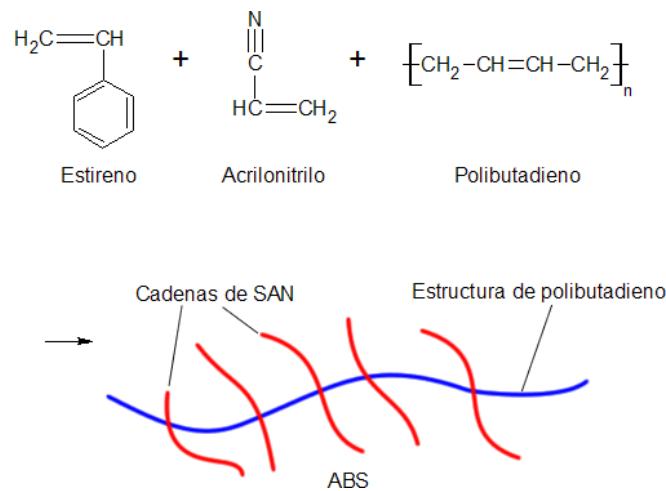


Figura 15 Composició del ABS. (Font: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs>).

Aquest material polimèric d'impressió 3D d'origen fòssil (prové del petroli) és molt utilitzat i és famós per la seva ductilitat i estabilitat tèrmica. El post processament de l'ABS és senzill i pot obtenir-se un acabat superficial suau i brillant tractant els productes amb acetona. A més a més, és menys sensible a la propagació d'osques i té menor cost que per exemple el niló. No obstant, un dels inconvenients de l'ABS, a part del seu origen no renovable, és el preu i que no es biodegradable.

A causa de la seva flexibilitat de composició i estructura, durabilitat i resistència, aquest polímer pot presentar una àmplia gamma de propietats, la qual cosa permet el seu ús en diverses aplicacions. Un clar exemple és l'ús d'aquest material per a fabricar peces funcionals en prototips com a engranatges, plantilles i accessoris. Altrament, un camp important és el sector de l'automòbil, on s'utilitza en graelles del radiador, panells d'instruments, carcasses de fars, *airbaigs* i per aplicacions electròniques. Altres aplicacions son orientades a productes utilitzats en construcció, així com en articles d'esbarjo, com a cases mòbils i vaixells.

1.2.2 PET

El Polietilè tereftalat o conegut com PET és un polièster termoplàstic semi cristal·lí que es produeix a partir de dos compostos principalment, l'àcid tereftàlic i el etilenglicol; encara que també pot obtenir-se utilitzant dimetil tereftalat en comptes d'àcid tereftàlic. Aquest material té una baixa velocitat de cristal·lització i pot trobar-se en estat amorf-transparent o cristal·lí.

El PET en general es caracteritza per ser extremadament dur, resistent al desgast, dimensionament estable, resistent als químics i té bones propietats dielèctriques. És un

polímer plàstic, lineal, amb alt grau de cristal·linitat i termoplàstic en el seu comportament, la qual cosa permet a ser transformat mitjançant processos d'extrusió, injecció, injecció-bufat i termoformat. La seva fórmula química es presenta en la Figura 16.

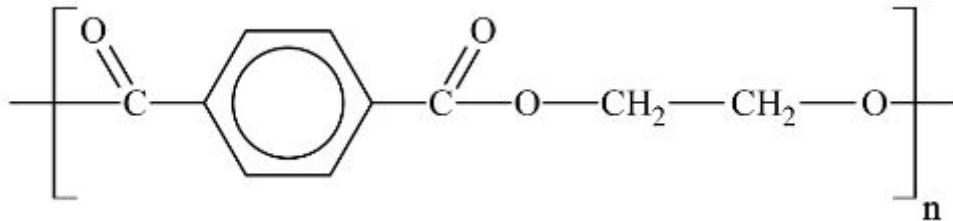


Figura 16 Estructura química del tereftalat de polietilè. (Font: <https://www.arapack.com/faq/que-es-el-pet/>)

A continuació es descriuen les característiques importants que presenta el PET. Respecte les seves propietats mecàniques aquest presenta un bon comportament enfront esforços permanents. A més a més, és capaç de suportar un alta resistència a la fricció, a la fatiga, al desgast i té un bon coeficient de lliscament.

D'altra banda, pel que fa les propietats químiques, aquest ofereix bona resistència química, alta resistència als atacs químics com a àcids i àlcalis suaus i solvents orgànics, no es danya per greixos o olis. A més a més, un avantatge del PET respecte a altres termoplàstics es que presenta molt bona barrera envers al diòxid de carboni (CO₂), acceptable barrera a O₂ i a la humitat.

El PET és totalment reciclable, encara que tendeix a disminuir la seva viscositat amb la història tèrmica. Aquest es pot reciclar mecànicament, o bé químicament. Cal comentar que poder ser reciclat químicament és un avantatge envers altres polímers. Consisteix en un procés en el qual es produeix la descomposició del polímer per obtenir els components de partida (monòmers). Aquest monòmers se'ls aplicarà un nou procés de polimerització per obtenir nous materials polimèrics. Mitjançant aquest reciclatge s'evita la pèrdua de propietats mecàniques associades a la trituració, neteja i processament dels materials reciclats mecànicament. No obstant, cal destacar que és un procés car i on es produeixen residus químics que cal tractar.

Aquestes propietats característiques del PET el converteixen en el material idoni per a la realització d'aplicacions d'ús comú i principalment per a la producció de diferents tipus d'envasos. Com a conseqüència que no desprèn molècules tòxiques quan es degrada, qualitat necessària per aprovar el seu ús en productes que hagin d'estar en contacte amb productes alimentaris. Apart de la del sector alimentari, també s'aplica en l'àmbit manufacturer on treuen

profit a aquest polímer termoplàstic. Tanmateix aquest pot ser modificat químicament per a ser utilitzat en la manufacturaria additiva (impressió 3D).

1.2.3 PLA

El poliàcid làctic, és un polímer d'origen vegetal termoplàstic on la molècula precursora és l'àcid làctic com es pot observar a la Figura 17. A causa de les notables propietats fisicoquímiques del PLA, com la seva biodegradabilitat, propietats barrera i biocompatibilitat, aquest biopolímer ha trobat nombroses aplicacions, ja que presenta un ampli rang inusual de propietats, des de l'estat amorf fins a l'estat cristal·lí; propietats que poden aconseguir-se manipulant les mescles entre els isòmers D(-) i L(+), els pesos moleculars, i la copolimerització. A més a més, l'aprovació de l'Administració d'Aliments i Medicaments dels Estats Units (FDA) per a ús clínic, obren perspectives interessants per a la seva aplicació en envasos d'aliments i materials biomèdics.

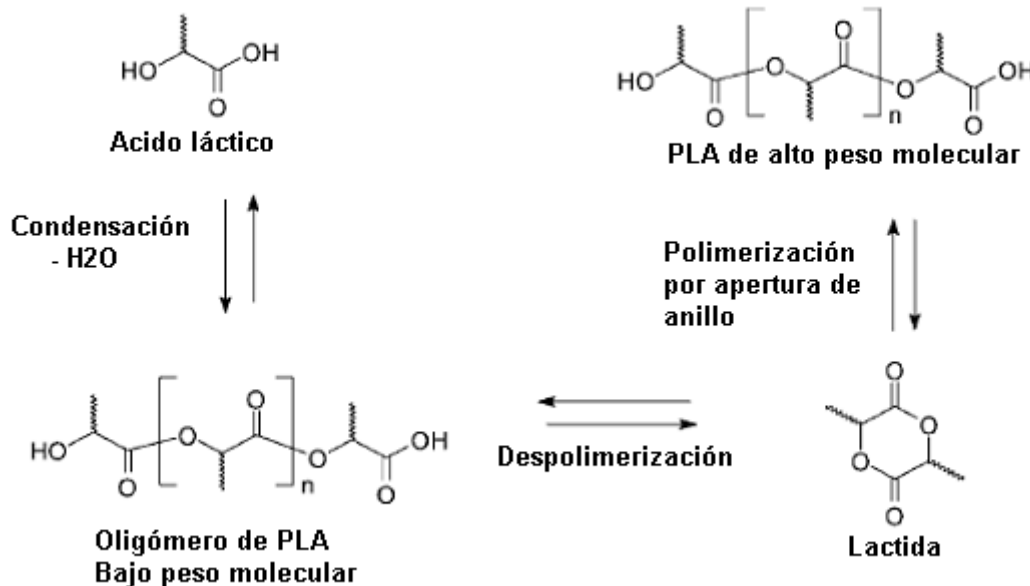


Figura 17 Estructura química de l'àcid polilàctic (Font: Serna C. et al., 2011)

Les propietats mecàniques i químiques depenen de la composició del polímer, del seu pes molecular i del seu cristal·linitat. La cristal·linitat pot ajustar-se des d'un valor de 0% a 40% en forma d'homopolímers lineals o ramificats, i com copolímers a l'atzar o de bloc (Serna et al., 2003). Una forma cristal·lina (en la seva major part composta de forma L+) d'alt pes molecular (> 100.000 Daltons) garanteix una reabsorció llarga (aproximadament d'1 a 2 anys). Formulacions diferents i l'addició de radicals en les cadenes, permeten controlar o modelar la

velocitat de reabsorció. La Taula 1 mostra algunes propietats del PLA d'acord amb la seva composició.

Taula 1 Propietats del PLA. (Font: Serna C. et al., 2011)

Massa Molecular (Kda)	% Cristal·linitat	Viscositat (dL/g)	Densitat (g/cm³)
L PLA 50 a 756	15-74	0,61-8,2	1,25
D-L PLA 21 A 550	0 (Amorf)	0,25-2,01	1,29
PLA 20 a 145	46-52	0,5 – 1,6	1,50 – 1,64

Utilitzant 100% de L-PLA, resulta un material amb alt punt de fusió i alta cristal·linitat. En situacions de mescla D i L, s'obté un polímer amorf amb una temperatura de transició vítria (T_g) de 60 °C. Amb 90% D i 10% L, s'obté un material copolimèric, el qual pot polimeritzar-se de forma orientada, amb temperatures per sobre de la seva temperatura de transició vítria. La temperatura de processament està entre 60 i 125 °C i depèn de la proporció de D o L àcid làctic en el polímer. No obstant això el PLA pot ser plastificat amb el seu monòmer o alternativament amb àcid làctic oligomèric i això permet disminuir T_g .

El PLA té propietats mecàniques en el mateix rang dels polímers petroquímics, a excepció d'una baixa elongació. No obstant això, aquesta propietat pot ser afinada durant la polimerització (per copolimerització) o per modificacions post polimerització (per exemple plastificants). La Taula 2, mostra una comparació d'algunes propietats mecàniques de plàstics d'origen petroquímic amb les propietats del PLA.

Taula 2 Propietats de polímers utilitzats per impressió 3D. (Font: Elaboració pròpia).

Polímer	Força de tensió (MPa)	Mòdul de Tensió (GPa)	Temperatura d'extrusió en impressió 3D (°C)
ABS	41- 45	2,1 - 2,4	220-270°C
PET	69	2,8 - 4,1	230-260
PLA (L+)	40 - 60	3,0 - 4,0	120-220
Nylon	62 – 83	1,2 - 2,8	220-250

La barrera a l'aigua i al diòxid de carboni del PLA és bastant bona, tot i que inferior a la del PET, mentre que la barrera al oxigen és considerada bona. Cal remarcar que els filaments de

PLA són el material d'impressió 3D de sobretaula més utilitzat. Els avantatges dels filaments de PLA són el seu baix cost, la seva facilitat d'ús i la seva disponibilitat en diversos colors. Els components de PLA són resistents i tenen una major resistència a l'impacte i poden imprimir-se sense un llit calefactat o una cambra d'impressió tancada. Generalment s'utilitzen per a fer models a escala i joguines.

El PLA pot ser tan dur com l'acrílic o tan tou com el polietilè, rígid com el poliestirè o flexible com un elastòmer. Pot a més ser formulat per a donar una varietat de resistències. Les resines de PLA poden ser sotmeses a esterilització amb raigs gamma i és estable quan s'exposa a la radiació ultraviolada. Al PLA se li atribueixen també propietats d'interès com la suavitat, resistència al ratllat i al desgast.

El PLA és utilitzat àmpliament en la indústria alimentaria, química, farmacèutica, del plàstic, tèxtil, l'agricultura, l'alimentació animal, entre altres. Clars exemples en els diversos sectors esmentats anteriorment son: la producció de fil per a sutura, implants, pròtesis, producció d'envasos i empaquetatges per a aliments i producció de pel·lícules per a la protecció de cultius en estadis primaris. Altrament cal fer esment que aquest biopolímer ha despertat l'interès d'investigadors, productors i processadors, ja que fora de la seva degradabilitat, s'ha trobat que pot ser un gran competidor enfront d'altres plàstics d'origen petroquímic pel seu ampli rang inusual de propietats, des de l'estat amorf fins a l'estat cristal·lí; propietats que poden aconseguir-se manipulant els pesos moleculars, les mescles entre els isòmers D(-) i L(+) i la copolimerització.

1.2.4 Nylon

El nylon és el nom comercial que Dupont, un dels majors productors de productes destinats al àmbit químic i científic, li va assignar a la primera poliamida que va fabricar. Aquest és un polímer artificial que pertany al grup de les poliamides (PA), el qual es genera per policondensació d'un diàcid amb una diamina.

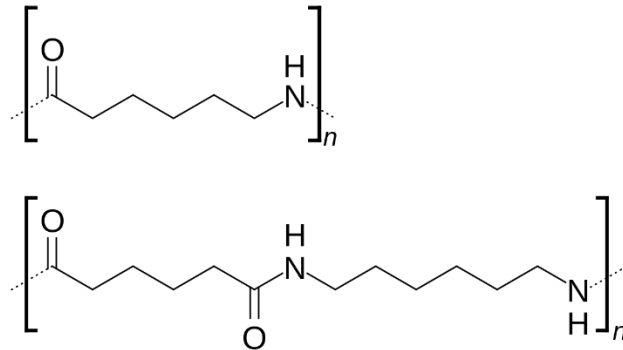


Figura 18 Composició química del niló. (Font: <https://es.wikipedia.org/wiki/Nailon>)

El Nylon és un termoplàstic semi cristal·lí, el qual presenta un grau d'opacitat del 65%, és a dir, és un 65% traslluït a causa del seu acabat en color blanc natural i brillant. A causa d'això no mostra reflectivitat. Aquest és un plàstic sintètic molt comú i amb una gran varietat d'aplicacions, com a conseqüència de les propietats tèrmiques i mecàniques que presenta. Un clar exemple és el Nylon 645, una poliamida molt comuna per impressió 3D, del qual s'explica a continuació les seves propietats.

Respecte a les propietats tèrmiques, per impressió 3D a l'ésser una poliamida amb bona resistència a l'abració i alta resistència a la calor el fabricant recomana una temperatura de l'extrusor entre 230 °C -265 °C essent l'òptima 242 °C. La poliamida, al ser un termoplàstic, si s'escalfa es produeix un estovament del material. Per aquesta raó, la temperatura de fusió és de 217 °C i la de transició vítria de 52 °C, per la qual cosa la seva viscositat de fusió és molt baixa. La temperatura de degradació tèrmica o Piròlisis és de 340 °C, on es descomposaria químicament a causa de l'escassetat d'oxigen. La temperatura del llit calent o base de la màquina el fabricant recomana entre 30-65 °C. Totes aquestes característiques tèrmiques queden englobades sota els termes la degradació quan aquest material s'enfronti a la humitat i clorats, reduint les seves propietats mecàniques tant finals com durant la impressió.

Les propietats mecàniques més influents, el fabricant facilita el coneixement de l'esforç de tracció que se situa en 35,770 MPa amb un allargament al trencament en un 186%. Això produeix la principal característica diferenciadora que és la seva gran resistència a la tracció

o trencament. El Mòdul de Young, el qual caracteritza el comportament elàstic del material, ronda els 212,6 MPa quan s'origina per impressió 3D. D'aquesta manera es poden obtenir objectes flexibles al mateix temps que amb alta resistència a causa dels seus alts esforços de tracció i mòdul d'elasticitat. En altres paraules, el rendiment mecànic és excel·lent per a usos d'enginyeria.

La seva utilització es pot apreciar en diversos sectors com per exemple en la fabricació de diversos utensilis industrials com a engranatges, corrioles, coixinets, vàlvules i peces de tota mena. És el plàstic d'enginyeria més utilitzat, ja que garanteix una gran adherència entre capes i per tant el converteix en la millor opció per a imprimir peces funcionals. Actualment, aquest plàstic a base de niló està substituint als metalls. Això és degut al fet de ser més econòmic, evitar la instal·lació de sistemes de lubricació, facilitat d'ús reduint els temps de reposició i la seva lleugeresa i alta tenacitat en absorbir grans càrregues d'impacte.

2. ANTECEDENTS, OBJECTIUS I ABAST

2.1 Antecedents

La tecnologia FDM, de l'anglès "*Fused Deposition Modeling*" o "Modelatge per Deposició Fosa", és un procés de fabricació utilitzat en les impressores 3D amb el propòsit de fabricar prototips o bé per una producció a petita escala. Les màquines FDM tenen molt èxit i satisfan les demandes de molts usuaris industrials i consumidors privats. A raó de les propietats del material i, en part, al baix cost de les màquines bàsiques els avantatges que proporciona aquest tipus d'impressió són la competitivitat econòmica, bona estabilitat de les peces a imprimir, relativa rapidesa a l'hora de lliurar el producte, absència de post curat, possibilitat de fabricar peces molt grans sense deformacions i possibilitat de combinar materials durant la fabricació.

No obstant, la combinació de diferents materials durant la fabricació cal tenir en compte que la majoria de les màquines FDM tenen dos extrusors, és possible que un capçal tingui un capçal més gruixut que l'altre. El més gruixut pot emprar-se per a construir estructures de suport i per a emplenar l'interior de la peça. Tot i així, la dificultat de mantenir un registre correcte entre els dos gruixos de capa ha impedit probablement que aquest enfocament es desenvolupi comercialment. Un compromís sobre aquesta solució és utilitzar un patró de farciment en forma de bresca (o similar) que utilitzi menys material i requereixi menys temps. Això només és per a aplicacions en les quals la massa i la resistència reduïdes d'una peça d'aquest tipus no són un problema.

D'altre banda, existeixen desavantatges en utilitzar aquesta tecnologia, principalment en termes de velocitat de construcció, precisió i la densitat del material. Tanmateix la menor resolució de l'eix z en comparació amb altres processos d'AM por comportar com a conseqüència, la fabricació d'objectes complexos amb una durada de diversos dies. Cal tindre en compte també que tots els capçals són circular i, per tant, és impossible dibuixar cantonades exteriors esmolades; hi haurà un radi equivalent al del capçal en qualsevol cantonada o vora. Les cantonades internes i les vores internes també presentaran un arrodoniment. La forma real produïda depèn de la del capçal, de les característiques d'acceleració i desacceleració i del comportament viscoelàstic del material en solidificar-se. La velocitat d'un sistema FDM depèn de la taxa d'alimentació i de la velocitat de traçat. La velocitat d'alimentació també depèn de la capacitat de subministrament del material i de la velocitat a la qual la líquadora pot fondre el material i alimentar-lo a través del capçal. En cas

d'augmentar el cabal de material, el més probable és que es produís un augment de la massa, i com a conseqüència faria més difícil moure el capçal d'extrusió més ràpid. A més a més, es destaquen defectes com: l'enlairament de cantonades o complet, delaminació, desplaçament de capes, sobreescalfament i etc. Tots aquests efectes actuant de forma perjudicial causant la degradació del polímer i dificultant la unió de diversos polímers.

2.1.1 Tecnologia FDM amb extrusió pèl·lets, filaments i dual.

En aquest projecte es disposa d'una impressora 3D amb tecnologia FDM dual la qual es capaç d'imprimir en 3D mitjançant l'extrusió de pèl·lets, extrusió de filaments, o bé la combinació d'ambdues. No obstant, cal destacar que com a conseqüència a la dificultat de produir filament amb certs materials en les instal·lacions del grup de recerca com per exemple la PA11 o materials compostos experimentals, degut a les seves propietats i la concentració d'esforços locals que es produeixen al enrotllar el filament, es planteja aquest projecte el qual la impressora en qüestió gaudeix d'un sistema d'impressió dual amb filament i pèl·let com s'ha esmentat anteriorment.

En l'extrusió de filament, el filament s'alimenta a través d'una extrusora d'engranatges que aplica pressió al filament per a empènyer-lo cap a un bloc de calor que fundi el polímer que s'extrudirà a través d'un filtre. En canvi, l'extrusió de pèl·lets, els grànuls de materials s'introdueixen a través d'una tremuja, la qual té múltiples zones de calor. Dins d'aquest barril hi ha un caragol impulsat per motor que impulsa els pèl·lets a través del barril per a ser extruïts a través del capçal.

Actualment un factor determinant per qualsevol impressora 3D és el cabal, mesurat en kg/hora o lliures/ hora depenen del sistema de mesura. Com més gran sigui el cabal, més ràpida és la impressió. Per aquesta raó, el cabal de l'extrusora de pèl·lets té un avantatge en vers la de filaments, ja que la grandària i la velocitat del cargol són els únics paràmetres restrictius. En canvi, una extrusora de filaments està limitada per la velocitat a la qual les rodes dentades empenyen el filament i pel diàmetre del orifici del capçal. Altrament, el diàmetre del filtre ha de ser menor que el diàmetre del filament, que té un màxim de 2,85 mm, per a mantenir la pressió i la consistència de la massa fosa necessàries per a una impressió de qualitat. A raó, la taxa de flux de filament més alta que s'ha pogut aconseguir és d'aproximadament 1 kg / hora amb un filtre de 2,4 mm. A més a més, generalment una extrusora de pèl·lets també tindrà grandàries només de boca més grans, la qual cosa permetrà velocitats de flux més altes.

Cal comentar que la impressió amb matèria primera granulada té un mercat més variat de materials. No obstant això, la quantitat de filaments en el mercat continua creixent ràpidament, però no pot igualar la gran selecció i varietat de termoplàstics granulats que estan disponibles com a resultat de l'ús generalitzat de l'emmotllament per injecció. A més a més, hi ha certs materials disponibles en forma de grànuls que són simplement impossibles de produir en forma de filaments o amb gran complexitat de produir-la com per exemple el niló, per les característiques físiques i tèrmiques de les quals disposen aquestes poliamida. Com a conseqüència del procés de fabricació més elaborat del filament envers els pèl·lets i per oferta-demanda de la matèria primera es veu reflectit al cost d'aquesta per la impressió 3D. El cost del grànul és menor que el del filament per a una mena de material donat.

Altrament, l'adhesió de capa adequada és una característica primordial per aquesta tecnologia d'impressió 3D. Aquesta propietat pot patir riscos com a conseqüència a no poder mantenir una impressió continua tenint detencions que provoquin refredament addicional. Un clar exemple és el canvi de bobina de filament per peces que ho requereixin. A més de canviar el rodet en obrir la cambra escalfada per efectuar el canvi existeix el risc de perdre calor d'aquesta, fet que comportarà distorsions a la peça objecte. Cal esmentar que un gran avantatge dels pèl·lets és que es pot automatitzar el procés d'ompliment de la tremuja depenent del pes de la peça a imprimir. Per a evitar la supuració, una extrusora de pèl·lets necessitaria invertir la direcció del caragol al final de una trajectòria, la qual cosa pot ser perjudicial per a l'extrusora. D'altra banda, degut a que el filament està restringit dins dels engranatges que alimenten el capçal, es maneja molt millor el traspua en retreure el filament cap endarrere al final d'una trajectòria d'extrusió per a aconseguir unes costures molt netes i suaus.

A més a més, cal tindre en compte que la gestió de la calor del plàstic extruït tendeix a ser més fàcil amb la impressió de filaments. Com a conseqüència que segons la mida del pèl·let pot trobar-se amb un escenari en el qual la perla extruïda reté massa calor i no es refreda per complet ni solidifica prou per a suportar la següent capa. Això pot provocar peces flàccides i falles d'impressió.

En resum, el mode dual d'aquesta tecnologia pot generar peces per prototips d'alta qualitat amb benefici de les dues vies d'extrusió segons es requereixi.

2.2 Objectiu

L'objectiu del projecte és implementar una metodologia per a la fabricació de materials bicomponents en una impressora 3D amb una tecnologia FDM i optimitzar aquest procés.

