

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Resistència mecànica d'estructures
cel·lulars produïdes per fabricació
additiva**

MEMÒRIA

Autor: Sergio Domènech Garcia

Director: Julián Arnaldo Ávila Díaz

Convocatòria: Juny 2023



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Les estructures cel·lulars són construccions tridimensionals que segueixen patrons geomètrics en forma de xarxa. Tenen un ampli rang d'aplicacions com la construcció de pròtesis o l'optimització estructural, entre moltes altres. Per obtenir-les, s'utilitzen mètodes de fabricació additiva, concretament en aquest projecte s'ha fet servir la tecnologia de deposició de filament fos amb material PLA. L'objectiu principal d'aquest treball de fi de grau és l'estudi de tres estructures cel·lulars diferents (Cúbica simple, BCC i FCC) amb un esforç a tracció. Per dur a terme aquesta investigació, s'han assajat les provetes dels diferents enreixats a tracció uniaxial, s'han simulat amb un mètode d'elements finits i s'ha fet una anàlisi de correlació digital. Un cop aconseguits els resultats, s'han comparat amb models d'espumes polimèriques existents per comprovar la fiabilitat d'aquests. En conclusió, s'han analitzat les propietats de cada proveta per tal d'assolir les conclusions sobre quina proveta té un millor rendiment mecànic.

Resumen

Las estructuras celulares son construcciones tridimensionales que siguen patrones geométricos en forma de red. Tienen un amplio rango de aplicaciones como la construcción de prótesis o la optimización estructural, entre muchas otras. Para obtenerlas, se utilizan métodos de fabricación aditiva, concretamente en este proyecto se ha utilizado la tecnología de deposición de filamento fundido con material PLA. El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es el estudio de tres estructuras celulares distintas (Cúbica simple, BCC y FCC) con un esfuerzo a tracción. Para llevar a cabo esta investigación, se han ensayado las probetas de los diferentes enrejados a tracción uniaxial, se han simulado con un método de elementos finitos y se ha realizado un análisis de correlación digital. Una vez conseguidos los resultados, se han comparado con modelos de espumas poliméricas existentes para comprobar su fiabilidad. En conclusión, se han analizado las propiedades de cada probeta para conseguir las conclusiones sobre qué probeta tiene un mejor rendimiento mecánico.

Abstract

Lattice structures are three-dimensional constructions that follow geometric grid-like patterns. They have a wide range of applications such as the construction of prostheses or structural optimization, among many others. To obtain them, additive manufacturing methods are used, specifically in this project the fused filament fabrication technology with PLA material has been used. The main objective of this thesis is the study of three different cell structures (simple cubic, BCC and FCC) with a tensile stress. To carry out this research, the specimens of the different trusses have been tested in uniaxial tension, simulated with a finite element method, and analysed with a digital correlation test. Once the results were obtained, they were compared with existing models of polymeric foams to check their reliability. In conclusion, the properties of each test tube have been analyzed in order to reach conclusions about which test tube has a better mechanical performance.

Contingut

Resum	2
Resumen	4
Abstract	6
Contingut	8
Glossari i nomenclatura	11
Índex de figures	12
Índex de taules	14
1. Prefaci	15
2. Introducció	16
2.1. Motivació	16
2.2. Abast del treball	16
2.3. Objectius del treball	17
3. Introducció teòrica	18
3.1. Assajos de caracterització	18
3.1.1. Assaig de tracció uniaxial	18
3.1.2. Correlació d'imatges digital	20
3.2. Estructures cel·lulars	20
3.2.1. Estructura cúbica simple	21
3.2.2. Estructura BCC	21
3.2.3. Estructura FCC	22
3.3. Fabricació additiva	22

