

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Millora de les propietats mecàniques d'un material compost d'impressió 3D

Document: MEMÒRIA

Alumne: David Puig Hombrados

Tutor: Norbert Blanco i Inés Ferrer

Departament: Enginyeria Mecànica i Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria Mecànica

Convocatòria (mes/any): Setembre 2018

Índex:

1. INTRODUCCIÓ.....	1
1.1. Antecedents	2
1.2. Objecte del projecte.....	3
1.3. Abast del projecte	3
2. ESTAT DE L'ART.....	4
2.1. Fabricació additiva.....	4
2.2. <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM)	5
2.3. Elements de la impressora	8
2.4. Materials per FDM.....	11
2.5. Propietats mecàniques de peces impreses amb FDM	12
2.6. Tractament tèrmic.....	14
3. PARÀMETRES D'IMPRESSIÓ.....	18
3.1. Configuració de la impressió	18
3.2. Configuració del filament	24
3.3. Configuració de la impressora.....	25
3.4. Programari.....	26
3.4.1. Repetier-Host.....	26
3.4.2. Slic3r	26
4. METODOLOGIA.....	27
4.1. Material utilitzat.....	27
4.1.1. ABS	27
4.1.2. Copolièster reforçat amb fibra de carboni curta (CFRP)	29
4.2. Geometria de les provetes	31
4.3. Tipus de provetes	32
4.3.1. Provetes tipus I	32
4.3.2. Provetes tipus II	33
4.3.3. Provetes tipus III	34
4.4. Paràmetres del procés.....	36

4.5.	Tractament tèrmic aplicat	38
4.5.1.	Forn utilitzat.....	40
4.6.	Caracterització de les provetes	41
4.6.1.	Màquina d'assaig a tracció	42
4.6.2.	Variació física	43
4.6.3.	Estructura interna.....	43
5.	EXECUCIÓ DEL PROJECTE.....	44
5.1.	Consideracions d'impressió.....	44
5.2.	Consideracions del tractament tèrmic.....	48
5.2.1.	Proves del tractament tèrmic amb ABS.....	48
5.2.2.	Proves del tractament tèrmic amb CFRP	51
6.	RESULTATS.....	52
6.1.	Tensió màxima.....	55
6.2.	Mòdul de <i>Young</i>	58
6.3.	Elongació a tensió màxima	61
6.4.	Variació física.....	64
6.5.	Relació entre la variació de la secció i la resistència	65
6.6.	Estructura interna	67
7.	CONCLUSIONS	70
7.1.	Futures línies d'investigació	72
8.	RELACIÓ DE DOCUMENTS	73
9.	BIBLIOGRAFIA	74

1. INTRODUCCIÓ

La impressió 3D de material termoplàstic mitjançant la tècnica coneguda com a *Fused Deposition Modeling* (FDM) és una tecnologia de fabricació additiva relativament nova i amb una gran projecció de futur. Aquest mètode de fabricació permet una creació amb gran llibertat de dissenys diversos, d'una forma ràpida i amb un relatiu baix cost. Així doncs, tot plegat suposa un seguit de millores en comparació als altres processos de fabricació tradicionals.

Aquesta tecnologia també comporta un seguit de limitacions que s'han de tenir en compte a l'hora de dissenyar una peça. Una de les restriccions principals de les peces impreses en 3D és que les seves propietats mecàniques són més baixes en relació amb altres tècniques de processat com la injecció convencional o la extrusió de plàstics; les quals es veuen afectades en gran mesura per la direcció en la qual s'extrudeixen els filaments, de la geometria de les capes i dels paràmetres de fabricació. Per aquest motiu, en l'actualitat existeix un gran interès empresarial per investigar la millora d'aquestes propietats mecàniques i així augmentar el seu ús en el sector industrial. En aquest sentit, una de les tècniques que pot millorar la resistència de les peces consisteix en un post processat mitjançant un tractament tèrmic.

A la *Figura 1* es mostra un esquema de la fabricació additiva per capes. Cal dir que la unió entre filaments i la unió entre les diferents capes no sempre és del tot correcta i en ocasions pot provocar que la peça presenti punts dèbils i baixa resistència. Aquestes propietats mecàniques dependran de l'eix X, Y o Z i per això la orientació d'impressió juga un paper molt important a l'hora de determinar el comportament del material.

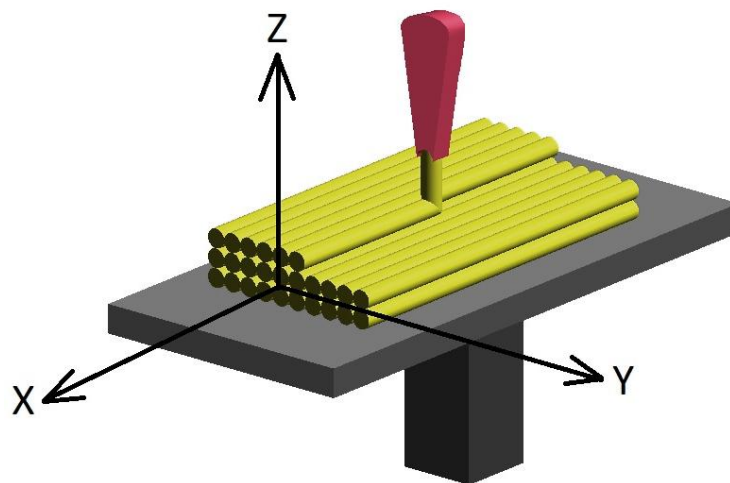


Figura 1: Deposició del material en forma de fils i capes [1]

1.1. Antecedents

Inicialment la impressió 3D es va utilitzar per a la fabricació de prototipatges ràpids, però avui en dia s'utilitza en sectors tant diversos com el mèdic, l'automoció, l'arquitectura, el tèxtil, entre molts d'altres. L'evolució de la tecnologia durant aquests últims anys, la baixada de preus de les impressores, la utilització de gran varietat de materials i la millora de la precisió, fan que aquest mètode de fabricació tingui un gran interès per la indústria i la societat en general. No obstant, tot i aquestes característiques, encara s'han de millorar diversos aspectes com la resistència i l'acabat superficial dels models impresos en 3D amb l'objectiu d'obtenir geometries de peces complexes i amb propietats mecàniques adients.

En nombrosos articles es pot observar com la direcció de fabricació és un dels paràmetres més importants a l'hora de determinar les propietats mecàniques del material [2][3]. Per aquest motiu, és important estudiar com influeix aquesta direcció en la resistència del material imprès. A la *Figura 2* es mostra l'aplicació d'una força en dues orientacions diferents i el tipus de ruptura que es produeix. Cal remarcar que el comportament de la direcció Y serà diferent que en el cas de la Z, ja que la resistència dependrà de les unions entre els filaments de la mateixa capa o entre les diferents capes respectivament.

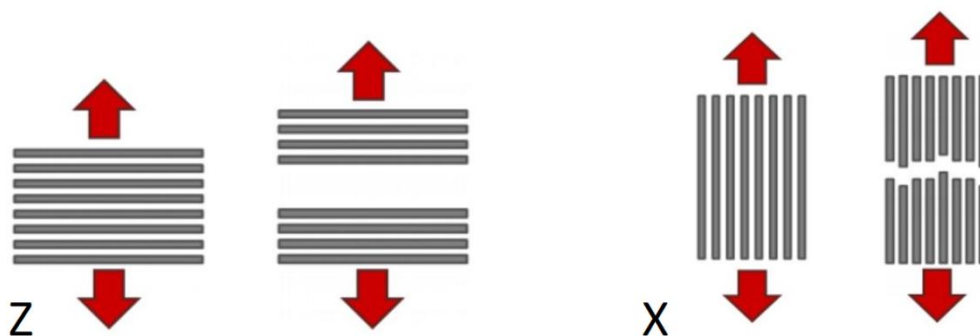


Figura 2: Tipus de trencament segons la orientació del filament [4]

Dins de la Universitat de Girona s'han dut a terme dos projectes previs per tal d'estudiar les propietats mecàniques de l'ABS i del mateix material reforçat amb fibra de carboni curta. A més, també s'ha considerat l'efecte d'un tractament de vapor d'acetona aplicat posteriorment. En aquests projectes es va concloure que el tractament millora les propietats en una direcció d'impressió, però empitjora en les altres dues [5][6].

Per aquest motiu, s'ha vist que també seria interessant estudiar l'efecte d'un altre post processat. En aquest cas d'un tractament tèrmic per millorar l'adhesió entre els filaments i així augmentar les propietats mecàniques del material.

1.2. Objecte del projecte

L'objecte del projecte és determinar la influència de la configuració d'impressió, en funció de l'orientació i les condicions del posterior tractament tèrmic, sobre les propietats mecàniques de l'ABS i d'un copolièster reforçat amb fibra de carboni curta (CFRP). També s'observarà com afecta aquest tractament en les dimensions finals de cada una de les direccions, en el pes, i en l'estructura interna del material.

L'objectiu principal d'aquest projecte és determinar el comportament de cada material en les diferents direccions, per tal de poder-lo caracteritzar i millorar les seves propietats mecàniques amb l'aplicació d'un tractament tèrmic.

1.3. Abast del projecte

- Ajustament dels paràmetres d'impressió de cada tipus d'orientació de proveta i en funció de cada material (ABS i copolièster reforçat amb fibra de carboni curta)
- Establir variables a estudiar, així com estimar de forma teòrica els paràmetres que afecten les diferents propietats i acabat de la peça impresa
- Fabricació d'una mostra significativa de provetes de diferents tipus d'orientació, seguint la normativa ASTM D638-1 per tal de ser assajades a tracció
- Determinació dels paràmetres adequats del tractament tèrmic per una millor adhesió del cordó i les diferents capes de material. Es compararà experimentalment l'efecte de dos tractaments diferents i es determinarà quina és la millor combinació de temperatura i temps que aporta les majors millores en el material
- Estudi de la variació dimensional, de la massa i de l'estructura interna després de cada tractament tèrmic
- Realització dels assajos a tracció per analitzar el comportament del material
- Plantejar futures línies d'investigació que ajudin a comprendre o a millorar processos en diferents materials utilitzats en la impressió FDM

2. ESTAT DE L'ART

2.1. Fabricació additiva

La fabricació additiva, en anglès *Additive Manufacturing* (AM), engloba un conjunt de tecnologies amb diferents mètodes de fabricació i una gran varietat de materials.

Totes aquestes tecnologies tenen en comú que parteixen d'un model creat per disseny assistit per ordinador (CAD) i el procés de fabricació es basa en l'aportació de material en una successiva superposició de capes. La tecnologia additiva elimina les restriccions de la fabricació dels processos tradicionals basats en la subtracció de material i és una alternativa molt interessant per aplicar en molts sectors de la indústria.

Existeixen diferents tipus de tecnologies de fabricació additiva, que es poden classificar en funció del material de base utilitzat. Principalment es poden dividir en 3 tipus: base líquida, base sòlida i base en pols. Dins del tipus de base líquida es troben principalment la tecnologia Estereoliogràfica (SLA) i el *Digital Light Processing* (DLP). En els processos de fabricació additiva on el material està en estat sòlid hi destaca principalment la tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM) utilitzada en les impressores 3D del mercat i emprada per la realització d'aquest projecte. Les tecnologies que utilitzen el material en base pols uneixen les capes mitjançant la seva fusió per làser; i les principals són la *Selective Laser Sintering* (SLS) i la *Laser Cladding* (LC). Per una introducció més a fons de les tecnologies de fabricació additiva es pot consultar l'Annex A.

Un dels principals avantatges de la tecnologia d'impressió FDM, utilitzada en aquest projecte, és que permet crear objectes de geometries complexes d'una forma senzilla i amb una gran flexibilitat. Per contra, aquest procés de fabricació té un seguit d'inconvenients i d'aspectes a millorar com ara les baixes propietats mecàniques de les peces a causa de les tensions internes i l'efecte de l'orientació del filament. A més, s'ha de tenir en compte que d'entrada els materials aptes per poder ser utilitzats amb aquestes tècniques de fabricació tenen unes propietats mecàniques relativament baixes, malgrat hi ha una continua evolució i poc a poc van apareixent nous materials i millores en els existents aptes per aquesta tecnologia de fabricació.

2.2. Fused Deposition Modeling (FDM)

El modelat per disposició fosa (FDM) és una de les tecnologies de fabricació additiva per impressió 3D més estesa entre el públic en general. Aquesta tecnologia ofereix una gran flexibilitat d'ús, una relativa facilitat de construcció i a un baix preu.

Aquesta tècnica de fabricació va néixer l'any 1989 de la mà del cofundador de *Stratasys Inc.* i es va denominar *Fused Deposition Modeling (FDM)*. Cal dir que aquesta denominació està registrada i per evitar problemes legals també s'utilitza el terme de fabricació per extrusió de filament, *Fused Filament Fabrication (FFF)*. El concepte de funcionament és molt senzill, ja que es fon un termoplàstic de forma controlada en un fusor i es va dipositant capa a capa per un extrusor fins a conformar la peça final.

A la *Figura 3* s'observa l'esquema i els components d'una impressora 3D per FDM.

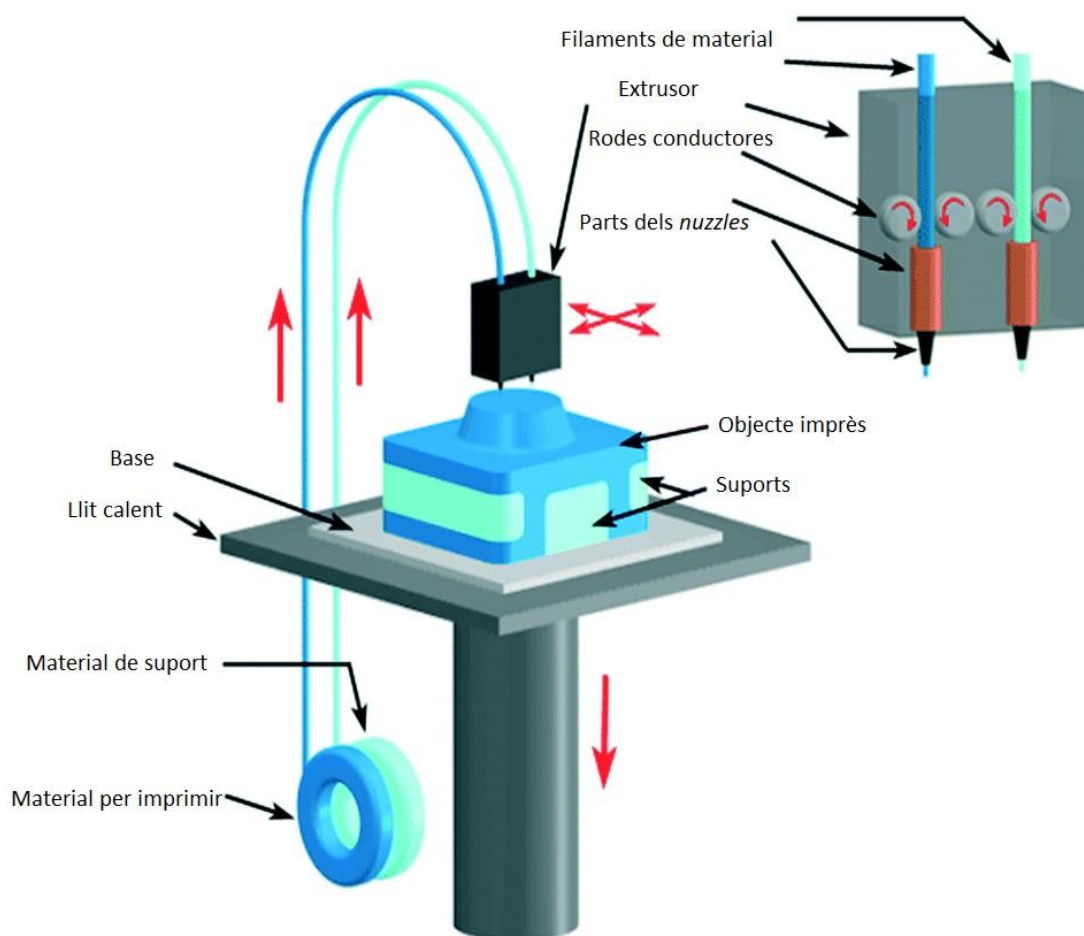


Figura 3: Esquema de funcionament de la impressió 3D per FDM [7]

El procés d'impressió 3D comença amb la creació d'un model mitjançant un programari de disseny assistit per ordinador (CAD). Amb el mateix programa, que en el cas d'aquest projecte ha sigut el *SolidWorks v.2016*, s'exporta el model en format estereolitogràfic (.stl).

Tot seguit, amb el software de laminació s'orienta la peça respecte la superfície de construcció i es configuren els paràmetres d'impressió. En cas que sigui necessari també es poden configurar les estructures de suport o múltiples extrusors. El mateix software converteix l'objecte sòlid a un seguit de coordenades en format *G-Code* amb el qual ja es pot executar la impressió. En el procés d'impressió, diversos motors pas a pas mouen el capçal i la superfície de construcció en les diferents direccions. Un altre motor s'encarrega de moure el filament a través de l'extrusor que fon el termoplàstic a una temperatura que depèn del material i normalment oscil·la entre 170 i 260°C. El filament s'extreu pel broquet, també anomenat *nozzle*, de l'extrem de l'extrusor i ràpidament s'endureix a temperatura ambient per fixar-se amb la capa inferior.

Una vegada finalitzat el procés d'impressió de la peça, existeixen diverses tècniques de post processat que poden millorar la qualitat superficial de l'objecte. Normalment aquests processos són manuals i entre ells s'inclou el polit, l'eliminació dels suports, infiltracions per millorar les propietats mecàniques, tractaments tèrmics, o en el cas de l'ABS, un bany amb vapor de acetona per suavitzar les capes visibles del model.

A la *Taula 1* es mostren els principals avantatges i inconvenients de la tecnologia de fabricació FDM, utilitzada en la realització d'aquest projecte.

Avantatges	Inconvenients
✓ Gran flexibilitat i geometries complexes	✗ Baixes propietats mecàniques
✓ Útil per prototips ràpids i utilitatges	✗ Comportament anisotròpic
✓ Àmplia varietat de materials	✗ Acabat rugós
✓ Procés altament automatitzat	✗ Poca precisió dimensional
✓ Reducció del temps de cicle	✗ Baixa repetibilitat

Taula 1: Avantatges i inconvenients de la tecnologia FDM

Per la realització d'aquest projecte s'ha utilitzat una impressora cartesiana, model *Prusa i3 Single Frame* de l'empresa *Cooking Hacks*, que treballa sobre els eixos X, Y i Z i que va sortir al mercat l'any 2012. Aquesta impressora es subministra desmuntada i s'ha de muntar seguint les instruccions que el fabricant proporciona. Les bones prestacions, la gran flexibilitat i el relatiu baix cost, ha provocat que sigui un dels models domèstics més utilitzats en els últims temps [8].

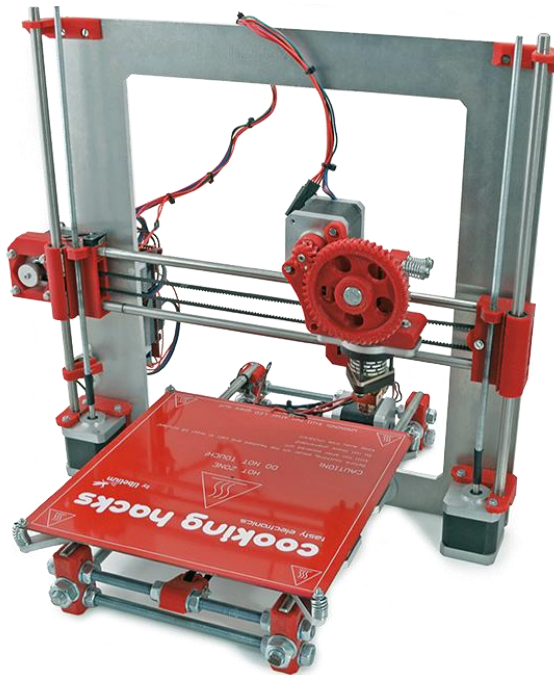


Figura 4: Impressora 3D utilitzada [9]

Característiques generals:

- Voltatge d'entrada: 220V
- Materials recomanats: ABS, PLA o similars (\varnothing de 2.85 o 3 mm)
- Temps aproximat de muntatge: 12 hores
- Àrea d'impressió: 200x200x200 mm
- Dimensions de la impressora: 340x440x370 mm
- Basat en el model *PRUSA ITERATION 3 – IT3*
- Resolució (eix Z): alta: 100 μ m, mitjana: 200 μ m i baixa 300 μ m

2.3. Elements de la impressora

En aquest apartat es descriuen els elements principals que formen una impressora 3D de FDM i les característiques més rellevants que s'han de tenir en compte. La localització de cadascun dels elements es pot trobar a la *Figura 3* de l'anterior apartat 2.2.

Extrusor

L'extrusor o *hot-end* és l'element de la impressora que fon el material en forma de filament i el va dipositant capa a capa. Aquest element és una de les parts més crítiques d'una impressora de tecnologia FDM, ja que el material que es pot arribar a imprimir depèn directament de la temperatura de l'extrusor. Aquesta temperatura es controla mitjançant el software d'impressió i en el cas de la impressora utilitzada en aquest projecte la seva temperatura màxima és del voltant de 270°C.

Actualment existeix una gran varietat de models i configuracions diferents de capçals d'extrusió. Normalment són metàl·lics, d'una sola peça i presenten una sèrie d'aletes que evacuen l'escalfor per mantenir fred el canal inicial per on passa el filament i així evitar que es col·lapsi. A la *Figura 5 (a)* es pot veure l'extrusor de la impressora utilitzada.

Broquet (*Nozzle*)

A l'extrem de l'extrusor es troba el broquet o *nozzle*, un element amb forma de punta amb un orifici a la part inferior que permet la sortida del filament en estat fos. Normalment el *nozzle* és massís i metàl·lic, sent el bronze i l'acer els materials més utilitzats. En el cas d'imprimir amb un material abrasiu com un polímer reforçat amb fibra de carboni s'ha de tenir especial atenció amb el material del *nozzle*. El diàmetre del broquet és el que definirà el gruix màxim de filament i cal conèixer aquest diàmetre per introduir el seu valor al programa i que aquest pugui fer els càlculs per controlar el material que surt. Els diàmetres més comuns són de 0.2, 0.3, 0.4 i 0.5 mm. Es pot veure el *nozzle* utilitzat a la *Figura 5 (b)*.

Motors pas a pas

La impressora utilitzada està formada per 5 motors pas a pas o també anomenats servomotors. Dos dels quals són els encarregats de moure el capçal en la direcció Z, un altre mou l'extrusor en la direcció X i un altre s'encarrega del moviment de la plataforma en la direcció Y. Finalment el darrer motor és el que s'utilitza per moure el filament de material fins a l'extrusor.

A la *Figura 5 (c)* es mostra un dels motors de la impressora, concretament és el model *Nema 17* que és un dels més estesos dins la comunitat d'impressores 3D de codi obert.

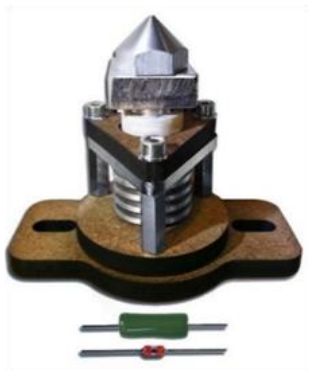
Plataforma d'impressió o llit calent

El llit calent o plataforma d'impressió és la superfície plana on es construeix l'objecte i ha d'estar sempre completament perpendicular a l'extrusor per a permetre una correcta adherència de les capes del material. La necessitat del llit calent i la graduació de la seva temperatura depèn del tipus de material imprès.

El seu funcionament és senzill i es basa en l'efecte de la resistència al pas del corrent de la placa que conté un entramat de coure. En el cas de la placa calefactora de la impressora 3D utilitzada pot arribar a una temperatura màxima de 120°C i es pot controlar mitjançant el software. A la *Figura 5 (d)* s'observa una imatge de la placa de la impressora.

Filament

El filament és la matèria prima utilitzada per la impressió 3D del model. La bobina de filament sol estar sobre el marc i amb l'ajuda d'un dels motors i dos engranatges conductors va alimentant l'extrusor. Tal i com es pot veure a la *Figura 5 (e)*, actualment existeixen bobines de filaments de diversos materials, diàmetres i colors.



(a) [9]



(b) [10]



(c) [9]



(d) [9]



(e) [10]

Figura 5: Extrusor (a), nozzle (b), motor (c), plataforma d'impressió (d) i filament (e) [9] i [10]

Altres elements

En la impressora també hi ha presents altres elements electrònics que fan possible el control dels motors i de la temperatura de l'extrusor i del llit calent. La part electrònica està formada pel *driver* del motor, la placa de control, dos sensors de temperatura i quatre finals de cursa per situar l'origen de coordenades de la impressora. Un altre element indispensable és la font d'alimentació necessària pel sistema electrònic. Aquestes fonts són de corrent continu a 12V amb una potència entre 100 i 400W.