2.3 Abast

El projecte abastarà la posta en marxa d'una impressora 3D dual amb tecnologia FDM, la qual es pot alimentar a través d'una tremuja que emmagatzema un polímer amb forma de gransa i amb un rodet de filament de polímer. Per tant, es planteja el funcionament de la màquina amb totes les combinacions d'entrades que disposa i amb diversos polímers comercials amb la finalitat de crear materials bicomponents. Posteriorment, es realitzarà tot un estudi de caracterització fonamentat en: assajos a tracció, flexió, impacte, avaluació de propietats tèrmiques, estudi de les unions entre materials, etc. Finalment s'avaluaran els costos de producció que permetin valorar la seva implementació en el mercat.

3. MATERIALS I MÈTODES

Al llarg d'aquest capítol s'explica els materials emprats i la metodologia emprada per realitzar una anàlisi comparatiu entre provetes normalitzades d'impressió 3D amb diverses orientacions del farciment en l'estructura interna de la peça, 0°, 45°, 90 i la combinació de 0 i 90°. Han sigut impreses 7 provetes normalitzades segons la normativa ASTM D638 i 10 provetes segons la normativa ASTM D790 per cada orientació, per la Universitat de Girona mitjançant la impressora 3D de la marca TUMAKER NX PRO DUAL, amb les diverses modalitats de impressió que proporciona aquest model per pèl·lets, per filament i amb ambdues, per la posterior caracterització d'aquestes.

3.1 Materials

Les peces impreses contenen un 100% de material intern, amb PLA (L105 de Total Corbion). A més a més, s'ha imprès una figura d'un joc de taula com es pot observar a la Figura 19, amb una bobina de PLA comercial amb la finalitat de comprovar la qualitat d'impressió envers la modalitat de pèl·lets, aquesta ha diferència de les provetes la densitat de farciment és d'un 20%, ja que és destinada a una avaluació qualitativa.

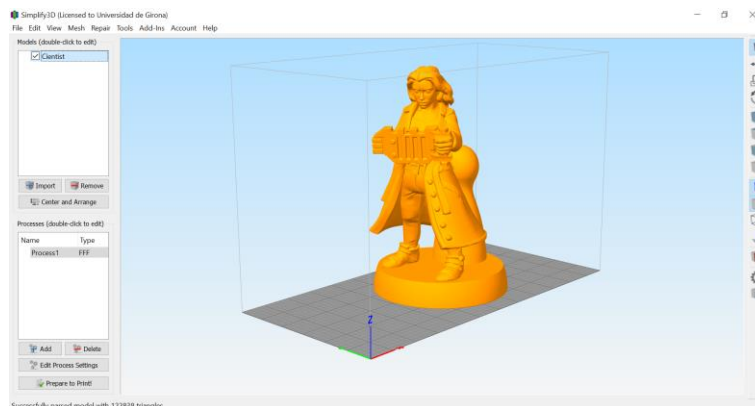


Figura 19 Model d'una peça de joc de taula. (Font: Elaboració pròpia).

3.1.1 Fabricació de filament de PLA

En aquest projecte s'ha extruït filament amb la extrusora 3devo Next 1.0 – Advanced (Països Baixos) que gaudeix el grup LEPAMAP de la Universitat de Girona.



Figura 20 Extrusora de filament Next 1.0 – Advanced. (Font: <https://www.3devo.com/filament-makers>)

Aquesta màquina disposa d'una tremuja que alimenta l'extrusora de pèl·lets, del material en qüestió, mitjançant un sense fi. Els pèl·lets passen per quatre zones amb diferents temperatures com es mostra a la Figura 21, aquestes superiors a la temperatura de fusió.



Figura 21 Punts de temperatura en la extrusora de filament. (Font: Elaboració pròpia).

A continuació, el material en estat viscos surt del filtre i es condueix entre dos coixinets que estiren el material, els quals mitjançant un control de gruix regulen el diàmetre del filament. Aquest gruix es determina en el menú "configuració del material" que disposa l'extrusora. Havent seleccionat el material i el gruix, la màquina disposa de paràmetres preestablerts, com son la velocitat del fus i temperatures, manipulables segons criteri del tècnic. Un cop estabilitzat el gruix del filament amb una tolerància de $\pm 0.10\text{mm}$ es posiciona el filament a la

bobina i es comença a bobinar. Cal comentar que una de les majors problemàtiques d'aquesta extrusora de filament es que el sensor que controla el gruix del filament no es precís fet que en moments puntuals el gruix del filament superin cotes no desitjades i com a conseqüència el filament no seria vàlid per la impressora 3D en qüestió. Altrament per la disposició de la maquina el filament produït presenta radis durant el bobinat, ja que la traçabilitat del fil fins arribar a la bobina és complexa com es pot observar a la Figura 22 Procés de l'extrusora de filament. Per aquesta raó el filament es trenca amb freqüència al utilitzar-lo a la impressora 3D que el projecte escau.



Figura 22 Procés de l'extrusora de filament. (Font: Elaboració pròpia).

A més a més es poden controlar diversos paràmetres durant el procés com la velocitat del fus, el percentatge d'obertura dels ventiladors per controlar la fluïdesa del material. Per a millor entendre a la següent es poden veure els paràmetres modificats per tal de produir el filament el qual alimentarà la impressora 3D.

Taula 3 Paràmetres extrusora de filament.(Font: Elaboració pròpia)

Diàmetre filament [mm]	Temperatura Heater 1 [°C]	Temperatura Heater 2 [°C]	Temperatura Heater 3 [°C]	Temperatura Heater 4 [°C]	Velocitat extrusor [rpm]	Velocitat ventilació [%]
1,75	170	185	190	178	3,5	80

Cal fer esment de la importància de la neteja de la extrusora de filament al finalitzar el procés ja que, per futures impressions podries arribar a obstruir el filtre, o bé imprimir el material desitjat amb addicions del anterior.

3.2 Metodologia de preparació

El següent apartat es centrarà en el procés general des del disseny fins a la peça final. Cal tenir en compte que cada mètode d'impressió 3D produeix peces de manera diferent manera com s'explica en capítols anteriors, però en resum, aquests són els cinc passos principals que són constants en totes les tecnologies.

3.2.1. Producció d'un arxiu 3D

La producció d'un model digital és el primer pas en el procés d'impressió 3D. El mètode més comú per a produir un model digital és el disseny assistit per ordinador (CAD). També pot utilitzar-se l'enginyeria inversa per a generar un model digital mitjançant l'escanejat 3D. En aquest treball es crea els dissenys assistits, els qual es poden observar en la Figura 23 i Figura 24, per ordinador amb el programari SolidWorks. Hi ha diverses consideracions de disseny que han de ser avaluades quan es dissenya per a la impressió 3D. En general, aquestes consideracions es centren en les limitacions de la geometria, és a dir, les característiques, el material de suport i el material de fuita de la geometria.

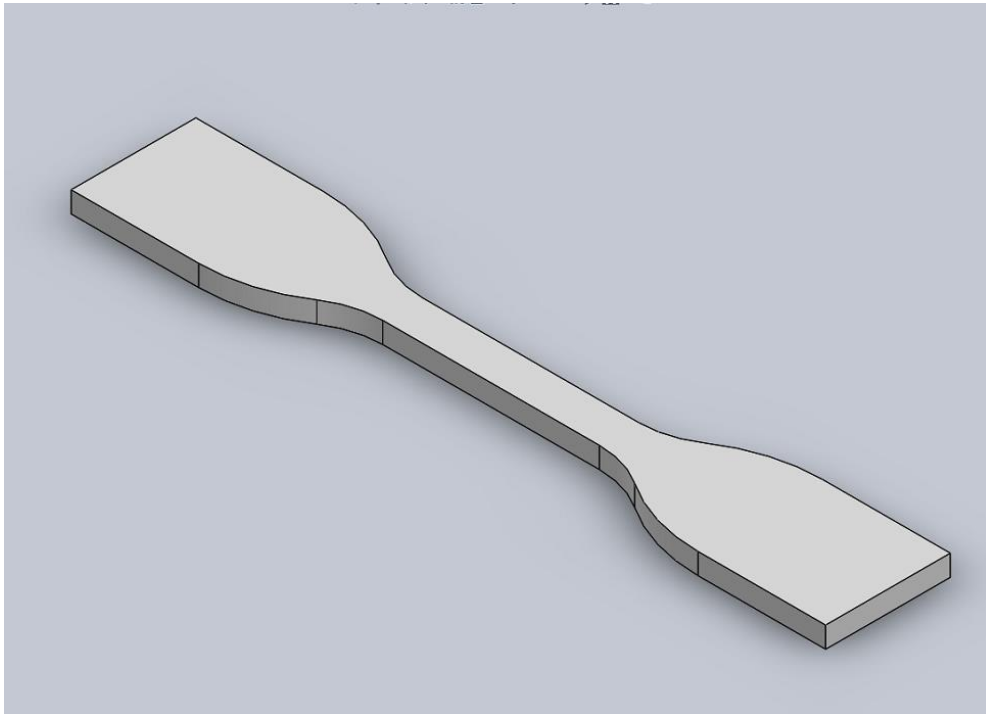


Figura 23 Espècimen tipus IV ASTM D638 (Font: ASTM International., 2002).

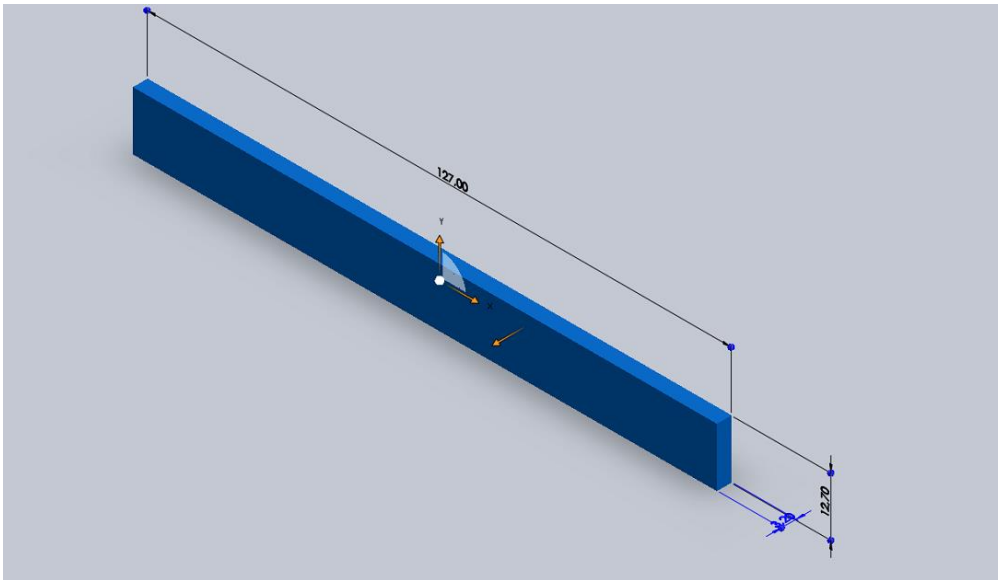


Figura 24 Espècimen ASTM D790 (Font: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2002)

3.2.2. Creació i manipulació d'arxius STL

Per a poder imprimir una peça en 3D, un model CAD ha de convertir-se a un format que la impressora 3D sigui capaç d'interpretar. Això comença amb la conversió del model CAD en un arxiu (STL), conegut com a arxiu de llenguatge triangular estàndard. Cal fer esment que també hi ha altres tipus d'arxius d'impressió 3D acceptables com són OBJ o 3DP, però són menys comuns.

El STL utilitza triangles (polígons) per a descriure les superfícies d'un objecte, essencialment simplificant el model CAD. Una vegada generat l'arxiu STL, s'importa a un programa de tall, que talla el disseny en les capes que s'utilitzaran per a construir la peça.

El programa de tall pren l'arxiu STL i el converteix en codi G. Aquest és un llenguatge de programació de control numèric utilitzat en el CAM per a controlar màquines automatitzades com a màquines CNC i impressores 3D. El programa de tall també permet a l'operador de la impressora 3D definir els paràmetres de la impressora 3D especificant la ubicació del suport, l'altura de la capa i l'orientació de la peça.

Els programes de tall solen ser propis de cada marca d'impressora 3D de cada marca d'impressora 3D, encara que hi ha alguns programes de tall universals com Netfabb, Simplify3D i Slic3r, on en aquest projecte s'ha treballat amb Simplify3D.

3.2.2.1 Simplify3D

En aquest projecte final de màster el software professional que s'utilitza com a programa de tall és el Simplify3D com la marca de la impressora emprada suggereix. La Figura 22 mostra la interfície del programari.

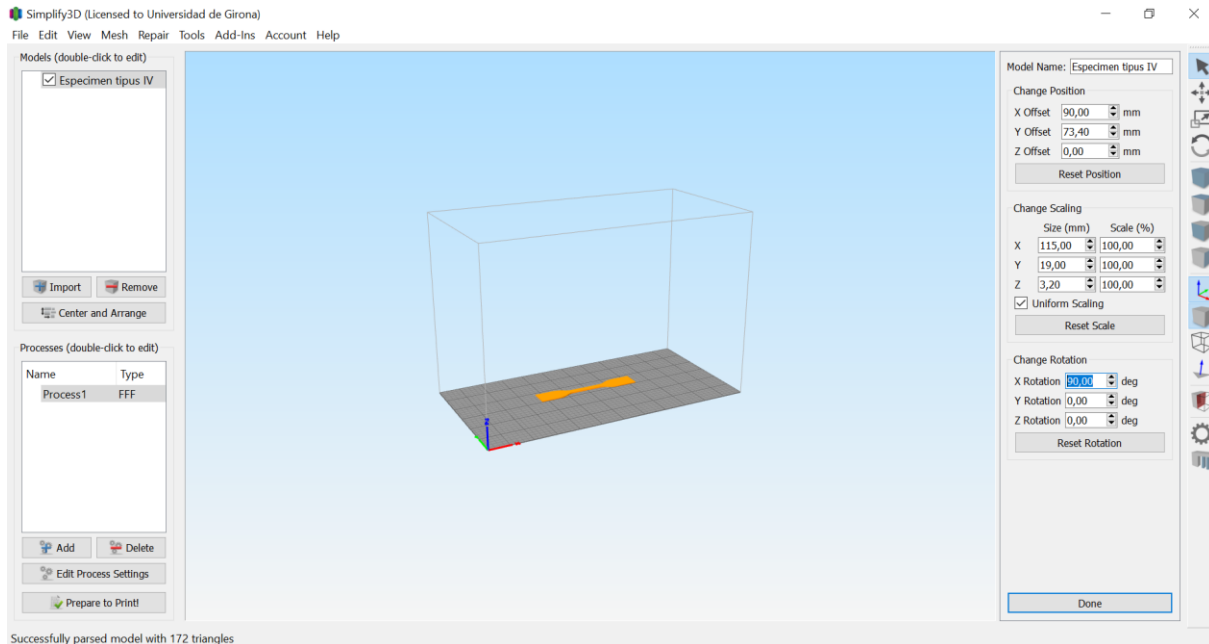


Figura 25 Interfície del programa de tall Simplify3D (Font: Elaboració pròpia).

Fent doble clic a la peça objecte es poden trobar diverses opcions d'aplicació de transformacions simples al model 3D. Aquestes serveixen per a adaptar el model a l'àrea d'impressió o ajustar-lo a la grandària desitjada. Opcions de transformació:

- **Posició (“*Change position*”)**: Permet canviar la posició de la peça a la base on el zero està referenciat en l'eix de coordenades. Altrament, permet tornar a la posició inicial mitjançant el boto “Reset”.
- **Escalat: (“*Change Scaling*”)**: Permet escalar la grandària de la peça modificant el seu model 3D. En obrir aquesta icona es desplega el menú on es permet aplicar un factor de multiplicació escalat. Aquest redimensionament pot realitzar-se proporcional a l'objecte inicial o de manera lliure desactivant “*Uniform Scale”. També podem desfer els canvis amb “Reset”.
- **Rotació (“*Change Rotation*”)**: Permet girar el model en qualsevol dels 3 eixos. A més inclou l'opció de retornar els canvis que hàgim realitzat prement “Reset” .

Altrament es pot copiar la peça, seleccionant la peça en el quadre de comandament que es troba a la part superior esquerra de la pantalla, amb els comandaments Control+C Control+V.

A la Figura 26 es mostra la pantalla de la qual es modifiquen tots els paràmetres de procés per obtenir la peça en qüestió segons especificacions.

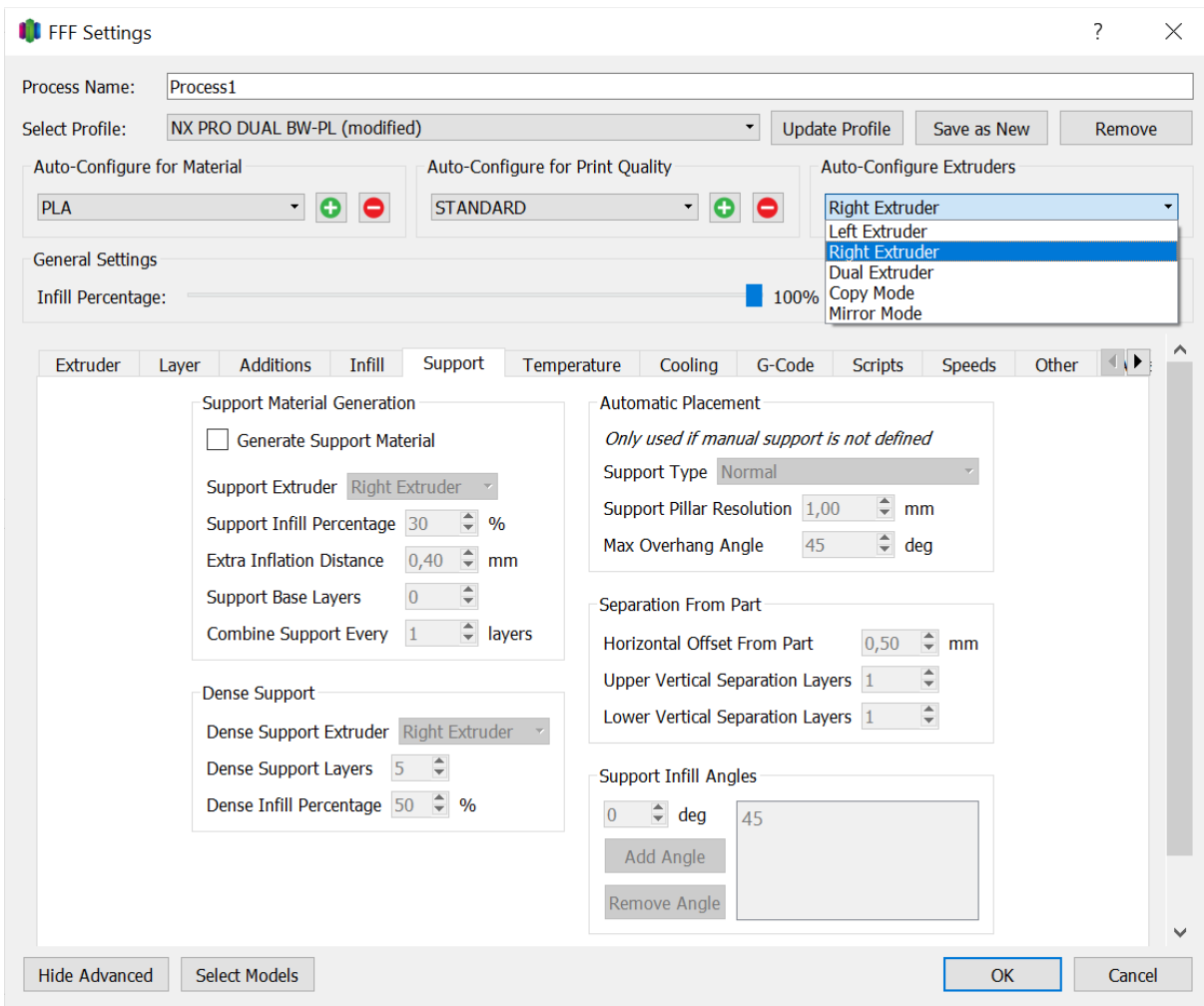


Figura 26 Configuració de la pantalla de procés. (Font: Elaboració pròpia).

En aquesta pestanya es poden configurar els paràmetres de procés que definiran que la impressió sigui de millor o pitjor qualitat. En primer lloc es pot observar que a la part superior de la pantalla es pot escollir el material, la qualitat d'impressió que pot ser *Fast*, *Standard* o *High* on es diferencien per la resolució de la peça i la velocitat d'impressió. Per exemple l'opció de fast seria una impressió més ràpida però amb una resolució més baixa. Altrament, es pot seleccionar quin mode d'impressió es desitja.

- Left Extruder: Només l'extrusor de filament.
- Right Extruder: Només l'extrusor de pèl·let.
- Dual Extruder: Treballa amb els dos extrusor simultàniament fent dos peces o la mateixa.
- Copy Mode: Crear una replica exacte del objecte.

- **Mirror Mode:** Aquesta opció crea una figura mirall de la figura inicial, es pot realitzar en qualsevol dels tres eixos

D'altre banda en la part inferior de la pestanya es poden determinar característiques del procés. No obstant, s'expliquen els mínims recomanables (o imprescindibles), per a poder començar a treballar amb la nostra impressora recentment configurada, o almenys, els que s'han utilitzat en el projecte.

- **Pestanya EXTRUSOR (“Extruder”)**

- Llistat d'extrusors: Agregarem 1 o diversos extrusors, segons la nostra mecànica.
- Diàmetre del filtre: Paràmetre imprescindible, el normal és 0.4mm.
- Multiplicador d'extrusió: Útil per a calibrar el nostre flux de plàstic i corregir els possibles errors el diàmetre del filament (toleràncies).
- Retracció: Imprescindible si la teva mecànica utilitza extrusor Bowden.

- **Pestanya CAPA (“Layer”)**

- Altura de capa primària: Defineix la qualitat de les nostres peces, i augmenta considerablement el temps d'impressió.
- Capes sòlides superiors: Indica les capes sòlides a efectuar en la part superior del model.
- Capes de fons sòlides: Indica les capes sòlides a efectuar en la base del model.
- Cobertes de contorn/perímetre: Indica el gruix en *cadas de la superfície del model (mínim recomanable 2).

- **Pestanya FARCIT (“Infill”)**

- Angle de farciment intern: Defineix l'orientació del farciment del model internament.
- Angle de farciment extern : Defineix l'orientació del farciment del model externament.

- **Pestanya SUPORT (“Supports”)**

Aquests pestanya s'utilitza per peces amb alçades per tal d'evitar que caigui. A continuació, s'expliquen els paràmetres de suports estructurals que es mostren a la Figura 27.

Support Material Generation

Generate Support Material

Support Extruder: Right Extruder

Support Infill Percentage: 15 %

Extra Inflation Distance: 0,00 mm

Support Base Layers: 3

Combine Support Every: 1 layers

Dense Support

Dense Support Extruder: Right Extruder

Dense Support Layers: 0

Dense Infill Percentage: 70 %

Automatic Placement

Only used if manual support is not defined

Support Type: Normal

Support Pillar Resolution: 4,00 mm

Max Overhang Angle: 45 deg

Separation From Part

Horizontal Offset From Part: 0,30 mm

Upper Vertical Separation Layers: 1

Lower Vertical Separation Layers: 1

Support Infill Angles

0 deg

Add Angle

Remove Angle

Figura 27 Pestanya suport (Font: Elaboració pròpia).

- **Generació de material de suport**

- Extrusor de suport: Extrusor que imprimirà el material de suport.
- Percentatge de farciment: Percentatge de farciment del suport a crear. És recomanable deixar valors entre 20% i 40%.
- Distància d'inflació addicional: Quantitat de suport generat en el pla XY.
- Capa base per a suport: Nombre de capes pròximes a la peça que usaran el percentatge de farciment.
- Combinar suport cada: Selecciona cada quantes capes imprimeix material de suport.

- **Suport dens**

- Extrusor suport dens: Extrusor que imprimirà el material de suport dens.
- Capes de suport dens: Nombre de capes pròximes a l'objecte que s'imprimiran amb el percentatge de farciment dens.
- Percentatge de farciment dens: Percentatge de farciment dens en les capes superiors mes pròximes a l'objecte. Molt útil a l'hora d'imprimir amb filaments solubles PVA/HIPS, incrementant la

densitat en les capes de contacte amb la peça (recomanable 60% o 70% per a capes en contacte directe).

- **Col·locació automàtica**

- Tipus de suport: Tipus de suport desitjat (normal o des de plataforma solament).
- Resolució de pilar de suport: Grandària dels pilars o columnes generades. Per defecte és 4mm. És probable que per a peces més petites sigui necessari reduir-los.
- Angle màxim de penjoll: És l'angle màxim permès per la teva impressora. Si s'ha realitzat el test d'inclinació que indica prèviament et serà molt útil per a configurar aquest paràmetre.