3.4.	Mètode d'elements finits _____	23
3.5.	Estat de l'art _____	24
3.5.1.	Models mecànics d'espumes polimèriques _____	24
4.	Metodologia i equipament experimental _____	26
4.1.	Disseny de provetes i d'estructures _____	26
4.1.1.	Provetes sòlides _____	26
4.1.2.	Provetes d'estructures _____	27
4.1.3.	Estructures cel·lulars _____	28
4.2.	Conformació de les provetes _____	30
4.3.	Assajos a tracció _____	34
4.4.	Simulació per correlació digital _____	36
4.5.	Anàlisi per elements finits _____	37
4.5.1.	Obtenció de cossos mallats _____	37
4.5.2.	Simulacions amb MSC.Marc _____	38
5.	Resultats i discussió _____	40
5.1.	Resultats d'assajos a tracció _____	40
5.1.1.	Provetes sòlides _____	40
5.1.2.	Provetes amb estructura cúbica simple _____	41
5.1.3.	Provetes amb estructura BCC _____	42
5.1.4.	Provetes amb estructura FCC _____	43
5.2.	Anàlisi de fractures _____	44
5.3.	Resultats dels anàlisis per elements finits _____	47
5.3.1.	Provetes amb estructura cúbica simple _____	47
5.3.2.	Provetes amb estructura BCC _____	48

5.3.3.	Proveta amb estructura FCC _____	49
5.4.	Resultats d'anàlisi per correlació digital _____	50
5.4.1.	Proveta sòlida _____	50
5.4.2.	Proveta amb estructura cúbica simple _____	51
5.4.3.	Proveta amb estructura BCC _____	51
5.4.4.	Proveta amb estructura FCC _____	52
5.5.	Comparació i discussió de resultats _____	53
6.	Planificació _____	58
7.	Pressupost _____	59
8.	Estudi ambiental _____	61
9.	Estudi social i d'igualtat de gènere _____	62
10.	Conclusions _____	63
11.	Agraïments _____	64
12.	Bibliografia _____	65

Glossari i nomenclatura

σ	Tensió (<i>MPa</i>)
P	Força uniaxial (<i>m</i>)
A_i	Superfície inicial perpendicular (<i>mm</i> ²)
ε	Deformació (%)
ΔL	Increment de longitud (<i>mm</i>)
L	Longitud final (<i>mm</i>)
L_i	Longitud inicial (<i>mm</i>)
E	Mòdul de Young (<i>MPa</i>)
σ_o	Límit elàstic de compensació (<i>MPa</i>)
σ_{eq}	Tensió equivalent de Rankine
σ_i	Component principal de tensió
T	Vector posició d'una xarxa de Bravais
n_i	Enter que defineix una xarxa de Bravais
a_i	Vector fonamental d'una xarxa de Bravais
E^*	Mòdul de Young d'espuma polimèrica (<i>MPa</i>)
E_s	Mòdul de Young de material polimèric sòlid (<i>MPa</i>)
ϕ	Factor indicatiu de la pressió del gas atrapat a les bosses de les cel·les tancades
ρ^*	Densitat d'espuma polimèrica (<i>kg/m</i> ³)
ρ_s	Densitat de material polimèric sòlid (<i>kg/m</i> ³)
ν^*, ν	Coefficient de Poisson
E_{Ass}	Mòdul de Young mesurat per assaig a tracció (<i>MPa</i>)
E_{GOM}	Mòdul de Young mesurat per correlació digital (<i>MPa</i>)
E_{GiA}	Mòdul de Young calculat pel model de Gibson i Ashby (<i>MPa</i>)
E_G	Mòdul de Young calculat pel model de Goods (<i>MPa</i>)
m	Massa (<i>g</i>)
ρ	Densitat estructura cel·lular (<i>g/cm</i> ³)
σ_o/ρ	Límit elàstic específic (<i>MPa · cm</i> ³ / <i>g</i>)

Índex de figures

Figura 1. Diagrama tensió-deformació [8]	18
Figura 2. Esquema [11] i model d'estructura cel·lular cúbica simple	21
Figura 3. Esquema [11] i model d'estructura BCC	22
Figura 4. Esquema [11] i model d'estructura FCC	22
Figura 5. Cel·la unitària oberta [18]	25
Figura 6. Plànol de la proveta seguint la normativa E466 (mides en mm)	26
Figura 7. Provetes desenvolupades per la Ohio State University [22]	27
Figura 8. Plànol de proveta amb estructures cel·lulars (cotes en mm)	27
Figura 9. Normes de disseny per diferents tècniques de fabricació additiva [23]	28
Figura 10. Proveta amb estructura cúbica simple	29
Figura 11. Proveta amb estructura BCC	29
Figura 12. Proveta amb estructura FCC	30
Figura 13. Configuració avançada de la màquina de fabricació additiva	33
Figura 14. Procés de fabricació d'una proveta sòlida	34
Figura 15. D'esquerra a dreta: proveta sòlida, proveta cúbica simple i proveta FCC	34
Figura 16. Exemple de proveta BCC llesta per ser assajada	35
Figura 17. Exemple de proveta sòlida llesta pel fotoanàlisi	36
Figura 18. Primera iteració del mallat de les provetes	37
Figura 19. Mallat de les provetes refinades	38
Figura 20. Gràfic tensió-deformació de les provetes sòlides	40
Figura 21. Gràfic tensió-deformació de les provetes cúbiques simples	41
Figura 22. Gràfic tensió-deformació de les provetes BCC	42