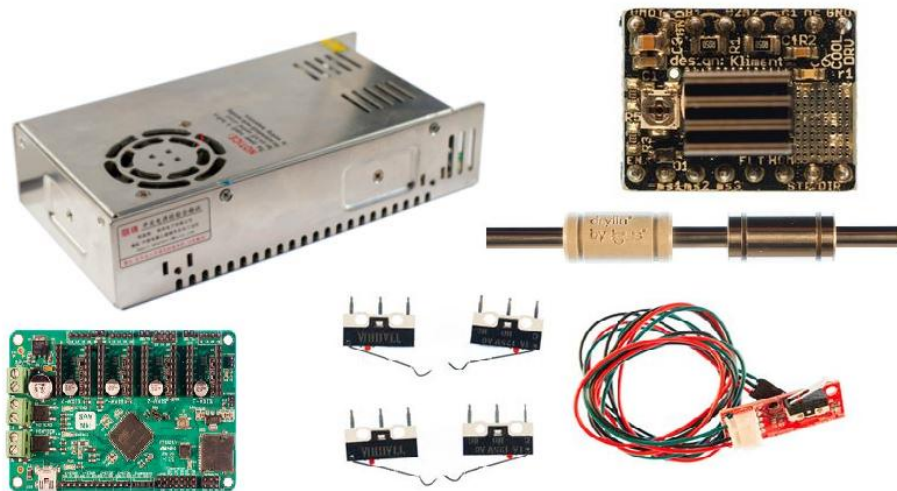


Figura 6: Elements que també formen part de la impressora 3D [11]

2.4. Materials per FDM

La tecnologia de fabricació additiva ha evolucionat molt en els darrers anys, gràcies a la proximitat entre la societat i l'augment de la impressió 3D en molts camps diferents, nombroses empreses han invertit en la investigació de nous materials i fins i tot la combinació entre ells per cobrir diverses necessitats.

Actualment aquesta tecnologia ofereix la possibilitat de fabricar models amb termoplàstics, ceres, metalls, fusta i fins i tot aliments. La majoria de termoplàstics utilitzats en la impressió FDM són polímers, els quals consisteixen en dues o més substàncies i cada una d'elles està composta de llargues cadenes moleculars entrelaçades.

Els termoplàstics més utilitzats en la impressió FDM són el PLA (Poliàcid Làctic) i l'ABS (Acrilonitril Butadiè Estirè) [12]. També s'utilitza amb freqüència el PC (Policarbonat), *nylon*, elastòmers (*Filaflex®*) i HIPS (Poliestirè d'Alt Impacte). Com a materials de suport s'acostumen a utilitzar ceres i PVA (Acetat de Polivinil), ja que són hidrosolubles [13]. Per aplicacions més funcionals on es requereix d'una bona resistència mecànica s'utilitza el termoplàstic ASA (Acrilonitril Estirè Acrilat) i compòsits reforçats amb fibra de carboni.

Aquests materials venen subministrats pels diferents fabricants en forma de filament en una bobina. Els diàmetres més comuns són els de 1.75 mm i 2.85 mm. En l'apartat 4.1. *Material utilitzat* es descriuen els materials emprats en l'elaboració d'aquest projecte.



Figura 7: Exemples de materials per FDM [14] i [15]

2.5. Propietats mecàniques de peces impreses amb FDM

Mitjançant la impressió 3D, cada cop més es busca obtenir peces funcionals i no només prototipatges. Actualment els polímers utilitzats en la tecnologia FDM tenen una plasticitat limitada i una baixa resistència mecànica i per aquest motiu no s'acostumen a utilitzar en aplicacions més exigents. Per tal de millorar les propietats del material, es necessitarà conèixer el seu comportament mecànic i caracteritzar les seves propietats en funció dels paràmetres de fabricació i dels posteriors tractaments. Per predir aquestes propietats és necessari conèixer les característiques anisotròpiques del material [2].

El procés d'impressió ve marcat, en gran mesura, per la direcció del filament fos i la unió entre les capes de la peça, les propietats mecàniques també dependran d'aquesta direcció. Com que el plàstic és un mal conductor de la calor, en el refredament es produeix un conjunt de defectes i tensions internes que debiliten la resistència de l'estructura del polímer. Aquests defectes sumats a la línia d'unió no ideal entre les diferents capes, també produïts pel refredament ràpid i irregular, fan que les peces impreses mitjançant tecnologia additiva FDM siguin poc resistents.

Cal tenir en compte que, com a norma general, la unió entre filaments de la mateixa capa serà millor i més resistent que la unió entre els fils de les diferents capes (*Figura 8*). Aquesta diferència és ocasionada pel fet que entre una capa i una altra transcorre un major temps que en la unió de filaments de la mateixa capa, el que fa que la capa inferior perdi temperatura i com a conseqüència es produeixi una unió més dèbil per la falta de difusió molecular. Per altra banda, les unions entre filaments de la mateixa capa es produeixen més seguides i a una major temperatura i per tant els enllaços són més forts.

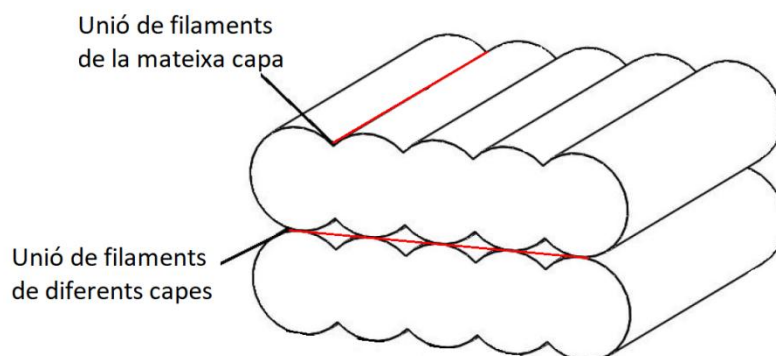


Figura 8: Unió dels filaments d'una peça impresa amb tecnologia FDM [16]

Orientació o direcció de fabricació

La direcció de fabricació serà un dels paràmetres més influents en la caracterització de les propietats mecàniques del material. La direcció que generalment ofereix una resistència a tracció més elevada és la que té les unions entre capes de forma paral·lela a la direcció de la força aplicada [2]. Normalment quan la peça està sotmesa a compressió o a flexió el comportament és totalment diferent [17], ja que els filaments posseeixen una major resistència a tracció i també una bona resistència a flexió; però en general tenen una molt mala resistència a compressió. A més, aquesta resistència a tracció dependrà de la direcció dels filaments i es veurà afectada per la tendència del polímer a alinear-se i orientar les molècules de cadena llarga en la mateixa direcció de l'elongació, incrementant així la seva resistència en aquesta direcció.

Anisotropia

El comportament del material no és el mateix en les 3 direccions i per aquest motiu s'han de caracteritzar les propietats mecàniques i elàstiques com la resistència, el mòdul de *Young* i l'elongació en cada una de les direccions.

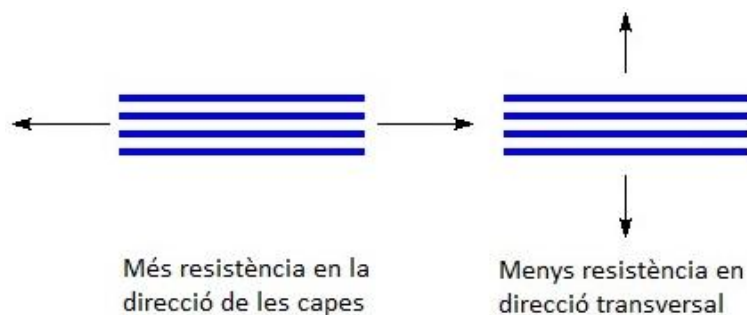


Figura 9: Propietats anisotròpiques del material imprès per capes [18]

Per tots aquest factors el comportament mecànic de la peça impresa en tecnologia 3D vindrà fortament marcat per la orientació de fabricació i aquest serà un paràmetre clau per caracteritzar la seva resistència i les propietats mecàniques finals. Existeixen altres factors que poden influir en les característiques de la peça com poden ser alguns paràmetres de fabricació com ara el gruix de filament, l'altura de capa i la velocitat d'impressió. Es descriuen els principals paràmetres i el seu efecte en les propietats finals de la peça en l'apartat 3. *PARÀMETRES D'IMPRESSIÓ*.

2.6. Tractament tèrmic

En funció de la peça que es vol fabricar i el seu propòsit final, es sol·licita al material una certa resistència i rigidesa que a vegades és difícil d'aconseguir en models impresos en 3D. Fins i tot en les aplicacions on el model no estarà subjecte a alts nivells de tensió mecànica, la resistència addicional sempre pot ser convenient i ajudarà a allargar la seva vida útil.

Els plàstics per impressió 3D són polímers amb una estructura típicament desorganitzada i bastant amorfa. A l'extrudir el material i posteriorment refredar-se a temperatura ambient es reordenen aquestes estructures d'una forma cristal·lina més organitzada; no obstant, aquest refredament succeeix de forma ràpida i de manera desigual, debilitant les seves propietats. Per minimitzar aquests efectes es pot aplicar un tractament tèrmic per tal de suavitzar l'estructura del material, relaxar les tensions i augmentar el grau de cristal·linitat.

Cristal·linitat

En certs polímers és possible variar el seu grau de cristal·lització i com a conseqüència modificar les seves característiques físiques i mecàniques. Aquest procés es pot produir durant la síntesi del polímer o bé en un procés posterior. Mitjançant el control de la velocitat de solidificació durant el refredament, l'estructura de la cadena i les seves ramificacions, és possible aportar diferents graus de cristal·linitat al material. En molts casos s'obté com a resultat un polímer parcialment cristal·lí, considerat com un material bifàsic, amb una fase cristal·lina i una altra amorfa. A la *Figura 10* es veu un esquema de la recrystal·lització d'un polímer.

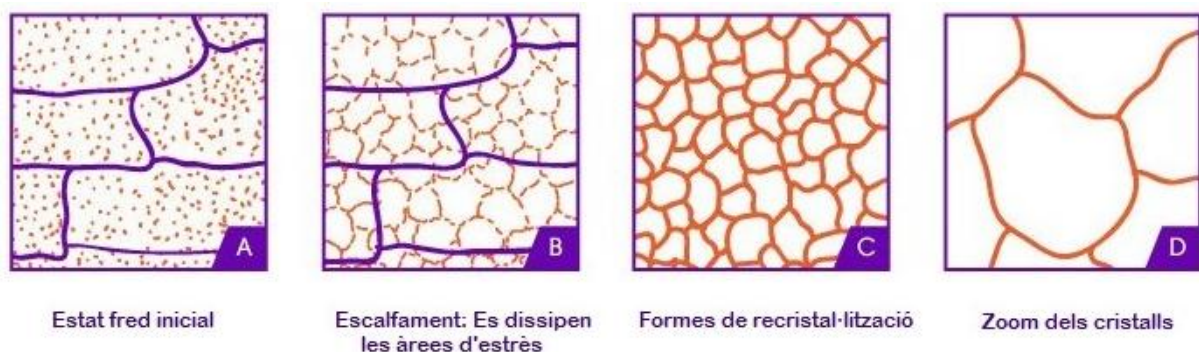


Figura 10: Esquema del procés de recrystal·lització d'un polímer [19]

El grau de cristal·linitat afecta en gran mesura a les propietats físiques i mecàniques del polímer. A mesura que augmenta la cristal·lització, el plàstic es torna més rígid, dur, resistent i com a conseqüència disminueix la seva ductilitat. També augmenta la seva densitat fruit d'un ordre més eficient de les molècules de la xarxa cristal·lina [20].

Temperatura de transició vítria

Encara que els polímers amorfs no tinguin un punt de fusió específic, pateixen un canvi clar en el seu comportament mecànic en un interval de temperatura concret. En aquest interval de temperatura es produeix la transició vítria (T_g).

L'exposició del material a temperatures pròximes a la de transició vítria provoca un canvi de la conformació de les molècules que modifica la rigidesa del material. Aquest canvi en la regió amorfa del polímer és reversible i pot ser des d'una condició gomosa del material fins a una condició relativament dura i trencadissa, o viceversa. Per determinar aquesta temperatura s'ha d'estudiar el volum específic del polímer en funció de la temperatura i en el punt on s'observa un canvi marcat en el pendent de la corba és on es troba la temperatura de transició vítria. Un mètode per obtenir aquesta temperatura del material d'una forma experimental és mitjançant una anàlisi de calorimetria d'escombrat diferencial (*Differential Scanning Calorimetry, DSC*).

Revingut

El revingut és un procés tèrmic antic, utilitzat originalment en la indústria metal·lúrgia per alterar les propietats físiques del material, augmentar la seva resistència i reduir les tensions internes creades en el procés de fabricació. Normalment s'aplica el revingut en materials comuns com l'acer, el coure, el llautó i en alguns polímers.

En el procés de revingut el material és escalfat lentament fins a la seva temperatura de transició vítria, o just per sobre, però per sota del seu punt de fusió. Un cop assolida aquesta temperatura, es manté durant un temps prolongat, que depèn de la dimensió i la geometria de la peça. Aquest augment de la temperatura permet que es formin cristalls més petits i més organitzats. Tot seguit es refredarà el material lentament i de forma homogènia fins a arribar a la temperatura ambient amb l'objectiu de reduir les tensions internes. Si es refreda massa ràpid, algunes àrees de la peça poden tenir diferències de temperatura i causar deformacions o tensions internes. Finalment, aquesta nova matriu cristal·lina més compacte farà que el material sigui més resistent, augmenti la seva ductilitat i estabilitat dimensional.

Revingut de polímers

Aquest tractament tèrmic també es pot aplicar als polímers i, concretament, als plàstics d'impressió 3D. El procediment és molt similar al dels metalls però amb diferències de temperatura i temps.

Quan el polímer tractat s'aproxima o assoleix la seva temperatura de transició vítria, les cadenes moleculars tenen suficient energia per entrar en un estat amorf. En aquest estat, poden rotar, moure's i estirar-se, fent que s'alliberin algunes de les forces de tracció i compressió que resulten d'un refredament desigual. Aquest procés tèrmic augmenta la quantitat d'estructures cristal·lines en el material i fa que sigui més rígid, resistent i torni al seu estat de relaxació inicial. Hi ha treballs d'investigació de professionals que analitzen la relació de la cristanilitat amb les propietats mecàniques del plàstic [21].

Temperatura de revingut

Teòricament, el valor de la temperatura de tractament tèrmic ha de ser major a la temperatura de transició vítria (T_g). Tanmateix, aquesta temperatura pot causar flexió i deformació de la peça tractada. Per tant, la temperatura idònia del revingut dependrà en del gruix, la forma i les característiques del material i per aquest motiu, en molts casos s'ha d'acabar obtenint d'una forma experimental el rang de temperatures del tractament.

Temps de revingut

En moltes ocasions el temps de revingut és un paràmetre complicat de seleccionar. Principalment existeixen dues estratègies de tractament, la primera consisteix amb un escalfament fins a una certa temperatura, després d'un manteniment i un posterior refredament. En casos on les toleràncies són molt ajustades o el material té facilitat pel vinclament s'aplica un altre tractament amb un escalfament més lent, sense manteniment i seguidament d'un refredament d'un temps addicional. A la *Figura 11* es mostra gràficament la relació entre el temps i la temperatura dels dos tipus de tractaments.

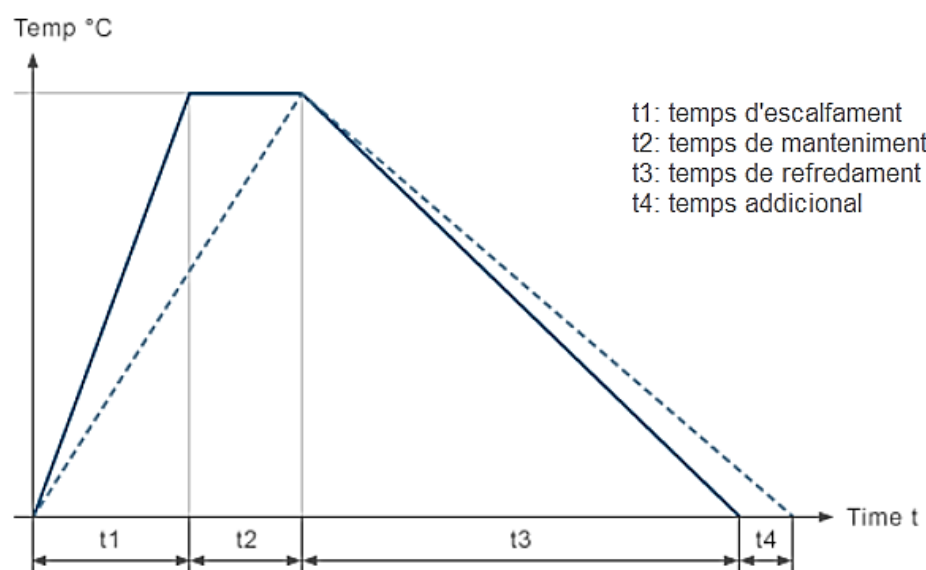


Figura 11: Gràfic temps-temperatura del tractament tèrmic [22]

El temps necessari per el tractament es selecciona en funció del gruix, la forma i el medi de revingut de la peça; per això es recomana obtenir aquest valor d'una forma experimental. La velocitat de refredament també depèn del gruix de l'objecte i s'ha de mantenir homogeneïtat entre la part exterior i el nucli de la peça per tal d'evitar tensions internes.

Cal tenir en compte que les condicions de tractament variaran depenent de si el material s'ha fabricat mitjançant extrusió o bé injecció. A la *Taula 2* es poden veure les condicions de revingut dels principals polímers d'impressió 3D.

Material Plàstic	Escalfament	Manteniment	Refredament	Temperatura (T _g)
ABS	23°C/h fins a 90°C 28°C/h fins a 105°C	1 h/cm de gruix -	20°C/h fins 40°C	105 °C
PLA	13°C/h fins a 60°C 16°C/h fins a 70°C	1 h/cm de gruix -	20°C/h fins 40°C	62 °C
Polietilè Tereftalat (PET)	26°C/h fins a 100°C 40°C/h fins a 180°C	1 h/cm de gruix -	20°C/h fins 40°C	177 °C
Polietilè (PE)	16°C/h fins a 70°C 33°C/h fins a 120°C	1 h/cm de gruix -	20°C/h fins 40°C	104 °C
Nylon 6	23°C/h fins a 90°C 38°C/h fins a 160°C	1 h/cm de gruix -	20°C/h fins 40°C	91 °C
Policarbonat (PC)	20°C/h fins a 80°C 36°C/h fins a 130°C	1 h/cm de gruix -	20°C/h fins 40°C	135 °C
Copolièster	16°C/h fins a 70°C 23°C/h fins a 90°C	1 h/cm de gruix -	20°C/h fins 40°C	80 °C

Taula 2: Condicions de tractament tèrmic de diferents materials extruïts [22]

Consideracions del tractament

El revingut tèrmic no sempre és necessari. En alguns casos pot ocasionar problemes dimensionals produïts per una excessiva contracció i per això s'han de tenir en compte algunes consideracions:

- **Revingut de materials reforçats amb fibres:** Els productes reforçats amb fibres poden provocar anisotropia. Aquest fet està influenciat pel gruix i la geometria de la peça.
- **Tractament segons el medi:** Existeixen dos medis per escalfar el material: medi líquid (oli, aigua, glicol, etc.) o mitjançant l'aire. El medi de revingut també és un factor que afecta les condicions i temps de tractament.
- **Revingut excessiu:** El tractament tèrmic excessiu pot provocar decoloració, descomposició, formació de defectes a la superfície i altres problemes no desitjats.

3. PARÀMETRES D'IMPRESSIÓ

Quan es realitza una impressió en 3D d'un model, existeixen múltiples paràmetres dels quals estan fortament lligats a les propietats finals de la peça impresa i determinen en gran mesura la seva qualitat, durabilitat i resistència. Per tant, cal saber com i quan modificar aquests paràmetres per obtenir un model que s'ajusti més a les necessitats desitjades.

Els paràmetres més rellevants són la orientació d'impressió, l'altura de capa, l'ompliment, el gruix del filament i la configuració relacionada amb la velocitat i temperatura d'impressió. Tot seguit es detalla cada un dels paràmetres subdividits en funció de la configuració del software de laminació (*Slic3r*) en 3 apartats: configuració de la impressió, del filament i de la impressora.

3.1. Configuració de la impressió

En aquest apartat es descriuen les configuracions de la impressió i s'inclou la orientació d'impressió, l'altura de capa, els perímetres, el tipus d'*infill*, el gruix del filament i la velocitat de moviment de la impressora.

Orientació d'impressió

L'orientació d'impressió és un factor clau a tenir en compte abans de començar a imprimir un model. La col·locació de la peça respecte a la base de la impressora pot influir en l'acabat de l'objecte i en les seves propietats finals. D'aquest paràmetre dependrà si les capes del material s'imprimeixen en la direcció longitudinal de la força que s'aplicarà o bé en la direcció transversal.

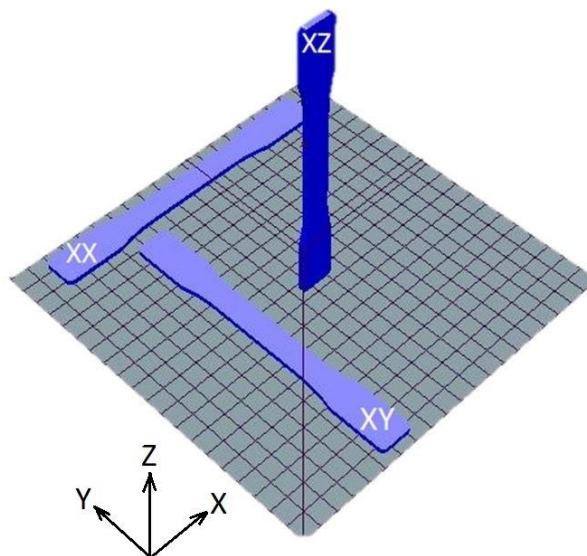


Figura 12: Diferents orientacions d'impressió

La nomenclatura que s'ha utilitzat és: el primer terme defineix la direcció del moviment del capçal extrusor (totes les provetes s'han imprès amb direcció de moviment X). El segon terme defineix l'orientació de la proveta respecte les coordenades de la base de la impressora. A l'apartat 4.3 *Tipus de provetes* es descriuen més detalladament la configuració i orientació de les provetes que es mostren a l'anterior *Figura 12*. Segons la majoria d'articles i treballs d'investigació les provetes del tipus XX són les que presentaran millor resistència [3].

Altura de capa

L'altura de capa és el paràmetre principal que afecta la qualitat d'impressió i estableix el gruix de cada capa que s'imprimirà. Com menor sigui aquest gruix, s'aconseguirà una millor qualitat d'impressió i un acabat més fi però es necessitaran més capes per imprimir i el temps total augmentarà significativament.

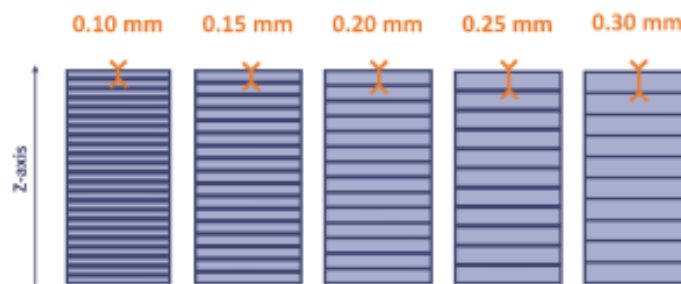


Figura 13: Diferents altures de capa [23]

L'altura de capa juga un paper important en el control de les propietats mecàniques de la peça impresa. Diversos estudis conclouen que a mesura que augmenta el gruix de capa augmenta la resistència màxima de la proveta, per valors de més de 0.2 mm la tensió es manté bastant constant assolint el pic amb l'altura de 0.25 mm, posteriorment la tensió disminueix en augmentar el gruix de capa fins 0.35 mm [24].

El paràmetre de l'altura de capa està directament relacionat amb el diàmetre del *nozzle* i normalment aquest valor no ha de ser major al 60 - 80% del diàmetre de sortida del filament, per tal d'obtenir una bona adherència entre filaments i entre capes. En general els valors mitjans d'altura de capa són de 0.3, 0.2 o 0.1 mm tot i que a vegades es redueix el valor de la primera capa per obtenir una millor adherència amb la placa calefactora.

Ompliment (*infill*)

L'ompliment és un valor generalment representat en percentatge que mostra quant s'omplirà un model sòlid quan sigui imprès. Amb el software de laminació, l'usuari pot determinar aquest percentatge, així com el patró d'ompliment. Aquests dos paràmetres són importants a l'hora de determinar la densitat i les propietats mecàniques de la peça.

Normalment, a menys que es desitgi la resistència màxima, no és necessari omplir completament el model, especialment si també es vol estalviar en cost de material, pes i temps. Per aquest motiu la majoria de peces impreses en tecnologia FDM no solen ser del tot massisses i es fabriquen amb un *infill* entre el 30 i el 70%. A la *Figura 14* es veu la secció de provetes impreses amb diferents percentatges d'ompliment.

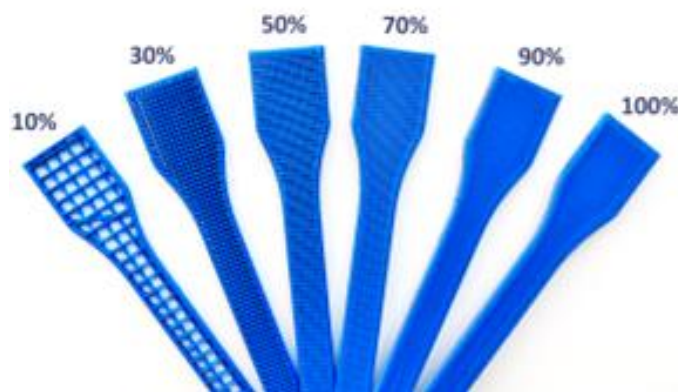


Figura 14: Imatge de diferents percentatges d'infill [1]

Com més percentatge d'ompliment es configuri, més es redueix la deformació i més resistència mecànica presenta la peça. S'ha comprovat en diversos estudis que aquest creixement no és lineal [25].