- **Separació de la peça**

- Offset horitzontal de la part: Distància en el pla X-Y a la qual es realitzarà el suport.
- Capes de separació verticals superiors: Distància en el pla Z a la qual es realitzarà el suport en la part superior. Si utilitzes PVA / HIPS és probable que ho desitgis configurar a 0.
- Capes de separació verticals inferiors: Útil per a imprimir una peça amb diversos processos amb suports, en quedar un espai entre dues capes, pots emplenar-lo amb aquest paràmetre.

- **Angles d'ompliment del suport**

- Agregar angle: Afegeix l'angle de farciment del suport.
- Llevar angle: Elimina l'angle de farciment del suport.

Tot i així, Simplify3D també ens ofereix la possibilitat d'agregar o eliminar manualment les ubicacions de material de suport existents. Això significa que si una determinada àrea no precisa de suports, podem eliminar-los i estalviar temps d'impressió, temps de processament en evitar netejar aquests suports posteriorment i material.

- **Pestanya TEMPERATURA (“Temperature”)**

Controlador *Primary Extruder*: Configurarem aquí la temperatura de l'extrusor, depenent del material que anem a utilitzar.

Si utilitzem una plataforma calenta haurem d'afegir un segon controlador per a aquesta. Per a això pressionarem el botó Afegir controlador de temperatura, i en tipus de controlador de temperatura seleccionarem l'opció Plataforma calenta. Una vegada creat hem de configurar la temperatura del llit.

- **Pestanya REFREDAMENT (“Cooling”)**

Aquí podem controlar el ventilador de capa, per a refrigerar el filament en cas necessari. Això s'efectua generant punts de referència amb l'opció Afegir punt de referència.

- **Pestanya VELOCITATS (“Speed”)**

En aquesta pestanya podem modificar totes les velocitats de la nostra impressora. Les actuals per defecte funcionen correctament, però és possible que es requereixi efectuar alguna modificació per a impressions més tècniques.

3.2.3. Impressió

Generació de capes perquè un cop sumades tinguem la proveta normalitzada ASTM D638 tipus IV i la ASTM D790 per la posterior caracterització d'aquestes. Cal recordar que la tecnologia de impressió 3D FDM es comenta anteriorment.

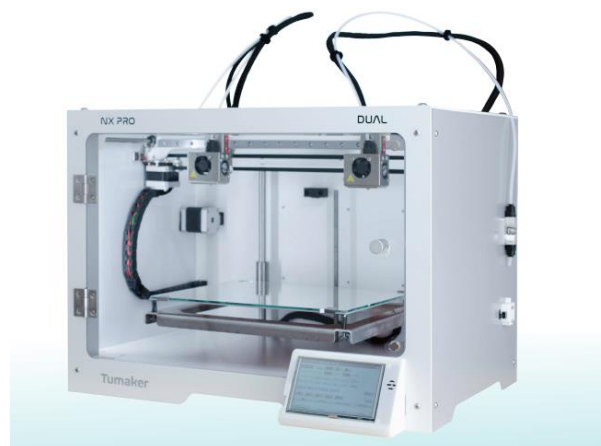


Figura 28 Impressora 3D model NX PRO DUAL (Font: MANUAL NX PRO DUAL, n.d.)

En aquest cas cal comentar que el volum de construcció de la impressora 3D NX PRO DUAL és de:

Taula 4 Limitacions de construcció de la impressora. (Font: Elaboració pròpia).

Eix	Magnitud [mm]
X	300
Y	170
Z	200

A més a més és de vital importància respectar els materials que accepta la impressora en qüestió com són: ABS, ASA, NYLON, PET-G, PLA, PP, XT-CF20, TPU, PLA-3D870, PVA.

3.2.4. Eliminació de les impressions

En algunes tecnologies d'impressió 3D, la retirada de la impressió és tan senzilla com separar la peça impresa de la plataforma de construcció, com és el cas. En el cas d'altres mètodes d'impressió 3D més industrials, la retirada d'una impressió és un procés altament tècnic que implica l'extracció precisa de la impressió, ja que la peça es troba en el material de construcció o està subjecta a la placa de construcció. Aquests mètodes solen requerir també procediments d'extracció estrictes i operadors de màquines altament qualificats, juntament amb equips de seguretat i entorns controlats.

3.2.5. Post processament

Els procediments de post processament també varien segons la tecnologia d'impressió. Algunes tecnologies requereixen que el component es curi sota radiació UV abans de la seva manipulació mentre que unes altres permeten que les peces es manipulin immediatament. En el cas de les tecnologies que utilitzen suport, aquest també s'elimina en la fase de post processament. En aquest cas no requereix post processament.

3.3 Caracterització dels materials compostos

3.3.1 Densitat dels materials

Aquest assaig determinar la densitat d'un sòlid o d'un líquid, en aquest cas un sòlid, amb una balança ACS 220-4 de la marca Kern (Balingen, Alemanya) amb un error de ± 1 mg.

Per a realitzar aquest assaig en primer lloc es condicionen les mostres en una línia de buit durant dues hores, per tal d'extreure la humitat de les provetes sense afectar les propietats del PLA i com a conseqüència aportin resultats erronis. Finalment, es treuen les provetes de la cambra i pesen a la balança (m). Cal comentar que el volum de les peces es conegut, ja que es prenen les mides físicament. Aquest el denominarem volum real (V_R). Per les provetes de flexió al ser una estructura rectangular:

$$V_R = a \cdot p \cdot h \text{ (Eq.1)}$$

On (a) és l'amplada de la proveta, (p) és la profunditat i (h) és l'alçada d'aquesta. En canvi per les provetes de tracció, a causa de la seva geometria és considera el volum extret del programari SolidWorks.

A partir de la densitat del material, coneguda, i el pes dels sòlids s'obté el volum com expressa la següent equació:

$$V_A = \frac{m}{\rho_s} \text{ (Eq.2)}$$

Essent, aquest el volum aparent de l'estructura. A partir del volum real i l'aparent es calcula el volum buit en la mostra com:

$$V_B = V_R - V_A \text{ (Eq.3)}$$

A partir de la volum buit, s'obté el percentatge de farciment aparent en les mostres impreses com expressa la següent equació:

$$\rho_A = \left(1 - \frac{V_R - V_A}{V_A}\right) * 100 \text{ (Eq.4)}$$

3.3.2 Assaig a tracció

Un dels assajos mecànics esforç-deformació més comú és el realitzat a tracció, el qual pot ser utilitzat per a determinar diverses propietats dels materials. Aquest s'ha realitzat amb la màquina Universal d'assajos (DTC-10, IDM test (Sant Sebastià, Espanya)) que mesura la resistència d'un material amb una força estàtica o aplicada lentament. Per aquesta raó cal tindre en compte que els assajos es poden realitzar a diferents temperatures i velocitats de deformació.



Figura 29 Màquina Universal d'assajos mecànics. (Font: Elaboració pròpia).

L'assaig a tracció es realitza amb provetes normalitzades impreses amb 3D. Tanmateix, cal fer esment que existeixen diferents normes per a realitzar l'assaig de tracció com són: DIN 53455, ISO/DP 527, ASTM. Tot i que, en aquest treball es segueix la ASTM D638.

Altrament, un fet a destacar és que la força necessària per a deformar les provetes depèn, entre d'altres paràmetres, de les seves dimensions, dels seus punts de recolzament i de la distància de les mordasses. Per tant, no s'expressa la força (N), sinó l'esforç nominal (MPa). A continuació, es defineixen els conceptes en els que es centra l'assaig a tracció realitzat en aquest projecte.

- Mòdul d'elasticitat o Mòdul de Young (E_t): és la constant que correlaciona la tensió i la deformació, dins de la regió elàstica d'un diagrama esforç-deformació (veure Figura 31). A més a més, quantifica les tensions difícilment mesurables a partir de les deformacions les quals poden mesurar-se sense excessiva dificultat.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ (Eq.5)}$$

- Càrrega de trencament o resistència a tracció (σ_t): (*Tensile strength*) càrrega màxima la qual el material és capaç de suportar en la prova tensió-deformació en una proveta portada a fractura.
- La deformació o allargament unitari (ϵ_t): referit a una magnitud mesurada L, es determinarà mitjançant el quocient entre la longitud allargada (ΔL) i la mesura inicial (L_0).

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \text{ (Eq.6)}$$

En iniciar-se l'assaig, el material es deforma elàsticament; això significa que si la càrrega s'elimina, la mostra recupera la seva longitud inicial. El material sobrepassa el seu límit elàstic quan la càrrega és de magnitud suficient per a iniciar una deformació plàstica, és a dir la mostra no recupera la seva longitud inicial si s'elimina la càrrega aplicada. L'esforç aconseguix el seu màxim en el valor de resistència màxima a la tensió. En aquest valor d'esforç, es forma en la proveta una estricció o coll, la qual és una reducció localitzada en l'àrea de la secció transversal, en la qual es concentra tot l'allargament posterior. Una vegada format aquest coll, l'esforç disminueix en augmentar la deformació i continua disminuint fins que la proveta es trenca.

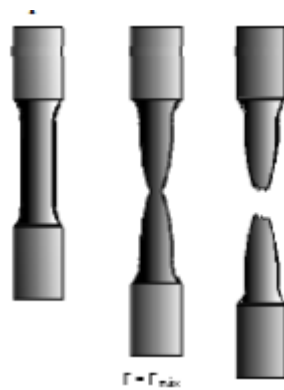


Figura 30 La forma de la proveta al inici, al moment d'arribar a la càrrega màxima i després de la ruptura. (Font: <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>)

Amb els resultats de l'elongació de la proveta, es pot gràfica una corba de càrrega vs allargament, que generalment es registren com a valors d'esforç i deformació unitaris, i són independents de la geometria de la proveta (veure Figura 30).

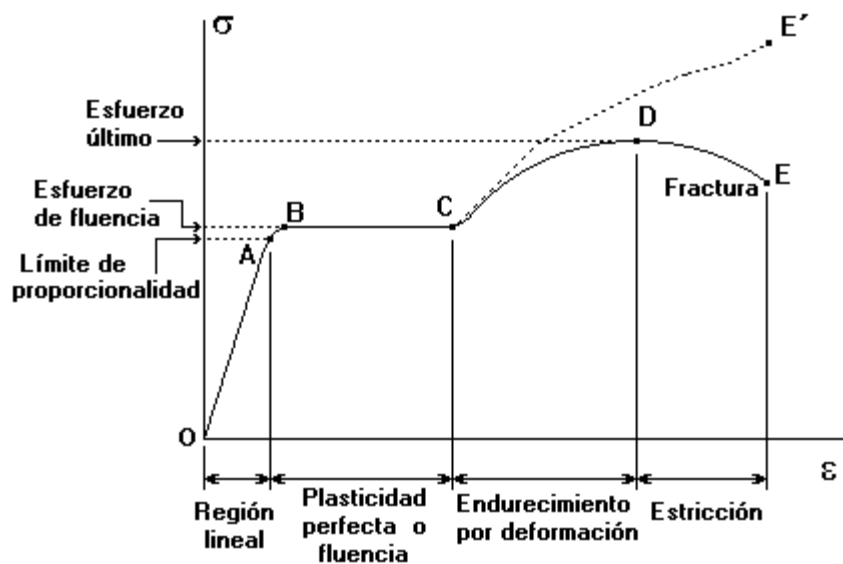


Figura 31 Diagrama de ruptura per tracció. (Font: <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>)

En aquest cas per calcular els conceptes en els que es centra l'assaig a tracció, comentats anteriorment, es segueix la següent metodologia:

- Preparació de la màquina universal col·locant les mordasses a una distància de 65mm entre elles.
- Caracterització de totes les proves a assajar, ja que el monitor sol·licita el gruix i amplada per proveta a assajar.

Per ser més precisos s'agafen diverses mesures i es fa la mitjana, ja que la proveta pot tindre irregularitats com per exemple no tindre un gruix constant.

- S'introdueix la proveta a la màquina
- Es fixen les mordasses
- S'inicia el programa d'assaig.

Durant l'assaig s'obté un corba com la explicada anteriorment a la Figura 31 en la qual es pot apreciar una zona elàstica i una zona plàstica on el material es deforma fins arribar al punt de trencament. Cal fer esment que les mordasses estiren de forma continua i controlada amb una velocitat de 2mm/min.

No obstant, el mòdul de Young és un càlcul que el mateix programa realitzar. En aquest cas no es necessari l'ús de l'extensòmetre, model Walter+baia (Löhningen, Suïssa), ni realitzar l'assaig entre els valors 0,05 i 0,25% de deformació, ja que les provetes a caracteritzar són espècimen tipus IV. Tot i així el valor que s'obté és la pendent que relaciona l'esforç respecte la deformació.

3.3.3 Assaig a flexió

Aquest assaig es va realitzar amb la màquina universal d'assajos (DTC-10, IDM test (Sant Sebastià, Espanya)) on la metodologia aplicada segueix la norma de determinació de les propietats a flexió de plàstics d'injecció UNE-EN-ISO 178.

L'assaig a flexió com es mostra a la Figura 32 consisteix en sotmetre una proveta de secció rectangular, suportada pels extrems, a una força centrada. Com a conseqüència durant la flexió les forces que actuen en el sòlid tendeixen a treballar a tracció en la part central i a compressió en la part restant.

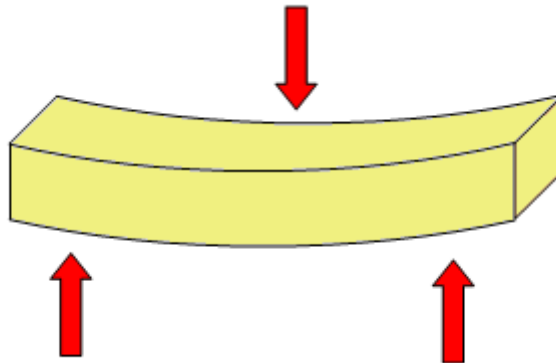


Figura 32 Assaig a flexió. (Font: <https://www.picuino.com/es/estructuras-esfuerzos.html>)

Amb aquest assaig podem extreure diferents paràmetres com:

- La resistència a flexió (σ_F) s'expressa segons l'equació:

$$\sigma_F = \frac{3 \times F \times L}{2 \times w \times h^2} \text{ (Eq.7)}$$

On σ_F és la resistència màxima a flexió, "F" la força màxima exercida a la proveta perquè trenqui, "L" la distància entre els dos punts de recolzament de la proveta i "w" i "h" son l'ample i l'espessor de las provetes.

- El mòdul elàstic (E_F) es calcula en la regió elàstica segons l'equació:

$$E_F = \frac{L^3 \times F}{4 \times w \times h^3 \times \delta} \quad (\text{Eq.8})$$

On E_F es el mòdul elàstic i δ la fletxa de la proveta al aplicar-se una força F al punt mig.

Cal remarcar que abans de començar l'assaig s'han introduït les paràmetres i les dimensions de les provetes al programa. La distància entre punts de recolzament és constant i amb un valor de 526mm. Altrament la velocitat de deformació és constant i amb un valor de 2 mm/min. Durant l'assaig el programa ens relaciona la força en funció de l'increment de deflexió mitjançant una gràfica i també la taula de valors.

3.3.3.1 Simulació amb **SolidWorks®**

SolidWorks és un software CAD 2D-3D que permet realitzar una modelització mecànica assistida per ordinador. Per realitzar les simulacions en aquest projecte s'ha fet servir el complement *Simulation* que a part de dissenyar i modelitzar, en aquest cas els espècimens bicomponents amb les dues possibles situacions d'assaig, permet simular unes condicions virtuals de càrrega a l'objecte, i per tant estudiar el seu comportament en condicions semblants a la realitat i en aquest cas contrastar els resultats obtinguts en l'assaig experimental.

El complement *Simulation* incorpora l'assaig estàtic que es basa en la resolució de la fórmula de Von Mises. Per tal de poder realitzar la simulació, es necessari que prèviament es modelitzi l'objecte, en aquest cas el material bicomponent. Un cop s'ha obtingut l'objecte es defineixen les restriccions del objecte, és a dir, definir l'àrea de subjecció i quants graus de llibertat té. A continuació, es determinar la força externa que serà aplicada en el cos durant la simulació. Per últim, avanç de córrer la simulació, és necessari realitzar el mallat en petits elements de tot el volum, és a dir diferencials de volum, on cada diferencial de volum del mallat es tracta d'un volum finit individual que s'estudia i relaciona amb la resta de volums per obtenir el resultat final del comportament de la proveta respecte la càrrega aplicada.. En aquest treball es simularan dues provetes bicomponents amb les seves respectives configuracions, PLA (0-BAB) i PLA (0-BAD).

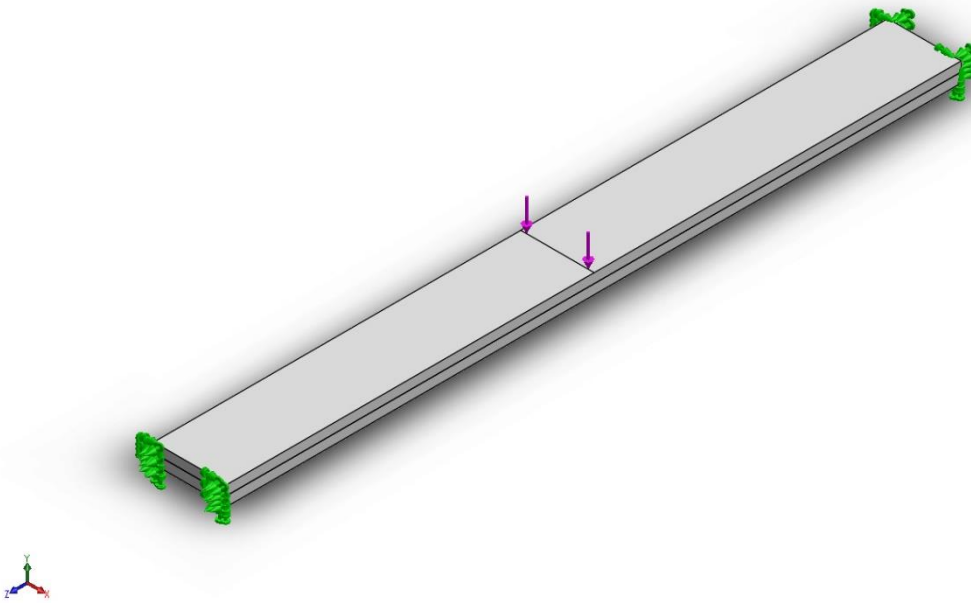


Figura 33 Modelització del material bicomponent. (Font: Elaboració pròpia).

3.3.4 Assaig d'impacte

En aquest assaig es sotmeten provetes d'impressió 3D normalitzades segons la norma de determinació de les propietats enfront l'assaig del pèndol Charpy UNE-EN-ISO 179. Aquest assaig serveix per a calcular la resiliència d'un material, en concret l'oposició d'un material a trencar-se d'un cop. Per a realitzar l'assaig de tenacitat al impacte, s'utilitza una màquina de pèndol de Charpy específica per a plàstics amb el martell model Resil 5,5 Ceast (Pianezza, Itàlia).



Figura 34 Martell model Resil 5,5 Ceast (Pianezza, Itàlia). (Font: Elaboració pròpia).

En primer lloc, es col·loca el martell en l'extrem a uns 150° aproximadament, aquesta posició es configura com a l'inicial com es pot veure en la Figura 34. En aquest instant tenim una

energia inicial, al deixar caure el martell com a resultat el material absorbeix l'energia on provoca la formació de l'esquerda i la propagació de la fractura, finalment el material s'acaba trencant. Si la proveta es trenca, el martell arriba a una nova alçada, inferior a l'inicial, i per tant la diferència d'energia serà la que ens mostra l'equip.

Cal remarcar que l'assaig s'ha repetit cinc vegades, assajant cinc provetes sense entalla per cada orientació d'impressió amb la finalitat d'obtenir un valor promig amb baixa desviació.

3.3.5 Calorimetria diferencial de rastreig (DSC)

La calorimetria diferencial de rastreig (DSC) és la tècnica d'anàlisi tèrmica utilitzada més freqüentment, la qual s'utilitza per analitzar i estudiar polímers com termoplàstics, termoestables o elastòmers. Aquesta tècnica mesura els canvis d'entalpia de les mostres deguts a canvis en les seves propietats físiques i químiques en funció de la temperatura o el temps.



Figura 35 DSC. (Font: <https://materials.waters.com/es/calorimetros-de-escaneo-diferencial/>)

Aquesta tècnica mesura la calor absorbida o despresada per una mostra quan aquesta es sotmet a un programa de temperatures. La DSC és una tècnica diferencial, el flux de calor es calcula a partir de la diferència de temperatura de la mostra respecte a una referència. Inicialment tenim dos recipients, la mostra encapsulada i la referència (generalment una càpsula buida) es col·loquen sobre el sensor, situat dins d'un forn amb control molt precís de la temperatura.

Es crea un programa de temperatures en funció del procés a monitorar (fusió, cristallització, transició vítria, curat,...). En el cas d'un programa dinàmic, cal especificar la temperatura inicial, la temperatura final i la velocitat a la que es vol fer l'escalfament o refredament, generalment (10°C/ minut). En el cas d'un programa isoterm, cal especificar la temperatura de la isoterma i la seva duració. A més a més, la computadora s'assegura totalment que la velocitat d'escalfament sigui exactament la mateixa al llarg de tot l'experiment. Els dos

platerets són diferents. Un conté mostra i l'altre no. La mostra polimèrica implica que hi ha material extra en el platet de la mostra. Com a conseqüència, tenir material extra significa que farà falta més energia per aconseguir que la temperatura del platet de la mostra, augmenti a la mateixa velocitat que la del platet de referència. Per tant, el que es fa a la DSC, és mesurar quanta energia addicional ha de subministrar-se.

En la gràfica resultant de l'anàlisi es representa el flux de calor (mW) absorbit o després per la mostra en funció de la temperatura o el temps.

Cal comentar que el principi bàsic subjacent a aquesta tècnica és que, quan la mostra experimenta una transformació física tal com una transició de fase, es necessitarà que flueixi més (o menys) calor a la mostra que a la referència per a mantenir totes dues a la mateixa temperatura. El que flueixi més o menys calor a la mostra depèn de si el procés és exotèrmic o endotèrmic. Els efectes sobre o sota una corba DSC poden ser utilitzats per a calcular entalpies de transicions. Aquest càlcul es realitza integrant el pic corresponent a una transició donada. Així, l'entalpia de la transició pot ser expressada per la següent equació:

$$\Delta H = KA \text{ (Eq.9)}$$

on ΔH és la variació entàlpica de la transició, K és la constant calorimètrica i A és l'àrea sota la corba. La constant calorimètrica variarà d'instrument a instrument, i pot ser determinada analitzant una mostra ben caracteritzada amb entalpies de transició conegudes.

3.3.6 Difracció de raig X

Aquest assaig es va realitzar amb un difractòmetre de Raigs X Bruker D8 QUEST ECO (Alemanya) que disposen els serveis de recerca de la Universitat de Girona en les seves instal·lacions.

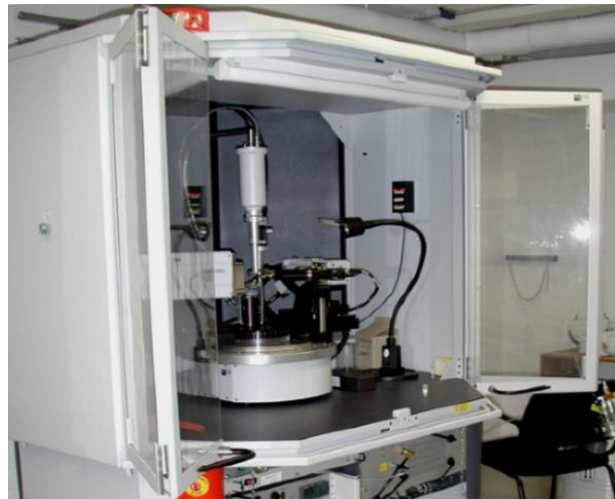


Figura 36 Difractòmetre de Raig X Bruker D8 QUEST ECO. (Font: <https://www.udg.edu/ca/str/aparells-tecniques-disponibles/analisi-quimica-i-estructural/difraccio-de-raigs-x-de-monocristall-xrd>)

Aquest assaig es realitzar per a la determinació estructural a partir d'un cristall. És a dir, s'obté la imatge tridimensional de la molècula o molècules que formen el cristall, podent-se establir clarament quina és la seva estructura, les distàncies i angles d'enllaç, configuracions, enllaços per pont d'hidrogen, etc. A més a més, a diferència aquest assaig respecte el microscopi òptic permet detectar i caracteritzar la textura.