Figura 23. Gràfic tensió-deformació de les provetes FCC_____	43
Figura 24. Fractura de la proveta sòlida _____	44
Figura 25. Fractura de la proveta amb estructura cúbica simple_____	45
Figura 26. Fractura de la proveta amb estructura BCC_____	45
Figura 27. Fractura de la proveta amb estructura FCC_____	46
Figura 28. Anàlisi FEM estructura cúbica simple de la vista general (esquerra) i la secció de ruptura (dreta). De dalt a baix: distribució de desplaçaments i distribució de màxima tensió principal_____	47
Figura 29. Anàlisi FEM estructura BCC de la vista general (esquerra) i la secció de ruptura (dreta). De dalt a baix: distribució de desplaçaments i distribució de màxima tensió principal_____	48
Figura 30. Anàlisi FEM estructura FCC de la vista general (esquerra) i la secció de ruptura (dreta). De dalt a baix: distribució de desplaçaments i distribució de màxima tensió principal_____	49
Figura 31. Camp de deformacions de la proveta sòlida per correlació digital _____	50
Figura 32. Camp de deformacions de la proveta cúbica simple per correlació digital _	51
Figura 33. Camp de deformacions de la proveta FCC per correlació digital _____	52
Figura 34. Assajos a tracció de les diferents estructures cel·lulars_____	53
Figura 35. Comparació de Mòduls de Young entre provetes _____	54
Figura 36. Comparació de límits elàstics entre provetes_____	55
Figura 37. Comparació de deformacions elàstiques màximes _____	56
Figura 38. Comparació de deformacions de fractura _____	57
Figura 39. Diagrama de Gantt de la planificació del treball_____	58

Índex de taules

Taula 1. Propietats físiques de les provetes.....	30
Taula 2. Propietats dels mallats de les provetes	38
Taula 3. Característiques mecàniques de les provetes sòlides	41
Taula 4. Característiques mecàniques de les provetes cúbiques simples	42
Taula 5. Valors de Mòdul de Young de les provetes cúbiques simples	42
Taula 6. Característiques mecàniques de les provetes BCC.....	43
Taula 7. Valors de Mòdul de Young de les provetes BCC.....	43
Taula 8. Característiques mecàniques de les provetes FCC.....	44
Taula 9. Valors de Mòdul de Young de les provetes FCC	44
Taula 10. Mesures del Mòdul de Young utilitzant diferents models.....	53
Taula 11. Mesures dels diferents trams del Mòdul de Young.....	54
Taula 12. Mesures del límit elàstic de les diferents estructures.....	55
Taula 13. Mesures de deformacions de les diferents estructures.....	56
Taula 14. Pressupost destinat a la mà d'obra	59
Taula 15. Pressupost destinat als equips informàtics.....	59
Taula 16. Pressupost destinat a les llicències informàtiques.....	59
Taula 17. Pressupost destinat a la maquinària.....	59
Taula 18. Pressupost destinat al consum energètic	60
Taula 19. Pressupost destinat als materials.....	60
Taula 20. Pressupost total del treball de fi de grau	60
Taula 21. Despesa energètica del treball.....	61

1. Prefaci

Aquest Treball de Fi de Grau s'ha dut a terme a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), concretament al departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria (RMEE). Es un treball principalment de focus experimental. Consisteix en la fabricació de provetes amb diverses estructures cel·lulars amb material polimèric mitjançant fabricació additiva i després assajar-ne la resistència a tracció i realitzar un fotoanàlisi de correlació digital. Finalment s'analitzarà un model d'elements finits per comprovar els resultats.