Número de perímetres

El número de perímetres és el nombre de contorns impresos que conformen la part exterior de la geometria del model, sense tenir en compte l'*infill*. Aquest paràmetre afecta considerablement a l'acabat exterior i a la resistència mecànica de la peça. Generalment, com més contorns es configuren més resistència tindrà el model, però també cal dir que augmentarà la seva massa i densitat. El número predeterminat de contorns per peces convencionals sol ser entre 2 i 5, però en el cas de voler una peça sòlida a partir de contorns s'ha de configurar manualment un número elevat de perímetres que garanteixi l'ompliment de tota la peça sense *infill*. Això és el que s'ha fet per imprimir els diferents tipus de provetes d'aquest projecte.

Patró d'impressió

El patró d'impressió és el tipus d'ompliment amb el qual s'imprimirà l'interior de la peça. La configuració més utilitzada és el patró rectilini, seguit del diagonal i el de rusc d'abella, encara que existeixen altres com el concèntric o alguns basats en curvatures. A la *Figura 15* es mostren els patrons d'impressió més utilitzats. Es pot configurar el tipus d'ompliment per les capes superiors i inferiors, així com l'ompliment d'una capa sòlida cada cert nombre de capes de la peça, per tal de donar rigidesa.

El patró d'impressió lineal, diagonal i hexagonal són bastant comparables en termes de resistència mecànica. Diversos estudis han conclòs que el patró lineal o rectilini és aproximadament un 10% més resistent que la resta [2][26].

També es pot modificar l'angle del patró d'impressió amb el que es realitzarà l'ompliment del model. Per defecte el programa imprimeix amb angles ortogonals entre capes i amb una inclinació de 45° o 90°.



Figura 15: Patrons d'impressió més utilitzats [1]

Amplada de filament

L'amplada del filament és un paràmetre que es troba a la configuració avançada del software de laminació i defineix el gruix del filament extrudit. Encara que el *nozzle* tingui un diàmetre de 0.4 mm no significa que el gruix màxim de filament sigui de 0.4 mm. De fet no ho és, ja que el fet d'imprimir amb una alçada de capa inferior al diàmetre del broquet fa que el material s'expandeixi lateralment resultant en una secció el·líptica de filament enlloc de circular. D'altra banda, sempre ha de ser una mica major per incrementar la superfície de contacte entre filament i millorar-ne l'adherència. Si es deixa el valor per defecte del 100% de l'altura de capa, el programa calcularà el gruix de filament internament i ajustarà la velocitat del motor que introdueix el filament a l'extrusor.

També es pot configurar l'amplada de filament de la primera capa de l'objecte i normalment es recomana un gruix d'un 150-200% superior al de la resta de capes per una millor adhesió a la plataforma.

L'amplada de filament extrudit dels perímetres també es pot configurar i habitualment es deixa a un valor inferior a la dels filaments interns per obtenir una millor qualitat en les parts externes de la peça. Un paràmetre directament relacionat amb l'amplada de filament és el nombre de contorns que tindrà la peça i com a conseqüència el temps total d'impressió. Configurant una amplada de filament alta, l'extrusor farà menys passades i el temps total per imprimir la peça serà menor.

Aquesta amplada de filament és un factor important a l'hora de determinar les propietats mecàniques de la peça impresa en 3D. Els filaments orientats a la mateixa direcció de la força aplicada actuen com fibres de reforç i per aquest motiu amb un gruix major es produeixen unions més resistents i millora la resistència de l'objecte [27].

L'amplada de filament ve marcada per la quantitat de material dipositat i el gruix que ocupa. A una altura de capa fixada, si s'imprimeix amb un major gruix de filament, hi haurà una major superfície de contacte i l'adhesió entre filaments serà millor. No sempre es pot imprimir a amplada màxima, ja que aquest paràmetre dependrà del diàmetre del *nozzle* i la bobina del material. Com es pot observar a la *Figura 16*, existeix una diferència entre una impressió sense sobre-extrusió (esquerra) i una impressió amb increment d'amplada (dreta) mantenint la mateixa altura de capa.

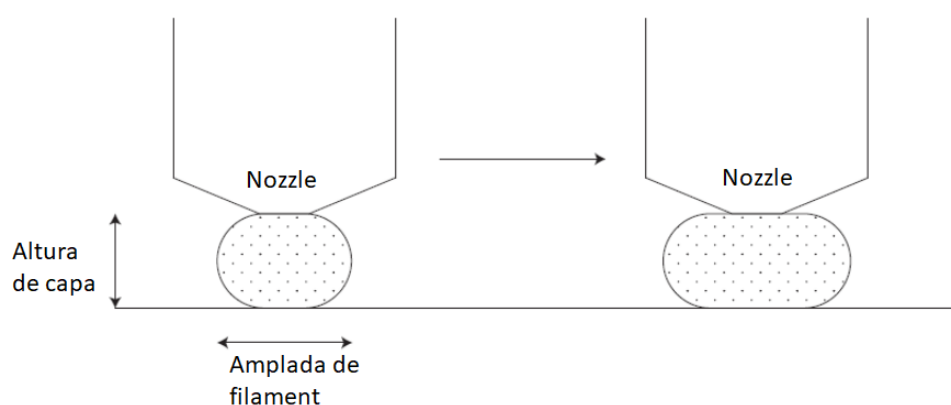


Figura 16: Diferència entre una impressió amb sobre-extrusió (esquerra) i sense (dreta) [20]

Velocitat d'impressió

La velocitat d'impressió és la velocitat a la qual es mou el capçal extrusor mentre diposita el filament en el procés de fabricació del model 3D. Depenent de la peça a imprimir i del filament que s'utilitzi s'haurà de configurar una velocitat d'impressió o una altra. El factor directament relacionat amb aquest paràmetre és el temps total d'impressió de la peça, encara que també pot influenciar en l'acabat superficial i l'adhesió entre les capes.

S'ha de tenir en compte no configurar una velocitat massa lenta perquè podria causar problemes d'unió entre capes i doblegament del filament provocat per la diferència de temperatures. Per una altra banda, una velocitat d'impressió massa alta generarà vibracions a la màquina que pot repercutir en la precisió dimensional de la peça. També es pot donar el cas que l'extrusor col·loqui la següent capa, abans que la capa anterior s'hagi pogut refredar, provocant cavitats i altres defectes de fabricació. Per tal d'obtenir un millor acabat superficial i una bona qualitat final de la peça es recomana disminuir el valor d'aquest paràmetre. La resistència mecànica també està relacionada amb la velocitat d'impressió, ja que si no es configura una velocitat adequada, les propietats del material es poden veure afectades [28].

La velocitat d'impressió utilitzada normalment oscil·la entre els 30 i 65 mm/segon, depenent de la impressora, el material i la geometria de la peça. Es recomana reduir aquesta velocitat en la impressió de la primera capa per tal de millorar l'adherència.

Velocitat de moviment

La velocitat de moviment o *travel* és la velocitat amb la qual es mou el capçal d'impressió sense extrudir el filament. Aquesta velocitat pot ser més ràpida que durant l'extrusió i fins i tot el doble. Normalment no és necessari modificar aquest paràmetre i es recomana deixar el valor predeterminat pel fabricant de la impressora. Aquest paràmetre normalment oscil·la entre 90 i 150 mm/segon.

Altres paràmetres d'impressió

Hi pot haver altres opcions disponibles pel control del procés d'impressió 3D, depenent del software de laminació que s'utilitzi. Alguns d'aquests paràmetres avançats poden modificar l'estratègia de fabricació, la retracció del capçal i altres paràmetres que normalment té el software per defecte. No es recomana modificar aquestes configuracions sense previ coneixement, ja que la qualitat d'impressió es pot veure afectada negativament si es configuren valors que no són correctes.

3.2. Configuració del filament

Una vegada configurats els paràmetres d'impressió és molt important establir les característiques del filament utilitzat, així com el seu diàmetre, color i les temperatures de l'extrusor i del llit calent.

Temperatura de l'extrusor

La temperatura de l'extrusor és la temperatura a la qual fon el material en imprimir. Aquesta temperatura depèn del material utilitzat i per això s'ha de consultar la fitxa tècnica del fabricant del filament. En general els rangs de temperatures proporcionats són bastant amplis i normalment s'ha d'anar ajustant aquest valor fins que la qualitat de la impressió sigui del tot correcta.

Establir una temperatura massa alta conduirà a una situació en que el filament començarà a degradar-se i com a conseqüència hi haurà una pèrdua de propietats mecàniques, funcionals i estètiques. Per minimitzar l'efecte de la temperatura, alguns models d'impressora incorporen un ventilador a l'extrem de l'extrusor que ajuda a refredar les capes. Per contra, una temperatura insuficient conduirà al cas on les capes tindran dificultats per unir-se, cosa que provocarà una fragilitat a la peça i un mal acabat superficial. A més, si aquesta temperatura és massa baixa, es pot donar el cas que el plàstic no flueixi adequadament a través de l'extrusor.

Temperatura del llit calent

El plàstic fos es diposita sobre una base llisa i polida, en el cas d'aquest projecte, en un vidre acoblat a una placa calefactora. Aquesta base ha d'estar recoberta d'un material adherent perquè el model que s'està fabricant no es desprengui durant el procés d'impressió. En la majoria dels casos s'utilitzen laques, productes específics o cinta *Kapton*.

En la majoria d'impressores aquesta base es pot escalfar mitjançant una placa calefactora que es manté a una certa temperatura durant la impressió per prevenir que la peça s'aixequi o es deformi de les puntes. Normalment la temperatura de la placa calefactora oscil·la entre els 70 i 120°C.

3.3. Configuració de la impressora

En aquest apartat s'introdueixen els paràmetres característics de la impressora com per exemple: les dimensions útils del llit d'impressió, el número d'extrusors, el diàmetre de la boqueta utilitzada. Com s'observa a la *Figura 17*, en aquest menú es pot configurar la distància *Z offset* que s'utilitzarà per calibrar la plataforma d'impressió.

També es poden configurar paràmetres avançats, com és el cas de l'opció d'afegir un codi *G-Code* per modificar els moviments de cada capa així com el desplaçament inicial i final, el port de sortida d'USB, el *Firmware*, entre d'altres.

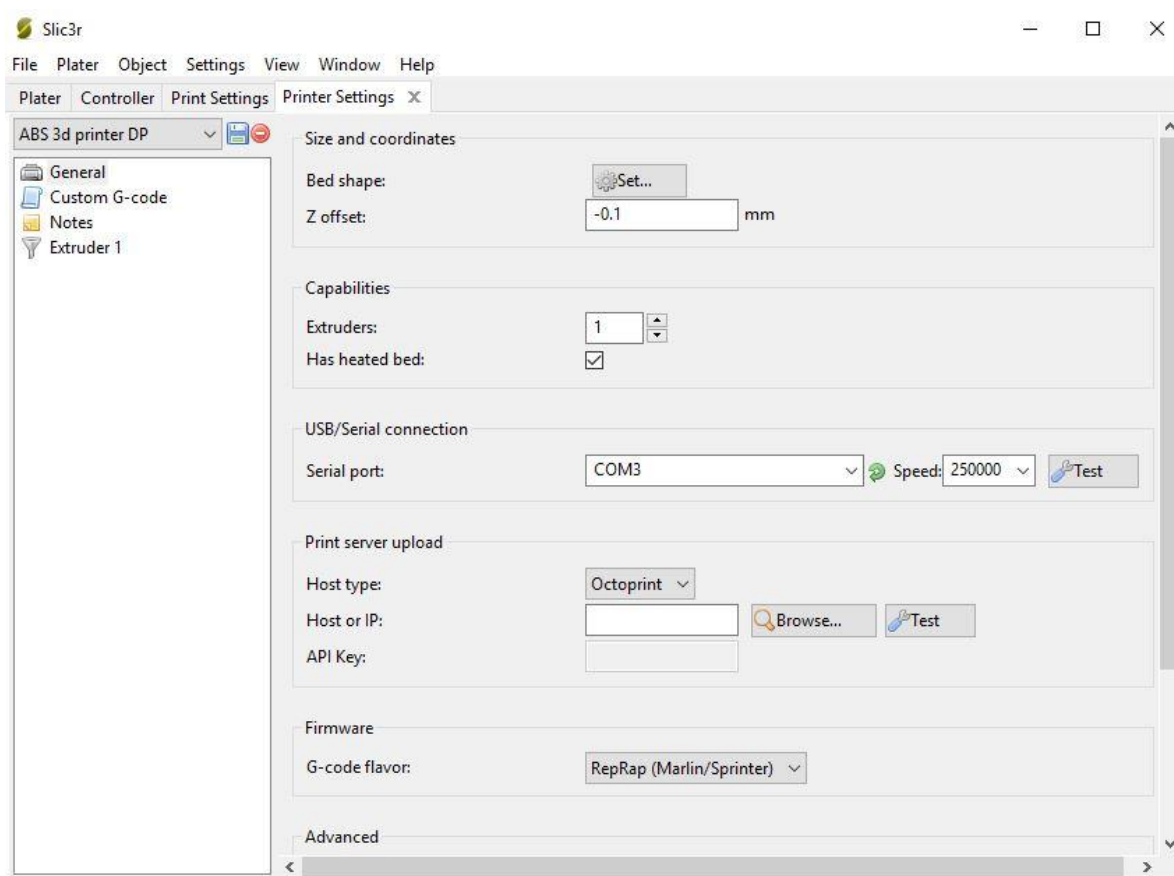


Figura 17: Menú de configuració dels paràmetres de la impressora

3.4. Programari

El programari que s'ha utilitzat per transferir les instruccions d'impressió a la impressora 3D és totalment obert i permet una gran flexibilitat per ajustar i modificar els paràmetres. Concretament s'ha utilitzat el *Repetier-Host* i l'*Slic3r* i tot seguit es fa una breu descripció de la funció de cadascun.

3.4.1. Repetier-Host

Repetier-Host és un software obert, gratuït, i compatible amb la majoria de models d'impressores 3D de tecnologia FDM. El programa permet controlar, calibrar i transmetre les dades de l'arxiu *G-Code* a la impressora per fabricar la peça. Es pot importar un model 3D, escalar-lo o rotar-lo i abans d'imprimir-lo es pot comprovar el resultat amb un visualitzador.

El programa ofereix àmplies opcions pel control manual de la impressora, així com una visualització del procés i l'opció de configurar una gran quantitat de paràmetres per ajustar millor la impressió. Incorpora programes de laminatge com *Slic3r*, *Skeingforge* i *Cura Engine*, tres opcions d'eines que converteixen el model en instruccions d'impressió 3D. Després del laminatge del model es poden comprovar tots els moviments de l'extrusora. Per l'elaboració d'aquest projecte s'ha utilitzat el programa de laminació *Slic3r*.

3.4.2. Slic3r

El programa *Slic3r* és un software gratuït i obert que s'utilitza per convertir un model 3D prèviament dissenyat en CAD en instruccions d'impressió en format *G-Code* perquè la impressora ho pugui interpretar. La funció principal del programa és subdividir la peça en capes horitzontals i generar les trajectòries que seguirà la impressora. També calcula el temps total d'impressió i el material que s'ha d'extrudir.

Slic3r és compatible amb la majoria de lectors de *G-Code* del mercat, permet la conversió entre diferents formats (STL, OBJ, POV, etc.) i controlar paràmetres més avançats per un ajust fi i un control total.

4. METODOLOGIA

En aquest apartat es mostra el mètode que s'ha dut a terme per dissenyar l'experimentació. Es descriu el material utilitzat, els tipus de provetes i els paràmetres de fabricació de cada configuració.

4.1. Material utilitzat

En aquest projecte s'ha experimentat amb dos materials diferents: ABS i copolièster reforçat amb fibra de carboni, els quals es caracteritzen per ser rígids i tenir una bona resistència. Tot seguit es descriuen les característiques més rellevants de cadascun.

4.1.1. ABS

L'Acrilonitril Butadiè Estirè (ABS) és un termoplàstic obtingut per polimerització d'estirè i acrilonitril en presència de polibutandiè. Es caracteritza per ser un material dur, rígid i sobretot tenaç. A més, també té una bona estabilitat dimensional, resistència a fluència i baix coeficient de fricció. Encara que sigui un material amorf, pel qual es considera que no té temperatura de fusió, la temperatura a la qual pot estar conformat és de prop de 250°C.

Aquest conjunt de característiques fan que l'ABS sigui un dels més utilitzats en la impressió 3D. Per la realització d'aquest projecte s'ha utilitzat un filament d'ABS negre de la marca *SMARTFIL*® i es poden veure les propietats a la *Taula 3* i més detalladament a l'*Annex B*.

Propietats ABS	
Propietat	Valor
Mòdul de tracció (GPa)	2.1-2.4
Elongació a la ruptura (%)	45
Resistència a la tracció (MPa)	41-45
Resistència a l'impacte Izod (J/m ⁻¹)	200-400
Densitat (g/cm ³)	1.07
Duresa Rockwell	102
Absorció d'aigua en 24 hores (%)	0.3-0.7
Coeficient de fricció	0.5
Resistència química	Bona
Resistència als rajos UV	Baixa
Biodegradable	NO
Temperatura de treball (°C)	De -20 °C a 80 °C
Temperatura de transició vítria (°C)	105 °C

Taula 3: Característiques físico-mecàniques de l'ABS [29]

Estructura de l'ABS

L'estructura de l'ABS és una mescla d'un copolímer vitri (estirè-acrilonitril) i un compost elàstic, principalment el polímer butadiè. L'estructura amb la fase elastòmera del polibutadiè es troba immersa en una dura i rígida matriu SAN. A la *Figura 18* s'observen els components de l'ABS i la seva estructura molecular.

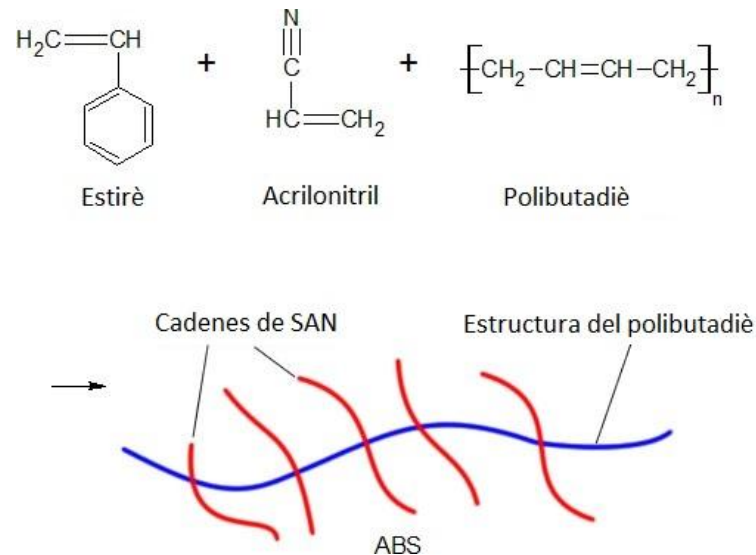


Figura 18: Estructura química de l'ABS [30]

La combinació dels tres blocs aporta al material unes bones propietats. L'acrilonitril dona resistència química, duresa i estabilitat a temperatures altes. El butadiè, resistència a l'impacte inclòs a baixes temperatures i tenacitat; i l'estirè aporta al material una bona rigidesa, resistència mecànica i acabat superficial. Aquesta mescla de propietats fan que el material tingui molts d'usos en sectors molt diversos.

El polímer ABS té una àrea molt ampla d'utilització i aplicacions, com per exemple:

- Productes bàsics de manteniment de la casa i aparells de cuina
- Telèfons mòbils, electrodomèstics i ordinadors
- Joguines (LEGO®)
- Indústria automobilística, elèctrica i química

4.1.2. Copolièster reforçat amb fibra de carboni curta (CFRP)

El copolièster és un material que es forma a partir de modificacions realitzades als polièsters. La majoria de copolièsters conserven la seva resistència, aspecte i altres propietats mecàniques, inclòs quan s'exposen a una varietat molt ampla de productes químics. Tot plegat, a més de la seva versatilitat i flexibilitat, fan que sigui un material molt útil per fabricar peces i components d'altres prestacions.

Cal dir que a vegades aquestes propietats no són suficients i cal buscar una combinació per millorar certs aspectes mecànics del material. Existeixen tres formes de portar a terme això: la copolimerització, la mescla i l'obtenció de compòsits. En el cas de la realització d'aquest projecte s'ha utilitzat un polímer reforçat amb fibra de carboni curta, també anomenat CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) que es caracteritza per ser un material d'alta resistència i duresa amb una relativa baixa densitat.

Per la realització d'aquest projecte s'ha utilitzat la bobina de *ColorFabb XT CF20*, que és un material compòsit amb base del copolímer *XT-copolyester* creat exclusivament per l'empresa *Amphora 3D* i reforçat amb un 20% de fibra de carboni d'origen especial adequada per la impressió 3D. Les principals característiques i propietats del polímer reforçat amb fibra de carboni es troben a la *Taula 4* i més detalladament a l'*Annex B*.

Propietats copolièster + 20% fibra de carboni	
Propietat	Valor
Mòdul de tracció (GPa)	6.2
Elongació a la ruptura (%)	7.5
Resistència a la tracció (MPa)	76
Resistència a l'impacte (J/m ²)	60
Densitat (g/cm ³)	1.35
Duresa Rockwell	115
Absorció d'aigua en 24 hores (%)	--
Coefficient de fricció	Alt
Viscositat de fusió	Alta
Precisió dimensional i estabilitat	Bona
Temperatura de transició vítria (°C)	80 °C

Taula 4: Característiques físico-mecàniques del copolièster + 20% fibra de carboni [31]

Les propietats físiques, mecàniques i elàstiques dels plàstics reforçats amb fibra de carboni depenen de la forma, la longitud i el percentatge del material de reforç. Les fibres de carboni es poden classificar per la seva longitud i comportament, en fibres curtes o llargues. Les curtes o discontinues són menys resistents que les fibres llargues o contínues.

Aquesta millora en les propietats mecàniques i elàstiques dependrà en gran mesura de l'orientació dels filaments, sent molt més resistent en la direcció longitudinal de la fibra que no en la transversal.

Normalment les fibres de carboni curtes tenen una relació de longitud entre 20 i 60 μm , mentre que les fibres llargues varien entre 200 i 500 μm . El filament és d'un diàmetre inferior a 10 μm i està compost de carboni amorf (no cristal·lí), amb un percentatge entre el 80 i el 95%, i una part de grafit (carboni cristal·lí) que proporciona una alta resistència.

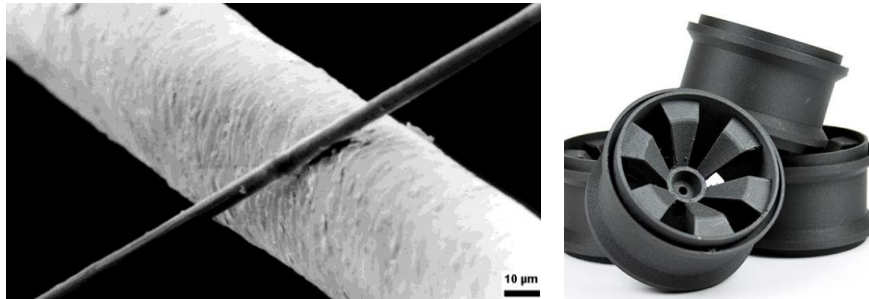


Figura 19: Filament de fibra de carboni i aplicacions del copolièster reforçat amb fibra [31]

S'ha de tenir en compte que la fibra de carboni és abrasiva i tendeix a desgastar més ràpidament les boquetes de llautó o alumini. Per això els fabricants recomanen utilitzar boquetes d'acer inoxidable endurit.

Tal com es mostra a la següent Figura 20, el percentatge de carboni influeix en la resistència del material.

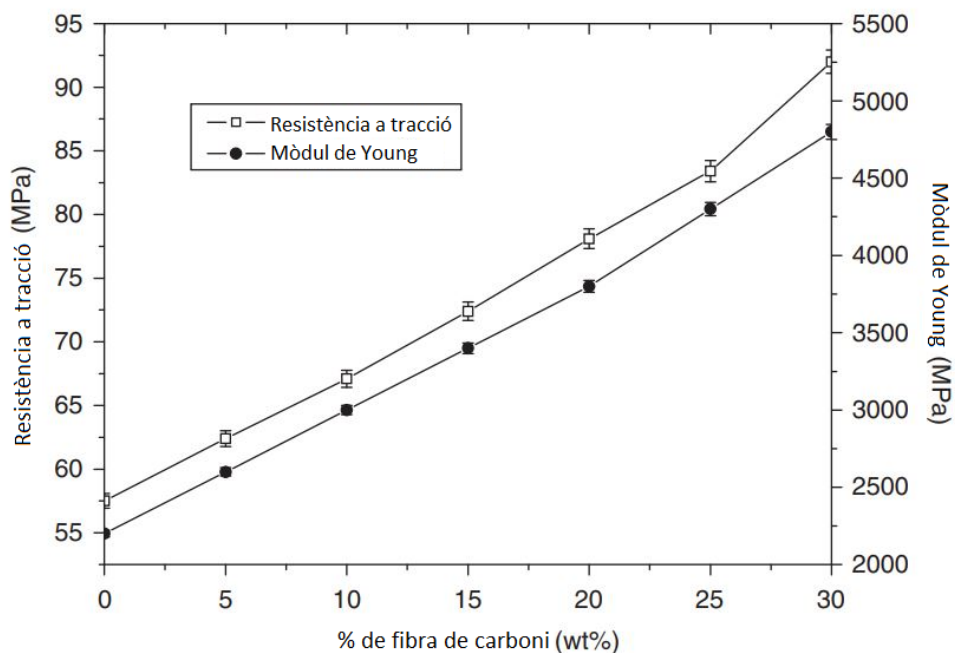


Figura 20: Efecte del % de carboni en la resistència a tracció d'un ABS reforçat [32]

4.2. Geometria de les provetes

Després de consultar diferents articles relacionats amb la caracterització de provetes impreses en 3D, es va arribar a la conclusió que la majoria d'assajos es feien seguint l'estàndard ASTM D638, concretament la variant del tipus I [33].