3.3.7 Microscòpia òptic

Aquest assaig es va realitzar amb un microscopi digital ZEISS JENAVERT, (40-1000X) que disposen els serveis de recerca de la Universitat de Girona en les seves instal·lacions. Aquest consta amb sistemes d'il·luminació amb llum blanca episcòpica i diascòpica, la qual permet treballar en camp clar, camp fosc, contrast de fases i polarització.



Figura 37 Microscopi òptic digital USB (40-1000X). (Font: Elaboració pròpia)

Aquest assaig es realitzar per estudiar espècimens prims, ja que la seva profunditat de camp és molt limitada. En general, s'utilitzen per a examinar cultius, preparacions triturades o una làmina molt fina d'un material qualsevol, com és el cas que s'escau. Normalment depèn de la llum que travessi la mostra des de baix i usualment són necessàries tècniques especials per a augmentar el contrast de la imatge.

4 RESULTATS I DISCUSSIONS

Al llarg del següent capítol s'exposaran els resultats de la caracterització dels materials obtinguts amb una metodologia experimental. A continuació es mostren les nomenclatures utilitzades en aquests apartats.

- PLA(45-P), PLA(0-P), PLA(90-P) i PLA(0/90-P)
- PLA(45-F), PLA(0-F), PLA(90-F) i PLA(0/90-F)

Les formulacions es denominen en funció de l'orientació d'impressió del PLA, on aquestes són de 45, 0, 90 i 0/90 graus, i pel mode d'impressió utilitzades, pèl·lets (P) o filament (F) com s'esmenta en l'apartat de materials. Cal comentar que per ambdós mètodes d'impressió els següents paràmetres han sigut els mateixos:

- Velocitat: 27mm/s
- Temperatura del llit : 55°C
- Temperatura de sortida: 200°C
- Temperatura d'entrada (pèl·let): 160°C
- Percentatge de farciment: 100%
- Velocitat de refredament : 90%
- Altura de la capa 0,2 mm
- Diàmetre del filtre: 0,8mm

A més a més, per l'assaig a flexió s'afegeix la següent nomenclatura:

- PLA(0M-F)

On en aquesta els paràmetres d'impressió són els mateixos que els esmentats anteriorment excepte el diàmetre del filtre que és de 0,4mm.

4.1 Estudi de la caracterització dels materials compostos

4.1.1 Densitats dels materials

Es va analitzar l'efecte d'imprimir PLA mitjançant la deposició de la filament fos o bé per extrusió de pèl-let. Un dels principals desavantatges que presenta el PLA imprès amb filament respecte el pèl-let és la seva menor porositat entre capes. La Taula 5 mostra els percentatges de farciment experimentals de les estructures a tracció i flexió segons el mitjà d'impressió.

Taula 5 Percentatge de farciment segons el mitjà d'impressió 3D. (Font: Elaboració pròpia).

Material	Percentatge farciment tracció [%]	Percentatge farciment flexió [%]
PLA (45-F)	45%	42%
PLA (45-P)	100%	94%
PLA(0-F)	62%	49%
PLA(0-P)	100%	100%
PLA(0M-F)	-	62%
PLA (90-F)	75%	65%
PLA (90-P)	100%	92%
PLA(0/90-F)	47%	34%
PLA(0/90-P)	100%	97%

Els percentatges de farciment experimentals es van obtenir mitjançant una balança i calculant el volum desplaçat amb la proveta. El PLA verge té una densitat de $1,24 \text{ g}\cdot\text{ml}^{-1}$. En calcular el volum aparent de la peça i comparar-lo amb el real, s'observa que pels espècimens fabricats mitjançant la deposició de filament fos, contingut de material en les estructures és menor a l'esperat, ja que en el programari el percentatge de farciment introduït era del 100% per totes les provetes. Es pot exemplificar amb el cas del PLA(0/90-F) i PLA(45-F) on els percentatges són els més baixos de les estructures. Les mostres estudiades mostren una varietat de resultats sense una tendència clara. A més a més, cal remarcar que les provetes de pèl-let aparentment són contínues, és a dir, no tenen cap anomalia. En canvi, les provetes de filament aparentment és veuen obertes, és a dir, una adhesió defectuosa de la interfície. No obstant, el perímetre de les mostres té una orientació de 0° i sembla ser que amb les provetes de 0° i 0/90 permet millor adhesió i el percentatge de farciment incrementa fins el 100%.

D'altra banda, es pot observar com el diàmetre de filtre és un paràmetre influent. Un clar exemple és el PLA (0M-F) on el diàmetre de filtre és de 0,4mm, igual que el programari, i el percentatge de farciment augmenta un 13% respecte el PLA (0-F), on el diàmetre de filtre

introduït en el programari es de 0,8mm com a la resta de mostres impreses. Tot i així, la superfície es mostra aparentment rugosa amb imperfeccions superficials, però en comparació al PLA(0-F) és més compacte.

Altrament, aquestes diferències en els resultats poden ser degudes a imperfeccions en els materials. Una d'elles és la porositat produïda per l'aparició de gasos durant el seu processat i per tant generant un espai buit en el material, el porus. L'altre pot ser la presència d'un petit percentatge d'humitat al material per no haver-se assecat bé. En ambdós casos, el pes o el volum de les provetes agafades no serien correctes, ja que en el pes inclouria aire o aigua. Tenint això en compte les provetes de filament tindrien més error, ja que el filament no s'ha assecat abans d'imprimir, i en canvi el pèl-let ha estat a la estufa a 60 graus.

4.1.2 Assaig a tracció

En aquest capítol s'estudia la influència de l'orientació d'impressió i el mode d'aquest, amb pèl-let o filament, sobre el comportament mecànic a tracció del PLA. A la Taula 6 es mostra els resultats obtinguts dels materials per la resistència a tracció (σ), la deformació (ϵ) i mòdul de Young (E). Cal remarcar que els valors extrets tenen certes variacions en el mateix material com a conseqüència de la qualitat i geometria de la proveta. Com a conseqüència, s'han extret cinc resultats del mateix material per tal d'obtenir la mitjana i desviació estàndard de cada assaig com es mostra a la Taula 6, d'aquesta manera l'error entre assajos amb igual velocitat de deformació és mínim.

Taula 6 Resultats de l'assaig a tracció (Font: Elaboració pròpia).

	σ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)
PLA	60,39 ± 1,5	3,22 ± 0,12	3784 ± 44
PLA (45-F)	6,4 ± 2,2	2,17 ± 0,26	744 ± 126
PLA (45-P)	40,4 ± 3,5	2,33 ± 0,09	2228 ± 242
PLA(0-F)	16,2 ± 3,0	2,85 ± 0,25	668 ± 485
PLA(0-P)	37,8 ± 3,5	1,95 ± 0,24	1055 ± 340
PLA (90-F)	4,8 ± 3,3	2,44 ± 0,98	324 ± 312
PLA (90-P)	37,6 ± 2,3	2,11 ± 0,07	2194 ± 160
PLA(0/90-F)	4,8 ± 2,1	3,12 ± 0,17	794 ± 277
PLA(0/90-P)	27,1 ± 0,5	1,57 ± 0,11	1578 ± 353

Les dades dels assajos van mostrar variacions entre els diferents conjunts de mostres fabricades mitjançant tant per a filament com per extrusió de pèl-let, inclús alguns conjunts van mostrar grans diferències internes respecte el PLA pur. Aquest efecte es pot relacionar

amb les característiques d'anisotropia. D'altra banda les reduccions de propietats mecàniques han estat diferent en funció del mitjà de fabricació de provetes. Una comparativa de la resistència mecànica d'aquests materials és mostrada en la Figura 38. En aquesta es pot observar com l'orientació de les capes provoca diferències significatives de la resistència mecànica en tot el rang de l'orientació d'impressió. Essent les orientacions de 45° i 0° , fabricades per extrusió de pèl·lets, els casos més similar al valor referència del PLA pur, el qual dona lloc a pèrdues de resistència mecànica del 33% i 37% respectivament. Els casos més significatius són dels espècimens fabricats mitjançant la deposició de filament, el qual dona lloc a pèrdues de resistència mecànica que van des del 73% al 92% per l'eix longitudinal a l'esforç i l'eix transversal a aquest. Aquesta diferència abrupta entre ambdós mitjans d'impressió pot ser relacionat a la feble unió entre capes o porositat entre aquestes. Un clar exemple de la literatura (Valerga et al., 2019; Wendt et al., 2016) és el post tractament de les provetes amb diclorometà, on els espècimens es deixarien en una cambra segellada un temps finit amb un recipient d'acetona obert, i per tant el vapor del químic fondria la superfície de les mostres i probablement ompliria els espais buits de la mostra fent que aquesta fos llisa i la resistència mecànica augmentes.

Altrament, les provetes fabricades mitjançant extrusió de pèl·lets provoquen un major increment de resistència mecànica a tracció (Figura 36), comparat amb les de deposició de filament. Aquest fet és bastant esperable, ja que les capes semblen presentar una millor adhesió interfacial. No obstant en el grup de provetes "pèl·let" els resultats han sigut inesperables, ja que la tendència hauria de ser com les de filament. En altres paraules, les provetes amb l'orientació a 0° haurien de donar els resultats més elevats, ja que és l'orientació en la que es produeix l'esforç de l'assaig. Per la mateixa raó, els espècimens amb l'orientació a 90° son les que reflecteixen els resultats amb més pèrdues de resistència mecànica, i les altres orientacions, és a dir, a 45° i $0/90^\circ$ millor resistència que les de 90° però inferior a les de 0° , tenint una diferència poc significativa entre elles.

Cal comentar que el nombre de perímetres d'una mostra també afecta a la resistència. Els perímetres són presents en cada capa i sempre s'alineen amb l'eix de càrrega. Per tant, les orientacions de capes 45° i 90° no estaven completes ja que el perímetre tenia una orientació a 0° .

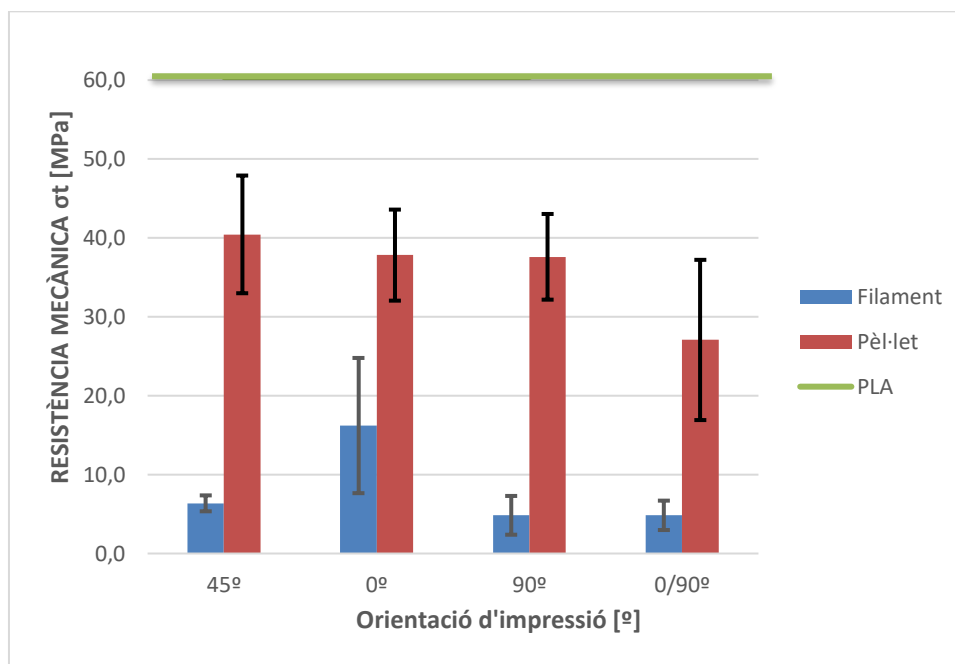


Figura 38 Resistència a la tracció σ_t segons l'orientació d'impressió. (Font: Elaboració pròpia).

El mòdul de Young (o mòdul a tracció), que expressa la rigidesa al començament d'un assaig de tracció, és a dir, durant el règim elàstic de l'assaig a tracció, s'incrementa o disminueix segons l'orientació d'impressió de les capes que formen l'espècimen tal i com podem observar a la Taula 6 i més clarament a la Figura 39. Probablement la causa per a aquest efecte podria ser relacionada al comportament dels filaments individuals de les provetes, quan aquestes últimes són sotmeses a tracció. La confirmació d'aquesta hipòtesi podria realitzar-se mitjançant l'observació microscòpica de conjunts de filaments durant l'aplicació de forces de tracció en diferents direccions. A més a més, es poden observar diferències segons si la impressió de la mostra es mitjançant filament o per extrusió de pèl·let. Altrament, es pot observar que tant per filament com per pèl·let el canvi d'orientació no comporta un decreixement lineal respecte el PLA pur. L'orientació en l'eix transversal i diagonal a l'assaig, per provetes fabricades mitjançant l'extrusió de pèl·lets, presenta les orientacions amb major resiliència amb pèrdues del 40% aproximadament respecte el PLA pur. En canvi, per les provetes fabricades mitjançant la deposició de filament s'obtenen pèrdues des del 80 % fins al 90% per l'orientació de 0/90° i 90°. En altres paraules, el PLA imprès amb pèl·let garanteix ser un material més rígid que per filament.

Cal afegir que com més elevat es el valor del mòdul de Young més àrea es té sota la corba on ens indica la resiliència d'un material, per tant, les provetes amb les capes orientades a 45° és el material que necessita més energia per deformat-se. A més a més, el mòdul de Young ajuda a predir com s'allarga la proveta.

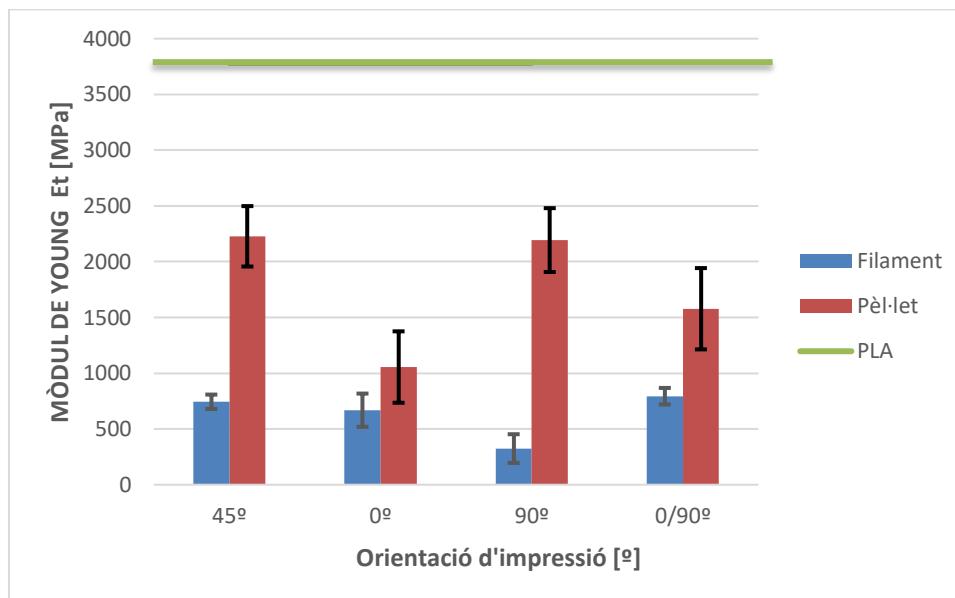


Figura 39 Mòdul de Young segons l'orientació d'impressió. (Font: Elaboració pròpia).

Per últim s'ha analitzat un altre factor important com és la capacitat de deformació d'aquests materials impresos en 3D, mostrada a la Figura. 24. Per a aquesta propietat es va observar també que totes dues vies per imprimir en 3D, filament o pèl·let, posseeixen un comportament ortotròpic, és a dir, el seu comportament en la direcció d'impressió és significativament diferent que el seu comportament en la direcció transversal a la direcció d'impressió. Per exemple, el PLA imprès per filament mostra una deformació de ruptura en direcció axial 18% major en comparació amb la direcció transversal ; i imprès per extrusió de pèl·let mostra una deformació de ruptura en direcció axial 8% inferior en comparació amb la direcció transversal, com es presenta en la Figura 40.

Com es pot observar en aquesta figura, per impressió 3D de pèl·let les orientacions amb una deformació màxima a ruptura sona 0/90° i 0° amb un 3,12% i 2,85% respectivament. No obstant, per impressió 3D amb filament la deformació màxima a ruptura es dur a terme per orientacions a 0/90° i 0° amb un 3,12% i 2,85% respectivament. Cal destacar l'increment experimentat per les impressions amb filament respecte l'extrusió de pèl·let. Les mostres impreses de filament és més deformable a comparació de les de pèl·let probablement perquè l'augment del volum lliure al voltant de les cadenes polimèriques per el grup de filament afavoreix la seva mobilitat fent que la seva deformabilitat sigui superior. Tot i això els resultats obtinguts són desfavorables, ja que obtenim resultats menors que el resultat teòric del PLA pur.

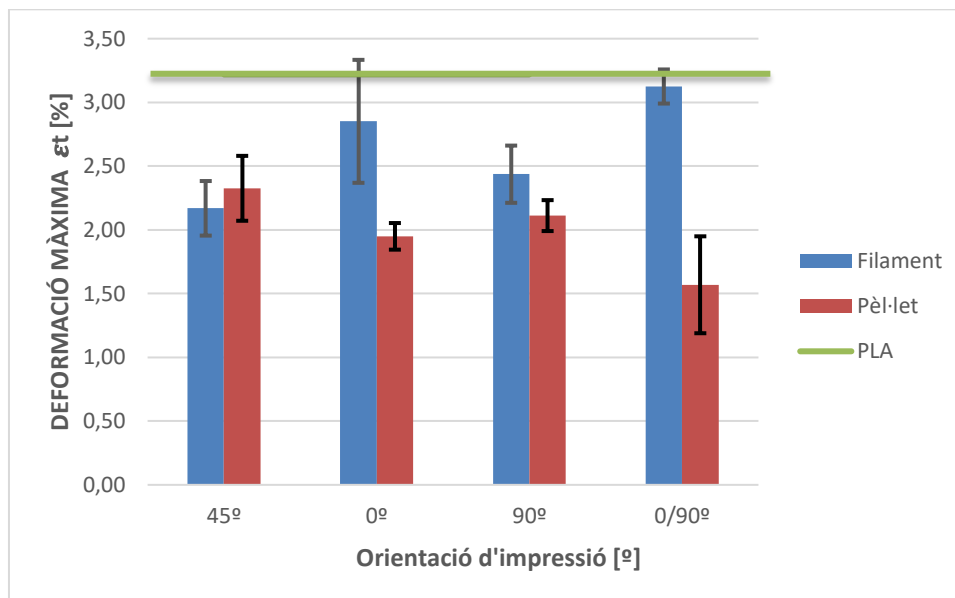


Figura 40 Deformació màxima en % segons l'orientació d'impressió. (Font: Elaboració pròpia).

4.1.3 Assaig a flexió

A la Taula 7 Resultats de l'assaig a flexió es mostren els resultats obtinguts de resistència, mòdul de Young i deformació dels assajos realitzats a flexió.

Taula 7 Resultats de l'assaig a flexió. (Font: Elaboració pròpia).

	σ_f (MPa)	ϵ_f (%)	E_f (MPa)
PLA	92,1 ± 1,9	4,35 ± 0,13	3348 ± 106
PLA (45-F)	19,1 ± 1,0	1,88 ± 0,22	1140 ± 65
PLA (45-P)	58,0 ± 7,5	1,91 ± 0,25	2880 ± 271
PLA(0-F)	36,9 ± 8,6	1,71 ± 0,48	2236 ± 149
PLA(0M-F)	36,6 ± 5,0	2,32 ± 0,21	2422 ± 215
PLA(0-P)	78,6 ± 5,7	2,07 ± 0,11	3664 ± 320
PLA (90-F)	11,9 ± 2,5	1,69 ± 0,23	796 ± 129
PLA (90-P)	48,0 ± 5,4	1,72 ± 0,12	2817 ± 286
PLA(0/90-F)	21,3 ± 1,9	1,44 ± 0,13	1507 ± 74
PLA(0/90-P)	72,9 ± 10,2	2,18 ± 0,38	3334 ± 365

L'assaig a flexió exerceix forces que actuen sobre un cos que tendeixen a induir una sol·licitació de tracció en una part de la seva secció transversal, i una sol·licitació de compressió en la secció restant, llavors el cos està sotmès a flexió. Com a resultat, la força aplicada produeix diferents càrregues: tracció i compressió. Per aquesta raó, les resistències a la flexió són majors que les resistències a la tracció perquè el mòdul de trencament mesura

la resistència màxima en la fibra exterior de la proveta. Això és d'esperar perquè durant la flexió, la mostra està sotmesa a esforços de compressió i de tracció com es comenta anteriorment.

Els valors són més alts per a l'orientació de 0° per ambdós mètodes d'impressió filament i pèl·let amb valors de 36,9 MPa i 78,9 MPa respectivament, la qual cosa coincideix amb les dades de tracció. Les orientacions de $0/90^\circ$ i 45° són les següents amb majors esforços, i l'orientació de 90° té el menor esforç 11,9 i 48,0 MPa . Per tant, el resultat de l'assaig de flexió de la Taula 7 mostra la mateixa tendència general que el resultat de l'assaig de tracció de la Taula 6. Una vegada més, igual que en l'assaig de tracció, les resistències a la flexió mesurades van ser molt menors que la resistència a la flexió del PLA (92,1MPa). Això es deu probablement al fet que les mostres de prototip ràpid tenen una feble unió entre capes o una porositat entre capes. Per la mateixa raó, com la unió entre capes per la impressió amb filament és mes feble que per pèl·lets obtenim valors inferiors.

Aquests resultats de resistència a flexió confirmen a més que l'orientació de les capes de les mostres de prototips ràpids contribueix a les propietats anisotròpiques. Aquesta causada probablement pel processament direccional dels laminatges 2D. La relació de resistència entre l'orientació més alta (0°) i la més baixa (90°) és 1,6 pel pèl·let i de fins a 3 vegades pel filament. En canvi, la relació de resistència entre l'orientació més alta (0°) i la segona més alta ($0/90^\circ$), per ambdós casos és 1,1.

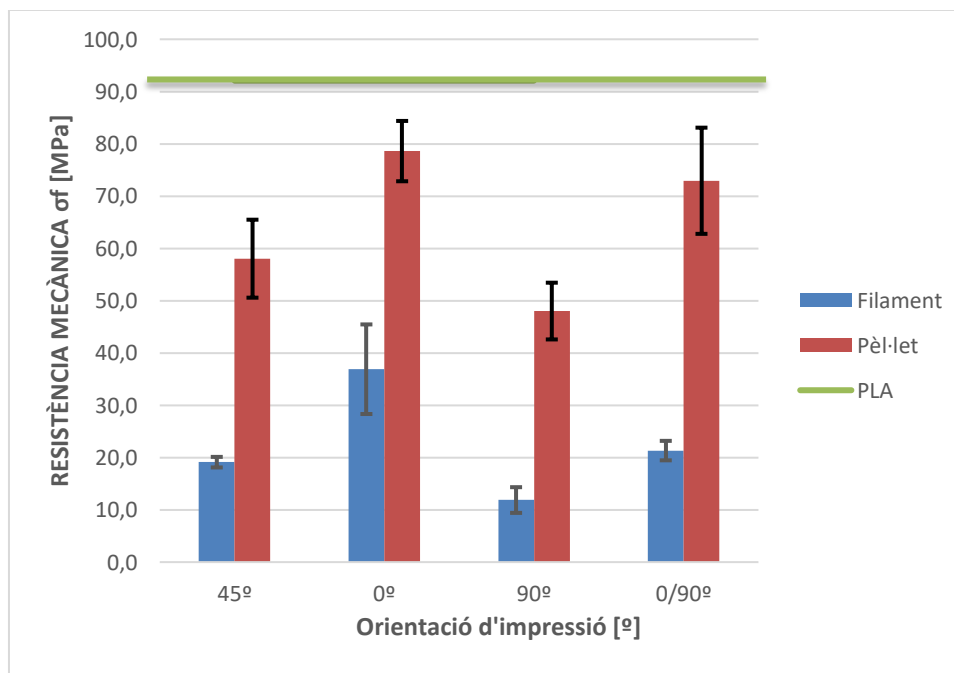


Figura 41 Resistència a la flexió (σ_F) segons l'orientació d'impressió. (Font: Elaboració pròpia).

A més a més a la Taula 8 es mostra el rendiment segons l'orientació de les capes i mètode d'impressió en relació a l'esforç a flexió en l'instant de ruptura de la mostra i la secció de la mostra.

Taula 8 Rendiment de les diferents formulacions amb relació a l'esforç a flexió i l'àrea de trencament sotmesa a l'assaig a flexió. (Font: Elaboració pròpia).