2. Introducció

Durant els darrers anys s'han anat investigant i desenvolupant noves estructures i materials que optimitzen el rendiment mecànic quant a costos, obtenció de recursos i impacte ambiental. Un d'aquests elements són els enreixats cel·lulars que mitjançant construcció d'estructures que segueixen patrons geomètrics tridimensionals. Aquestes formes són molt útils perquè estalvien material i modifiquen les propietats d'un material depenent de la geometria. Una de les tècniques de conformació més utilitzada dels enreixats cel·lulars és la fabricació additiva que consisteix en l'apilament de material capa a capa per tal d'obtenir un objecte. Un gran nombre d'estudis han estat desenvolupats per tal d'optimitzar al màxim aquestes estructures fent servir diversos mètodes de fabricació additiva i materials perquè són usades en els àmbits medicina, edificació, esports, moda, entre molts altres.

2.1. Motivació

La principal motivació rere aquest treball de fi de grau radica en la urgència d'abordar la despesa energètica i de recursos com una resposta al canvi climàtic i als problemes ambientals actuals. A través de la investigació d'estructures cel·lulars que optimitzen les propietats mecàniques vers el material utilitzat, s'espera contribuir al desenvolupament d'un futur més sostenible i promoure canvis significatius en la valoració dels recursos naturals.

D'altra banda, aquest treball també busca possibles millores en el camp de la medicina. L'exemple més clar és amb la construcció de pròtesis emprant enreixats cel·lulars per a disminuir el pes i el consum de material en la construcció de l'instrument. D'aquesta forma s'optimitzarien les propietats mecàniques de la pròtesi incrementant l'ergonomia del pacient i disminuint els costos de materials.

2.2. Abast del treball

L'estudi d'aquest treball només contemplarà la resistència mecànica a tracció. Es farà ús de provetes de material polimèric, concretament d'àcid polilàctic (PLA), conformades mitjançant la tecnologia de fabricació per fusió de filament. A part, només s'estudiaran 3 tipus d'estructures cel·lulars: cúbica simple, BCC i FCC.

2.3. Objectius del treball

Els objectius d'aquest treball de fi de grau són els següents:

- Dissenyar i fabricar diferents estructures cel·lulars mitjançant fabricació additiva donades les limitacions dels equipaments de fabricació i mesura.
- Obtenir les característiques mecàniques del material PLA i de les diferents estructures cel·lulars.
- Modelar les provetes i elaborar una anàlisi d'elements finits.
- Comparar les diferències entre les múltiples estructures cel·lulars generades.
- Comparar els resultats obtinguts amb estudis previs.

3. Introducció teòrica

3.1. Assajos de caracterització

3.1.1. Assaig de tracció uniaxial

Un assaig de tracció uniaxial consisteix en la prova destructiva d'una peça per tal d'obtenir informació sobre la resistència a tracció, el límit elàstic i la ductilitat del material testejat. Per tal d'aconseguir les dades desitjades, es mesura la força necessària per trencar una proveta i l'allargament que pateix fins al punt de fallada. Utilitzant una màquina d'assajos a tracció vertical i seguint diverses normatives com l'ISO 527-4 [1], ISO 527-5 [2], ASTM D 638 [3], ASTM D 3039 [4], i l'ASTM C 297 [5], es pot aplicar una càrrega a una proveta i quantificar el valor de la força aplicada i el desplaçament simultàniament [6]. L'objectiu final d'aquestes proves és generar un diagrama tensió-deformació on identificar les diferents propietats d'un material o estructura.