L'estàndard ASTM és una organització dels Estats Units que desenvolupa i publica acords de normes tècniques per una àmplia gamma de materials i productes. L'organització és un dels contribuents tècnics de la normativa ISO més importants i manté un lideratge sòlid en la definició de materials i mètodes d'assaig per tot tipus d'indústries. En especial la normativa ASTM D638 fa referència a la caracterització de les propietats mecàniques dels materials plàstics mitjançant un assaig de tracció normalitzat.

Dins d'aquesta normativa existeixen diversos variants i diferents tipus de provetes. S'ha optat per escollir el tipus I amb radis als extrems. Les dimensions de la proveta es poden veure a la *Figura 21*.

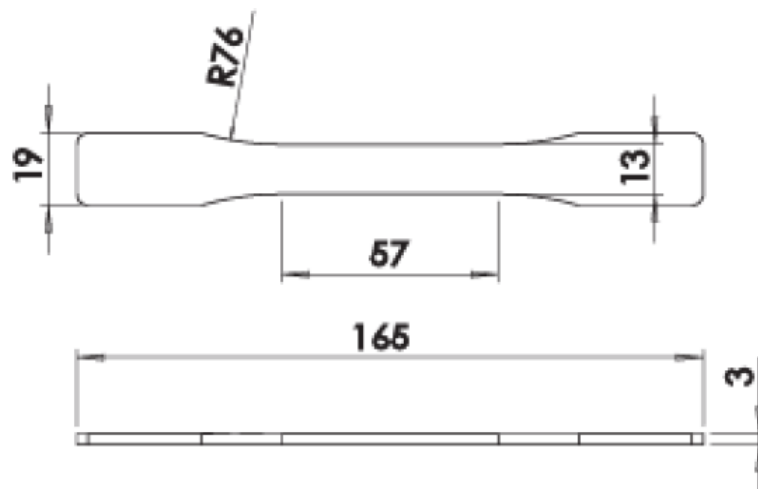


Figura 21: Geometria de les provetes impreses [34]

4.3. Tipus de provetes

Tal com es veia l'anterior *Figura 12*, quan s'ha definit la orientació d'impressió, s'han definit 3 tipus de provetes: les de direcció XX corresponen al tipus I, la XY a la tipus II i finalment la proveta amb direcció XZ s'ha anomenat tipus III. S'ha optat per imprimir 3 tipus de provetes amb ABS (tipus I, II i III) i 2 en el cas del polímer reforçat amb fibra de carboni (tipus I i II), ja que la orientació del tipus III és complicada sense ventilació de capa.

4.3.1. Provetes tipus I

Les provetes del tipus I s'han imprès orientades sobre l'eix X de la superfície d'impressió. Amb aquesta configuració les línies de filament són longitudinals a la proveta i en la mateixa direcció on s'aplicarà la càrrega. S'ha utilitzat un patró d'impressió basat en perímetres tal i com s'observa a la *Figura 22*.

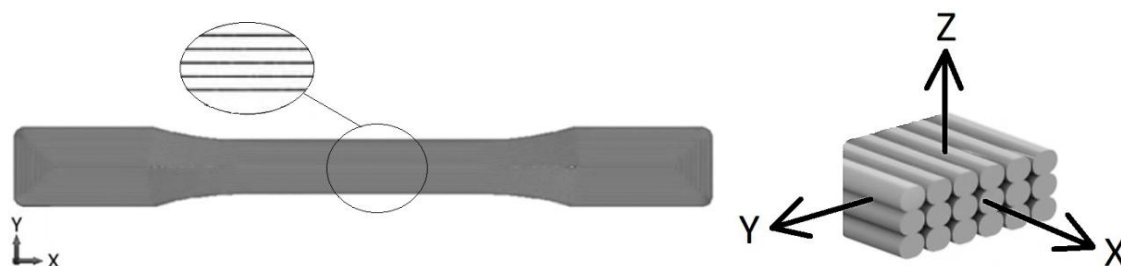


Figura 22: Orientació de la proveta tipus I amb la seva secció de capa

S'han fet un seguit de proves amb diferents configuracions per anar ajustant els paràmetres i obtenir un resultat òptim. S'han modificat els paràmetres de l'*Slic3r* per tal d'imprimir totes les capes en la mateixa direcció i el patró d'impressió sigui perimetral en tota la seva superfície. Els principals problemes que s'han produït ha set l'excés de material als extrems de la proveta i el *warping*. A la *Figura 23* es poden veure totes les provetes impreses del tipus I-ABS.



Figura 23: Provetes tipus I-ABS impreses

4.3.2. Provetes tipus II

Aquest altre tipus de provetes s'han imprès amb orientació Y respecte de la superfície de construcció i s'han orientat de manera que la direcció d'impressió coincideixi amb l'eix X de la plataforma, igual que en el tipus de provetes I. En aquest cas els filaments són transversals a la direcció de l'aplicació de la força de l'assaig a tracció.

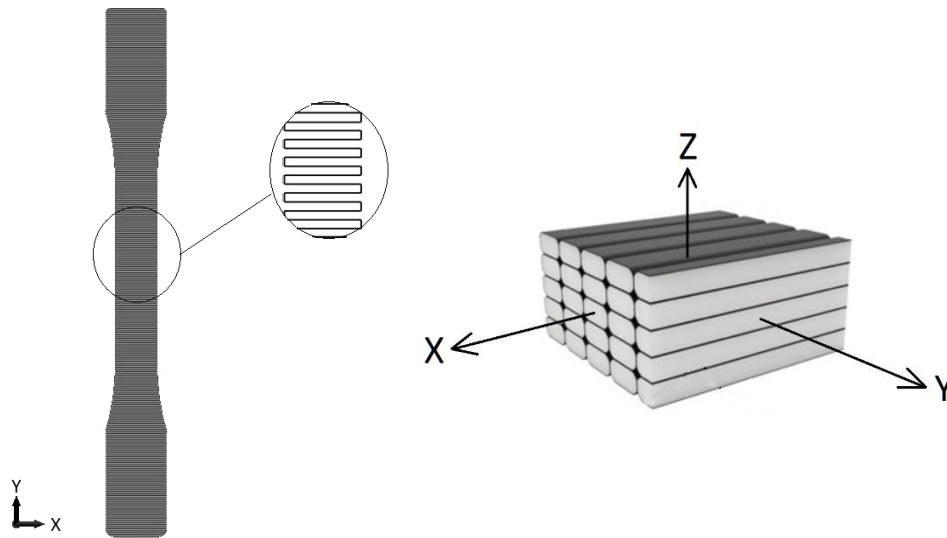


Figura 24: Orientació de la proveta tipus II amb la seva secció de capa

El problema d'aquest tipus de provetes és que amb el software no es pot aconseguir directament que totes les capes siguin en la mateixa direcció. Per defecte el programa planteja imprimir una capa en direcció X i una altra en direcció Y. Per aquest motiu, per imprimir totes les capes en la mateixa direcció s'ha hagut de modificar el programa en format *G-Code* manualment, substituint les capes de la direcció Y per les de la direcció X. D'aquesta manera, s'ha fet una prova d'impressió i s'ha hagut de reduir l'*skirt* (els perímetres externs que delimiten la zona a on s'imprimirà i és útil per extreure el material sobrant del *nozzle*). S'han disminuït el nombre de perímetres a 2 i la distància a l'objecte a 1 mm perquè sinó quedava fora del volum de la superfície de fabricació.



Figura 25: Provetes tipus II-ABS impreses

4.3.3. Provetes tipus III

Aquest darrer tipus de provetes es caracteritza per estar fabricat en direcció Z, perpendicular al llit. Igual que les provetes del tipus II, els filaments seran transversals a la direcció de la càrrega, però en aquest cas s'avaluarà la resistència de la unió entre les diferents capes. A la *Figura 26* s'observa l'orientació d'aquest tipus de provetes.

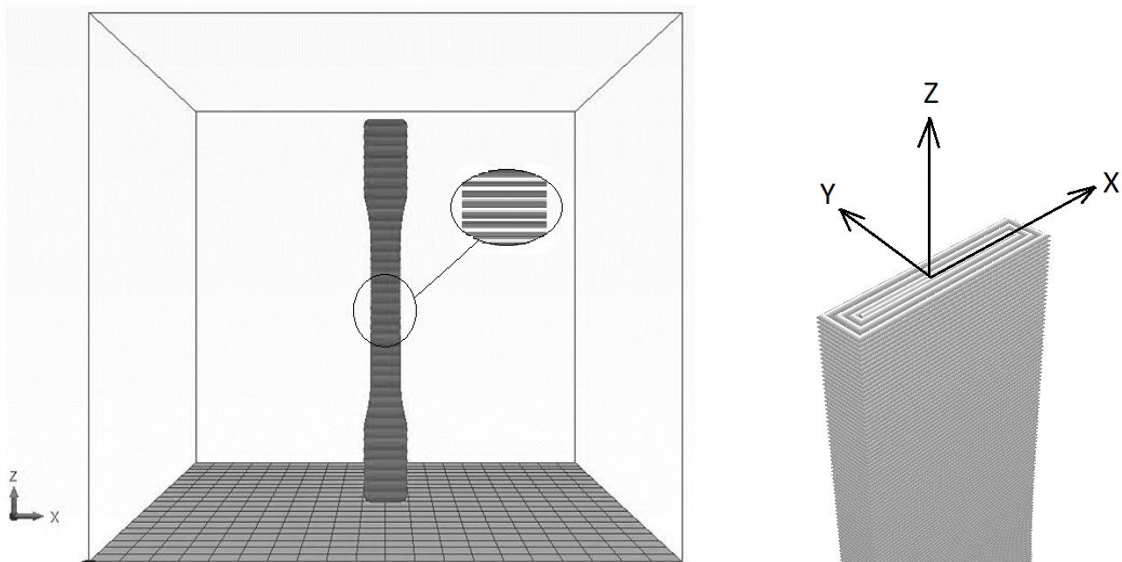


Figura 26: Orientació de la proveta tipus III amb la seva secció de capa

Per imprimir aquest tipus de provetes s'ha hagut d'introduir la impressora en un recipient per tal d'evitar corrents d'aire i reduir el gradient de temperatura que pot ocasionar la delaminació entre les capes. Aquest fet és causat pel nombre més alt de capes d'aquest tipus de proveta, que provoca una diferència de temperatures superior i facilita la separació entre les capes. A la *Figura 27* es pot veure el muntatge per tancar la impressora.



Figura 27: Recipient per imprimir les provetes del tipus III

Un altre dels problemes que han succeït en la impressió d'aquest tipus de provetes és que s'ha fet malbé la placa electrònica que alimentava el llit calent degut l'alta temperatura assolida a l'interior del recipient quan aquest no tenia un orifici per la ventilació. La impressió s'ha hagut de parar i s'ha hagut de canviar la placa *Ramps 1.4*. En substituir la placa electrònica per una de nova s'han hagut de tornar a programar les constants del controlador PID, ja que no ajustava correctament la temperatura de l'extrusor. A partir d'aquest moment la impressora es va fer malbé i el control no era capaç de mantenir correctament la temperatura de l'extrusor quan la placa calefactora estava funcionant.

Imprimir amb aquesta orientació fa que les provetes tinguin molt poca estabilitat i sigui complicat que s'obtingui el resultat desitjat. Així doncs, per tal de donar suport a l'objecte, inicialment s'ha optat per imprimir en conjunts de 8 provetes unides entre elles per 3 nervis, superior, central i inferior. Finalment s'ha optat per imprimir un conjunt de 6 provetes i així reduir el temps que transcorre entre les capes i disminuir la diferència de temperatures.

En la realització d'aquest projecte van aparèixer un seguit d'avaries i imprevistos que van retardar molt la seva realització i han provocat que no s'hagi pogut estudiar tot el que estava previst. Per exemple, la mala qualitat d'impressió de l'orientació del tipus III d'ABS o la impossibilitat d'impressió d'aquest mateix tipus de proveta amb CFRP. A l'apartat 5.2 *Consideracions d'impressió* es mostren detalladament els principals problemes que han succeït en la realització del projecte.

A la *Figura 28* es veuen totes les provetes del tipus III impreses.

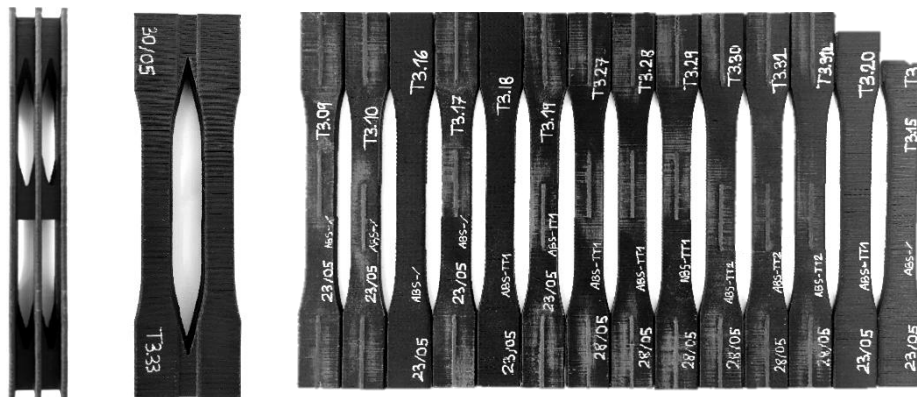


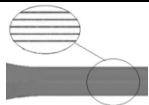

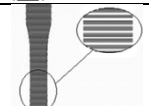
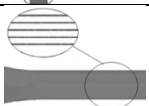

Figura 28: Provetes tipus III-ABS impreses

4.4. Paràmetres del procés

Abans de començar a imprimir s'ha investigat i estudiat els paràmetres de fabricació més influents sobre les propietats mecàniques de la peça final. Primer de tot s'ha optat per consultar els paràmetres d'impressió proposats pel fabricant del material, agafant com a referència les velocitats i les temperatures de l'extrusor i de la placa calefactora. Aquests són els paràmetres més influents que s'han tingut en compte en la impressió:

- **Orientació d'impressió:** Aquest paràmetre és un dels més influents i per tant s'ha decidit assajar 3 nivells dins d'aquest factor (tipus I, tipus II i tipus III) [3]. Cada nivell correspon a una orientació de fabricació diferent (X, Y i Z respectivament).
- **Altura de capa:** S'ha fixat aquest valor a 0,25 mm, ja que aquest paràmetre està relacionat amb el diàmetre del *nozzle* i com s'ha comprovat en una recent investigació, aquest valor és el que ofereix unes propietats mecàniques millors [24].
- **Factor multiplicador:** Aquest paràmetre s'ha fixat a 1,05 en el cas de l'ABS i 1,20 en el cas del CFRP. En les primeres impressions s'ha comprovat que no s'extrudia suficient plàstic i quedaven zones sense omplir. Amb augment del 5% i del 20% segons el material, aquest problema quedava solucionat.
- **Temperatura:** Inicialment s'ha fixat el valor de la temperatura del llit calent i de l'extrusor tal com recomana el fabricant del material. S'ha hagut d'ajustar els dos paràmetres per tal d'obtenir una impressió de més qualitat. Per la impressió d'ABS s'ha fixat la temperatura de l'extrusor a 248°C i la de llit de 95°C pels dos primers tipus i s'ha augmentat fins 250°C i 105°C pel tipus III. En el cas del CFRP s'ha imprès a major temperatura assolint els 270°C en el cas del tipus II. A causa del mal funcionament de la impressora i el control deficient de la temperatura s'ha hagut d'arribar a una situació de compromís, imprimint la primera capa a 80°C i posteriorment s'ha hagut de parar, obtenint un mal acabat superficial.
- **Velocitat:** La velocitat també s'ha hagut d'ajustar experimentalment depenent del tipus de proveta que s'ha imprès. S'ha obtingut un rang de velocitat que va des de 15 mm/s fins a 40 mm/s en els perímetres i de màxim 20 mm/s en els interiors.
- **Amplada de filament:** Aquest paràmetre s'ha hagut de modificar perquè si es deixava al valor que proposava el software de laminació per defecte quedaven línies sense omplir i la qualitat superficial era dolenta. Així doncs, s'ha fixat aquest valor entre 0,35 mm i 0,5 mm.

La *Taula 5* i la *Taula 6* mostren un resum dels diferents tipus de provetes i els paràmetres d'impressió utilitzats. Es poden consultar els paràmetres de fabricació de les diferents proves abans d'obtenir un resultat acceptable a l'*Annex C*.

	Orientació	Material	Trajectòria del filament	Direcció impressió	Unitats
Tipus I	X	ABS		X	16
Tipus II	Y			X	15
Tipus III	Z			X	14
Tipus I-C	X	CFRP		X	15
Tipus II-C	Y			X	15

Taula 5: Tipus de provetes impreses

Tipus	Material	Altura de capa (mm)	Altura 1era capa (mm)	Factor multiplicador	Temperatura extrusor (°C)	Temperatura llit (°C)	Velocitat perímetres (mm/s)	Velocitat interiors (mm/s)	Amplitud extrusió (mm)	Amplitud perímetres mm (%)	Duració
I	ABS	0.25	0.2	1.05	248/248	95/90	40	20	0.4	0.35	1h 17'
II		0.25	0.2	1.05	248/248	95/90	/	20	0.4	/	1h 24'
III		0.25	0.2	1.05	250/250	100/105	15	20	0.4	0.4	10h 17' (x6)
I	CFRP	0.25	0.2	1.20	265/265	80/0	20	40	0.5	0.57 (230%)	36' 45"
II		0.25	0.2	1.20	270/270	80/0	/	20	0.5	/	1h 5'

Taula 6: Paràmetres d'impressió de cada material i tipus de proveta

4.5. Tractament tèrmic aplicat

En aquest apartat es descriuen els tractaments tèrmics que s'han realitzat a cada material. S'ha optat per realitzar dos tractaments tèrmics diferenciats, el primer a una temperatura lleugerament per sobre del punt de transició, amb un temps menor, i l'altre a una temperatura per sota la de transició vítria però amb un temps de manteniment major.

Tractament tèrmic amb ABS

La temperatura de transició vítria de l'ABS és del voltant dels 103°C i la seva temperatura de fusió és de prop de 250°C. Degut a això es pot establir la temperatura de tractament de més o menys 100°C. El temps de tractament pot variar en funció del gruix de la peça i normalment es pot establir un temps mitjà d'uns 30 minuts [35].

S'ha decidit aplicar dos tractaments tèrmics variant la temperatura i el temps per observar quina era la millor combinació de les dues. El primer tractament és per sota la temperatura de transició, a 95°C. S'escalfa amb una rampa de 2°C/min i es manté 30 minuts a aquesta temperatura. Posteriorment es refreda amb una rampa d'1°C/min fins a temperatura ambient. El segon tractament és per sobre la temperatura de transició, concretament a 105°C. S'escalfa lentament amb una rampa d'1°C/min i quan arriba a la temperatura de tractament es refreda a la mateixa velocitat fins a temperatura ambient. A la *Figura 29* s'observen els dos tractaments tèrmics aplicats a l'ABS.

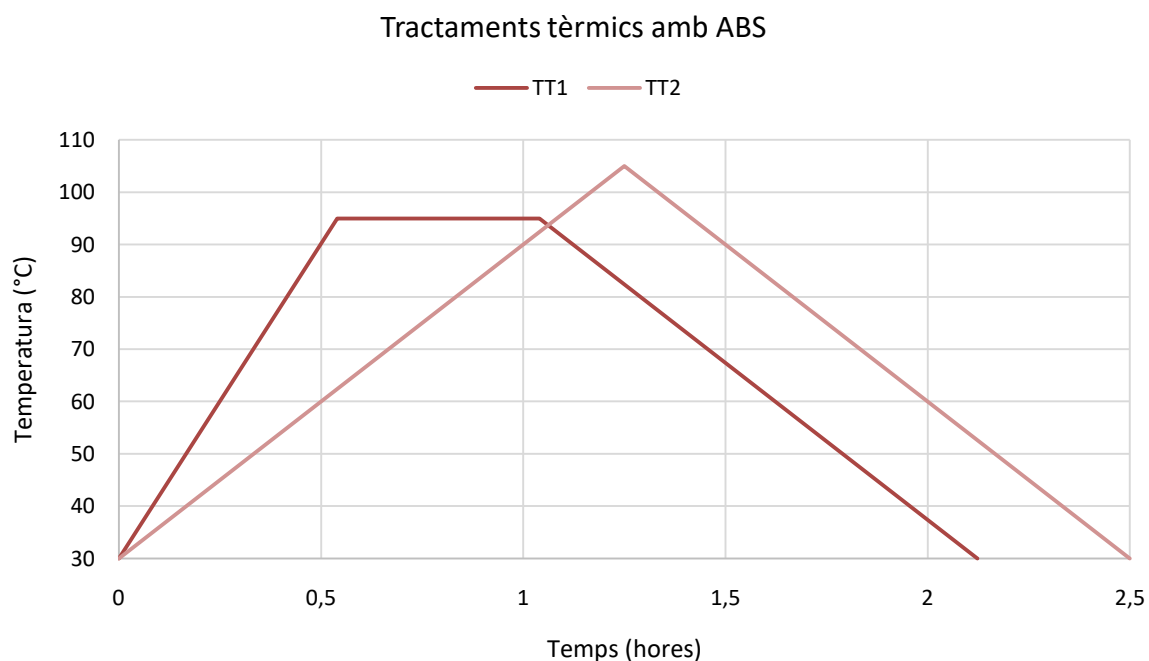


Figura 29: Tractaments tèrmics aplicats a les provetes d'ABS

Tractament tèrmic amb CFRP

En el cas del polímer reforçat amb fibra de carboni curta, també s'ha decidit aplicar dos tractaments tèrmics diferents variant la temperatura i el temps de tractament. S'ha establert una temperatura de transició d'aquest material segons la fitxa tècnica d'uns 80°C.

S'ha decidit aplicar un primer tractament per sota la temperatura de transició, a 75°C. Primer es produeix un escalfament amb una rampa de 2°C/min i un cop assolits els 75°C es manté aquesta temperatura durant 60 minuts. Posteriorment es refreda amb una rampa d'1°C/min fins a temperatura ambient. El segon tractament és per sobre la temperatura de transició, concretament a 85°C. S'escalfa lentament amb una rampa d'1°C/min i quan arriba a la temperatura de tractament es manté durant 30 minuts. Posteriorment es refreda a la mateixa velocitat fins a temperatura ambient.

Tal com s'observa en la *Figura 30* s'han aplicat dos tractaments diferenciats al CFRP.

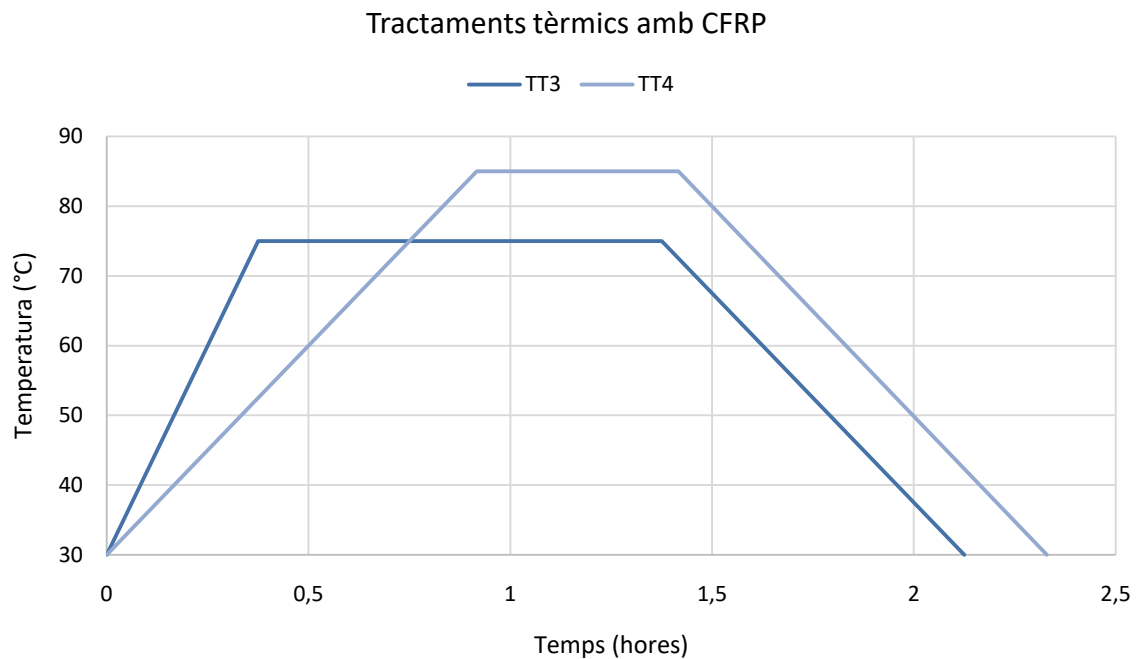


Figura 30: Tractaments tèrmics aplicats a les provetes de CFRP

A l'apartat 5.2. *Consideracions del tractament tèrmic*, es fa referència a les proves realitzades i la justificació de l'elecció d'aquests dos tractaments en funció de la deformació dimensional que patien les provetes en cada material i orientació.

4.5.1. Forn utilitzat

Per la realització del tractament tèrmic s'ha utilitzat el forn Digitheat-TFT de l'empresa J.P. SELECTA S.A.U. Concretament el model 2001255 és una estufa d'assecatge i esterilització utilitzada en nombrosos sectors mèdics i d'investigació. El forn ha estat cedit pel grup d'investigació AMADE de la Universitat de Girona, amb seu a la mateixa universitat i amb laboratoris al Parc Científic i Tecnològic.

A la *Figura 31* s'observa una imatge de l'exterior del forn amb el seu panell de control i a la part inferior es veuen les provetes del tipus III d'ABS abans de realitzar el primer tractament tèrmic (TT1). Les característiques tècniques del forn es troben a l'*Annex B*.