Material	Àrea flexió (A2) [cm2]	Àrea flexió PLA injecció (A1) [cm2]	σ_f^{FDM} [MPa]	σ_f^I [MPa]	A2/A1	$\sigma_f^{FDM}/\sigma_f^I$	Rendiment [%]
PLA(45-F)	0,26	0,42	19,1	92,1	0,6	4,8	13%
PLA(45-P)	0,42	0,42	58,0	92,1	1,0	1,6	63%
PLA(0-F)	0,28	0,42	36,9	92,1	0,7	2,5	26%
PLA(0-P)	0,50	0,42	78,6	92,1	1,2	1,2	100%
PLA(90-F)	0,30	0,42	11,9	92,1	0,7	7,8	9%
PLA(90-P)	0,41	0,42	48,0	92,1	1,0	1,9	50%
PLA(0/90-F)	0,25	0,42	21,3	92,1	0,6	4,3	14%
PLA(0/90-P)	0,41	0,42	72,9	92,1	1,0	1,3	78%
PLA(0M-F)	0,30	0,42	36,6	92,1	0,7	2,5	28%

En aquesta taula es pot observar com en pràcticament tots els casos segueixen les següents relacions:

$$A_2 < A_1 \text{ (Eq. 10)}$$

$$\sigma_f^I > \sigma_f^{FDM} \text{ (Eq. 11)}$$

On A_2 és la secció per on ha trencat la proveta en qüestió en l'assaig de flexió, A_1 és la secció d'una proveta d'injecció de PLA per l'assaig a flexió. Aquesta ha sigut calculada com la divisió del volum aparent (Eq.2) entre la llargada de la proveta, i el promig de les cinc provetes assajades és el valor per formulació. σ_f^I és tensió ultima en l'assaig a flexió per la proveta d'injecció de PLA, la qual és el valor referencia. σ_f^{FDM} és la tensió ultima per cada formulació comentades anteriorment. El cas ideal que s'esperava era el següent:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\sigma_f^I}{\sigma_f^{FDM}} \text{ (Eq. 12)}$$

En aquest cas podem observar com els espècimens fabricats mitjançant l'extrusor de pèl·lets tenen una correlació entre les seccions de ruptura i els esforços més ajustada que les provetes fabricades per filament. Aquest rendiment oscil·la del 50 fins al 100% per les mostres de 0°. En canvi per les mostres fabricades per filament podem observar que no segueix cap relació,

i com a conseqüent s'obtenen rendiments de fins el 9% com és el cas a 90° , que a la Figura 41 s'observa com és l'estructura amb la resistència mecànica més baixa.

A la Figura 42 es mostra el mòdul elàstic on es pot observar que segueix la mateixa tendència que en l'assaig a tracció. L'impacte de l'orientació d'impressió a 0° per extrusió es reflecteix en aconseguir el mòdul a flexió 0,3 GPa més alt que el PLA pur. Cal recordar que el mòdul elàstic està associat directament amb els canvis de longitud que experimenta un objecte, quan està sotmès a les accions de tensió de tracció, o de compressió. Aquest essent un bon indicatiu per corroborar el resultat de resistència mecànica. En aquest cas, els resultats obtinguts pel mòdul elàstic com els de càrregues de ruptura mostren clarament que la peça aconsegueix una major resistència mecànica, quan és fabricada en direcció longitudinal a l'eix de l'esforç, és a dir, per l'orientació d'impressió de 0° . Aquest resultat coincideix perfectament amb els esperats, ja que per al cas d'espècimens fabricats mitjançant la deposició de filament fos, la falta d'adherència entre les capes comporta a la ruptura. Per aquesta raó, es pot observar una diferència considerable amb els fabricats mitjançant l'extrusor de pèl·let.

Sempre pel cas de PLA, els mòduls elàstics obtinguts amb pèl·let són lleugerament inferiors als valors que assenyalava la literatura per al material sòlid per orientacions de 90° i 45° . No obstant, per provetes fabricades en direcció longitudinal a l'eix de l'esforç i mitjançant l'extrusió de pèl·let els valors són superior a la literatura (3664 MPa i 3348 MPa, respectivament).

Altrament, probablement la causa per a aquest efecte podria ser relacionada al comportament dels filaments individuals de les provetes, quan aquestes últimes són sotmeses a tracció. La confirmació d'aquesta hipòtesi podria realitzar-se mitjançant l'observació microscòpica de conjunts de filaments durant l'aplicació de forces de tracció en diferents direccions.

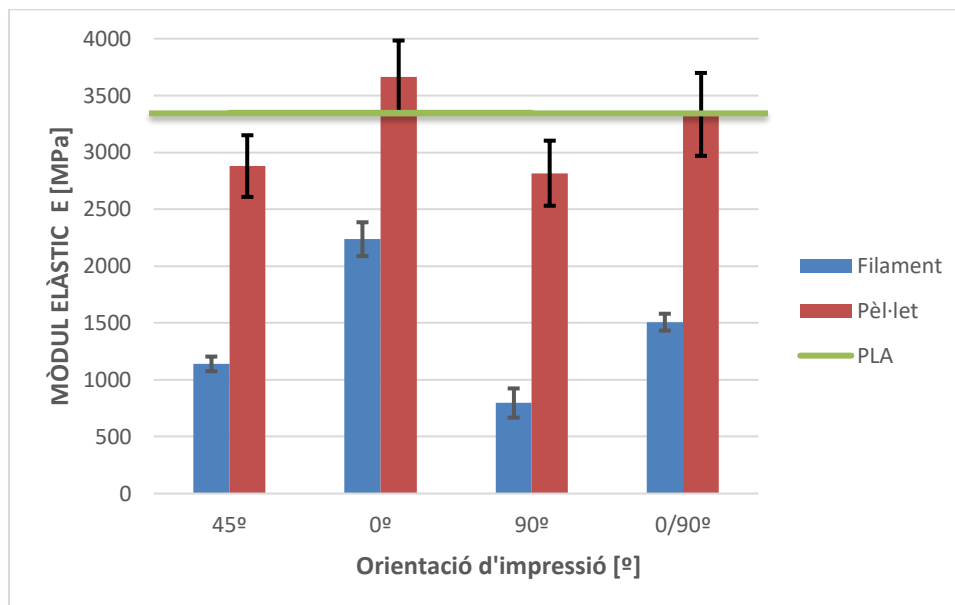


Figura 42 Mòdul elàstic segons l'orientació d'impressió per assajos a flexió. (Font: Elaboració pròpia).

La deformació màxima segueix la mateixa tendència que la resistència i el mòdul elàstic com podem observar en la Figura 41 i Figura 42, és a dir, per provetes fabricades en direcció longitudinal a l'eix de l'esforç o bé la combinació de direccions en aquest eix i l'eix transversal augmenta la deformació màxima. Això és degut a la llei de Hooke, la qual estableix la relació lineal entre l'allargament i la tensió per al rang lineal.

Cal destacar també que sembla ser que l'únic factor influenciable és l'orientació de fabricació, ja que no es mostren diferències significants i segueixen la mateixa tendència, encara que les provetes han sigut fabricades mitjançant filament o bé per extrusió de pèl-lets.

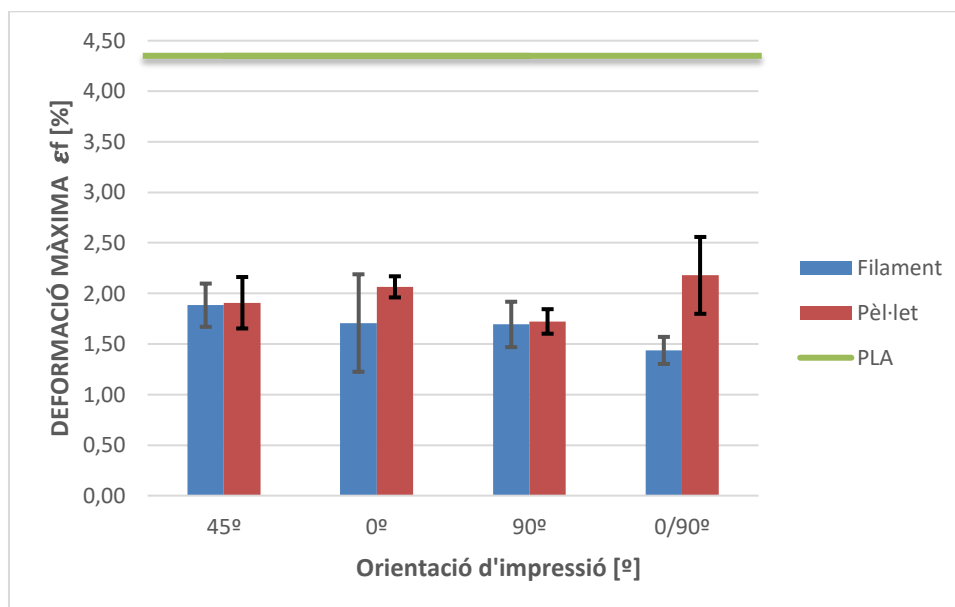


Figura 43 Deformació màxima en % segons l'orientació d'impressió per assajos a flexió. (Font: Elaboració pròpia).

Finalment, en l'assaig a flexió es van assajar provetes fabricades mitjançant l'extrusora de pèl·let i la de filament amb la finalitat de fabricar un material bicomponent com es mostra a la Figura 44. En aquesta mitja proveta, destacada d'un color, és de filament i la restant de pèl·let.



Figura 44 Espècimen a flexió bicomponent. (Font: Elaboració pròpia).

Com s'ha comentat anteriorment les propietats a flexió per provetes segons mètode de fabricació, pèl·let o filament, s'han assajat les provetes en dues configuracions diferents:

- PLA (0-BAD)
- PLA (0-BAB)

On BAD son les provetes bicomponents que s'han assajat amb la part fabricada per pèl·let de cares adalt, en canvi les provetes BAB són les provetes bicomponents amb la part de pèl·let de cares abaix. A causa que durant l'assaig a flexió existeix una part que treballa a compressió i una altre a tracció, aquestes han sigut assajades amb les dues configuracions esmentades anteriorment i s'ha comprovat com varien les seves propietats mecàniques. Cal esmentar que les provetes han sigut fabricades només amb una orientació de 0°, ja que en les proves anteriors és l'orientació que aporta millors propietats mecàniques.

A la Taula 9 es mostren els resultats de les estructures bicomponents amb comparació a les provetes fabricades senceres per filament o pèl·let.

Taula 9 Resultats de l'assaig a flexió amb materials bicomponents. (Font: Elaboració pròpia).

	σ_f (MPa)	ϵ_f (%)	E_f (MPa)
PLA(0-F)	36,9 ± 8,6	1,71 ± 0,48	2236 ± 149
PLA(0-P)	78,6 ± 5,7	2,07 ± 0,11	3664 ± 320
PLA(0M-F)	36,6 ± 5,0	2,32 ± 0,21	2422 ± 215
PLA(0-BAD)	63,5 ± 5,2	3,55 ± 0,53	2423 ± 215
PLA(0-BAB)	53,1 ± 5,5	2,36 ± 0,23	2052 ± 183

Com es pot observar a la taula anterior, els espècimens que tenen un resistència mecànica i un mòdul elàstic superior són aquelles que la part fabricada per pèl·let treballa a compressió i la part de filament treballa a tracció respecte l'altre configuració del materials bicomponents. Per aquest motiu la part de pèl·let en treballar a compressió és més difícil generar esquerdes que si treballés a tracció, llavors per propagar l'esquerda en la secció de l'estructura es requereix més esforç l'altre configuració. Tot i això, els valors son inferiors respecte els espècimens fabricats per extrusió de pèl·let, ja que el material bicomponent una part és de filaments i aquests treballen independentment i, a més a més, tenen una menor intercalació respecte el pèl·let. Altrament, cal comentar que la deformació màxima en aquest assaig ha sigut donada per la configuració en la part de filament treballa a tracció i la part de pèl·let a compressió, ja que els filaments al treballar de forma independent, ser la art sotmesa a tracció i aquesta part ser més buida que l'altre, les cadenes tenen més espai per deformar-se. Inclús aquesta configuració sol ser la més propera al valor referència del PLA pur.

No obstant, els resultats a flexió per les provetes bicomponents no són els esperats, ja que s'esperava que el filament treballés millor a compressió, i a més els resultats obtinguts són considerablement alts. Conseqüentment a continuació es dur a terme una simulació on es calcula on es situa la línia neutre, ja que es suposava inicialment en el centre i es probable que aquesta, que separa compressió de tracció, hagi sigut desplaçada i produeixi que el filament o el pèl·let treballi de forma diferent.

4.1.3.1 Simulació amb SolidWorks®

La modelització del espècimen bicomponent i la simulació d'un assaig estàtic sobre aquest ens permet contrastar els resultats obtinguts en l'assaig a flexió. Altrament, pel disseny del sistema bicomponent fabricat l'objectiu és que la peça sigui dissenyada amb la menor quantitat de material possible i alhora sigui funcional.

Les dimensions de cada part que forma el material bicomponent simulat són de 127,0mm de llarg, 1,65 mm d'ample i 12,7mm de fondària, on la unió d'ambdues suposen l'ample de 3,3mm, formant un proveta de flexió segons la normativa ASTM D790. La força aplicada ha sigut es escollida per criteri propi en el centre de la proveta de 1kN, ja que la finalitat de la simulació és determinar on es situa la fibra neutra. La proveta esta subjectada pels extrems restringint el moviment vertical i horitzontal d'aquesta al igual que ho està en l'assaig experimental a flexió.

A continuació, a les Figures 43 i 44 es presenten els resultats obtinguts en l'assaig estàtic per diferents configuracions del espècimen bicomponent fabricat.

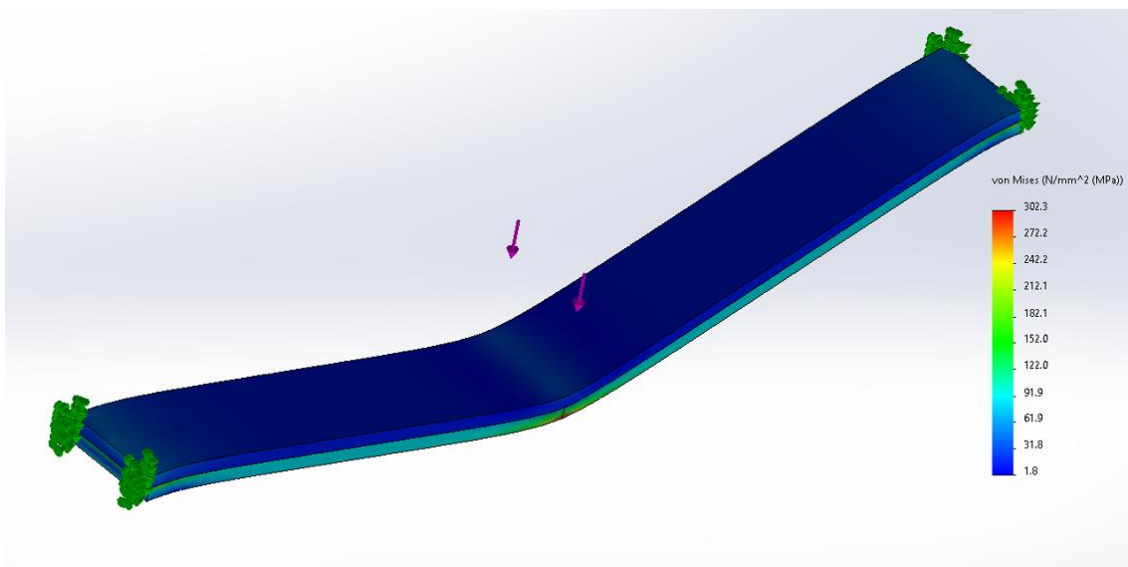


Figura 45 Tensions de Von Mises de la proveta bicomponent PLA(0-BAB). (Font: Elaboració pròpia).

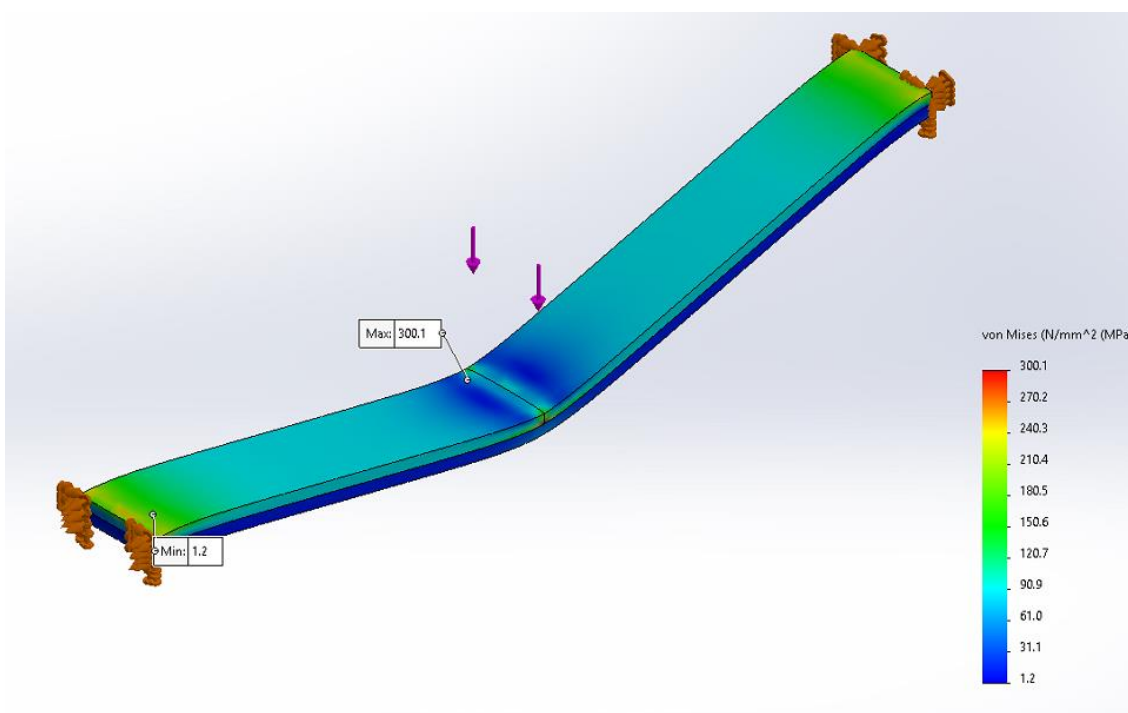
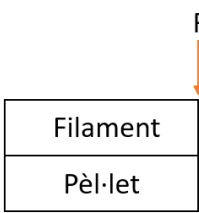


Figura 46 Tensions de Von Mises de la proveta bicomponent PLA (0-BAD). (Font: Elaboració pròpia).

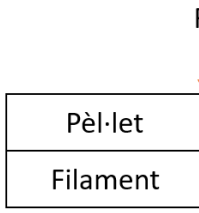
En aquestes imatges es pot observar les tensions màximes i mínimes a les que està sotmès l'espècimen al aplicar-se una càrrega centrada de 1kN segons la configuració d'aquesta. En ambdues es pot observar com les tensions màximes es concentren a la part central de la proveta, i a més a més, en ambdues es concentren en la regió del pèl-let on en el primer cas s'obté un valor de 302,3 MPa i en el segon cas de 300,1 MPa, tal i com es veu a les simulacions de les Figures 43 i 44. No obstant, hi ha poca o cap tensió al contorn de l'espècimen amb valors mínims de 1,8 MPa i 1,2 MPa.

Per calcular on es situa la línia neutra s'han agafat les tensions de von Mises de la part a compressió i tracció en la secció de trencament de la proveta, és a dir, en el cas crític. A la Taula 10 es mostren les tensions utilitzades pel càlcul esmentat anteriorment per les diferents configuracions.

Taula 10 Tensions màximes i mínimes respecte la configuració del material bicomponent. (Font: Elaboració pròpia).



PLA(0-BAB)



PLA(0-BAD)

Tensió de von Mises a compressió (MPa)	31,8	210,4
Tensió de von Mises a tracció (MPa)	302,3	31,3
Tensió de von Mises a màxima (MPa)	302,3	300,1
Tensió de von Mises mínima (MPa)	1,8	1,2

Per tant, estem en les següents situacions que es mostren en la Figura 47 i Figura 48.

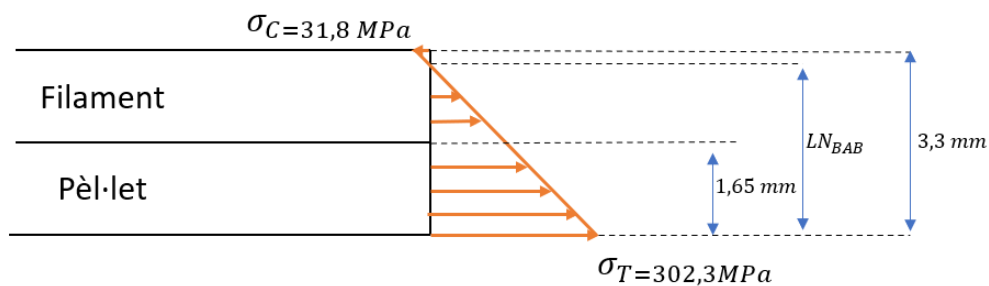


Figura 47 Línia neutre en el PLA(0-BAB) en l'assaig a flexió. (Font: Elaboració pròpia).

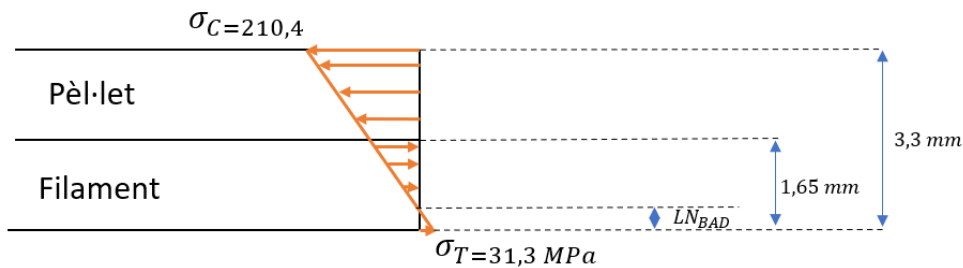


Figura 48 Línia neutra en el PLA (0-BAD) en l'assaig a flexió. (Font: Elaboració pròpia).

El càlcul de la línia neutra es fa mitjançant la següent equació que fa relació a la semblança de triangles:

$$\frac{A}{B} = \frac{A'}{B'} \quad (\text{Eq.10})$$

On A i A' són el catet dels respectius triangles, B i B' són les seves respectives alçades. Per tant, la línia neutra en el PLA (0-BAB) i del PLA (0-BAD) són:

$$LN_{BAB} = \frac{31,1}{\frac{(210,3 + 31,1)}{3,3}} = 0,42 \text{ mm}$$

$$LN_{BAD} = \frac{302,3}{\frac{(302,3 + 31,8)}{3,3}} = 2,98 \text{ mm}$$

Per tant, es pot observar com pel cas PLA (0-BAB) el filament només treballa a compressió mentre que el pèl·let treballa a tracció i compressió. Aquest fet és degut al desplaçament de la línia neutra per sobre del centre. Tanmateix, en el cas del PLA (0-BAD) el filament treballa a tracció mentre que el pèl·let treballa completament a compressió i parcialment a tracció, ja que la línia neutra en aquest cas a sigut desplaçada per sota del centre. Cal recordar que en l'assaig experimental a flexió pels materials bicomponents en el cas PLA (0-BAB) la resistència màxima era inferior respecte el PLA (0-BAD). En altres paraules, la configuració on el filament treballa a compressió i el pèl·let a compressió i tracció ofereix una resistència mecànica superior respecte l'altre cas. No obstant, en la simulació hem pogut observar que el cas on el filament treballa a compressió i el pèl·let a tracció i compressió ofereix una resistència mecànica superior respecte l'altre cas degut al desplaçament de la fibra neutra.

4.1.4 Assaig d'impacte

A la Taula 11 es mostra la variació de l'energia fractura segons l'orientació d'impressió determinades en l'assaig a impacte *Charpy* dels diversos materials avaluats amb les mateixes característiques d'impressió. Les provetes en qüestió han sigut impreses amb 100% de farciment de PLA en les quatre direccions d'impressió indicades, amb tots els filaments orientats en la direcció longitudinal de la proveta, a 45°, en la direcció transversal de la proveta i combinant la direcció longitudinal i transversal d'aquestes. Cal fer esment que es compararan els resultats obtinguts amb les característiques que ofereix la fitxa tècnica del material verge, PLA. Aquesta referència presa es considera també sense entalla, com totes les provetes assajades. Altrament, cal tenir en compte que l'equip amb el que s'ha dut a terme l'assaig proporciona l'energia que necessita per trencar el material. No obstant, la màquina et sol·licita el gruix i l'amplada de cada mostra i tenint en compte l'energia de resistència de l'aire 0,02(J), calculada per el propi equip al calibrar-la.