En els diagrames de tensió-deformació es poden distingir 2 zones diferents: l'àrea de deformacions elàstiques i l'àrea de deformacions plàstiques. La regió elàstica descriu les deformacions que tenen un comportament elàstic i, quan l'esforç aplicat cessa, la peça retorna a les seves dimensions originals sense haver-se provocat cap trencament. Per altra banda, la regió plàstica descriu les deformacions que tenen un caràcter permanent i no es retornarà a l'estat original tot i que no s'apliqui cap esforç. Aquesta zona continua fins al punt de fractura del material on es produeix el trencament. A la següent figura, es poden observar les dues zones de deformació. [7]

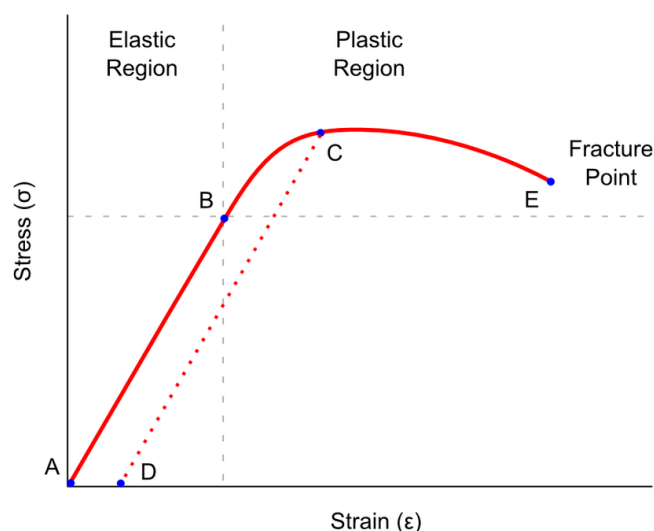


Figura 1. Diagrama tensió-deformació [8]

En aquest treball es faran diversos assajos de tracció uniaxial per tal d'analitzar les propietats mecàniques de diferents estructures cel·lulars. Les propietats principals que es volen mesurar són la tensió i la deformació. La tensió es defineix com la força axial dividida entre la superfície transversal inicial. D'aquesta forma, la força axial necessària

per deformar una proveta depèn de l'àrea de la mateixa resultant en la següent equació [7]:

$$\sigma = \frac{P}{A_i} \quad (\text{Equació 1})$$

Per altra banda, la deformació és el canvi en longitud axial que pateix una proveta respecte a la llargada inicial. Llavors, es defineix com la divisió entre l'increment de longitud entre la longitud inicial [7]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_i} = \frac{L - L_i}{L_i} \quad (\text{Equació 2})$$

A partir d'aquests dos conceptes, es pot confeccionar un diagrama tensió-deformació i definir altres constants. El mòdul de Young o mòdul elàstic es defineix com la constant de proporcionalitat entre la tensió i la deformació en la zona elàstica i representa la rigidesa o la dificultat per provocar deformacions a una peça. També, és el pendent de la zona lineal del diagrama de tensió deformació i resulta en la següent expressió:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Equació 3})$$

El límit elàstic (en anglès *yield point*), és el punt de desviació d'un comportament elàstic a un de plàstic. Pot ser caracteritzat de diverses maneres. La forma més simple és observant el punt on la linearitat finalitza. Un altre mètode és mesurant la màxima tensió que no provoca deformacions permanents. Aquestes dues definicions manquen de rigor o són molt difícils d'interpretar, per tant, el mètode més estandarditzat i utilitzat és el de compensació (offset). Aquest consisteix a traçar una línia paral·lela al pendent lineal des del valor de deformació de $\varepsilon = 0.002$ fins a la intersecció amb la corba del diagrama. El valor de tensió de la intersecció serà el mòdul elàstic (σ_o) [7].

Un altre factor a tenir en compte són els criteris de fallada. Les provetes, tot i estar sota l'esforç uniaxial, es provoquen tensions en múltiples eixos, dificultant l'anàlisi de la fallada a l'assaig. Per aquest motiu, s'usen els criteris de fallada. Per materials fràgils, es fa servir el criteri de Rankine. Segons aquesta teoria, en un estat multiaxial, la fractura es produeix quan la tensió principal més positiva supera el valor del límit elàstic [9].

$$\sigma_{eq} = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) < \sigma_o \quad (\text{Equació 4})$$

3.1.2. Correlació d'imatges digital

La correlació d'imatges digital o DIC (en anglès *digital image correlation*) és un mètode que permet la mesura dels desplaçaments i deformacions en la superfície visible d'un objecte. Les anàlisis es basen en la comparació d'un conjunt d'imatges entre si, des de l'estat inicial fins que s'assoleixen unes determinades condicions. Sovint, també s'anàlitzien les fotografies intermèdies per tal de formar una seqüència i poder observar l'evolució de l'assaig. Per tal de realitzar els mètodes DIC correctament, la superfície analitzada necessita un alt contrast de colors i patrons aleatoris per tal que el programari que s'utilitzi reconegui fàcilment el comportament de la peça. [10]