Figura 31: Forn utilitzat amb les provetes abans de tractar

4.6. Caracterització de les provetes

L'objectiu principal de la caracterització de les provetes és avaluar les seves propietats mecàniques amb i sense tractament, per observar si hi ha canvis en les diferents orientacions d'impressió. També s'observarà la variació de l'estructura interna, les dimensions i el pes.

Inicialment també estava previst obtenir el coeficient de *Poisson* per determinar la relació entre la deformació transversal i la deformació axial del material. En un principi es volia utilitzar un extensòmetre biaxial del grup AMADE juntament amb una de les seves màquines d'assaig a tracció, però finalment degut a l'avaria d'aquest extensòmetre, els assaigs s'han hagut de realitzar emprant una màquina del grup LEPAMAP amb un extensòmetre uniaxial i per això no s'ha pogut obtenir el coeficient de *Poisson*. Aquest fet, juntament amb l'avaria de la impressora, ha provocat que no s'hagi pogut portar a terme tot el que estava previst a l'inici del projecte.

Es volen fabricar i assajar un total de 75 provetes, 45 d'ABS de les quals 15 de cada orientació (tipus I, I i III). Dins de cada orientació s'assajaran 5 provetes sense tractament, 5 amb un tractament tèrmic a baixa temperatura i 5 amb un tractament a alta temperatura. En el cas del CFRP s'imprimiran 30 provetes, 15 de les dues orientacions estudiades (tipus I i II) i igualment separades en tres grups de 5: sense tractament, amb tractament a baixa temperatura i amb tractament a alta temperatura.

Finalment s'han estudiat els diferents paràmetres per caracteritzar cada material:

- Tensió màxima [MPa]
- Mòdul de *Young* [MPa]
- Elongació a tensió màxima [%]
- Diferència dimensional [%]
- Diferència de pes [%]
- Observació de l'estructura interna [/]

4.6.1. Màquina d'assaig a tracció

Per la realització de l'assaig de tracció s'ha utilitzat una màquina dinamomètrica de la marca IDM® cedida pel grup d'investigació LEPAMAP. S'han realitzat els assajos a una velocitat de 2 mm/min, amb una cèl·lula de càrrega de 5 kN i una separació entre mordasses de 115 mm. Aplicant una força axial i mesurant la deformació de la proveta s'obté la corba tensió-deformació que permet determinar les característiques mecàniques i elàstiques del material. Per obtenir el mòdul de *Young* s'ha realitzat un assaig no destructiu, deformant la proveta fins a un 0,25% i utilitzat un extensòmetre axial per avaluar el desplaçament. El software d'adquisició de dades utilitzat ha sigut el RG3.

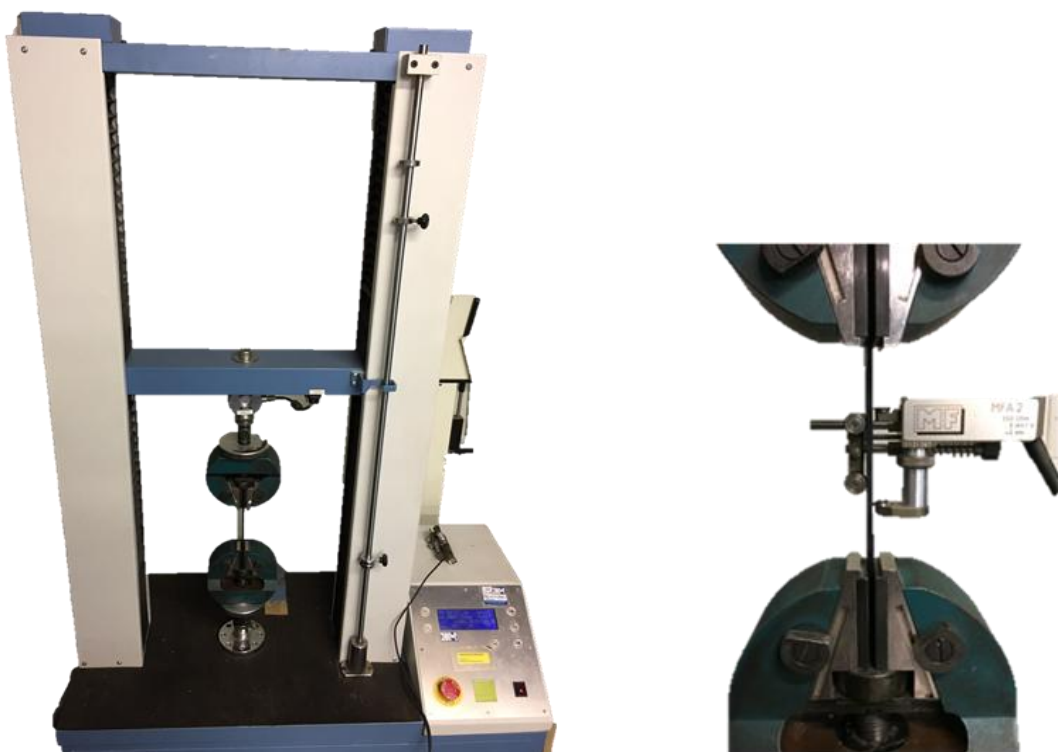


Figura 32: Màquina d'assaig a tracció i detall de l'extensòmetre

A la *Figura 32* s'observa una imatge de la màquina i l'extensòmetre utilitzat. Es poden consultar les característiques tècniques de la màquina d'assaig a l'*Annex B*.

4.6.2. Variació física

Abans de realitzar el tractament tèrmic de cada material i tipus de proveta s'ha utilitzat un micròmetre digital de la marca *Yazuki*[®] i amb una precisió de 0,001 mm per mesurar els punts de les provetes que marca la norma ASTM D638. També s'ha mesurat la longitud amb un peu de rei *Mitutoyo* de resolució 0,01 mm. Posteriorment s'han pesat amb una bàscula de precisió 0,1mg de la marca *Mettler Toledo* i amb referència AB204-S/FACT. Tot seguit s'han recollit totes les dades a l'Annex C. A la *Figura 33* s'observa el micròmetre i la bàscula de precisió cedits pel grup d'investigació AMADE i utilitzats per les mesures.



Figura 33: Micròmetre i bàscula utilitzada per mesurar cada proveta

4.6.3. Estructura interna

Per observar l'estructura interna de les provetes s'ha utilitzat la lupa binocular Stemi DV4 de l'empresa *Zeiss* i s'han pres les fotografies amb una càmera Canon 450D acoblada en un dels binocles. S'ha seccionat una proveta de cada tipus i s'ha polit manualment amb paper abrasiu d'aigua per obtenir una imatge més nítida. Es pot observar una fotografia de la lupa a la *Figura 34* i poden consultar les seves especificacions tècniques a l'Annex B.

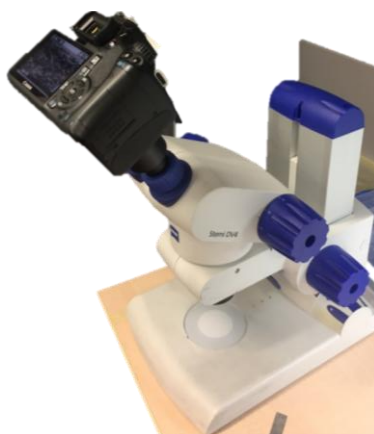


Figura 34: Lupa binocular i càmera utilitzada

5. EXECUCIÓ DEL PROJECTE

En aquest apartat es descriuen les consideracions d'impressió i de tractament que s'han tingut en compte per realitzar aquest projecte. S'inclouen tots els problemes que han anat sorgint, les possibles raons i les mesures que s'han adoptat per reduir-los.

5.1. Consideracions d'impressió

Cada impressió es pot dividir en tres fases: La primera part és de preparació i escalfament de l'extrusor. En aquesta fase també es porta a terme el calibratge de la impressora i l'aplicació de laca per millorar l'adherència. La segona fase correspon a la impressió de la proveta. Finalment l'última fase és el posterior refredament de la peça i extracció del llit.

El procés d'impressió de les provetes ha estat un procés iteratiu de prova i error i la validesa dels paràmetres respon a criteris visuals, d'homogeneïtat i acabat. Tot seguit es descriuen els errors més significatius que s'han produït i les mesures per reduir-los.

Mal calibratge del llit

El calibratge de la distància entre la boqueta i el llit calent és fonamental perquè la qualitat de la peça sigui bona. La impressora utilitzada per la realització d'aquest projecte no disposa d'auto calibratge del llit calent, per tant s'ha d'ajustar aquesta altura Z d'una forma manual abans d'imprimir cada peça.

Quan el llit està mal calibrat i la distància de l'extrusor és major a l'adequada, provoca que la peça s'aixequi dels extrems. Per contra, si la distància és massa petita, el filament no es diposita correctament i provoca un excés de material que deforma la peça i contribueix a un mal acabat. Per reduir aquest efecte s'ha hagut de calibrar la impressora després de cada impressió mitjançant un full com a galga, comprovant cada un dels 5 punts del llit calent i configurant en el programa un *Z offset* de 0,1mm. A la *Figura 35* es veu la diferència entre un bon i un mal calibratge del llit.

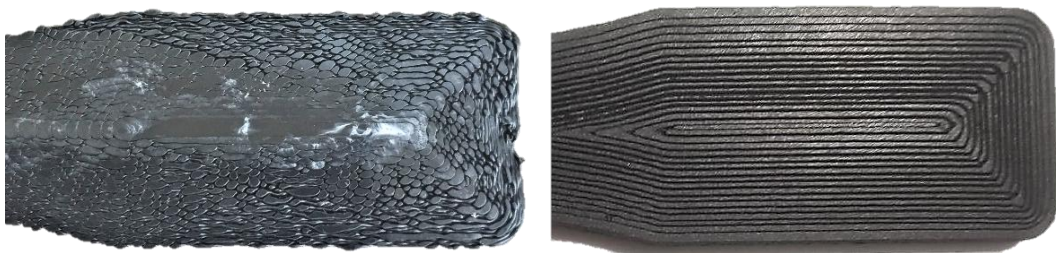


Figura 35: Diferència entre mal calibratge (esquerra) i bon calibratge (dreta) del llit

Warping

El *warping* és un error d'impressió comú en alguns materials d'impressió 3D com l'ABS. L'efecte que produeix el *warping* és la tendència a aixecar-se dels extrems de la peça a causa de la contracció del material provocat per les tensions i diferència de temperatures. En aquest projecte s'ha produït aquest defecte en les primeres impressions de les provetes del tipus I d'ABS.

Per minimitzar aquest efecte s'ha hagut de mantenir la impressora correctament calibrada i aplicar una capa de laca especial per impressió 3D, per tal de millorar l'adherència de la peça a la placa i evitar que s'aixequi. També s'ha hagut de tenir en compte els corrents d'aire provocats per les finestres o l'aire condicionat que facilitaven la contracció del material i l'aparició d'aquest defecte als extrems de les peces.

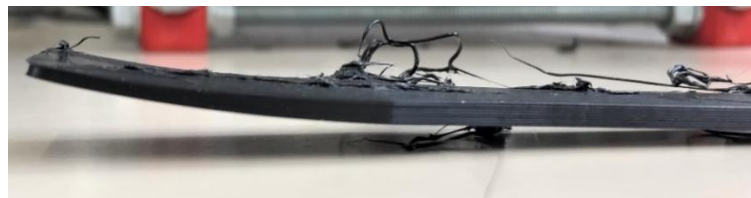


Figura 36: Defecte de warping en l'extrem de la proveta

Delaminació

La delaminació entre capes es produeix quan se separen o es formen esquerdes entre les capes impreses. Això ha succeït en les provetes del tipus III d'ABS al ser més esveltes i tenir un major nombre de capes. També ha sigut un dels principals motius perquè no s'ha pogut imprimir aquesta configuració amb el CFRP, ja que aquest material requeria d'una ventilació de capa per obtenir una acceptable qualitat.

Aquesta mala adherència entre les capes ha set fruit d'un mal calibratge del llit calent i per les diferències de temperatures entre el material dipositat i la capa anterior. Per reduir aquest problema s'ha hagut de cobrir la impressora amb una caixa de plàstic per tal d'augmentar la temperatura a l'interior i disminuir aquestes diferències.

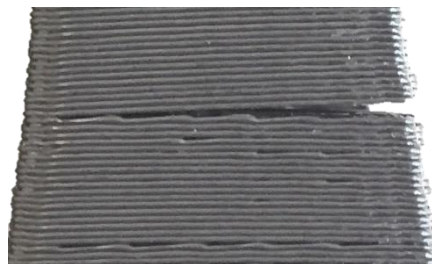


Figura 37: Defecte de delaminació entre capes

Error de codi

En la impressió de les provetes tipus II s'ha hagut d'editar el *G-Code* manualment per tal d'imprimir totes les capes amb la mateixa orientació del filament. En modificar el codi no es va tenir en compte el valor de la retracció del filament de les capes imparelles i com es veu a la *Figura 38* s'ha produït una falta de material a l'extrem.



Figura 38: Error del codi

En la impressió de peces massisses, com les d'aquest projecte, es pot donar el cas que el valor del gruix de filament calculat sigui superior al que pot proporcionar el *nozzle*, fent que quedin zones sense acabar d'omplir. Aquest error ha succeït en la impressió de les provetes del tipus I d'ABS i CFRP. Per evitar aquest efecte s'ha hagut de modificar el gruix del filament i augmentar el factor multiplicador per tal d'extrudir més quantitat de material. A la *Figura 39* s'observen línies sense omplir a l'extrem d'una proveta impresa.

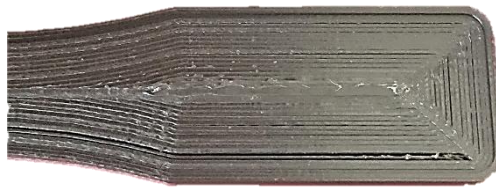


Figura 39: Defecte falta de material en algunes línies

Excés de material

Un altre dels problemes comuns és l'excés de material en les parts internes de la proveta que provoquen un mal acabat i poden ocasionar deformacions. Aquest fet també ha sorgit a les provetes del tipus I d'ABS i CFRP i s'ha acabat d'ajustar modificant el factor multiplicador per un valor més baix.



Figura 40: Defecte d'excés de material a l'extrem de la proveta

Obstrucció de l'extrusor

A l'imprimir les provetes del tipus III es va donar el cas que es va obstruir l'extrusor i va deixar de dipositar material. La impressió va continuar però a partir de poc més d'una hora ja no extreia plàstic a través del *nozzle*. Per solucionar aquest problema es va augmentar la temperatura de l'extrusor, per tal de fondre més el material i ajudar que flueixi més. També es va comprovar que l'engranatge encarregat de moure el filament cap a l'extrusor funcioni correctament i no patini. Finalment es va haver de desmuntar el *nozzle*, com s'observa a l'esquerra de la *Figura 41*, i es va deixar en un bany d'acetona per desfer el material i netejar-lo completament.



Figura 41: Defecte d'obstrucció de l'extrusor

Refredament del *nozzle*

El problema del refredament del *nozzle* i com a conseqüència l'acumulació de material en la superfície de la proveta, tan sols es va produir en la impressió de les provetes de fibra de carboni. Aquest material no flueix tant com l'ABS i si s'imprimeix a una temperatura inferior a l'adequada, pot col·lapsar el broquet o es poden solidificar restes de material que dificulten la impressió i en molts casos obliguen a parar-la.

El fabricant recomana utilitzar un diàmetre de *nozzle* gran i per això s'ha utilitzat una boqueta d'acer inoxidable endurit amb un orifici de 0,5 mm. Aquest material és menys conductor que el bronze i per aquest motiu s'ha hagut d'augmentar la temperatura de l'extrusor fins a 15°C per contrarestar aquest efecte. Això, sumat al mal control de la temperatura que ofereix la impressora 3D utilitzada, ha dificultat el seu ajust òptim.



Figura 42: Defecte d'acumulació de material pel refredament del nozzle

5.2. Consideracions del tractament tèrmic

En el següent apartat es descriuen les diverses proves de tractament tèrmic realitzades i la justificació dels paràmetres de temps i temperatura escollits per cada tipus de tractament i material diferent.

5.2.1. Proves del tractament tèrmic amb ABS

Abans d'efectuar el tractament tèrmic definitiu, s'han realitzat un seguit de proves per ajustar experimentalment els paràmetres de temps i temperatura. S'han fet diferents combinacions amb les provetes les quals tenien defectes i no s'han pogut aprofitar.

S'han pres mesures de les dimensions i la massa de les provetes abans i després del tractament per observar els canvis que es produïen. Tot seguit es mostren, a la *Figura 43*, els eixos de les provetes per tenir una referència de cada direcció estudiada.

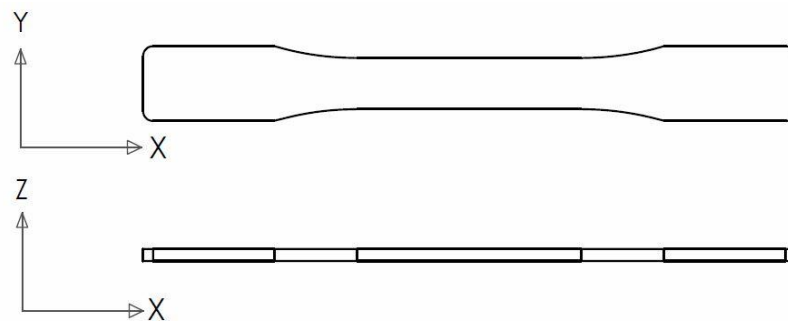


Figura 43: Eixos de les provetes

Les primeres proves s'han fet mitjançant un forn de cuina convencional, per tant el control de temperatura, de velocitat d'escalfament i refredament no va ser gens precís, però sí que va donar una idea del rang de temperatures i temps aproximats. Les següents proves ja es van fer amb l'estufa calefactora que sí permetia controlar la velocitat d'escalfament, alhora que també oferia un control més precís de la temperatura.

- TP1: **[Forn petit per pizzes]** Escalfar fins 110°C i manteniment de 30 minuts

Proveta	ΔX	ΔY	ΔZ	Δmassa
T1.10	-14.4%	+44.4%	+16.6%	-0.29%
T3.12	+16.1%	-14.7%	+4.6%	-0.27%

- TP2: **[Forn de cuina]** Escalfar fins 85°C i manteniment de 45 minuts

No hi ha hagut canvis significatius en les dimensions de les provetes.

- TP3: **[Estufa calefactora]** Escalfar fins 105°C amb una rampa d'1°C/min (1h 30') i refredar fins 30°C amb un temps d'1h 30 minuts

Proveta	ΔX	ΔY	ΔZ	Δmassa
T1.11	-3.34%	-0.38%	+8.3%	-0.28%
T1.17	-3.55%	-0.26%	+9.1%	-0.28%
T3.40	+2.76%	-5.14%	+5%	-0.12%

- TP4: **[Estufa calefactora]** Escalfar fins 110°C amb una rampa d'1°C/min (1h 30') i refredar fins a 30°C amb una rampa d'1°C/min (1h 30')

Proveta	ΔX	ΔY	ΔZ	Δmassa
T1.06	-4.49%	-0.31%	+15.25%	-0.19%
T1.12	-4.46%	-0.27%	+9.52%	-0.14%
T3.01	+3.16%	-3.42%	+1.58%	-0.12%

- TP5: **[Estufa calefactora]** Escalfar fins 95°C amb una rampa de 2°C/min (35min), mantenir a aquesta temperatura durant 30 minuts i refredar amb una rampa d'1°C/min

Proveta	ΔX	ΔY	ΔZ	Δmassa
T1.30	-0.61%	$\approx 0\%$	+1.66%	-0.17%
T3.46	+0.07%	+0.38%	$\approx 0\%$	-0.14%

- TP6: **[Estufa calefactora]** Escalfar fins 100°C amb una rampa d'1°C/min (1h 10') i refredar fins a 30°C amb una rampa d'1°C/min (1h 10')

Proveta	ΔX	ΔY	ΔZ	Δmassa
T1.18	-2.03%	-0.15%	+5.55%	-0.15%
T2.01	-0.53%	-0.82%	+2.05%	-0.16%

Com es pot observar a les anteriors taules, en funció del tipus de provetes i del tractament tèrmic han variat les dimensions, augmentant en algunes direccions (en verd) i disminuint en altres (en vermell). Les primeres proves realitzades amb el forn de pizza van donar molt mals resultats, ja que les provetes es van deformar molt. Tot seguit es va realitzar un altre tractament a una temperatura més baixa i amb el forn convencional; en el qual les provetes es van deformar molt menys, però igualment era molt complicat el control de la temperatura i sobretot de la rampa d'escalfament. En canvi, amb l'estufa calefactora, s'ha pogut fer un millor control de la temperatura i les rampes d'escalfament, fet que ha provocat que les deformacions hagin sigut considerablement menors.

Amb aquest seguit de proves de tractament tèrmic amb ABS es pot veure que les provetes del tipus I tendeixen a escurçar-se i a augmentar la secció després del tractament. Les provetes del tipus II pateixen menys aquesta variació i sobretot augmenta el seu gruix (ΔZ). En el cas de les provetes del tipus III es veu clarament com tendeixen a augmentar la seva longitud i disminuir la secció. En efectuar la primera prova es va veure que aquest tipus de proveta es deforma irregularment degut a les altes tensions internes que presenta. També es veu que a major temperatura de tractament les deformacions també són més grans.

La conclusió que es pot extreure respecte de la variació dimensional després d'aplicar un tractament tèrmic, és que ha sigut diferent en cada eix i en funció de cada direcció d'impressió. S'intueix que el fil té tendència a escurçar-se i augmentar la seva secció. Pel que fa a la massa, en tots els casos ha disminuït aproximadament entre un 0,15 i un 0,30%. Sent el tractament a major temperatura el que més ha afectat reduint la massa de les provetes estudiades.

5.2.2. Proves del tractament tèrmic amb CFRP

De les característiques tèrmiques del material no existeix massa informació ja que és un material compòsit de fibra de carboni amb un copolièster com a base. Concretament és un material creat per una empresa privada de la companyia química *Eastman Chemical*, especialitzada en el sector plàstic. Al ser un material creat exclusivament, és complicat trobar més informació de la que ofereix el mateix fabricant. A la fitxa tècnica s'especifica la temperatura de transició vítria (T_g) del material a un valor de 80°C.

S'han fet dos proves de tractament per observar la variació dimensional de les provetes i aquests han sigut els resultats:

- TP7: **[Estufa calefactora]** Escalfar fins 85°C amb una rampa d'1°C/min (55'), mantenir 30 minuts a aquesta temperatura i refredar fins a 30°C amb una rampa d'1°C/min (55')

Proвета	ΔX	ΔY	ΔZ	Δmassa
T1.04	-0.84%	+1.24%	+2.75%	-0.25%
T2.09	-0.52%	-0.56%	+1.32%	-0.21%

- TP8: **[Estufa calefactora]** Escalfar fins 75°C amb una rampa d'1°C/min (23'), mantenir 1 hora a aquesta temperatura i refredar fins a 30°C amb una rampa d'1°C/min (45')

Proвета	ΔX	ΔY	ΔZ	Δmassa
T1.20	-0.30%	-0.39%	+1.21%	-0.12%
T2.13	-0.41%	$\approx 0\%$	$\approx 0\%$	-0.11%

D'aquestes dues proves de tractament tèrmic amb el copolièster reforçat amb fibra de carboni curta es pot concloure que, igual que en el cas de l'ABS, el tractament tèrmic ha afectat sobre les dimensions i la massa de les peces.

Les provetes del tipus I tendeixen a escurçar-se i a augmentar la secció després del tractament tèrmic. Les provetes del tipus II pateixen menys aquesta variació i es deformen d'una forma més homogènia en les 3 direccions. Fins i tot, en el tractament a 75°C les deformacions són pràcticament nul·les en el cas de la proveta del tipus II. També es veu que a major temperatura de tractament, les deformacions també són més grans.

S'intueix que el filament de CFRP té un comportament similar a l'ABS i té tendència a escurçar-se i augmentar la seva secció després del tractament. Pel que fa a la massa en tots els casos ha disminuït aproximadament entre un 0,10 i un 0,25%. Sent el tractament a major temperatura el que més ha afectat reduint la massa de les provetes estudiades.

6. RESULTATS

Una vegada realitzats els assajos a tracció de cada proveta es poden comparar els diferents paràmetres i avaluar les propietats en funció de cada orientació d'impressió i del tractament aplicat. S'han realitzat dos tipus d'assajos, el primer no ha sigut destructiu i s'ha fet amb l'objectiu de determinar el mòdul de *Young*. S'ha utilitzat un extensòmetre axial i s'ha determinat aquest paràmetre amb una deformació entre el 0,05 i 0,25%.

El segon assaig ha sigut ruptura i s'ha fet sense l'extensòmetre, ja que el seu rang de desplaçament era de 2 mm i les provetes no trencaven amb tan poca elongació. En l'assaig a ruptura, per falta de temps, s'ha deixat desplaçar les mordasses fins a 8 mm i posteriorment s'ha parat la màquina manualment. Per aquest motiu en alguns casos no s'han acabat de trencar les provetes i el valor de la mitjana de deformació a trencament no és del tot representatiu. S'han assajat un total de 75 provetes (45 d'ABS i 30 de CFRP) i el conjunt de resultats s'han compilat en un informe per cada proveta a l'*Annex E*.

Tot seguit es mostren els resultats obtinguts en l'assaig a tracció de les provetes d'ABS a la següent *Taula 7*.