Taula 11 Resultats de l'assaig a impacte. (Font: Elaboració pròpia).

Energia fractura (KJ · m⁻²)

PLA	25,5 ± 3,9
45-F	44,0 ± 2,6
45-P	15,0 ± 4,1
0-F	51,1 ± 0,3
0-P	24,6 ± 1,7
90-F	34,7 ± 3,4
90-P	23,1 ± 6,7
0/90-F	40,2 ± 1,3
0/90-P	20,0 ± 4,3

Es pot observar que els valors a la resistència al impacte de Charpy són majors quan l'orientació d'impressió és de 0° tan per filament com per extrusió 51,1 KJ/m² i 24,6 KJ/m² respectivament. No obstant, els valors més baixos són per a 90° per filament (34,7 KJ/m²) i a 45° per extrusió (15,0 KJ/m²), obtenint variacions de magnituds significants. Aquests resultats no són esperables, ja que l'ordre de magnitud dels filaments haurien de ser com els de pèl·let i la tendència que haurien de seguir els resultats hauria de semblar-se als de filament on el resultat més baix hauria de ser per l'orientació a 90°. Cal remarcar que les provetes impreses amb filament han quedat "obertes" en el pla "XY", el mateix que per crear la fractura, obtenint una mala adhesió en l'eix Y. Probablement per aquesta raó els resultats obtinguts per filament l'ordre de magnitud és superior al valor màxim d'energia a fractura del PLA.

Tot i així, es pot observar que l'energia fractura per les orientacions de 45/-45° i 0/90° són menors que les de 0°. Altrament, a la Taula 11 podem observar una diferència poc significativa entre les orientacions 45/-45° i 0/90°. L'orientació de 0° no és només l'energia més elevada en comparació amb les altres orientacions, però sí la més significativa. La diferència entre l'orientació de 0° i 45/-45° és de 7,1 KJ/m² amb filament i de 9,6 KJ/m² per extrusió mentre que amb l'orientació de 90° és de 16,4 KJ/m² i 1,5 KJ/m², respectivament. A més a més, com s'observa a la Figura 49, les provetes amb una orientació de 0° impreses per extrusió són les que major resistència a impacte presenten i també són les que més s'assemblen al valor màxim d'impacte pel material verge (25,5 KJ/m²).

Cal remarcar que les mostres orientades a 0° i 90° es van fracturar en un angle de 90° respecte a la longitud. La fractura era suau al llarg de les capes en les orientacions de 90°, però tenia vores dentades a través de les capes i presentava delaminació entre capes en l'orientació 0°. Els patrons de fractura poden explicar-se per les interfícies febles en les capes 2D (en l'orientació 0°) que són perpendiculars a la font de l'esquerda i que absorbeixen grans quantitats d'energia a causa de la delaminació de la interfície. Aquesta delaminació incrementa a la punta de l'esquerda, la qual cosa redueix les tensions per davant de l'esquerda i fa que s'absorbeixin majors quantitats d'energia per a propagar l'esquerda. D'altra banda, les interfícies febles que són paral·leles a l'esquerda, orientació de 90°, proporcionen un camí fàcil per a la propagació de l'esquerda i absorbeixen la menor quantitat d'energia. Les interfícies febles que no són perpendiculars o paral·leles a l'esquerda (per exemple, amb una orientació de 45/-45°) es fracturaran amb majors quantitats d'energia respecte a l'orientació de 90° (i menys que l'orientació de 0°) perquè l'esquerda es propaga en una manera de fractura entre ambdues orientacions (Es-Said et al., 2000).

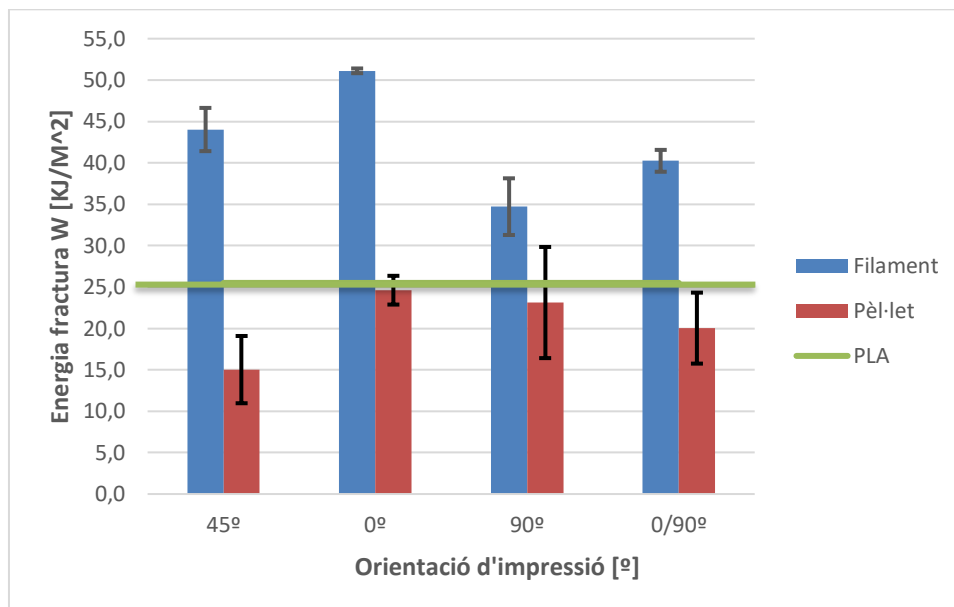


Figura 49 Energia fractura en KJ/m² segons l'orientació d'impressió. (Font: Elaboració pròpia).

4.1.5 Assaig de Calorimetria diferencial de rastreig (DSC)

L'assaig de calorimetria diferencial de rastreig (DSC) ens mostra mitjançant termogrames els comportaments de fusió de les estructures impreses en 3D. A continuació es representa un termograma amb l'orientació d'impressió de capes de 0°, ja que l'objectiu d'aquest assaig és estudiar si l'efecte de fabricar les provetes amb filament o pèl·let comporta canvis en el comportament tèrmic dels espècimens que estarien relacionats amb una diferent estructura del filament pels dos sistemes d'extrusió. A més a més, a les Figura 48 es representa el termograma per dita orientació amb el PLA pur per injecció per tal de poder comparar l'efecte del mitjà de fabricació amb la impressora que escau el projecte, filament o extrusió de pèl·let. En els termogrames es mostra la primera fusió del DSC. Cal recordar que les provetes al fer-se amb dies diferents, els materials no estaven a les mateixes condicions d'humitat, temperatura, etc..., degut a que la meteorologia pot afectar el procés de refredament dels materials. A la Taula 10 es resumeix de forma quantitativa les dades obtingudes dels termogrames. Tot i això, després de l'observació de les mostres fabricades en diversos dies i hores, s'observa clarament un diferent comportament i per tant l'efecte de la meteorologia es reduït.

Taula 12 Assaig de Calorimetria diferencial d'escombrat (DSC) dels materials segons l'extrusor pel qual han sigut fabricats. (Font: Elaboració pròpia).

	Inici Tg (°C)	Final Tg (°C)	T crist freda (°C)	ΔH crist (J/g)	T fusió (°C)	ΔH fusió (J/g)	Cristal·li nitat de la fusió (%)	Cristal·li nitat inicial (%)
PLA	57,7	60,8	104,3	38,7	167,5	50,2	53,6	12,3
PLA (0-F)	61,0	61,6	106,9	35,4	173,7	48,7	52,0	14,2
PLA (0-P)	60,3	63,0	90,9	22,7	176,1	41,3	44,1	20,0

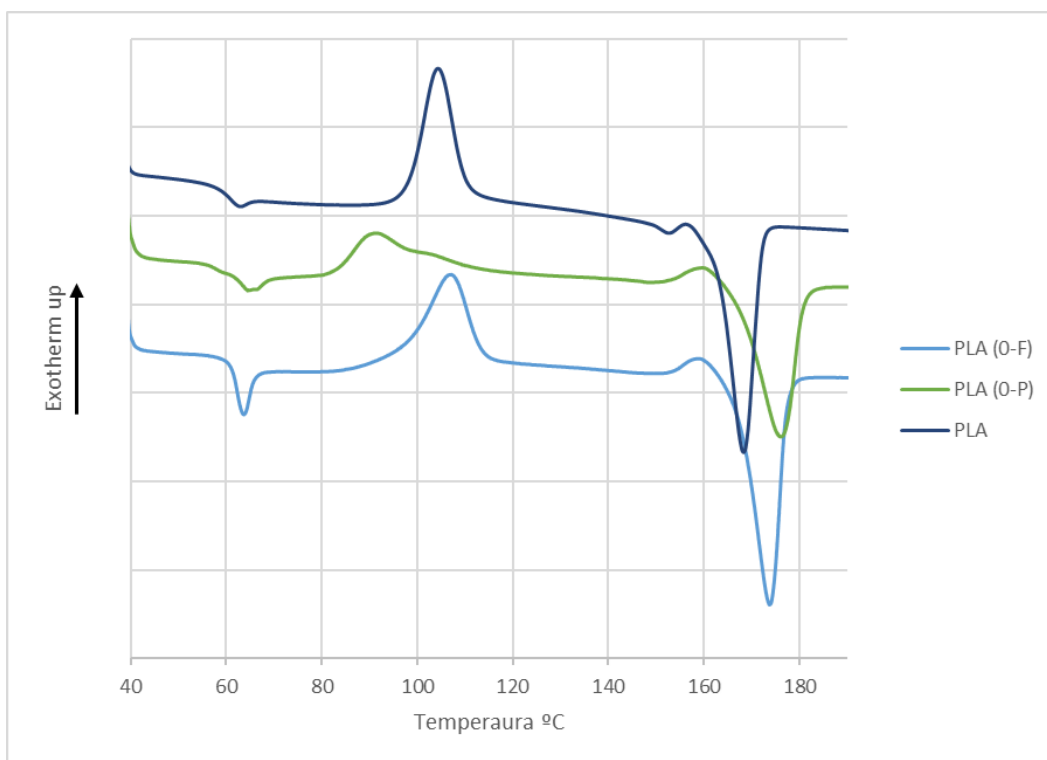


Figura 50 Termogrames de la segona fusió al DSC del PLA i els espècimens. (Elaboració pròpia).

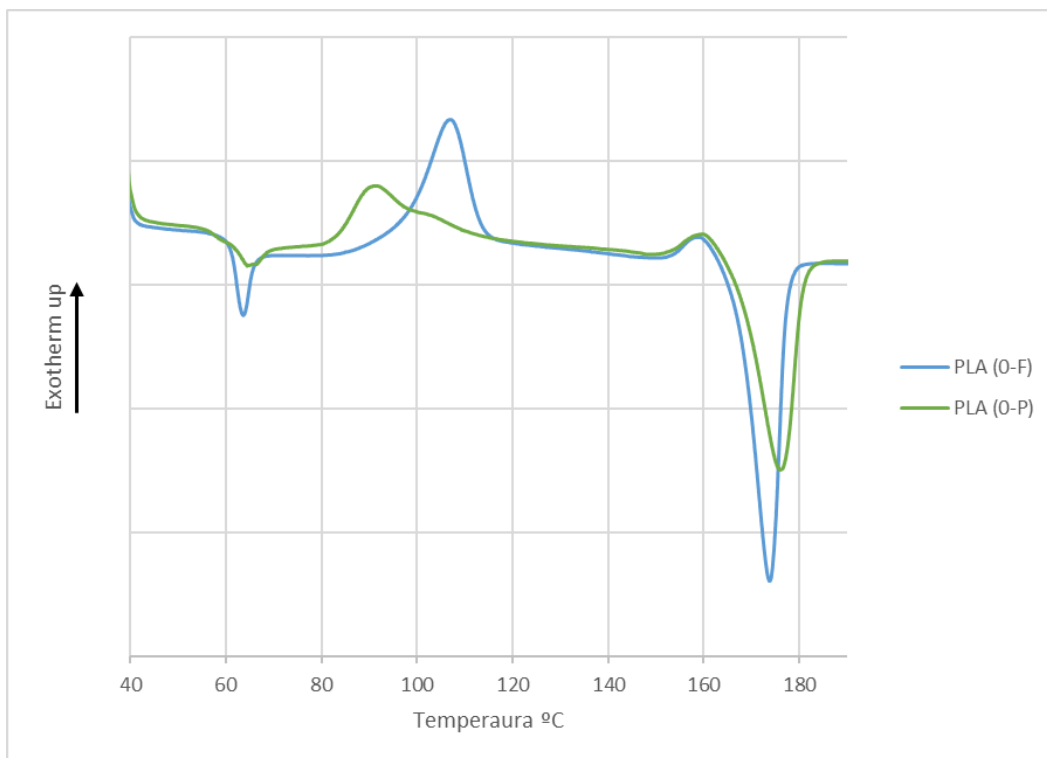


Figura 51 Termogrames de la primera fusió al DSC del PLA fabricat amb extrusora de filament i de pèl·let on ambdues tenen una orientació de 0°. (Font: Elaboració pròpia).

La transició vítria (T_g) del PLA va ser al voltant de 60 °C i es manté similar pel que fa la seva temperatura tan per als espècimens fabricats amb pèl·lets com amb filament. Es pot observar com per les provetes fabricades amb pèl·let la T_g es desplaça aproximadament 2°C respecte el PLA referència i 1,5°C respecte les provetes fabricades amb filament, la qual cosa indica una restricció de la mobilitat de la cadena de PLA. No obstant, els canvis més significatius s'observen al termograma on l'envelliment d'aquesta T_g és molt més pronunciat al filament, probablement derivat d'un salt tèrmic superior durant la impressió o d'una menor cristal·linitat. Aquest resultat estarien en concordança amb l'observat a les propietats mecàniques on els materials de pel·let semblen tenir una millor adhesió respecte als de filament. Això seria ja que el de filament refredaria molt més ràpid, i que quan es diposita la següent capa, la primera ja estigues refredada. En canvi, al material de pel·let el refredament és molt més lent, donant-se un menor envelliment, permetent una major cristal·lització i resultant a la vegada en una millor adhesió ja que no només la capa superficial es troba calenta durant la impressió.

Durant el primer escalfament es va observar que la temperatura de cristal·lització freda (T_c), definit en el màxim del pic exotèrmic, va patir una lleugera disminució per als espècimens fabricats mitjançant l'extrusor de pèl·lets. L'aparició d'aquest pic es relaciona amb la baixa taxa de cristal·lització del PLA quan es compara amb altres polímers semi cristal·lins com el

PP (Granda et al., 2016; Thomas, 2001). La disminució de la temperatura de cristal·lització en el cas del material pèl·let pot ser conseqüència de que durant el procés de fabricació entre capes el refredament és un procés molt més lent, la qual cosa facilita la cristal·lització en aquest material que té una taxa tant baixa. Aleshores, els cristalls que es formen durant la fusió en el DSC necessiten una quantitat d'energia menor, és a dir, una menor temperatura a continuar creixent. Aquest raonament explicaria a la seva vegada aquest diferent comportament a cristal·lització, on en el cas del pèl·let s'observa un pic molt ample on a una temperatura superior s'aprecia l'aparició d'un segon pic amb menor intensitat, mentre al cas dels materials fabricats per filament es tracta clarament d'un únic pic. L'aparició d'aquest segon pic estaria relacionada amb el creixement d'un cristall diferent als anteriors i probablement de característiques similars als que es formen al filament.

En quant al procés de fusió, els espècimens de PLA va mostrar una major temperatura de fusió ($T_{\text{fusió}} \text{ } ^\circ\text{C}$), definit com el mínim de la corba endotèrmica, quan es fabriquen amb l'extrusora de pèl·lets. Tot i que la diferència no és molt elevada (inferior a 3°C), el perfil de fusió mostra diferències en la cristal·linitat. Els valors per les provetes fabricades amb filament i amb pèl·let són de 52 i 44 % respectivament, el que suposa una pèrdua superior al 8% en la cristal·linitat de les mostres de pèl·let respecte el filament i el PLA de referència. Aquesta diferència podria estar associada al cristall format durant el procés d'impressió, més estable i que té un procés més lent i per tant no es dona de forma quantitativa durant la cristal·lització freda. Una altra opció pot estar associada amb una bona intercalació de les seves capes que podria impedir la formació de molts cristalls degut a l'espai ocupat per les capes.

4.1.6 Difracció de raig X (XRD)

La difracció de raig X es va realitzar un cop observat els resultats del DSC. El càlcul de la cristal·linitat inicial mitjançant DSC sovint comporta errors associats a la integració de les àrees, entre altres paràmetres. La difracció de raig X permet determinar la cristal·linitat de la mostra a temperatura ambient un cop obtinguda la peça. Els resultats es mostren a la Figura 52

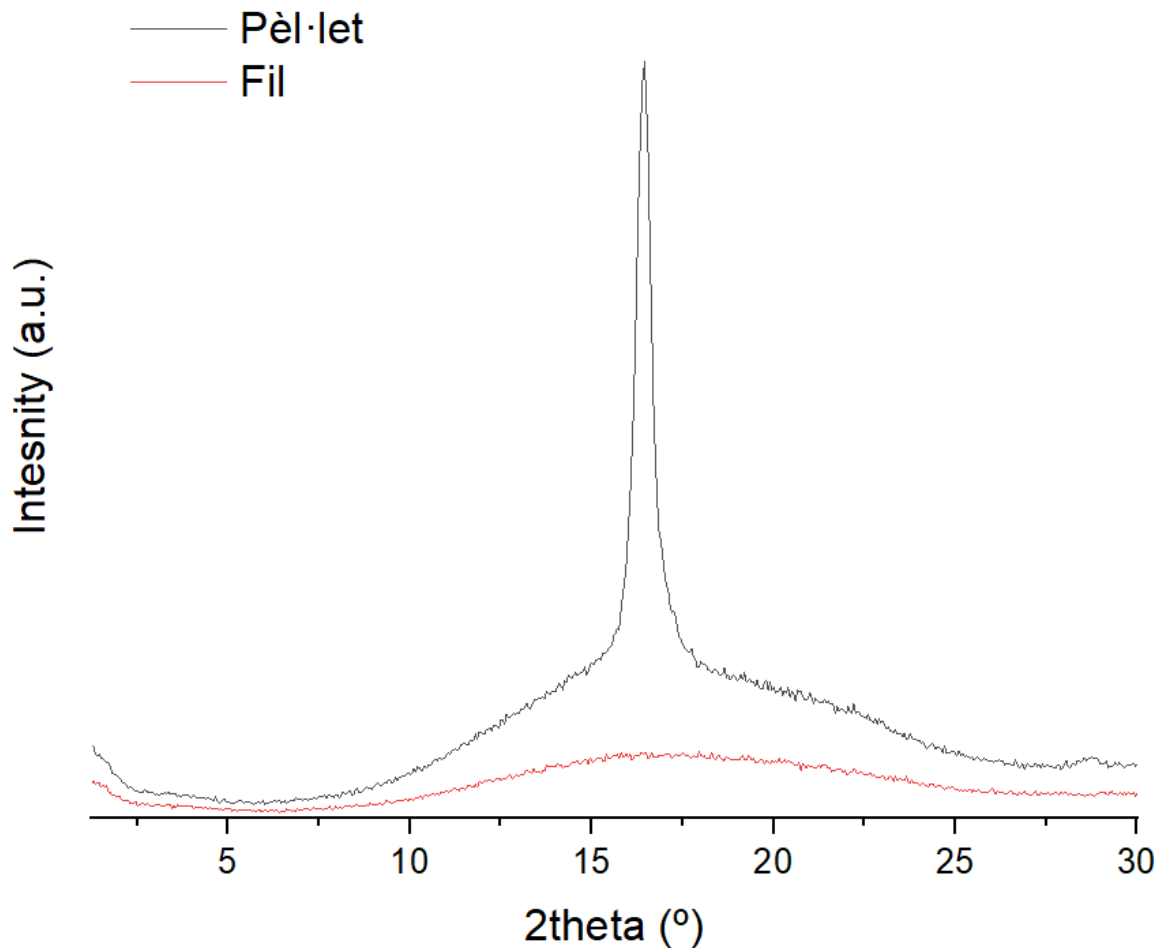


Figura 52 Difracció de raig X per mostres fabricades mitjançant filament envers pèl·let. (Font: Elaboració pròpia).

La mostra de filament presenta una estructura totalment amorfa mentre que la de pèl·let presenta clarament un pic a $2\theta=16.5^\circ$. Aquest pic correspon amb el pla 110 i 200 de les formes cristal·lines α i α' del PLA (Puchalski et al., 2017). La cristal·linitat de la mostra (χ) es pot calcular mitjançant la formula:

$$\chi = \frac{A_c}{A_a + A_c} \text{ (Eq. 13)}$$

On A_a és l'àrea corresponent a la part amorfa i A_c l'àrea corresponent a la part cristal·lina. La cristal·linitat és de 27.4% calculada fent servir XRD, considerablement superior a l'observada per DSC. La major cristal·linitat de la mostra de pèl·let, en termes de XRD amb una diferència de més del 25% respecte a la de filament, podria explicar les propietats mecàniques molt superiors en aquest tipus de mostra, molt properes a les mostres injectades tot i no tractar-se d'un material continu. A la vegada, els resultats concordarien amb els apreciats a impacte, on les mostres de pèl·let tenen una resistència molt inferior i que podria explicar-se també degut a la fragilitat del material.

4.1.7 Microscòpia òptica

En aquest capítol s'observa i analitza les propietats anisotròpiques del material i la forma de com s'efectua la unió entre capes de material fos i com ha pogut afectar això a les propietats mecàniques del material. De la Figura 53 a la Figura 60 es mostren els resultats obtinguts de les diferents estructures. Cal remarcar que els resultats extrets tenen certes variacions en el mateix material com a conseqüència que les mesures han sigut preses amb el programari *ImageJ* amb referència a l'escala obtinguda en el microscopi digital. Com a conseqüent, s'han extret diferents mesures perquè l'error sigui el mínim possible.

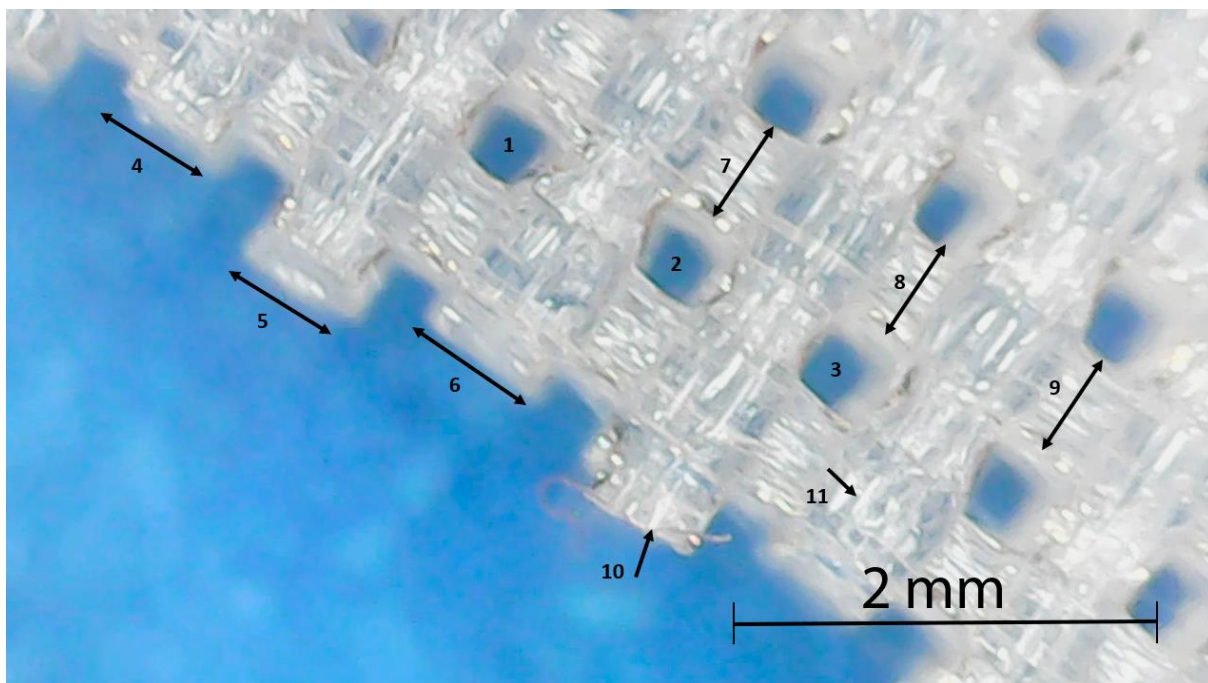


Figura 53 Estructura proveta a flexió fabricada mitjançant filament amb una orientació 0/90°. (Font: Elaboració pròpia).