Una de les aplicacions d'aquest mètode és l'anàlisi de deformacions, ja que compta amb una alta precisió que no es pot assolir amb un gràfic tensió-deformació obtingut a partir d'un assaig a tracció. A més, permet localitzar a la superfície d'estudi la zona on es produeixen les deformacions, així com trobar punts crítics a les provetes. [10]

Una altra aplicació d'aquesta anàlisi és la possibilitat de calcular el Coeficient de Poisson (ν) que estableix una relació entre la deformació transversal vers la longitudinal. Aquest paràmetre és molt difícil de calcular si no s'utilitza aquesta metodologia.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (\text{Equació 5})$$

3.2. Estructures cel·lulars

Els models que s'estudien en aquest treball són estructures cel·lulars cúbiques basades en les xarxes de Bravais. En geometria i cristal·lografia, les xarxes de Bravais són les matrius infinites i de punts generats a partir d'operacions de translació discretes amb l'ús de vectors fonamentals. A la natura, es poden trobar quan els àtoms s'agrupen formant estructures cristal·lines metàl·liques. El vector de posició determina la localització de la xarxa en un entorn tridimensional i s'escriu de la següent forma [11]:

$$T = n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3, \quad (\text{Equació 6})$$

on n_i són tots els enters i a_i són els vectors fonamentals. D'aquesta forma s'estableix que tota cel·la roman invariant sota qualsevol translació per tot l'enreixat cel·lular. El paral·lelepípede format pels tres vectors fonamentals s'anomena cel·la fonamental o primitiva i ocupa de forma repetida tot el volum la xarxa cristal·lina per les operacions de translació.

A l'espai tridimensional existeixen 14 xarxes de Bravais diferents, però en aquest treball s'estudiaran les següents tres estructures cúbiques:

3.2.1. Estructura cúbica simple

Les estructures cúbiques tenen com a característica general que els tres vectors fonamentals són iguals en mòdul i formen entre ells angles de 90° . Concretament, si la xarxa és cúbica simple, el vector posició és [11]:

$$T = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} a_1 + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} a_2 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} a_3. \quad (\text{Equació 7})$$

Els punts es posicionen als 8 vèrtexs que conformen un cub fent que sigui una forma ineficient d'agrupar una forma cristal·lina perquè només un 52% del volum total està ocupat. Són poc comunes a la natura, l'únic element que cristal·litza en aquesta estructura és el poloni [12]. En topologia aquestes estructures s'aconsegueixen en unir els hipotètics àtoms amb branques d'un gruix determinat i ubicades a les arestes del cub. A cada nus localitzat al vèrtex de cada cel·la hi intersequen un total de 6 branques, aquest valor es coneix com a índex de coordinació.

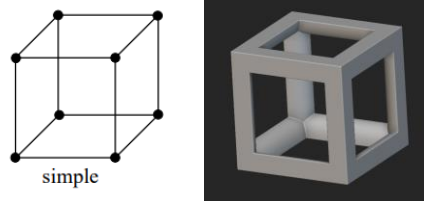


Figura 2. Esquema [11] i model d'estructura cel·lular cúbica simple

3.2.2. Estructura BCC

L'estructura cúbica centrada al cos o BCC (*Body-centered cubic*) consisteix en la agrupació de punts als 8 vèrtexs i al centre del cub en cada cel·la fonamental. Això es tradueix en el següent vector posició [11]:

$$T = \begin{pmatrix} 1/2 \\ 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix} a_1 + \begin{pmatrix} -1/2 \\ 1/2 \\ 1/2 \end{pmatrix} a_2 + \begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \\ 1/2 \end{pmatrix} a_3. \quad (\text{Equació 8})$$

A diferència de les estructures FCC, les BCC no són tan compactes, ocupant el 68% del volum total. Amb un índex de coordinació igual a 8, 8 branques coincideixen al mateix punt, formant un enreixat en forma de dues creus perpendiculars al centre de la cel·la fonamental. A la natura es troba en cristalls de crom, potassi, plom, etc.