ABS					
Tipus	Tractament	Mòdul de <i>Young</i> (MPa)	Tensió màxima (MPa)	Deformació a tensió màxima (%)	Deformació a trencament (%)
I	Sense	1941 (25.64)	28.97 (0.29)	2.72 (0.14)	8.18 (1.63)
	TT1	1911 (53.18)	28.48 (0.50)	2.38 (0.03)	6.36* (0.74)
	TT2	1897 (13.56)	26.29 (1.19)	2.38 (0.13)	8.25 (2.10)
II	Sense	1884 (34.49)	21.46 (0.77)	1.93 (0.07)	2.16 (0.09)
	TT1	1934 (32.38)	22.82 (0.62)	2.03 (0.06)	2.29 (0.19)
	TT2	1829 (90.53)	21.56 (1.37)	2.02 (0.14)	2.21 (0.22)
III	Sense	1000 (60.4)**	1.26 (0.24)	0.26 (0.09)	0.38 (0.13)
	TT1	1175 (66.2)**	1.88 (0.36)	0.33 (0.10)	0.33 (0.10)
	TT2	916.2 (82.8)**	2.27 (0.54)	0.36 (0.07)	0.39 (0.09)

Taula 7: Resultats de l'assaig a tracció de l'ABS

Nota: S'ha fet la mitjana de les 5 unitats de cada tipus i la desviació dels valors es mostra entre parèntesis.

*Aquest valor no és representatiu perquè només s'han trencat 2 de les 5 provetes.

**El mòdul de *Young* de les provetes del tipus III no és del tot representatiu perquè només s'han assajat 2 provetes de cada tipus, ja que es trencaven abans d'assolir el 0,25% de deformació i s'ha hagut de calcular aquest valor gràficament.

En el cas del copolièster reforçat amb fibra de carboni curta, els resultats han sigut força diferents que amb l'ABS. Com era d'esperar, aquest material és més rígid i per tant el mòdul de *Young* ha de ser força superior, disminuint al mateix temps la seva elongació.

La diferència entre l'orientació d'impressió del tipus I i el tipus II és molt gran i les propietats mecàniques es veuen considerablement afectades. Aquest fet pot ser produït pel gran efecte que té l'orientació de les fibres en aquest tipus de material, però també pot ser agreujat pels problemes d'impressió que es van ocasionar en fabricar aquest tipus de provetes que provocaven unions dèbils i poca homogeneïtat.

Tot seguit es mostra a la *Taula 8*, els valors obtinguts en l'assaig a tracció de les provetes de CFRP. S'ha fet la mitjana de les 5 unitats de cada tipus de proveta i la desviació dels diferents valors es mostra entre parèntesis.

CFRP					
Tipus	Tractament	Mòdul de <i>Young</i> (MPa)	Tensió màxima (MPa)	Deformació a tensió màxima (%)	Deformació a trencament (%)
I	Sense	4240 (246.00)	31.12 (2.54)	2.14 (0.30)	2.40 (0.44)
	TT3	3882 (177.40)	27.48 (1.35)	2.04 (0.08)	2.24 (0.08)
	TT4	3877 (152.60)	27.77 (0.45)	1.97 (0.31)	2.14 (0.39)
II	Sense	1010 (205.00)	7.39 (2.53)	1.12 (0.30)	1.13 (0.30)
	TT3	917.8 (113.10)	6.15 (1.17)	1.08 (0.13)	1.10 (0.14)
	TT4	905.8 (159.10)	6.35 (1.09)	1.09 (0.14)	1.10 (0.15)

Taula 8: Resultats de l'assaig a tracció del CFRP

Nota: S'ha fet la mitjana de les 5 unitats de cada tipus i la desviació dels valors es mostra entre parèntesis.

A la *Figura 44* es mostra la variació tensió-deformació típiques pels tres tipus de provetes d'ABS. Es pot observar el gran efecte de la direcció d'impressió sobre les propietats mecàniques del material.

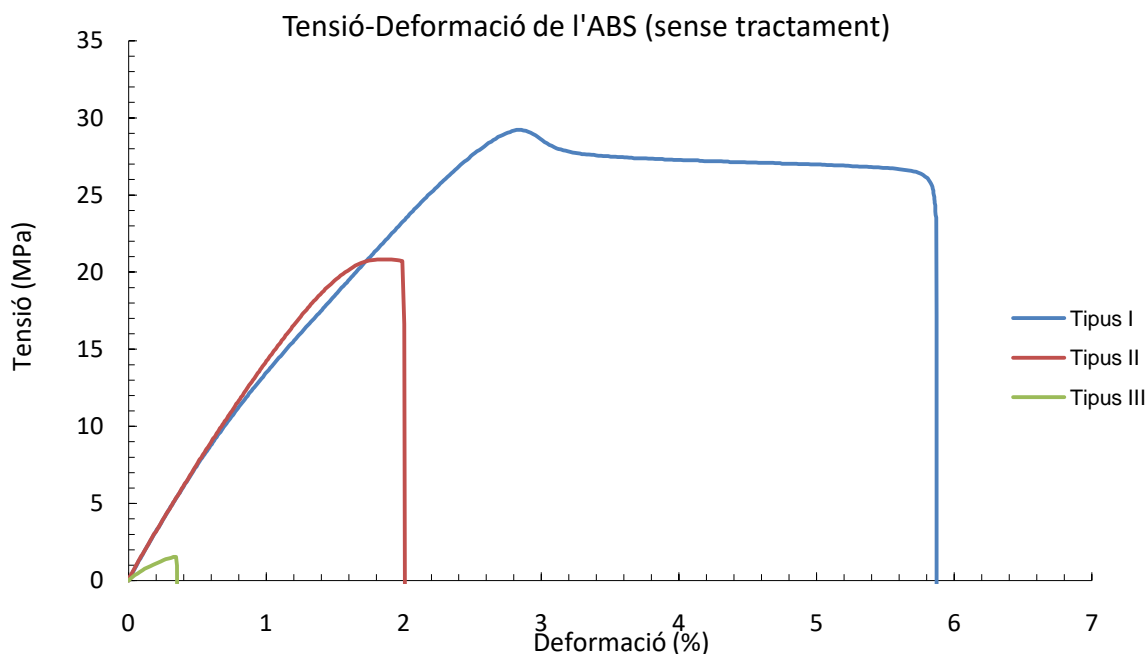


Figura 44: Comparació de les diferents orientacions de l'ABS sense tractar

De forma semblant, a la *Figura 45* es mostra la variació de les corbes tensió-deformació pels dos tipus de proveta de CFRP. Novament es pot observar la diferència de propietats segons la direcció d'impressió.

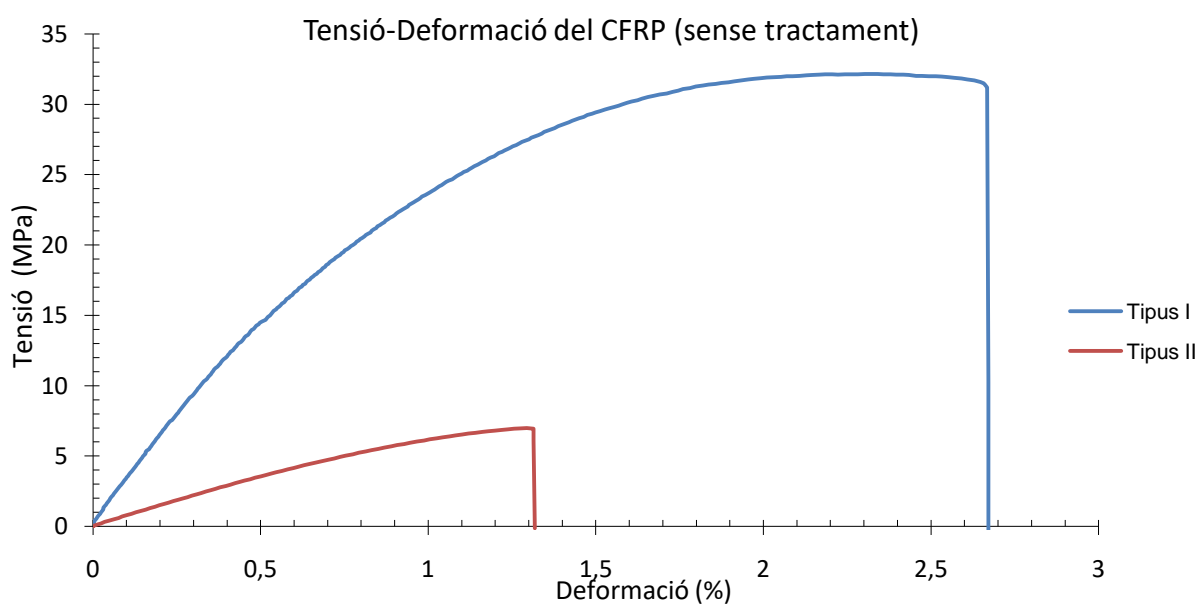


Figura 45: Comparació de les diferents orientacions del CFRP sense tractar

6.1. Tensió màxima

La tensió màxima és el valor de distribució de forces per unitat d'àrea en una secció del material. En aquest cas es tracta de tensió uniaxial, ja que amb la màquina d'assaig a tracció s'aplica una força uniforme sobre una secció de la proveta determinada.

El que s'ha assolit amb l'assaig és el valor de la màxima tensió que el material pot suportar abans que es trenqui, situant aquest punt al lloc més elevat de la corba tensió-deformació.

Tal com s'observa a la *Figura 46* el material imprès en l'orientació X (tipus I) és la que ha obtingut una tensió màxima més elevada, en el tipus II la tensió és lleugerament inferior i en el tipus III es veu clarament que està molt per sota a la resta d'orientacions. Això és degut al fet que amb la impressió vertical del tipus III es produeixen diferències de temperatura que provoquen una mala unió entre les capes, fent que fa que el material sigui propens a patir una delaminació o una propagació d'una esquerda.

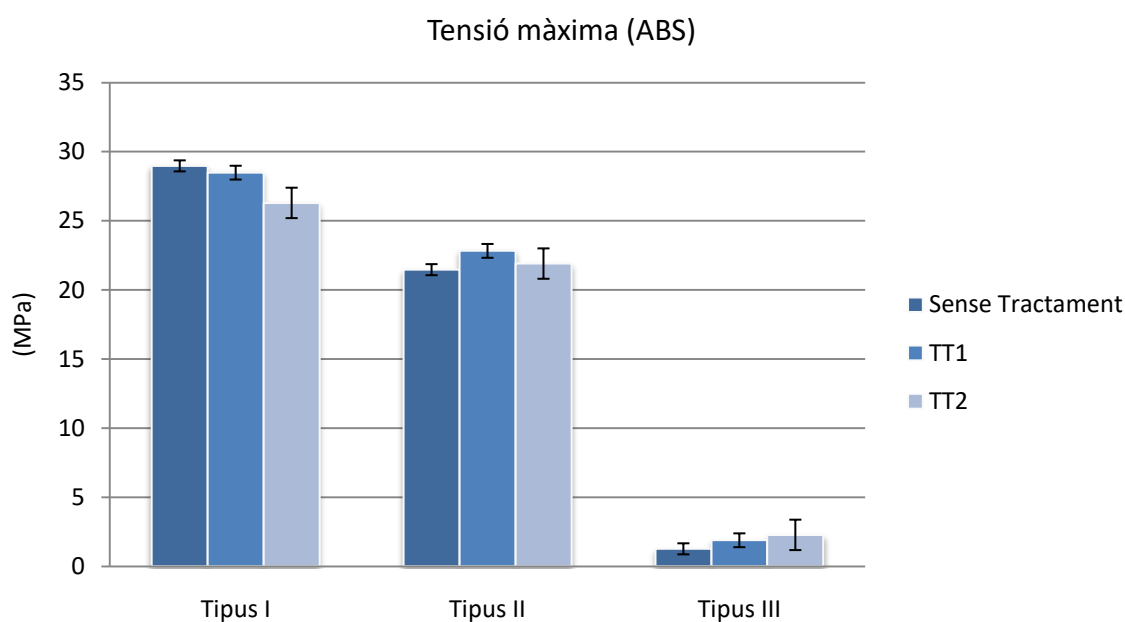


Figura 46: Comparació de la tensió màxima de l'ABS

Pel que fa als tractaments tèrmics es veu com el primer tractament (TT1), respecte a les provetes sense tractar, empitjora la resistència màxima en el cas de les provetes del tipus I, però millora en els casos de les provetes del tipus II i III. En el segon tractament (TT2), efectuat a una temperatura més alta, disminueix encara més la resistència del tipus I i la del tipus II en comparació amb el TT1, això sí, situant-se a un valor encara per sobre de les provetes sense tractament. En el cas de les provetes del tipus III, aquest tractament encara millora més la resistència a tensió màxima del material.

A la *Figura 47* s'observa en forma de percentatge l'augment o disminució de la tensió màxima de l'ABS en funció de cada tipus d'orientació i tractament tèrmic en comparació a les provetes sense tractament. La variació en les provetes del tipus I i II és substancial, però en el cas de les provetes del tipus III es veu un augment de fins a un 180% en el cas del TT2.

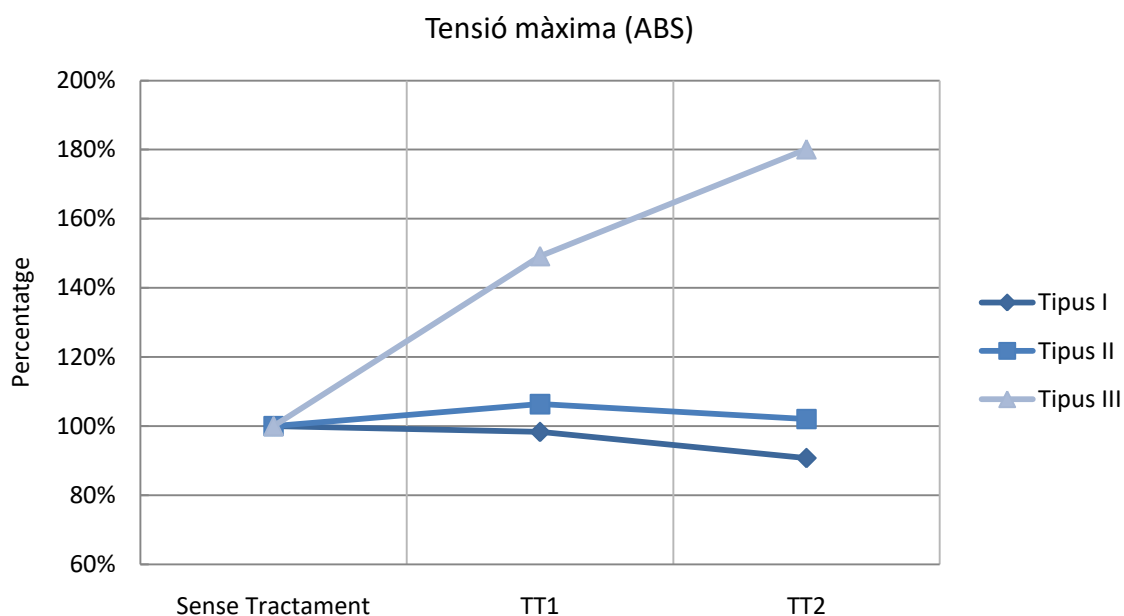


Figura 47: Comparació de la tensió màxima de l'ABS per cada tractament

En el cas del polímer reforçat amb fibra de carboni (CFRP) s'observa que el tractament tèrmic no aporta millora en cap dels dos tipus d'orientació estudiats. A la *Figura 48* es veuen els resultats de cada tipus i tractament diferent.

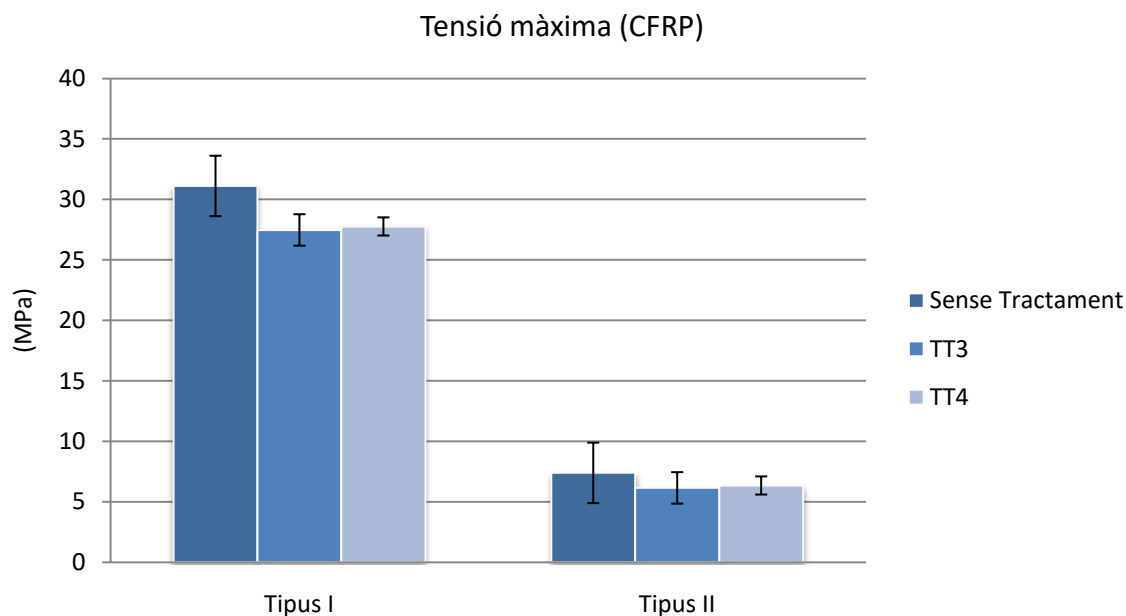


Figura 48: Comparació de la tensió màxima del CFRP

Com es veu a l *Figura 49* en el cas del primer tractament (TT3) disminueix la tensió màxima entre un 10 i un 15% i en el TT4 es redueix aquest valor aproximadament un 12% respecte les provetes sense tractament.

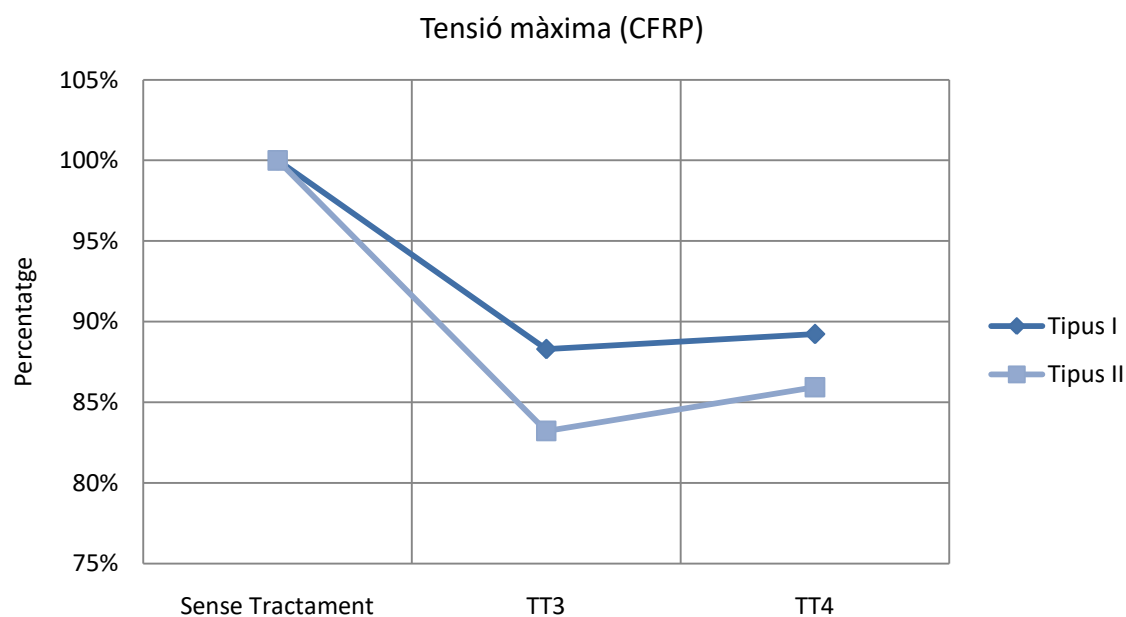


Figura 49: Comparació de la tensió màxima del CFRP per cada tractament

6.2. Mòdul de Young

El mòdul de *Young* o mòdul elàstic és un paràmetre que caracteritza el comportament d'un material a l'aplicació d'una força i indica la seva rigidesa. Es pot trobar de forma empírica mitjançant un assaig a tracció com el realitzat en aquest projecte. El mòdul de *Young* equival a la tangent en cada punt de la zona elàstica de la gràfica tensió-deformació i indica la relació entre l'increment de tensió aplicada i l'increment de deformació longitudinal unitària produïda.

En els materials lineals, el mòdul elàstic és constant en la zona elàstica del material i tenen un comportament que segueix la Llei de Hooke. En el cas de materials anisotròpics, com és el cas de l'objecte d'aquest projecte, existeixen tres constants elàstiques, una per cada direcció principal (E_x , E_y i E_z).

Pel que fa al mòdul de Young de l'ABS es veu clarament en la *Figura 50* com aquest paràmetre no varia massa entre els tipus I i II però sí que cau fins a la meitat en el cas de l'orientació de les provetes del tipus III.

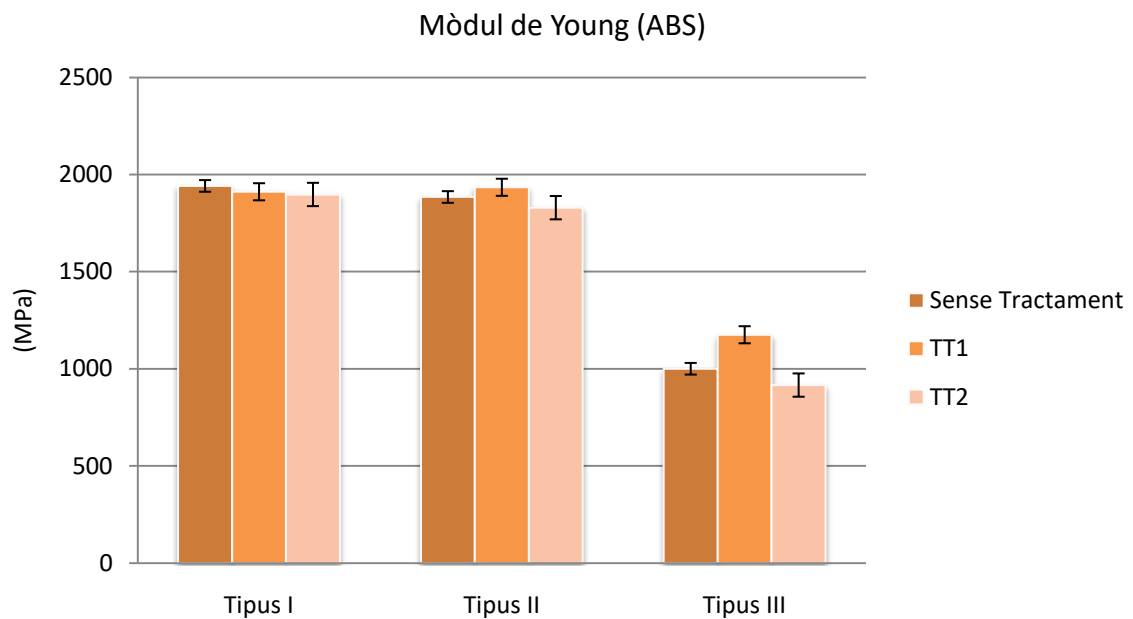


Figura 50: Comparació del mòdul de Young de l'ABS

Per ajudar en l'estudi de l'efecte del tractament sobre aquesta propietat del material s'ha elaborat la *Figura 51*, a on es compara la influència del tractament a cada tipus d'orientació. En el cas del primer tractament (TT1) es veu com augmenta més d'un 15% en les provetes del tipus III, també augmenta en les provetes II, concretament un 3% i disminueix menys d'un 2% en la configuració del tipus I.

Pel que fa al tractament a major temperatura (TT2) es veu que el mòdul de *Young* ha disminuït entre un 2 i un 8% en el cas de tots els tipus d'orientació. Tot i augmentar la resistència mecànica, amb el tractament a major temperatura ha disminuït la rigidesa del material, provocat per un canvi de l'estructura interna.

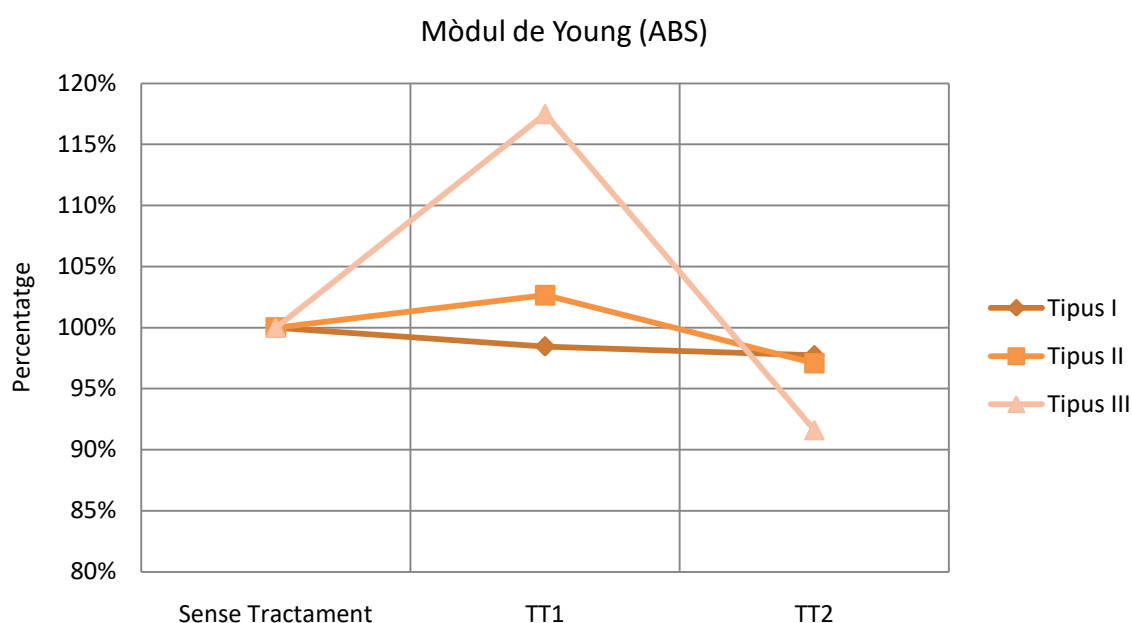


Figura 51: Comparació del mòdul de Young de l'ABS per cada tractament

En el cas del polímer reforçat amb fibra de carboni (CFRP) s'observa que el tractament tèrmic no aporta millora en la rigidesa de cap dels dos tipus d'orientació estudiats. Com s'observa a la *Figura 52*, en aquest material la diferència de rigidesa entre el tipus I i II és molt més accentuada que en el cas de l'ABS, això és degut a la gran influència de l'orientació de les fibres de carboni. Com es veu a la *Figura 53*, la rigidesa ha disminuït prop d'un 10% en comparació a les provetes sense tractament.