En primer lloc, a la Figura 53 es pot observar l'estructura de la proveta fabricada mitjançant la deposició de filament després de trencar en l'assaig a flexió. En aquesta podem observar que l'àrea dels quadrats buits que es formen al imprimir les capes de material combinen l'orientació de 0 i 90° no és constant. En altres paraules, es disposa d'àrees uniformes on per exemple l'àrea que es pot observar amb el subíndex 1 en la Figura 53 és de 0,128mm², l'àrea amb el subíndex 2 és de 0,136mm² i en el cas del 3 és de 0,123mm². En tots els casos l'àrea és molt similar i les variacions podrien ser degudes a l'error de mesura també.

Altrament, un altre factor a destacar és l'amplada que té el conjunt de fils, que formen l'estructura en la direcció de 0 i en 90°. Tanmateix, per la mateixa direcció també es considera

uniforme, ja que en la direcció a 0°, del subíndex 5 al 7, hi ha un salt de 0,092mm, i per l'orientació a 90° és de 0,025mm.

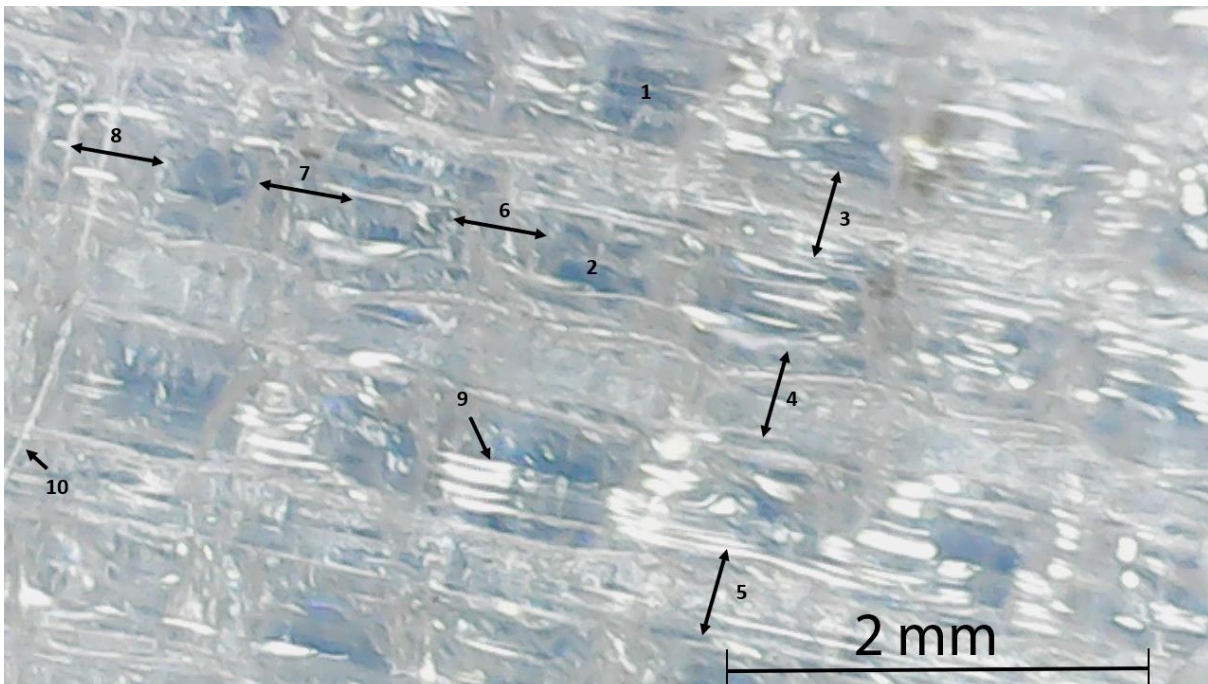


Figura 54 Estructura proveta a flexió fabricada mitjançant extrusió de pèl·let amb una orientació 0/90°. (Font: Elaboració pròpia).

En canvi, per les provetes fabricades per extrusió de pèl·let, es pot observar com l'àrea dels quadrats buit, que es formen per la pròpia estructura, és inferior fins arribar a una àrea de 0,117mm² com es pot observar en el subíndex 1 de la Figura 53. A més a més, per aquesta col·lecció de provetes l'acabat superior és millor qualitativament i les capes de les cares superficials són contínues sense cap buit, creant una proveta més compacte, amb millor adhesió entre capes i un percentatge de farciment superior a les provetes fabricades per deposició de filament.

En aquest cas podem observar com la diferència entre amplades en el conjunt de filaments extruïts per pèl·lets en ambdues direccions es menys significativa que pels conjunts de filament extruïts per filament.

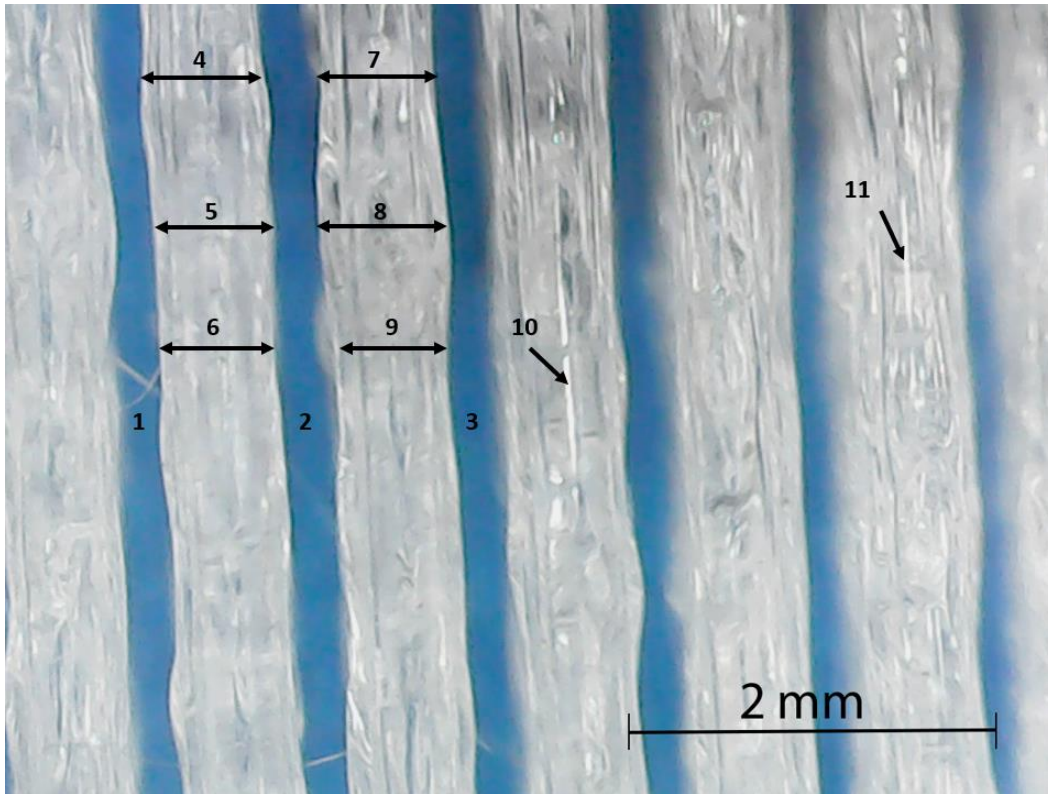


Figura 55 Estructura proveta a flexió fabricada mitjançant filament amb una orientació 90°. (Font: Elaboració pròpia).

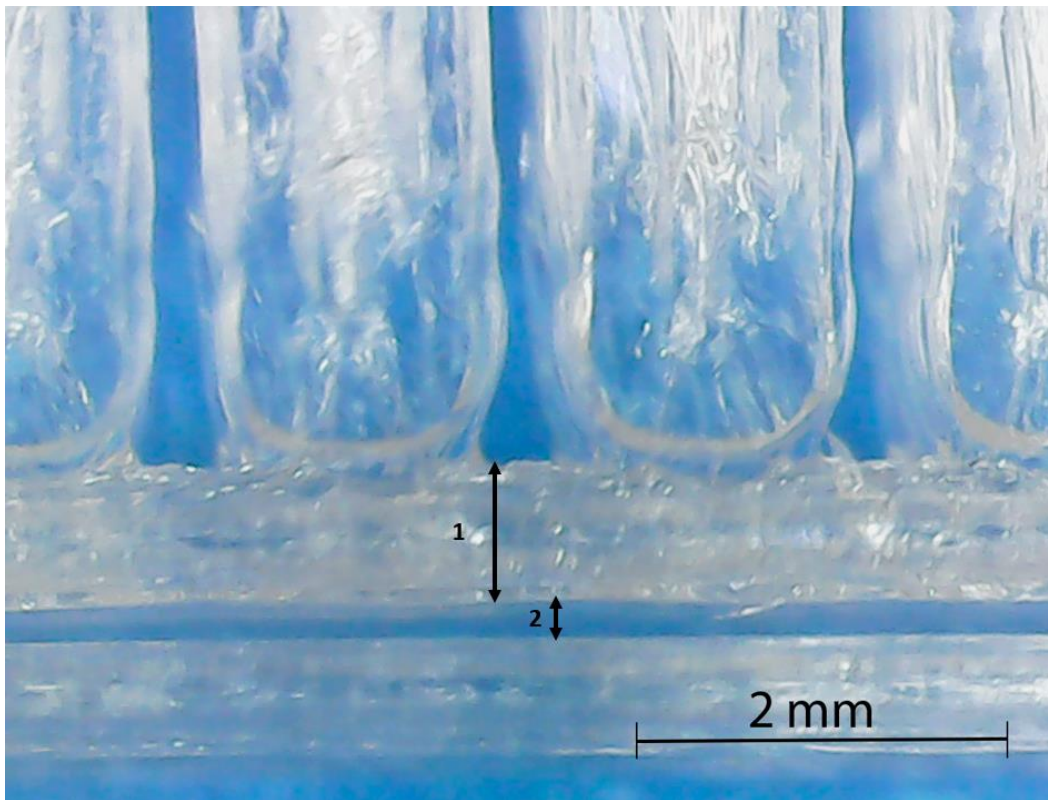


Figura 56 Unió del contorn amb l'estructura proveta a flexió fabricada mitjançant filament amb una orientació 90°. (Font: Elaboració pròpia).

A la Figura 55 i Figura 56 s'analitza l'estructura dels espècimens a flexió fabricats mitjançant la deposició de filament orientats a 90° i també la unió de l'estructura amb el contorn. Cal recordar que l'orientació del contorn és a 0° i en alguns casos el trencament es produïa a l'estructura i no en el contorn.

A la Figura 55 s'observa que el conjunt de filaments impresos a 90° tenen una separació entre ells de 0,27mm. Altrament un factor destacable que es mostra en la figura ens els subíndex del 4-9 és la uniformitat de l'estructura.

Cal remarcar que la unió del contorn amb la pròpia estructura del espècimen per aquest que han sigut imprès per deposició de filament és considera defectuosa a comparació amb les provetes impreses per extrusió de pèl·lets. Un clar exemple de la unió del contorn amb l'estructura per les provetes de pèl·lets es pot veure en la Figura 57.

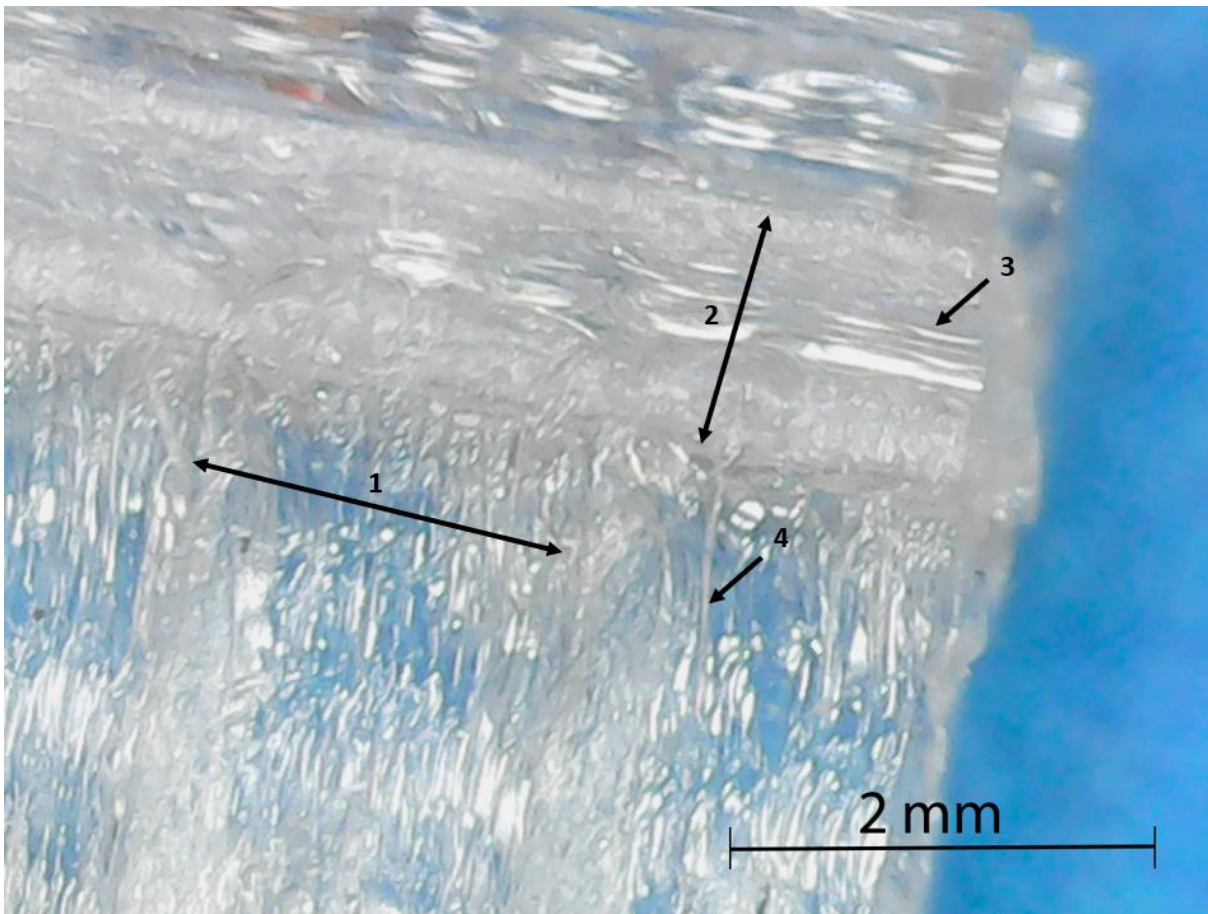


Figura 57 Estructura proveta a flexió fabricada mitjançant extrusió de pèl·let amb una orientació 90°. (Font: Elaboració pròpia).

En aquest cas es pot observar com el contorn està completament adherit amb l'estructura independentment de l'orientació de l'estructura. En altres paraules, els espècimens són completament sòlids sense presentar espais buits com per les provetes de filament. Aquestes imatges podrien validar els resultats mecànics obtinguts anteriorment.

Altrament, en les Figures 49 i 50 es pot visualitzar les estructures de les provetes a flexió orientades en l'eix longitudinal per filament i extrusió de pèl·let respectivament, portades al punt de ruptura. En ambdues es pot comprovar el diàmetre del fil. En la Figura 58 s'ha mesurat diversos punts visibles on el diàmetre està entre 0,80-0,88 mm. Tanmateix en la Figura 59 es pot comprovar el diàmetre del filament el qual s'ha mesurat i el valor obtingut és de 0,88 mm. Cal remarcar que les mesures han sigut preses amb el programari ImageJ i com a conseqüència pot haver-hi un error poc significatiu. No obstant, els resultats són esperats, ja que el diàmetre del filtre per l'extrusor de pèl·let és de 0,8mm i el diàmetre entrat en el programari per la deposició de filament també és de 0,8mm.

No obstant, entre la Figura 58 i Figura 59 destaca com segons ha sigut fabricada la proveta el trencament d'aquesta en l'assaig de flexió és completament diferent. Com es pot observar en la Figura 58 es pot observar com ha trencat per filament i aquests tenen un comportament individual. Aquest fet podria ser causa de les propietats mecàniques inferiors que hem obtingut per els espècimens fabricats per filament respecte amb els de pèl·let. En canvi, per les provetes fabricades per pèl·let com es pot observar en la Figura 59 es pot observar com a trencat l'estructura probablement per la propagació d'una esquerda. Al haver millor adhesió de l'interlineat de capes aquest fet facilita la propagació d'esquerdes. Per el mateix motiu, l'energia de fractura en l'assaig d'impacte per les provetes de pèl·lets és inferior respecte les provetes fabricades per filament.

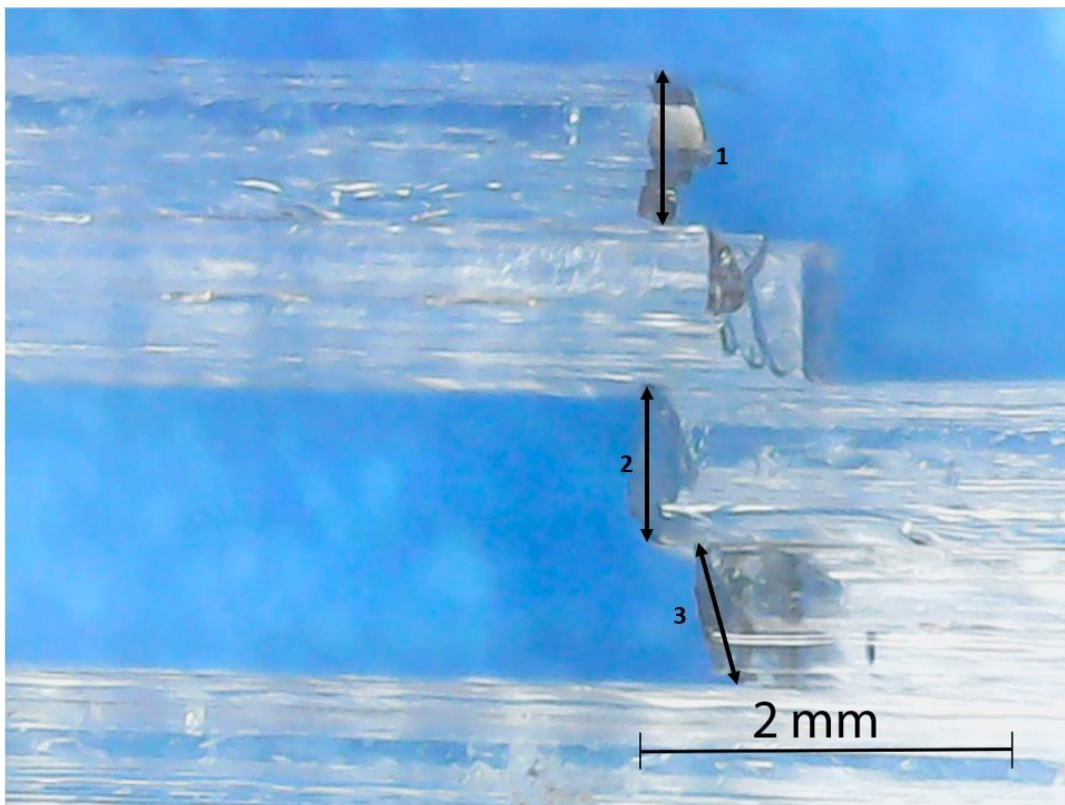


Figura 58 Estructura proveta a flexió fabricada mitjançant filament amb una orientació 0°. (Font: Elaboració pròpia).

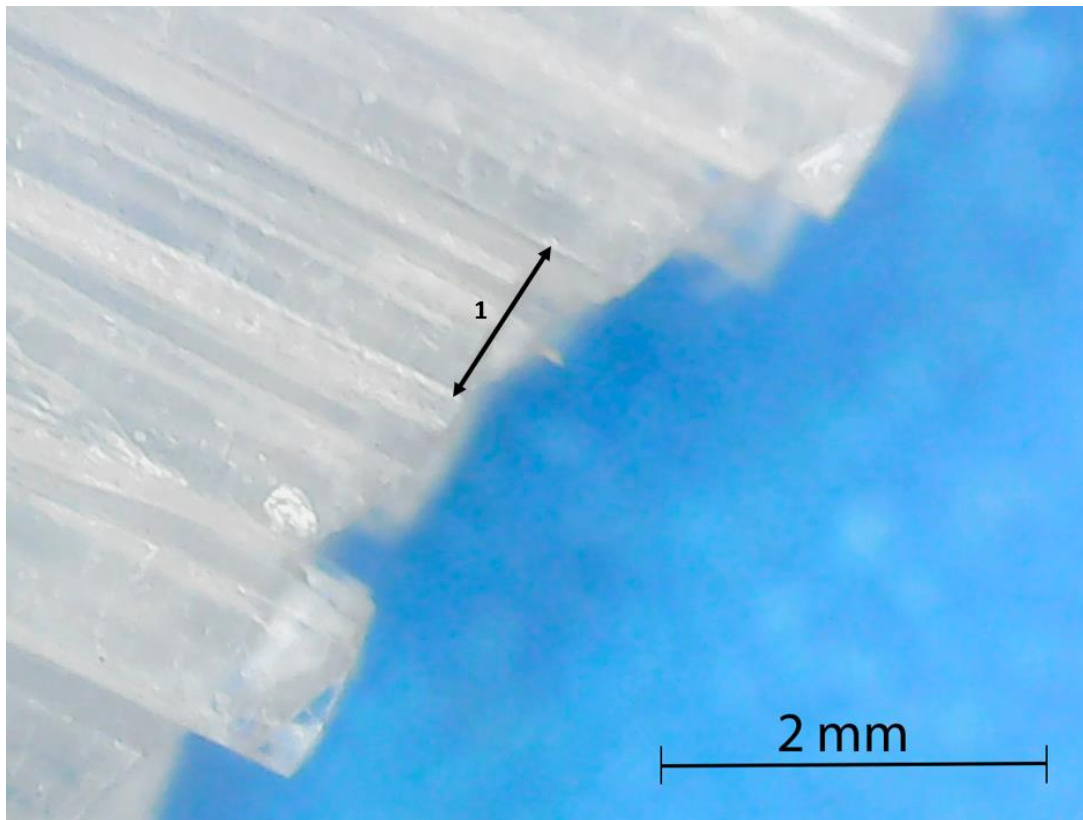


Figura 59 Estructura proveta a flexió fabricada mitjançant extrusió de pèl·let amb una orientació 0°. (Font: Elaboració pròpia).

Com a conseqüència que el diàmetre del filtre del capçal del extrusor de filament és de 0,4mm i per totes les provetes fabricades per filament en el programari Simplify3D no es va modificar el diàmetre que veia per defecte en el programa de 0,8mm es va fabricar una col·lecció de provetes a flexió amb una orientació de 0°, ja que les propietats mecàniques eren les més bones, modificant el paràmetre en el programari. En la Figura 60 es pot observar la secció de l'estructura del espècimen després de trencar en l'assaig de flexió.