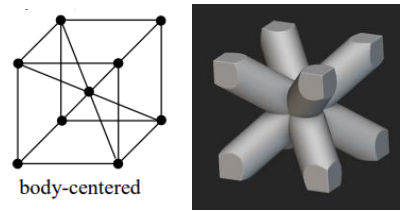


Figura 3. Esquema [11] i model d'estructura BCC

3.2.3. Estructura FCC

L'estructura cúbica centrada en les cares, també coneguda com a FCC (*Face-centered cubic*), es forma quan els punts de la matriu ocupen els 8 vèrtexs i el centre de les 6 cares de cada cel·la fonamental. El vector de posició és [11]:

$$T = \begin{pmatrix} 1/2 \\ 1/2 \\ 0 \end{pmatrix} a_1 + \begin{pmatrix} 0 \\ 1/2 \\ 1/2 \end{pmatrix} a_2 + \begin{pmatrix} 1/2 \\ 0 \\ 1/2 \end{pmatrix} a_3. \quad (\text{Equació 9})$$

Al contrari que amb les estructures cúbiques simples, les estructures FCC són més compactes doncs els àtoms ocupen un valor aproximat del 74% del volum total de la cel·la. A més, té un índex de coordinació igual a 12 cosa que significa que a cada vèrtex intersequen un total de 12 branques, formant una creu a cada cara de la cel·la. A la natura, és prou comú, es pot trobar en metalls com el ferro gamma, el coure, l'alumini i entre molts altres [12].

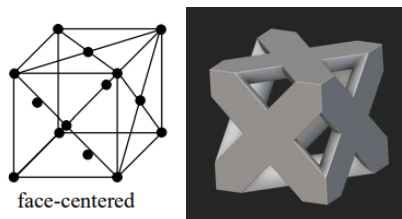


Figura 4. Esquema [11] i model d'estructura FCC

3.3. Fabricació additiva

La fabricació additiva són el conjunt de tècniques i processos que consisteixen en la conformació de peces mitjançant l'addició successiva de capes de material. És coneguda comunament com impressió 3D. Va sorgir l'any 1987 amb la comercialització d'un primer model que utilitzava l'estereolitografia, que consisteix en la solidificació capa a capa d'una resina polimèrica que reacciona a una llum ultraviolada [13]. A partir

d'aquesta primera patent, van anar sorgint diferents tecnologies que permetien la fabricació en una alta gamma de materials.

Un dels grans avantatges que ofereix la fabricació additiva és la facilitat que té per conformar construccions complexes. Per això s'ha escollit aquesta tècnica per tal de crear les provetes amb estructures cel·lulars perquè amb cap altre mètode es podria obtenir un grau de detall i de complexitat tan elevat per objectes tan petits. La tecnologia més comuna per elaborar peces amb enreixats cel·lulars i la que s'ha utilitzat per a la realització d'aquest treball és la fabricació per filament fos.

La fabricació per filament fos (FFF), en anglès *fused deposition model*, és una de les tècniques més àmpliament utilitzades. El procés es basa en l'extrusió de filaments de material polimèric escalfat a través d'una boqueta per dipositar capes sobre una plataforma. La construcció de la peça desitjada es va fent capa a capa a partir d'un model digital de l'objecte. La simplicitat, la fiabilitat i l'assequibilitat del procés han fet que sigui una tècnica molt emprada en investigacions de l'àmbit enginyeril. [14]

Una gran avantatja que té aquesta tècnica de fabricació és l'alta gamma de materials amb els quals pot treballar. En aquest treball s'ha utilitzat l'àcid polilàctic o PLA. És un polímer produït a mitjançant la polimerització de l'àcid làctic obtingut per materials naturals com el midó, la canya de sucre o la iuca. En ser un termoplàstic, quan s'escalfa a una temperatura prou alta (130-180 °C) es fon i s'endureix quan passa per un estat de transició vítria al refredar-se. D'aquesta forma es pot fondre i endurir el material de forma indefinida sense perdre propietats mecàniques [15]. Això fa que el PLA sigui un material ideal per la fabricació per filament fos.