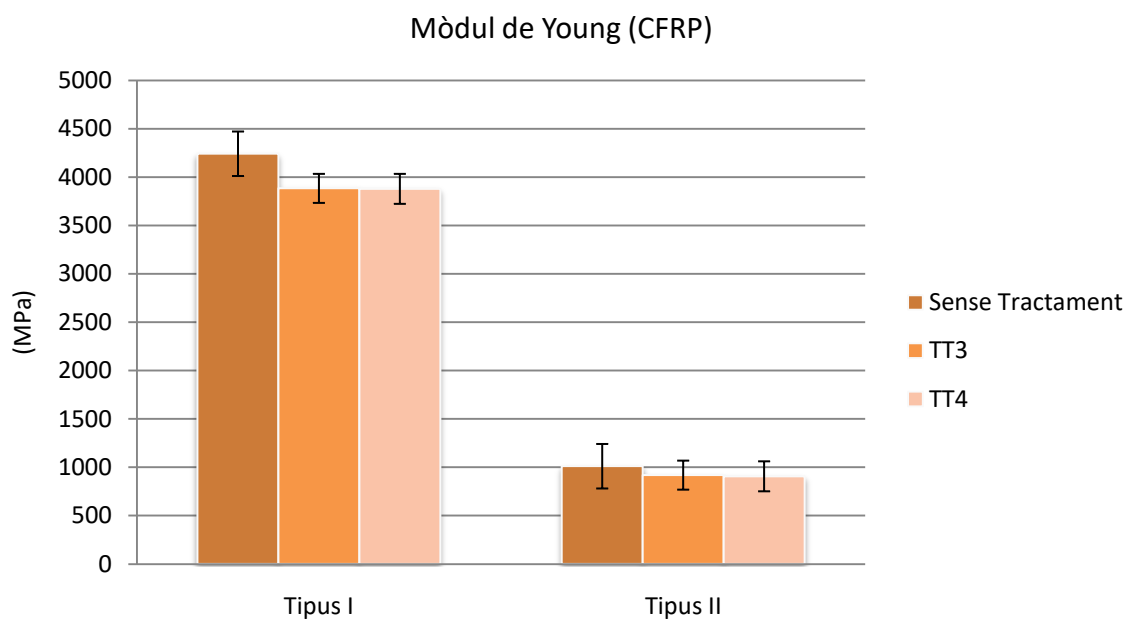


Figura 52: Comparació del mòdul de Young del CFRP

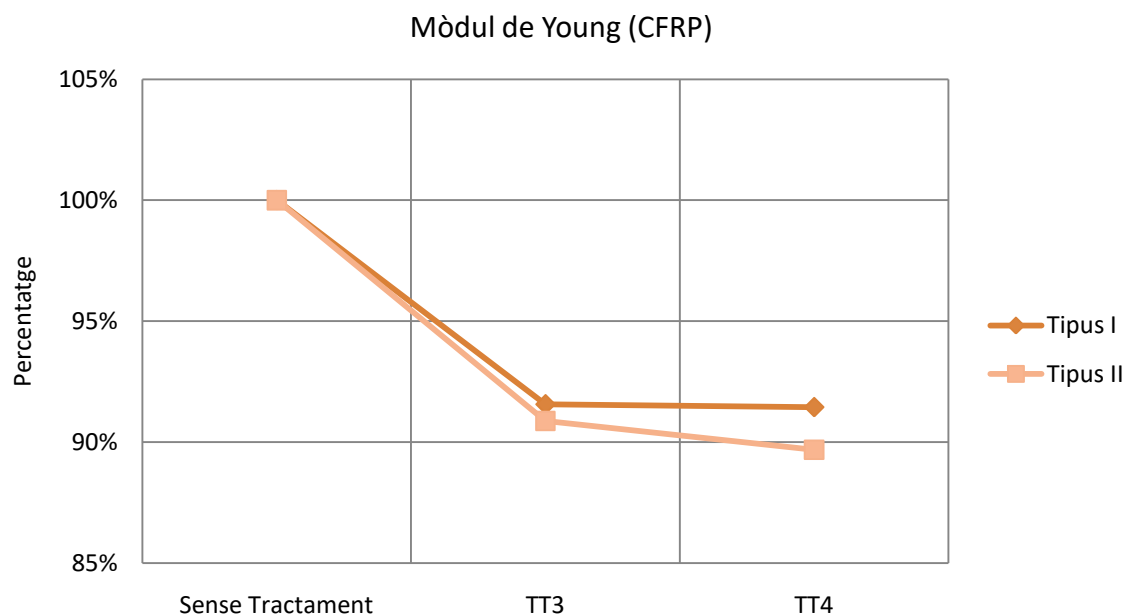


Figura 53: Comparació del mòdul de Young del CFRP per cada tractament

6.3. Elongació a tensió màxima

L'elongació és una magnitud que mesura l'augment de longitud d'un material quan és sotmès a un esforç. Per trobar l'elongació màxima fa falta que l'assaig del material sigui fins a la tensió de ruptura per així determinar el màxim allargament produït. Però també pot ser interessant conèixer la l'elongació en el punt on la tensió és màxima. Aquesta diferència de longitud s'expressa en forma de percentatge de la longitud inicial.

Si l'allargament no supera el límit elàstic del material, aquest es recupera fins a la longitud inicial un cop es deixa d'aplicar tensió. D'altra banda, si l'esforç és superior a aquest límit, el material no recuperarà la seva longitud inicial i es deformarà plàsticament.

En el cas de l'elongació a tensió màxima de l'ABS, el valor és diferent per cada tipus d'orientació. En les provetes del tipus I sense tractament, el material s'ha deformat més d'un 2,5% en el punt de tensió màxima. En el cas de l'orientació del tipus II es deforma prop d'un 2% i el tipus III està al voltant d'un 0,25% en el punt de tensió màxima.

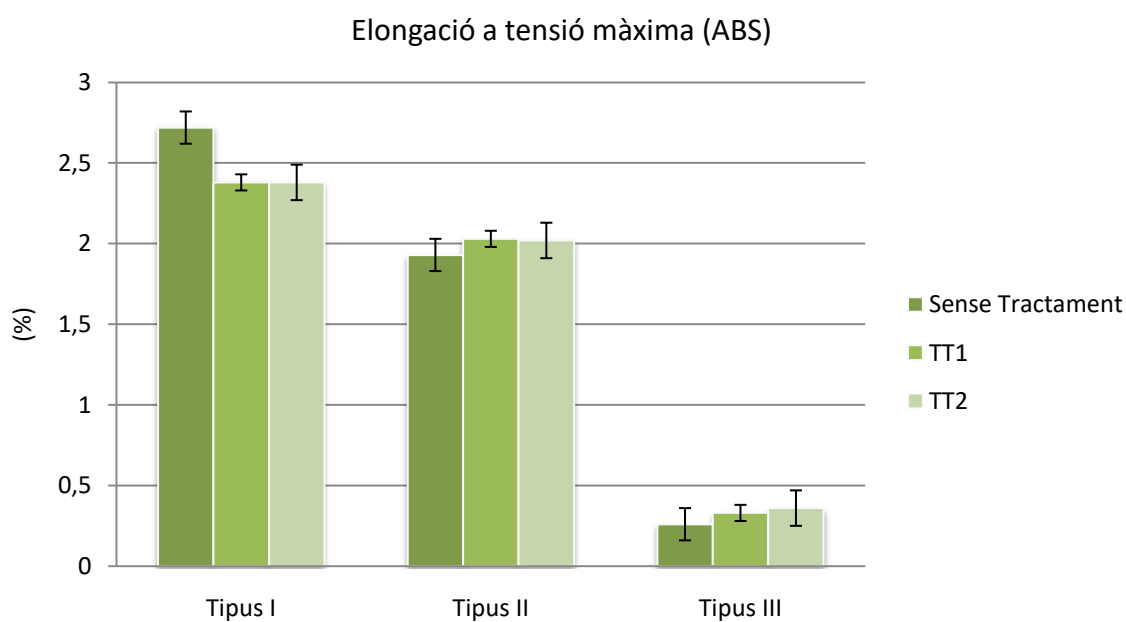


Figura 54: Comparació de l'elongació a tensió a màxima de l'ABS

A la *Figura 55* s'observa, en forma de percentatge, l'augment o disminució de l'elongació a tensió màxima de l'ABS en funció de cada tipus d'orientació i tractament tèrmic en comparació a les provetes sense tractament.

En el primer tractament (TT1) ha disminuït l'elongació un 10% en el tipus I i ha augmentat un 5% en el tipus II i prop d'un 30% en el tipus III. En el cas del tractament a més temperatura, els valors d'elongació a tensió màxima s'han mantingut similars al primer tractament en les provetes I i II, en canvi, ha seguit augmentant fins prop d'un 40% en les provetes del tipus III.

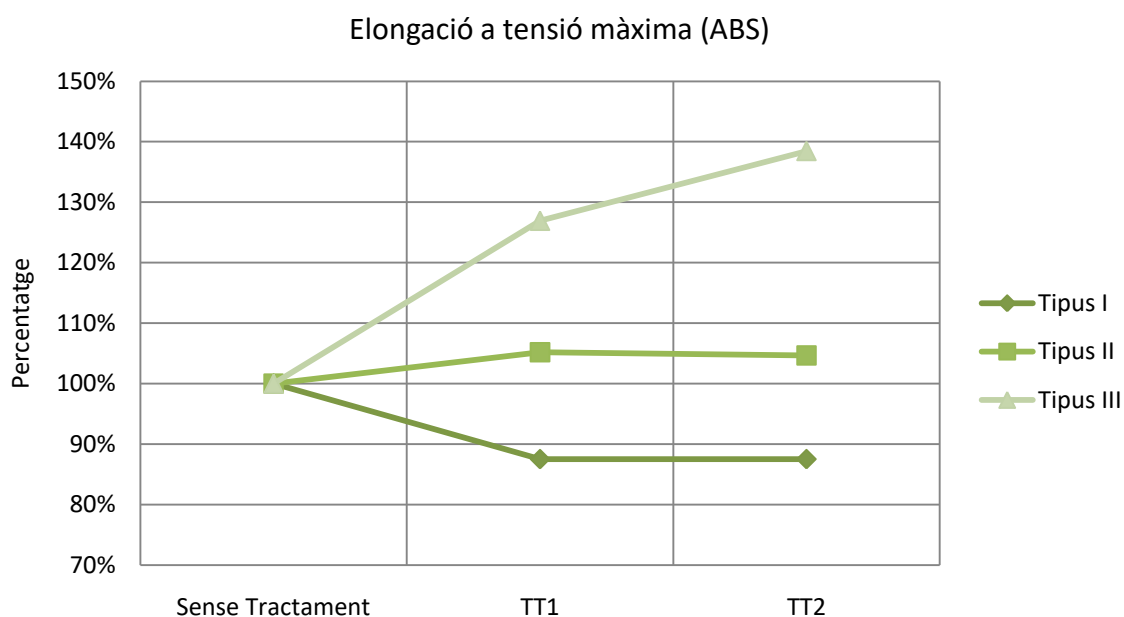


Figura 55: Comparació de l'elongació a tensió màxima de l'ABS per cada tractament

En el cas de l'elongació a tensió màxima del polímer reforçat amb fibra de carboni curta (CFRP) es veu clarament a la *Figura 56* com la deformació del tipus I és aproximadament el doble que la del tipus II.

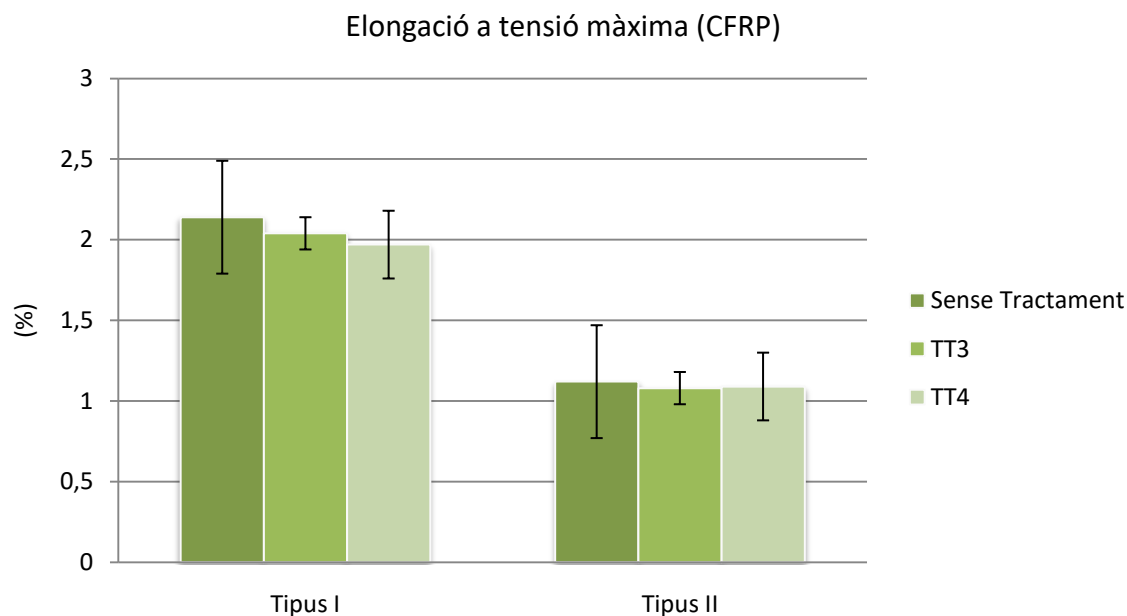


Figura 56: Comparació de l'elongació a tensió màxima del CFRP

L'efecte del tractament tèrmic en l'elongació a tensió màxima del CFRP és mínim i en els dos casos disminueix l'elongació respecte a el material sense tractar entre un 2 i un 8%. S'observa en forma de percentatge a la *Figura 57*.

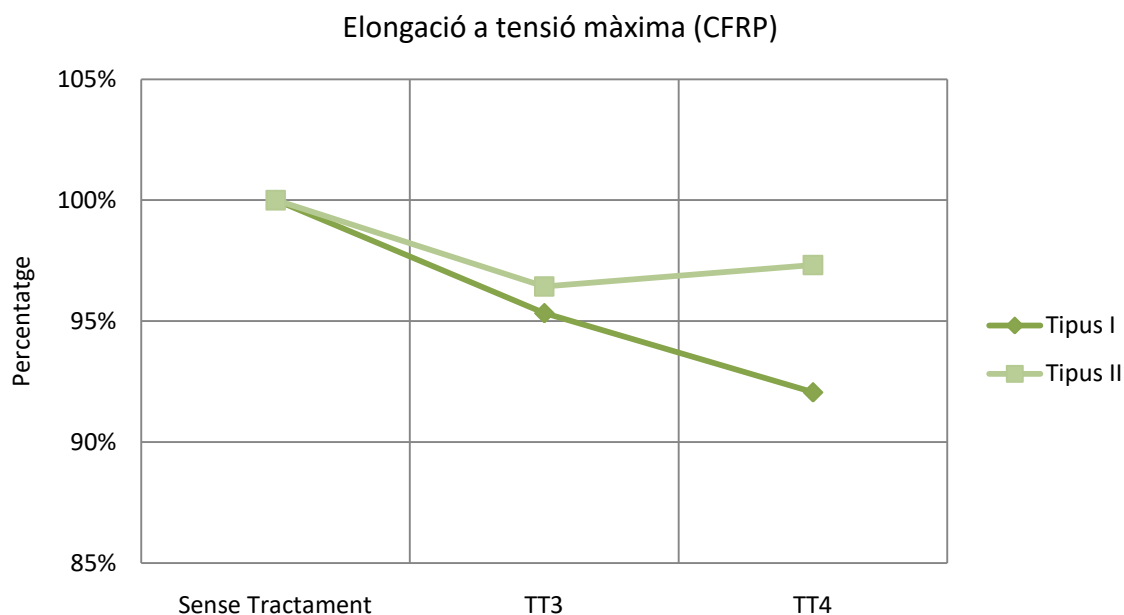


Figura 57: Comparació de l'elongació a tensió màxima del CFRP per cada tractament

6.4. Variació física

S'han agafat mesures dimensionals i el pes de cada proveta abans i després del tractament tèrmic per comprovar com afectava el post procés en les característiques físiques del material. La variació dimensional i de la massa s'expressa en forma de percentatge guanyat (en verd) o perdut (en vermell) i s'ha obtingut mitjançant la mitjana de variació de totes les provetes de cada un dels tipus. S'ha considerat que la variació era 0 si hi havia valors d'incertesa que no passaven del 0,1%. A les taules 9 i 10 es veu la variació dimensional i de la massa de les provetes d'ABS i CFRP, respectivament, un cop aplicat cada tractament.

ABS					
Tipus	Tractament	ΔX	ΔY	ΔZ	Δmassa
I	TT1	-0,89%	$\approx 0\%$	+1,61%	-0,17%
	TT2	-3,92%	+0,23%	+7,38%	-0,28%
II	TT1	-0,19%	$\approx 0\%$	$\approx 0\%$	-0,15%
	TT2	-1,11%	-1,81%	+3,01%	-0,15%
III	TT1	+0,15%	$\approx 0\%$	$\approx 0\%$	-0,20%
	TT2	+2,31%	-2,48%	+0,28%	-0,21%

Taula 9: Variació física de les provetes d'ABS tractades tèrmicament

CFRP					
Tipus	Tractament	ΔX	ΔY	ΔZ	Δmassa
I	TT3	-0,29%	-0,41%	+1,23%	-0,13%
	TT4	-1,00%	+1,81%	+3,11%	-0,26%
II	TT3	-0,44%	$\approx 0\%$	$\approx 0\%$	-0,10%
	TT4	-0,74%	-0,54%	+1,05%	-0,19%

Taula 10: Variació física de les provetes de CFRP tractades tèrmicament

S'observa que la variació dimensional ha sigut similar en els dos materials i depèn en gran mesura de l'orientació d'impressió. En les provetes del tipus I la longitud tendeix a disminuir i a augmentar el gruix i l'amplada. Les provetes del tipus II es deformen d'una forma similar però en menor mesura. En el cas del tipus III, que només ha pogut ser estudiat amb ABS, ha augmentat les dimensions longitudinals i ha disminuït la seva secció.

La pèrdua de massa ha sigut superior en el cas de l'ABS que en el CFRP i en els dos materials ha sigut de l'ordre d'un 0,20%, provocat segurament per la pèrdua d'aigua del material al ser escalfat.

6.5. Relació entre la variació de la secció i la resistència

Una vegada analitzada la variació dimensional després del tractament tèrmic es comprova si existeix una relació entre la variació de la secció i la variació de la resistència mecànica. Per això, s'analitzen els resultats normalitzats i es compara com ha variat la tensió màxima en cada un dels tractaments respecte al material sense tractar. També es mostra el percentatge d'augment (verd) o disminució (vermell) de la secció de la proveta després de cada tractament. A la *Taula 11* es mostren els resultats obtinguts en el cas de l'ABS.

ABS			
Tipus	Tractament	$\Delta\sigma_{\text{MAX}}$	$\Delta\text{Secció}$
I	TT1	-1,70%	+1,50%
	TT2	-9,30%	+7,71%
II	TT1	+6,33%	+0,31%
	TT2	+2,05%	+1,17%
III	TT1	+49,21%	-0,47%
	TT2	+80,16%	-2,43%

Taula 11: Comparació de la variació de la resistència i la secció de l'ABS

Tal com s'observa a la *Figura 58* existeix una relació entre la variació de secció i la resistència del material. En les provetes del tipus III on la secció ha disminuït, la resistència ha augmentat considerablement, en canvi, a mesura que ha anat augmentant la secció en els altres tipus i tractaments la resistència disminueix progressivament.

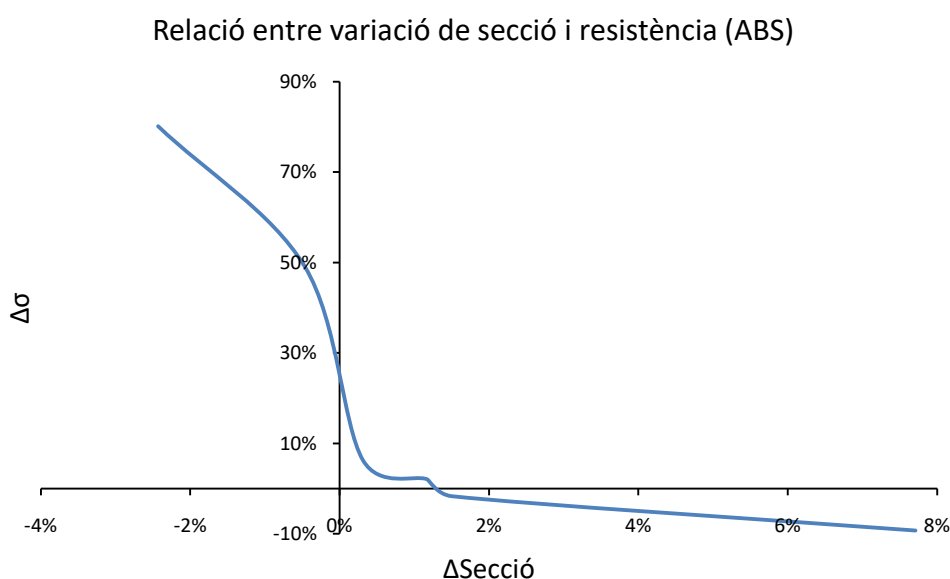


Figura 58: Gràfic secció-resistència de l'ABS després de tractar

En el cas del CFRP també s'han analitzat els resultats per tal d'obtenir una relació entre la variació de secció i l'efecte del tractament tèrmic sobre la resistència mecànica. Tot seguit es mostren els resultats obtinguts a la *Taula 12*.

CFRP			
Tipus	Tractament	$\Delta\sigma_{\text{MAX}}$	$\Delta\text{Secció}$
I	TT3	-11,71%	+0,84%
	TT4	-10,84%	+1,49%
II	TT3	-16,79%	+0,12%
	TT4	-14,12%	+0,53%

Taula 12: Comparació de la variació de la resistència i la secció del CFRP

Tal com s'observa a la *Figura 59* existeix una relació bastant lineal entre la variació de secció i la resistència del material. En el gràfic es veu que, al contrari que amb l'ABS, aquest material té un comportament diferent i quan la variació de secció és menor, la resistència mecànica disminueix. Això és degut al fet que el tractament a major temperatura influeix menys en les propietats però més en la variació de la secció.

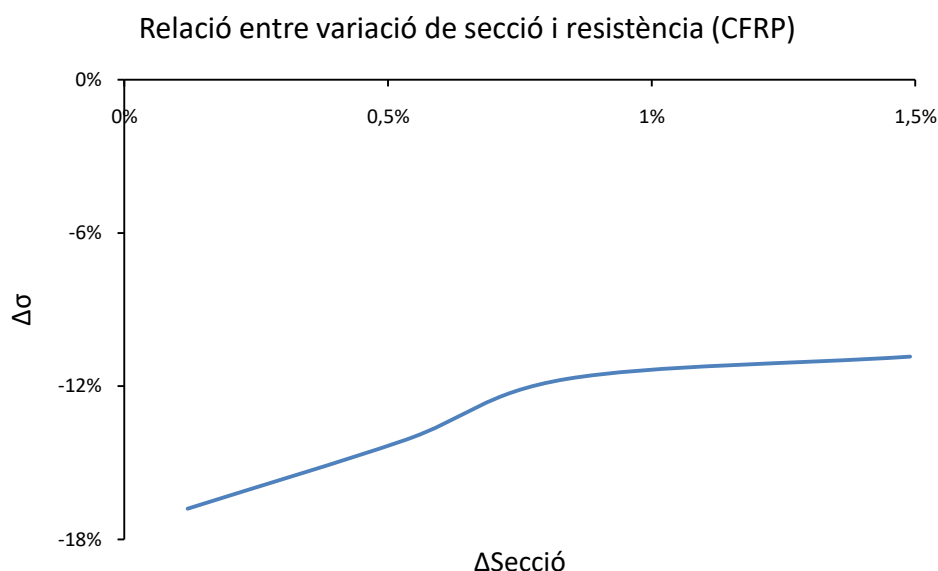


Figura 59: Gràfic secció-resistència del CFRP després de tractar

6.6. Estructura interna

En aquest apartat es realitza una comparació visual de la secció de la proveta abans i després de tractar. També es compara les diferències superficials i d'aspecte entre els dos materials per observar l'efecte de les fibres de carboni.

Comparació entre tractaments

La primera mostra es correspon a les provetes del tipus I-ABS i tal com es veu a la *Figura 60* es distingeixen clarament els filaments dipositats i els buits que queden entre ells. Això significa que la proveta no és del tot massissa i la separació entre els diferents filaments provoca que les unions no siguin del tot correctes, provocant punts dèbils. Observant les dues imatges es veu la diferència entre el material sense tractar i el material tractat tèrmicament. No s'adjunta una imatge de la secció després del tractament tèrmic a temperatura superior a la de transició vítria (TT2), ja que visualment no s'aprecien diferències amb el tractament a baixa temperatura (TT1).