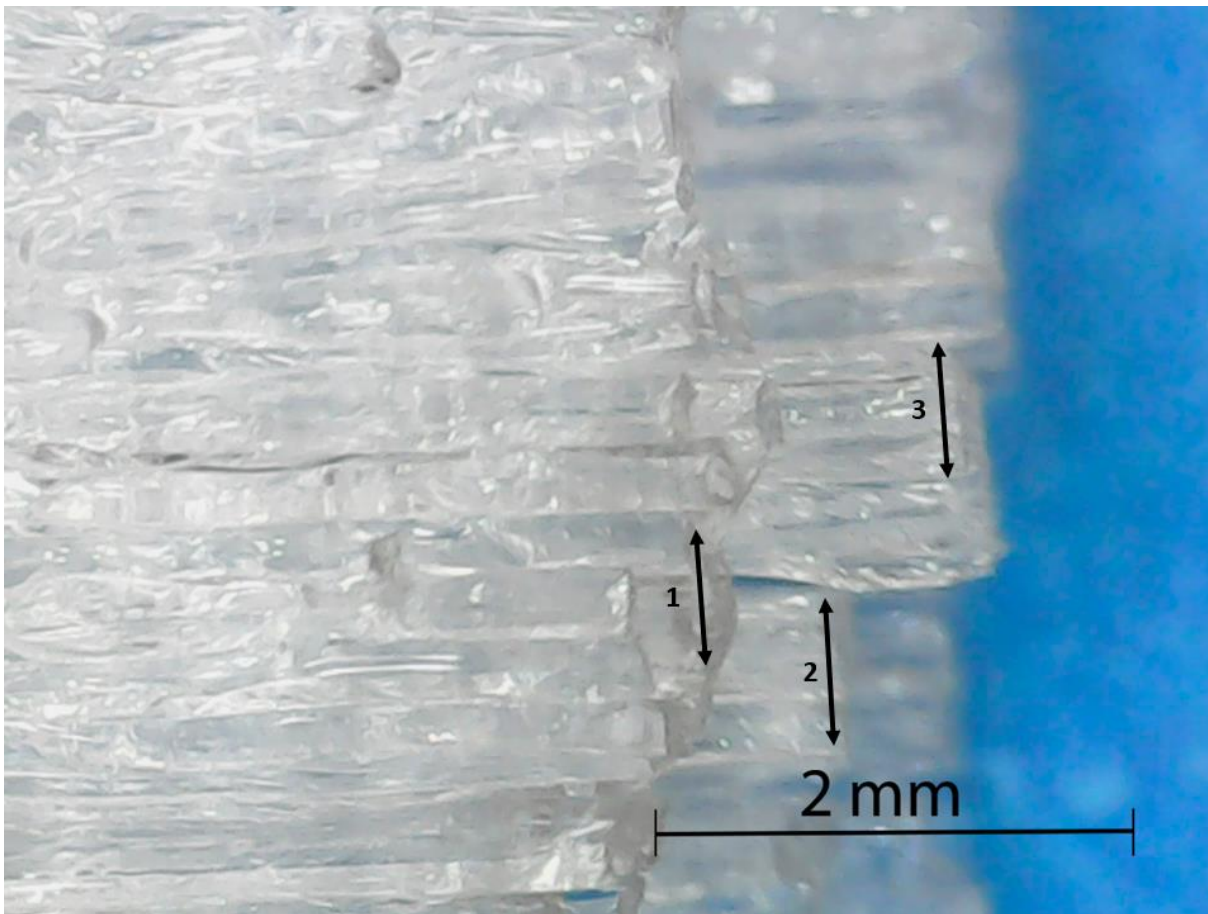


Figura 60 Estructura proveta a flexió fabricada mitjançant filament amb una orientació 0° i filtre de 0,4mm. (Font: Elaboració pròpia).

Respecte les provetes fabricades per filament on el diàmetre del filtre en el programari és de 0,8mm és pot observar que les provetes amb el diàmetre de 0,4mm són més compactes. Era d'esperar, ja que el pes d'aquestes era superior a les fabricades amb el filtre de 0,8mm. Altrament, en la figura s'observa com el diàmetre del filament és d'aproximadament 0,4mm amb valors obtinguts en un rang de 0,42-0,51mm. Malgrat la diferencia de diàmetre i ser més sòlides el trencament de les provetes és per filament, on cada un té un comportament independent com les provetes fabricades per filament amb el diàmetre de filtre de 0,8mm.

5. RESUM DEL PRESSUPOST

Taula 13 Resum del pressupost. (Font: Elaboració pròpia).

NIVELL 2: CAPÍTOL			PREU
Capítol	1	Mà d'obra	13.578,00 €
Capítol	2	Maquinaria	19.192,51 €
Capítol	3	Material	2,80 €
Projecte	1	Optimització del procés de fabricació de materials bicomponents mitjançant la tecnologia FDM.	32.773,31 €
			32.773,31 €

El cost en concepte de disseny i estudi sobre l'optimització del procés de fabricació de provetes de materials bicomponents mitjançant la tecnologia FDM del present projecte puja a 32.773,31 € (TRENTA DOS MIL SET CENTS SETANTA TRES Euros amb TRENTA UN Cèntims).

En la Figura 61 s'observa com el capítol maquinaria és en el que s'ha invertit més amb un 59% del pressupost.

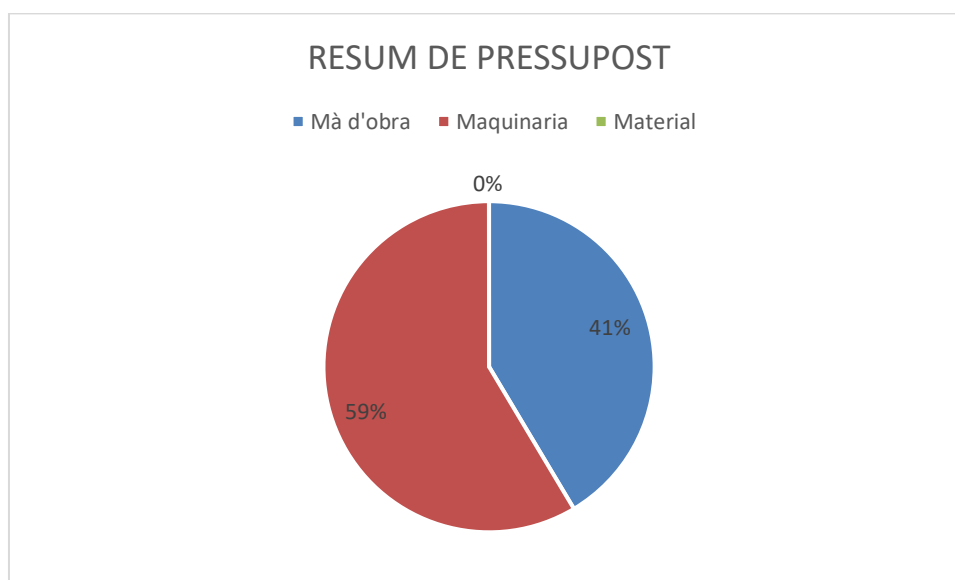


Figura 61 Resum del pressupost. (Font: Elaboració pròpia).

6. CONCLUSIÓ

La tecnologia d'impressió 3D FDM és una tecnologia encara en desenvolupament. Els paràmetres a establir a l'hora d'imprimir les peces canvien substancialment les propietats mecàniques d'aquestes. Com a conseqüència a millorar aquest aspecte l'objectiu inicial d'aquest treball se centrava en implementar una metodologia per a la fabricació de materials bicomponents en una impressora 3D amb una tecnologia FDM i optimitzar aquest procés, on aquest pretenia un doble objectiu:

- Comprovar la viabilitat de imprimir en 3D mitjançant l'extrusió de pèl·lets envers l'extrusió de filament.
- Optimitzar els paràmetres de impressió per futurs projectes que es realitzin amb la maquina objecte.

Com s'ha demostrat al llarg d'aquesta memòria, l'extrusora de pèl·let projectada en aquest treball de final de màster és perfectament viable en els aspectes presentats. Té un disseny diferenciador, el qual actualment no es gaire madur en el mercat, i tal com s'ha explicat podria resultar molt beneficiós per a objectes i/ o peces amb volums moderats d'impressió, sobretot per a usuaris que necessitin o desitgin imprimir de manera professional a un cost inferior que amb filament.

A raó de l'anàlisi experimental d'espècimens i peces de joc de taula fabricades, amb material PLA Corbion®, mitjançant l'extrusor de pèl·lets i el de filament s'extreu que els paràmetres més influents en les propietats estudiades, en ordre descendent, són l'orientació de les capes impreses i el mètode d'extrusió de la impressora 3D, filament o pèl·let. La temperatura, velocitat i el percentatge de farciment no els considerem paràmetres influents, ja que ha sigut el mateix per totes les proves experimentals. No obstant, l'acondiciament dels pèl·lets en l'estufa a 60°C, temperatura de transició vítria del PLA, és important per el millor funcionament de l'extrusor de pèl·lets.

Cal tindre en compte que el nombre de perímetres d'una mostra afecta a la resistència. Els perímetres són presents en cada capa i sempre s'alineen amb l'eix longitudinal a la càrrega. Aquests, presents en les provetes assajades, depenent dels ajustos de l'usuari de cada impressora.

En aquest treball s'ha estudiat les propietats mecàniques, comportament tèrmic i òptics per a quantificar la intercalació, possible exfoliació i la distància entre els filaments dipositats segons l'orientació i mètode d'impressió. En les propietats mecàniques s'ha observat una millora de les provetes impreses per extrusió de filament respecte les propietats de les provetes impreses per deposició de filament, tot i que ambdues són inferiors a les propietats del polímer en estat pur. A raó d'aquests resultats obtinguts mostren la viabilitat dels materials impresos per extrusió de pèl·let com a una sòlida alternativa a la tecnologia FDM convencional amb extrusió de filament. Tant per l'assaig a tracció com a flexió s'ha observat un augment del mòdul de Young i la resistència mecànica a mesura que l'orientació és en l'eix longitudinal a la càrrega, és a dir, 0° i el mètode d'impressió és mitjançant l'extrusió de pèl·lets. Altrament, la deformació màxima en el punt de trencament van augmentant a mesura que la mostra està més buida, per aquesta raó el grup de provetes fabricades per filament afavoreix la mobilitat de les cadenes polimèriques fent que la seva deformabilitat sigui superior. A més a més, en l'assaig estàtic que es va realitzar amb una simulació amb el programari SolidWorks s'ha pogut contrastar els resultats obtinguts pels materials bicomponents durant l'assaig a flexió i comprovar el desplaçament de la línia neutre segons la configuració de la proveta. Com s'ha pogut comprovar el material bicomponent amb el filament sotmès compressió i el pèl·let a tracció i compressió a comparació de la situació on el filament està a tracció i el pèl·let a tracció i compressió, es va demostrar que la resistència mecànica millora i aquesta configuració seria un disseny generatiu. En l'estudi de microscòpia s'ha observat i analitzat que els materials fabricats amb pèl·lets presenten millor intercalat entre les capes. En canvi, en l'estudi del comportament tèrmic dels espècimens es d'importància per poder analitzar la degradació i l'estabilitat de la matriu de PLA durant l'extrusió. En el DSC s'observa que la fabricació d'espècimens amb extrusora de pèl·lets suposa un petit augment de la temperatura de treball, com s'observa en la temperatura de transició vítria, però amb menor efecte per la fabricació d'aquestes amb filament. Altrament es va observar i comprovar amb la difracció de raig X el desenvolupament de la cristal·linitat per les estructures amb les capes orientades a 0° d'on s'obté que les fabricades amb filament tenen un grau de cristal·linitat superior a les fabricades per pèl·lets, però sent inferior al PLA. En definitiva, els millors resultats concernits s'obtenen amb el material orientat a 0° i fabricat per pèl·lets.

No obstant això, d'aquests resultats es desprèn que les peces impreses amb impressores 3D amb tecnologia FDM i extrusió de pèl·lets poden considerar-se mecànicament funcionals en aplicacions tan a tracció com a flexió com les de comercials.

Finalment, es considera nous temes a tractar en futurs projectes experimentals amb la finalitat d'avançar en el desenvolupament i coneixements del comportament mecànic de les peces fabricades amb materials composts en la tecnologia FDM. Determinant els paràmetres influents en el comportament mecànic d'altres materials composts amb fibres, argiles o l'agent que sigui.

7. RELACIÓ DE DOCUMENTS

DOCUMENT N° 1: MEMÒRIA I ANNEXOS

Memòria

Annexos

Annex A: Pressupost

Annex B: Fitxa tècnica del PLA

8. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- ASTM International. (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1*.
- Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret - *The 3D Printing Handbook_ Technologies, design and applications-3D Hubs (2017)*. (n.d.).
- Collier, W. A., Janssen, D., & Hart, A. L. (1996). Measurement of soluble L-lactate in dairy products using screen-printed sensors in batch mode. *Biosensors and Bioelectronics*, 11(10), 1041–1049. [https://doi.org/10.1016/0956-5663\(96\)87663-9](https://doi.org/10.1016/0956-5663(96)87663-9)
- Duda, T., & Raghavan, L. V. (2016). 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), 103–110. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2016.11.111>
- Es-Said, O. S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., & Pregger, B. A. (2000). Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. *Materials and Manufacturing Processes*, 15(1), 107–122. <https://doi.org/10.1080/10426910008912976>
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- Hughes, T. R., Mao, M., Jones, A. R., Burchard, J., Marton, M. J., Shannon, K. W., Lefkowitz, S. M., Ziman, M., Scheluter, J. M., Meyer, M. R., Kobayashi, S., Davis, C., Dai, H., He, Y. D., Stephaniants, S. B., Cavet, G., Walker, W. L., West, A., Coffey, E., ... Linsley, P. S. (2001). Expression profiling using microarrays fabricated by an ink-jet oligonucleotide synthesizer. *Nature Biotechnology*, 19(4), 342–347. <https://doi.org/10.1038/86730>
- MANUAL NX PRO DUAL. (n.d.).
- Mohebi, M. M., & Evans, J. R. G. (2002). A Drop-on-Demand Ink-Jet Printer for Combinatorial Libraries and Functionally Graded Ceramics. *Journal of Combinatorial Chemistry*, 4(4), 267–274. <https://doi.org/10.1021/cc010075e>

- Mu, Q., Wang, L., Dunn, C. K., Kuang, X., Duan, F., Zhang, Z., Qi, H. J., & Wang, T. (2017). Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing*, 18, 74–83. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2017.08.011>
- Muralidhara, H. B., & Banerjee, S. (n.d.). *3D PRINTING TECHNOLOGY AND ITS DIVERSE APPLICATIONS*.
- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., Shindo, P. W., Medina, F. R., & Wicker, R. B. (2012). Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60016-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60016-4)
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012>
- Park, J., Tari, M. J., & Hahn, H. T. (2000). Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. *Rapid Prototyping Journal*, 6(1), 36–50. <https://doi.org/10.1108/13552540010309868>
- Puchalski, M., Kwolek, S., Szparaga, G., Chrzanowski, M., & Krucińska, I. (2017). Investigation of the Influence of PLA Molecular Structure on the Crystalline Forms (α' and α) and Mechanical Properties of Wet Spinning Fibres. *Polymers*, 9(12), 18. <https://doi.org/10.3390/polym9010018>
- Serna C., L., Rodríguez de S., A., & Albán A., F. (2011). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad*, 5(1), 16. <https://doi.org/10.25100/iyc.v5i1.2301>
- Serna, L., Rodríguez, A., & Albán, F. (2003). *Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones*.

Sirringhaus, H., Kawase, T., Friend, R. H., Shimoda, T., Inbasekaran, M., Wu, W., & Woo, E. P. (2000). High-Resolution Inkjet Printing of All-Polymer Transistor Circuits. *Science*, 290(5499), 2123–2126. <https://doi.org/10.1126/science.290.5499.2123>

Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. (2002). *ASTM Standards D790*.

Universitat de Girona. (n.d.). *Fabricació integrada*.

Valerga, A., Batista, M., Fernandez-Vidal, S., & Gamez, A. (2019). Impact of Chemical Post-Processing in Fused Deposition Modelling (FDM) on Polylactic Acid (PLA) Surface Quality and Structure. *Polymers*, 11(3), 566. <https://doi.org/10.3390/polym11030566>

Wang, J. Z., Zheng, Z. H., Li, H. W., Huck, W. T. S., & Sirringhaus, H. (2004). Dewetting of conducting polymer inkjet droplets on patterned surfaces. *Nature Materials*, 3(3), 171–176. <https://doi.org/10.1038/nmat1073>

Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2016.11.034>

Wendt, C., Fernández-Vidal, S. R., Gómez-Parra, Á., Batista, M., & Marcos, M. (2016). Processing and Quality Evaluation of Additive Manufacturing Monolayer Specimens. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2016/5780693>

Wu, C., Yi, R., Liu, Y.-J., He, Y., & Wang, C. C. L. (2016). Delta DLP 3D printing with large size. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2155–2160. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759338>

9. GLOSARI

AM: *Additive Manufacturing*

FDM: Fused Filament Fabrication

Termoplàstic: plàstic que sotmès a l'exposició de temperatures relativament altes, es torna deformable o flexible arribant fins i tot a fondre's, mentre que quan es refreda prou, s'endureix.

PET: Polietilè tereftalat

PLA : Àcid polilàctic

T : Temperatura (°C)

Termoplàstic: Les molècules són cadenes llargues independents

Termoestable: Els àtoms estan units en una xarxa d'enllaços covalents que engloba tot el material.

ρ : Densitat

σ_t : Resistència a tracció (MPa)

E_t : Mòdul de Young (GPa)

ϵ_t : Deformació màxima del material en el punt de tensió màxima (%)

σ_F : Resistència a flexió (MPa)

E_F : Mòdul de flexió (GPa)

ϵ_F : Deflexió màxima del material en el punt de resistència màxima (mm)

T_c : Temperatura de cristal·lització (°C)

T_g : Temperatura de transició vítria (°C)

T_m : Temperatura de fusió (°C)

m : Massa de la proveta

m_t: Massa de la proveta

V_R: Volum real de la mostra

V_A: Volum aparent de la mostra

V_B: Volum buit de la mostra

ρ_f : Percentatge de farciment de la mostra

DSC: Calorimetria diferencial de rastreig

ANNEXOS

ANNEX A: PRESSUPOST

Projecte: 1 Optimització del procés de fabricació de materials bicomponents mitjançant la tecnologia FDM.
 Capítol: 1 Ma d'Obra
 Autor: Marc Martínez I Vecino
 Data: 02/09/2022



NUM.	CODI	U A	DESCRIPCIÓ	Unitats	Preu unitari	Parcial	Import	
1	A012M000	h	Estudi bibliogràfic	80,00	15,00	1.200,00		
2	A012M001	h	Disseny de les provetes i de la peça 3D, realització de càlculs i programació de paràmetres impressora 3D, anàlisi dels resultats, simulació amb SolidWorks i redacció del projecte.	400,00	20,00	8.000,00		
3	A012M002	u	Impressió	100	15,00	1.500,00		
4	A012M003	u	Assaig tracció i resistència màxima	40,00	30,00	1.200,00		
5	A012M004	u	Flexió	55,00	15,00	825,00		
6	A012M005	u	Impacte	40,00	15,00	600,00		
7	A012M006	h	Extrusió de filament	10,00	15,00	150,00		
8	A012M007	u	Calorimetria diferencial d'escombrat (DSC)	2,00	21,50	43,00		
9	A012M008	u	Difracció de raig X (XRD)	2,00	15,00	30,00		
10	A012M009	h	Microscopi digital	2,00	15,00	30,00		
						Suma mà d'obra	13.578,00	13.578,00 €

Projecte: 1 Optimització del procés de fabricació de materials bicomponents mitjançant
la tecnologia FDM.
Capítol: 2 Maquinaria
Autor: Marc Martínez I Vecino
Data: 02/09/2022



CODI	UA	DESCRIPCIÓ	Unitats	Preu unitari	Parcial	Import
CZ112000	u	Impressora 3D FDM NO PRO DUAL	1	12.000,00	12.000,00	
CZ112001	KW	Impressora 3D FDM NO PRO DUAL	500	0,312	4.677,75	
CZ112002	KW	Extrusora de filament 3devo	1300	0,312	2.432,43	
CZ112006	KW	Camara climàtica	5,50	0,312	82,3284	
				Suma		
				maquinària	19.192,51	19.192,51 €

Projecte: 1 Optimització del procés de fabricació de materials bicomponents mitjançant la tecnologia FDM.
 Capítol: 3 Materials
 Autor: Marc Martínez I Vecino
 Data: 02/09/2022



CODI	U A	DESCRIPCIÓ	Unitats	Preu unitari	Parcial	Import
BF21A200	Kg	Luminy® L105, PLA format pèl·let	0,40	4,00	1,60	
BFW21A10	Kg	PLA format filament	0,30	4,00	1,20	
				Suma materials	2,80	2,80 €

Pressupost d'Execució de material 32.773,31 €

ANNEX B: FITXA TÈCNICA DEL PLA

Luminy® L105

Description PLA is a biobased polymer derived from natural resources and offers a significant reduction in carbon footprint compared to oil-based plastics. Luminy L105 is a high heat, high flow PLA homopolymer suitable for thin wall injection molding and fiber spinning. Compared to standard PLA, these PLA homopolymers have higher melting points and an increased rate of crystallization. As a result, compounds containing PLA homopolymers are suitable for the production of semi-crystalline parts, which exhibit a higher temperature resistance.

Physical properties	Density (literature value)	1.24 g/cm ³
	Melt flow index (ISO 1133-A at 210°C/2.16kg)	50 g/10 min
	Melt flow index (ISO 1133-A at 190°C/2.16kg)	22 g/10 min
	Stereochemical purity (Corbion method)	min. 99 (% L-isomer)
	Appearance (visual)	crystalline white pellets
	Residual monomer (Corbion method)	max. 0.3 %
	Water / moisture (Coulometric Karl-Fisher)	max. 400 ppm
	Melting temperature T _m (DSC)	175 °C
	Glass transition temp. T _g (DSC)	55-60 °C
	<i>Typical properties, not to be interpreted as specifications</i>	

Mechanical properties	Tensile modulus (ISO 527-1)	3500 MPa
	Tensile strength (ISO 527-1)	50 MPa
	Elongation at break (ISO 527-1)	max. 5 %
	Charpy notched impact, 23°C (ISO 179-1eA)	max. 5 kJ/m ²
	Heat deflection temp., amorphous (ISO 75-1)	55-60 °C ⁽¹⁾
	Heat deflection temp., crystalline (ISO 75-1)	100-110 °C ⁽¹⁾
	<i>Typical properties, not to be interpreted as specifications</i>	

Processing information and recommendations PLA homopolymers and PLA compounds can be processed on conventional injection molding equipment. To prevent or reduce the degradation of PLA during processing, it is recommended to use a barrel with a content of 3-5 times the shot weight, a (general purpose) screw with a L/D ratio of at least 20:1 and if applicable low shear hotrunners in the mold.

Startup and shutdown

1. The equipment needs to be well cleaned and purged to prevent cross contamination.
2. At the start of the run it is recommended to purge the system with a polyolefin or a purging compound (e.g. Dyna-Purge, Clean LDPE) followed by purging with the PLA homopolymer or PLA compound at its processing conditions.
3. At the completion of the run it is recommended to purge the system using a purging compound again.

After completion of the run, PLA must be removed from the whole system. PLA can degrade into lactic acid causing corrosion of the equipment.

Luminy® L105

Recommended injection molding temperature settings	Throat Feed zone Compression zone Nozzle Tmelt Tmold, amorphous Tmold, crystalline Back pressure (Bar, specific) Screw speed <i>Typical settings may require optimization</i>	20-40 °C 155-175 °C 180-220 °C 180-220 °C 180-220 °C 20-30 °C 90-100 °C 50-100 bar as slow as possible
Moisture and pre-drying	It is recommended to dry Luminy L105 from the packaging for 4-6 hours at 100°C. Drying of semi-crystalline PLA homopolymer can be performed in a desiccant hot air dryer, with a dew point of -40°C or less. It is recommended to reduce the moisture content before melt processing to a level less than 250ppm and preferably less than 100 ppm, measured by e.g. Karl-Fischer or Brabender aquatrac method. Predrying is in particular important prior to injection molding, film and sheet production. Moisture causes hydrolysis of the PLA homopolymer during melt processing, resulting in reduced mechanical performance in the final part.	
Storage conditions	It is recommended to store PLA polymers in its closed, original moisture-barrier packaging at temperatures below 50°C. Storage in direct sunlight should be avoided. The supplied PLA homopolymer pellets are typically semi-crystalline, unless otherwise stated.	
Packaging	Luminy L105 is available in 700 kg aluminum-lined octabins.	
Compostability	Composting of organic waste helps to divert organic waste from landfill or incineration. Composting is a biological process in which organic wastes are degraded by microorganisms into carbon dioxide, water and humus, a soil nutrient. Corbion PLA polymers are in compliance with the EN-13432 standard. Corbion PLA has been certified compostable by Vinçotte (OK Compost S478) and by European Bioplastics (Seedling). As the compostability of the end product is also dependent on the geometry of product, it is the responsibility of the manufacturer of the end product to ensure compliance with the regulations.	
Food contact status	Corbion PLA polymers are compliant with EU commission regulation 10/2011 of 14 January 2011 (and amendments) on plastic materials and articles intended to come into contact with food. Given the composition of the PLA polymers they can be considered suitable for use in food contact applications. Regarding lactic acid, it should be taken into account that it is to be considered as a dual use substance according Regulation 10/2011, since lactic acid is approved as a food additive (additive number E270). For lactic acid there are no Specific Migration Limits set in Regulation 10/2011. The regulation does include an overall migration limit of 10 mg/dm ² of the overall migration from finished plastic articles into food. It is the responsibility of the manufacturer of the final product, when intended as a food contact product, to determine that the use of the product is safe and also suitable for the intended application. While it is Corbion's conclusion that the above mentioned polymers are permitted, it is the final product which must meet the given regulations and the manufacturer should take responsibility to check if the final product is in compliance with these Regulations.	

Luminy® L105

¹⁾HDT B, 0.45MPa flatwise. HDT depends on processing conditions. For crystalline resins, formulation included 3 - 7% nucleating agent (D070) and molding took place in a 90 - 100°C tool.