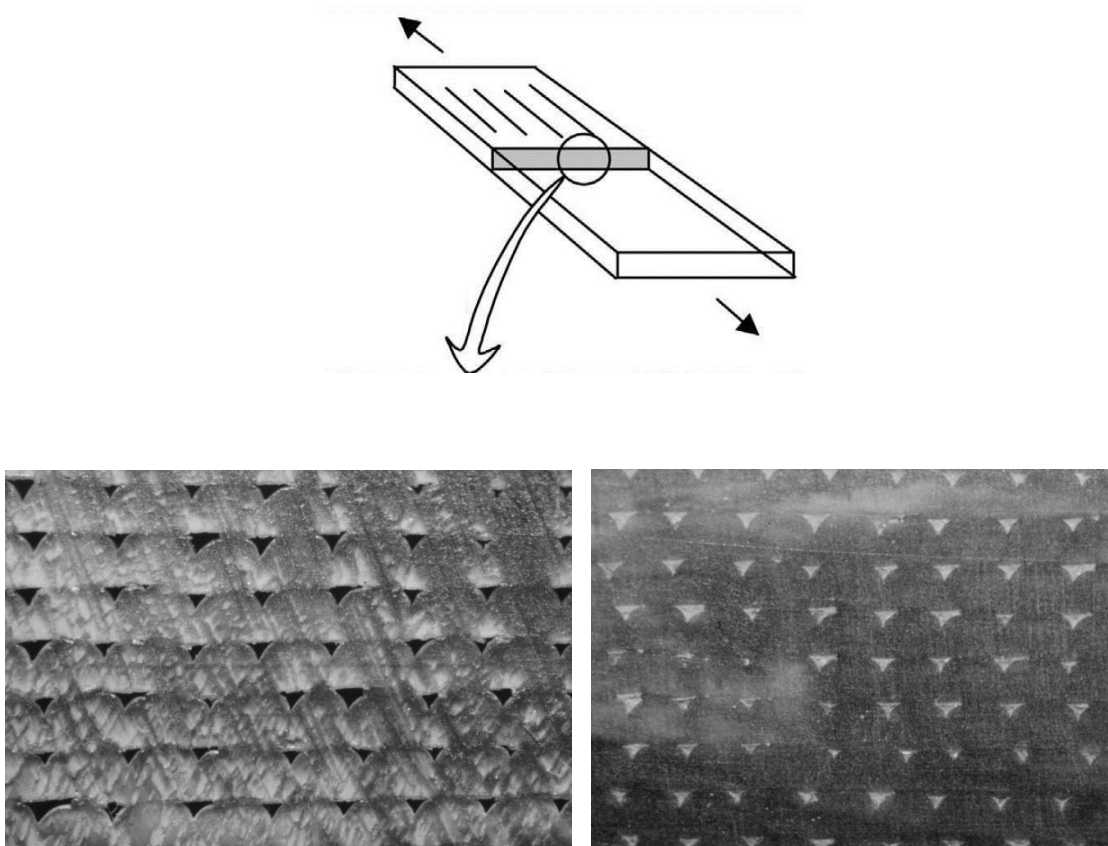


Figura 60: Secció de la proveta tipus I d'ABS abans i després del tractament tèrmic (TT1)

En el cas de les provetes del tipus II el resultat és significativament diferent. L'acabat de les cares superiors i inferiors és millor que en el cas de les mostres del tipus I. En canvi, els laterals d'aquest tipus d'orientació són significativament més rugosos tal i com es pot observar en les imatges de la *Figura 61*.

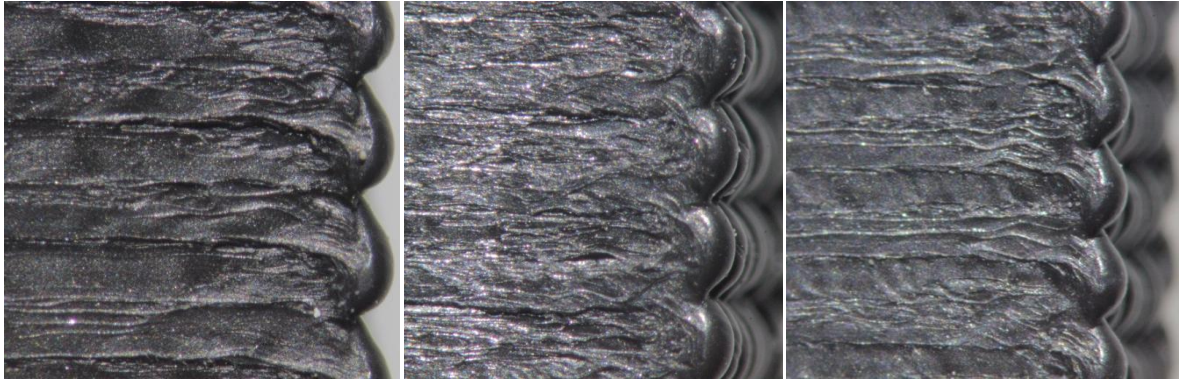


Figura 61: Lateral de les provetes tipus II d'ABS, d'esquerra a dreta: sense tractar, TT1 i TT2 respectivament

La secció de les provetes verticals del tipus III és diferent de la dels altres dos tipus i està formada per perímetres circulars. D'aquest tipus només s'han imprès provetes d'ABS i com es veu a la *Figura 62* la diferència de la secció abans i després del tractament és important. El filament de la mostra sense tractar és molt més marcat i es distingeixen els buits que hi ha entre les diferents passades; en canvi, després del tractament el material queda molt més homogeni i es marquen molt menys les direccions de fabricació. No s'adjunta una imatge de la secció després del tractament tèrmic a temperatura inferior a la de transició vítria (TT1), ja que visualment no s'aprecien diferències amb el tractament a alta temperatura (TT2).

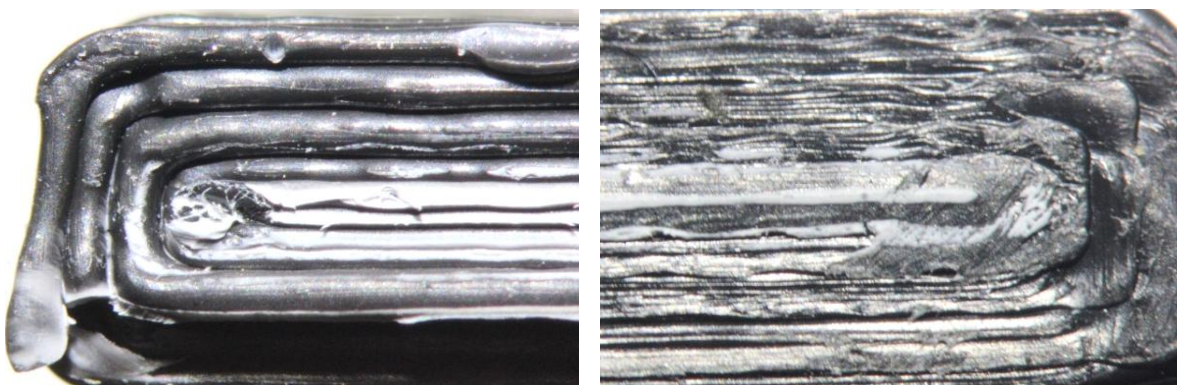


Figura 62: Secció de les provetes tipus III d'ABS abans i després del tractament (TT2)

Comparació entre materials

Existeix una gran diferència visual entre les provetes impreses amb ABS i les del polímer reforçat amb fibra de carboni. En la *Figura 63* es mostra una comparació del lateral de les provetes tipus I i es veuen els diferents filaments amb altura de capa de 0,25 mm que conformen el gruix total de la proveta. A la imatge de l'esquerra es veu clarament com l'ABS assoleix un acabat més fi, en canvi en el CFRP l'acabat és menys uniforme i més rugós, fet provocat per la presència de fibra de carboni curta.

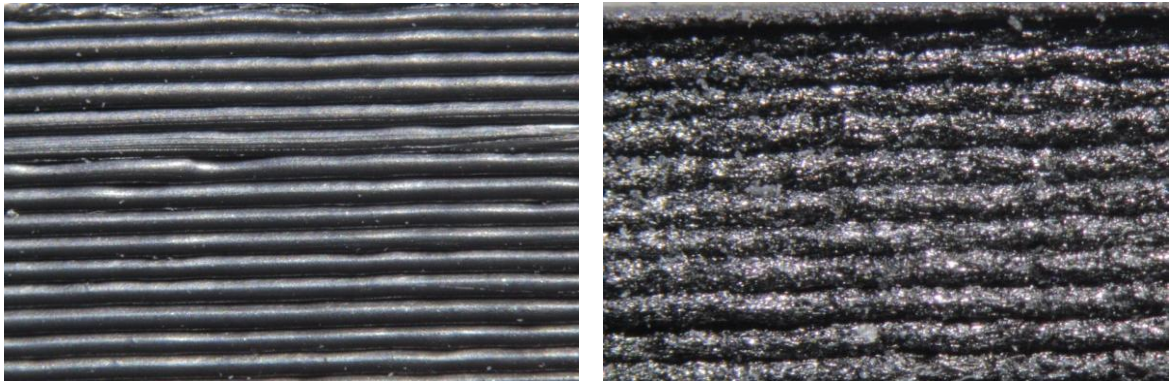


Figura 63: Lateral de les provetes tipus I d'ABS (esquerra) i CFRP (dreta) sense tractament

També es pot observar una gran diferència en l'acabat del material de l'ABS respecte al CFRP sense tractar. En la *Figura 64* es poden observar aquestes diferències en una imatge de la secció de dues provetes del tipus II.

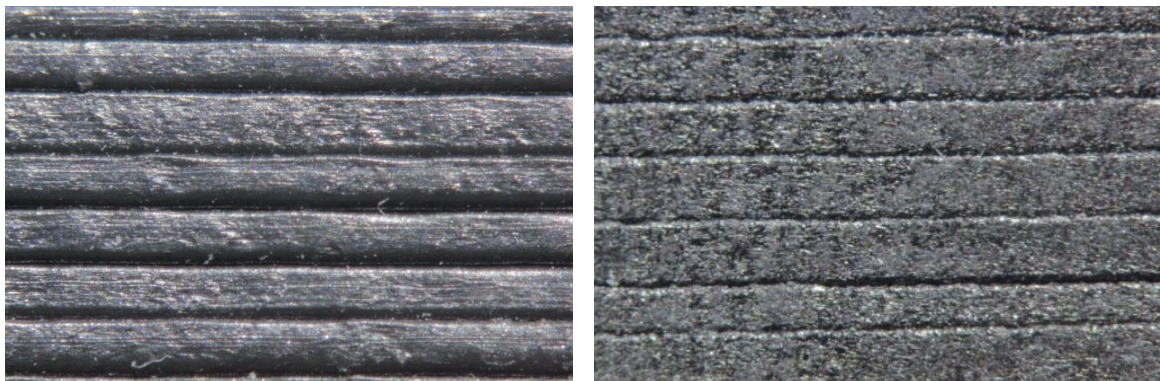


Figura 64: Detall de la secció de les provetes tipus II d'ABS (esquerra) i CFRP (dreta) sense tractament

7. CONCLUSIONS

En aquest projecte s'han imprès un total de 75 mostres amb ABS i CFRP, amb diferents orientacions d'impressió i s'han assajat segons la normativa ASTM D-638 després d'aplicar dos tractaments tèrmics. Una vegada finalitzats els assajos, s'han analitzat els resultats obtinguts i tot seguit s'enuncien les conclusions principals discutides.

- El factor principal que és majoritàriament determinant en qualsevol de les propietats estudiades és l'orientació d'impressió de la peça. En els dos materials es veu com en l'orientació del tipus I, on la força aplicada i la trajectòria del filament coincideixen, la resistència i el mòdul de *Young* són superiors a les altres direccions. El principal motiu d'això és perquè la direcció dels filaments són paral·lels a la força, els quals tenen una major resistència en comparació a qualsevol unió entre filaments o entre capes.
- El tractament tèrmic no produeix els mateixos efectes en els diferents tipus d'orientació d'impressió. S'ha vist com en el cas de l'ABS, el tractament amb una temperatura inferior, ha aportat millores de propietats (concretament ha millorat en el tipus II i tipus III). En el cas del tipus I les propietats han empitjorat prop d'un 5%. Observant l'efecte del tractament tèrmic es veu que el revingut amb l'ABS ha millorat la unió entre capes i entre filaments de la mateixa capa, però ha disminuït la resistència màxima dels filaments longitudinals. Paral·lelament també ha empitjorat lleugerament el mòdul de *Young* i l'elongació. L'orientació amb la qual el tractament ha influït més ha sigut la impressió del tipus III. Millorant la resistència a tracció un 80% i l'elongació en prop del 40%, en el cas del tractament tèrmic a major temperatura. Tot i que en algunes direccions han empitjorat les propietats mecàniques, aquest increment de resistència i rigidesa en l'orientació del tipus III és molt important, ja que es dona en la direcció més feble fent que en general tot el comportament de la peça sigui millorat.
- Les peces impreses amb el copolièster reforçat amb fibra de carboni curta, tenen un comportament anisotròpic. En determinar la tensió màxima i la rigidesa de cada orientació d'impressió es veu la clara influència de la direcció del filament. El tractament, lluny d'aportar cap millora en aquest material, ha reduït totes les seves propietats mecàniques i elàstiques. Els dos tractaments tèrmics han fet minvar la resistència màxima del material entre un 10% i un 15%. El mòdul de *Young* i l'elongació també s'han vist afectats i s'ha reduït aproximadament un 10% i un 6% respectivament en comparació amb el material sense tractar.

- La deformació que s'ha produït després d'aplicar el tractament tèrmic ha sigut diferent per cada tipus d'orientació. En el cas de l'ABS, les provetes del tipus I i tipus II s'han reduït longitudinalment, han augmentat la seva amplada i sobretot el gruix fins més d'un 7%. Amb la configuració del tipus III el resultat ha sigut del tot diferent, ha augmentat la longitud total, el gruix i ha disminuït l'amplada de la proveta després del tractament. El comportament amb el CFRP ha sigut similar però amb una deformació inferior que en el cas de l'ABS. De tot això es dedueix que independentment de l'orientació d'impressió el filament s'escurça en la direcció longitudinal, provocant un augment en el seu diàmetre i per això, en funció de cada orientació, variï el gruix i l'amplada de la peça.
- S'ha comprovat que hi ha una relació entre la variació de la secció i la resistència del material. En el cas de l'ABS, les provetes del tipus III són les que la seva secció ha disminuït més i com a conseqüència la tensió ha augmentat considerablement, en canvi, a mesura que ha anat augmentant la secció, la resistència ha anat disminuint progressivament. En el CFRP el comportament ha sigut considerablement diferent i curiosament quan la variació de la secció ha sigut menor, la tensió màxima també ha disminuït en comparació als tractaments de més temperatura. En molts casos la força que ha resistit la proveta ha sigut major després d'aplicar el tractament tèrmic, però a l'augmentar en gran mesura la seva secció, la tensió ha sigut menor.
- La massa de la proveta s'ha vist afectada després del tractament. En el cas de l'ABS la reducció ha sigut entre un 0,15% i 0,30% i amb el CFRP ha sigut entre el 0,10% i 0,25%. També s'ha vist d'una forma clara com a major temperatura la reducció de la massa de la proveta augmentava. Aquesta disminució del pes és deguda a la pèrdua d'aigua que el material havia absorbit.
- S'han observat canvis visuals en la secció del material després de tractar. Es veu com el material queda reorganitzat d'una millor forma, ocupant espais buits i reduint la porositat. A partir dels assajos s'ha comprovat que aquest canvi estructural ha millorat la unió entre filaments de l'ABS, però per contra ha debilitat la resistència longitudinal del filament. En el cas el CFRP no s'han apreciat diferències visuals amb el material abans i després de tractar, ja que la seva estructura era desorganitzada de per si. Probablement la presència de les fibres o bé el mal ajust dels paràmetres de tractament han fet que les propietats mecàniques empitjoressin considerablement.
- Els dos materials no són comparables perquè no tenen el mateix polímer de base, per aquest motiu la diferència entre ells ha sigut menor del que s'esperava. Fins i tot, en el cas del tipus II, l'ABS ha millorat en resistència i rigidesa al polímer reforçat amb fibra de carboni curta.

7.1. Futures línies d'investigació

En aquest apartat s'exposen algunes de les possibles línies d'investigació posteriors a aquest projecte. Són noves propostes de millora relacionades amb el tema estudiat que es poden tractar en futurs projectes amb la finalitat de desenvolupar el coneixement relacionat amb el comportament mecànic de peces impreses amb tecnologia FDM.

- La primera proposta per seguir investigant amb el tema estudiat seria repetir l'estudi realitzat imprimint provetes del tipus III de CFRP, per comprovar si també augmenta la resistència i la rigidesa després d'aplicar un tractament tèrmic.
- Es pot seguir investigant en com afecten aquests tractaments i paràmetres d'impressió en la resistència a flexió i a compressió del material. En aquest estudi s'ha obtingut experimentalment la resistència a tracció, en funció del material, orientació i tractament tèrmic, però no s'ha investigat el seu comportament a flexió ni a compressió.
- Modificar l'ompliment de la proveta. Es podria investigar en com afecta l'*infill* de la proveta, modificant el percentatge o bé l'angle d'impressió que es podria fixar a 45°. Així es reduiria l'anisotropia del material contrarestant la diferència de propietats en les diferents direccions.
- Amb les propietats del material obtingudes experimentalment es podria modelitzar una peça funcional, calculant la seva resistència teòrica mitjançant càlcul i simulació per elements finits i tot seguit comprovar-ho a partir d'un assaig mecànic.
- Utilitzar una impressora més precisa que no requereixi d'un ajust manual com el calibratge del llit calent, ja que no es garanteix la repetibilitat entre les diferents provetes, provocant defectes i resultats diferents. Molts models d'impressora 3D ja disposen d'un sensor pel calibratge automàtic de l'altura Z entre l'extrusor i el llit calent, fet que facilita i millora la impressió. També seria convenient utilitzar una impressora 3D que disposés de ventilació a l'extrusor. En imprimir amb un polímer reforçat amb fibra de carboni és necessari disposar d'una ventilació entre capes, ja que contribueix a millorar l'acabat superficial i la bona adhesió entre les capes.

8. RELACIÓ DE DOCUMENTS

DOCUMENT 1. MEMÒRIA

DOCUMENT 2. ANNEXOS

Annex A: INTRODUCCIÓ A LA FABRICACIÓ ADDITIVA

Annex B: DOCUMENTACIÓ TÈCNICA

Annex C: PARÀMETRES D'IMPRESSIÓ

Annex D: DIMENSIONS I PES DE LES PROVETES

Annex E: RESULTATS DE L'ASSAIG

DOCUMENT 3. PRESSUPOST

Annex A: ANNEX AL PRESSUPOST

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://www.3dprinteruniverse.com> (Consultat el 7 de març de 2018)
- [2] S.-H. AHN, M. MONTERO, D. ODELL, S. ROUNDY, P.K. WRIGHT. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, Rapid Prototyping Journal, 8, No 4. 2002
- [3] JASON CANTRELL - Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts (Mechanical and Aerospace Engineering Department, 571 Gale Lemerand Dr., MAE-C 134, University of Florida). 2017
- [4] <https://www.sculpteo.com> (Consultat el 10 de març de 2018)
- [5] BENCE P. GÁVAY. Investigation and optimization of 3D printer settings and surface treatment. Master Thesis. Universitat de Girona. 2016
- [6] ILLYASS SAAD. Determinació de les propietats mecàniques d'un compòsit imprès per FDM. Treball Final de Grau. Universitat de Girona. 2017
- [7] <http://www.todo-3d.com> (Consultat el 17 de març de 2018)
- [8] <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/> (Consultat el 6 d'abril de 2018) Publicat el 15 de desembre de 2017
- [9] <https://www.cooking-hacks.com> (Consultat el 22 d'abril de 2018)
- [10] <http://www.tridimake.com> (Consultat el 22 d'abril de 2018)
- [11] <http://www.impressores3d.cat> (Consultat el 9 de maig de 2018)
- [12] <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/> (Consultat el 12 de juny de 2018)
- [13] https://www.lafactoria3d.es/servicios/impresion/materiales/48/pva_soporte (Consultat el 12 de juny de 2018)
- [14] <https://www.imprime3dbarato.com> (Consultat el 30 de juny de 2018)
- [15] <https://www.uk.rs-online.com> (Consultat el 30 de juny de 2018)
- [16] B. M. RODRÍGUEZ. Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM. UPC BarcelonaTech. 2017

- [17] C. ZIEMIAN, M. SHARMA and S. ZIEMIAN. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. Duke University. 2012
- [18] <http://www.pslc.ws/macrog> (Consultat el 7 de juliol de 2018)
- [19] <https://rigid.ink/blogs/news/how-to-anneal-your-3d-prints-for-strength> (Consultat el 7 de juliol de 2018) Publicat el 16 de gener de 2017 per Ed Tyson
- [20] GUSTAV ENGKVIST. Investigation of microstructure and mechanical properties of 3D printed Nylon. Degree Project. Materials Engineering. 2017
- [21] ZIXIANG WENG, JIANLEI WANG, SENTHIL T and LIXIN. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nano composites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials and Design* 102 276–283. 2016
- [22] <http://www.ensinger.es/es/semielaborados/> (Consultat el 18 de juliol de 2018)
- [23] <http://my3dmatter.com> (Consultat el 21 de juliol de 2018)
- [24] PRITISH SHUBHAM, ARNAB SIKIDARI TEG CHAND. The Influence of Layer Thickness on Mechanical Properties of the 3D Printed ABS Polymer by Fused Deposition Modeling. 2016
- [25] G ĆWIKLA. The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 227 012033. 2017
- [26] M. VELASCO PEÑA - Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de manufactura aditiva FDM. 2016
- [27] DURGUN I, ERTAN R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyp J.* 2014;20:228–235. doi: 10.1108/RPJ-10-0091. 2012
- [28] JAYA CHRISTIYAN K G, U. CHANDRASEKHAR, K. VENKATESWARLU. “Influence of raster orientation and layer thickness on mechanical properties of ABS material using FDM process”, *IJARSE*, Vol. No.3, Special Issue (01), September. 2014
- [29] <https://smartmaterials3d.com> (Consultat el 22 de juliol de 2018)
- [30] <https://www.textoscientificos.com> (Consultat el 23 de juliol de 2018)
- [31] <https://colorfabb.com/materials/co-polyesters/colorfabb-xt> (Consultat el 27 de juliol de 2018)

- [32] DOMINGO ESPÍN M. Aportaciones al conocimiento sobre la fabricación aditiva con la tecnología Fused Deposition Modeling. 2016
- [33] REX C. KANU, C. HALE, P. O'NEAL PIPER. The Use of 3D Printing to Introduce Students to ASTM Standards for Testing Tensile Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Plastic Material. Purdue University. 2016
- [34] <https://www.astm.org/Standards/D638.htm> (Consultat el 9 de maig de 2018)
- [35] <https://www.fargo3dprinting.com/annealing-makes-3d-prints-better/> (Consultat el 17 de març de 2018) Publicat l'11 d'octubre de 2017 per fargo3dprinting
- [36] LEE CS, KIM SG, KIM HJ, AHN SH. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. J Mater Process Technology, 630(7):187– 188. 2007
- [37] K. SZYKIEDANS, W. CREDO. Mechanical Properties of FDM and SLA Low-cost 3-D Prints, Procedia Engineering, 136. 257-262. 2016
- [38] L. NOVAKOVA-MARCINCINOVA, J. NOVAK-MARCINCIN. Verification of Mechanical Properties of ABS Materials used in FDM Rapid Prototyping Technology, Proceedings in Manufacturing Systems, 8, No 2. 2013
- [39] A. RELAÑO PASTOR. Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida. Universidad Carlos III de Madrid. 2013
- [40] FAJIĆ, ADIS, TUFEKČIĆ, DŽEMO AND TOPČIĆ, ALAN. Effect of processing parameters on tensile strenght of 3D printed parts. University of Tuzla. 2008
- [41] P.J. ARRIBAS. Procedimiento y caracterización de probetas de plástico fabricadas mediante la impresión 3D. Universidad de Burgos. 2016
- [42] GIBSON I.; ROSEN, D. W.; STUCKER B. Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. 2010
- [43] SEROPE KALPAKJIAN, STEVEN R. SCHMID. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Pearson Education (Cuarta Edición). 2002
- [44] A. J. DEL MEDICO. Propiedades mecánicas de Componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida. Universidad de la Laguna. 2017
- [45] J. LI, Y. F. ZHANG. The Tensile Properties of Short Carbon Fiber Reinforced ABS and ABS/PA6 Composites. Shanghai Second Polytechnic University. Shanghai. 2009

- [46] <https://hackaday.com/2017/06/17/annealing-plastic-for-stronger-prints/>
(Consultat el 10 de març de 2018) Publicat el 17 de juny de 2017 per Brian Benchoff
- [47] <http://hxx.es/2014/12/20/tecnologias-de-impresion-3d-iii-extrusion-de-material/>
(Consultat el 11 de març de 2018) Publicat el 20 de desembre de 2014 per HXX.
- [48] <http://justinmklam.com/posts/2017/06/sous-vide-pla/>
(Consultat el 11 de març de 2018) Publicat el 13 de juny de 2017 per Justin Lam
- [49] <https://www.impresoras3d.com/un-repaso-a-los-trucos-mas-usados-para-imprimir-en-abs/> (Consultat el 12 de maig de 2018) Publicat el 5 d'abril de 2017 per impresoras3d