3.4. Mètode d'elements finits

El mètode d'elements finits o FEM (*Finite element method*) és una tècnica d'anàlisi numèrica amb l'objectiu de trobar respostes aproximades a càlculs complexes. Els primers models de FEM van aparèixer a la dècada de 1960 amb la premissa de modelar de forma analítica i aproximada una regió de solució. Aquest modelatge consisteix en l'assemblatge d'elements discrets i permet la creació de formes complexes en un procés que es diu discretització. [16]

El procediment de discretització d'un element finit redueix el problema de complexitat dividint un cos de matèria (sòlid, líquid o gas) o una regió de l'espai en elements. Després, s'expressen les variables de camp de cada element mitjançant funcions aproximades. Aquestes funcions es defineixen com a valors de les variables de camp a punts específics que es diuen nodes. Els nodes són les interseccions dels diferents elements que hi ha a l'espai definit. [16]

Un cop discretitzat el cos a estudiar, s'han de fixar les condicions de contorn per tal de definir un punt de partida des del qual fer els càlculs pertinents. Aquestes s'apliquen com a valors escalars als nodes del cos, la temperatura inicial i el desplaçament restringit són dos exemples de condicions de contorn. [16]

Els càlculs resulten de la resolució de diferents equacions simultànies per tal d'aconseguir els valors de les funcions definides al procediment de discretització. En el cas de ser un problema en règim estacionari, s'han de solucionar una sèrie d'equacions algebraïques lineals o no lineals. Per altra banda, si és en règim transitori, es tracta amb equacions diferencials ordinàries que són en funció del temps. En aquest treball, però, es treballa només en estat estacionari. [16]

3.5. Estat de l'art

Antigament, l'estudi mecànic d'estructures cel·lulars estava limitat per la tecnologia de conformació utilitzada perquè no s'utilitzaven tècniques de fabricació additiva. Actualment, es poden parametritzar diferents característiques dels enreixats cel·lulars per tal de facilitar l'estudi.

3.5.1. Models mecànics d'espumes polimèriques

Les espumes polimèriques són materials àmpliament utilitzats al sector de la construcció i en la construcció d'equips de refrigeració que consisteixen en la distribució de molècules d'un polímer formant estructures cel·lulars. Els mètodes de fabricació usats són: l'extrusió, el premsatge de materials sòlids, l'emmotllament rotacional i la injecció. Per dur a terme tots aquests processos el paràmetre a controlar és la calor per tal que es conformi el material correctament [17].

A diferència de la fabricació additiva, no es pot assolir un elevat grau de precisió en les mesures de les estructures cel·lulars. Per això, s'utilitzen models que parametritzen les característiques geomètriques i permeten calcular certes propietats mecàniques de les espumes cel·lulars. Per tal d'entendre'ls, cal diferenciar entre dos tipus d'espumes polimèriques depenent de les estructures cel·lulars presents en elles. Si hi ha bosses de gas atrapades a les seves cel·les, l'estructura es coneix com a cel·la tancada. Per altra banda, si no en presenta cap es coneix com a cel·la oberta [18]. Les estructures cel·lulars que s'estudien en aquest treball tenen cel·les obertes, per tant, s'empraran models per aquest tipus de cel·la.

Per assajos uniaxials a tracció com els que es realitzen en aquest treball, una característica important a estudiar és el mòdul elàstic o de Young. En el model de Gibson i

Ashby [19] estableixen que la rigidesa per a una espuma polimèrica de cel·les tancades és:

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \phi^2 \left\{ \frac{\rho^*}{\rho_s} \right\}^2 + (1 - \phi) \frac{\rho^*}{\rho_s} + \left(\frac{\rho_o}{E_s} \right) \frac{(1 - 2\nu^*)}{1 - \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)}, \quad (\text{Equació 8})$$

on E^* i E_s són els mòduls elàstics de l'espuma i del polímer sòlid, respectivament, ρ^* i ρ_s son la densitat de l'espuma i del polímer sòlid, respectivament. L'índex de Poisson de l'espuma es ν^* i l'indicatiu de la pressió del gas atrapat dins les bosses a les cel·les tancades és el nombre ϕ . En el cas de les cel·les obertes $\phi = 1$. [18]

Per altra banda, el model de Goods [20] és una versió simplificada del de Gibson i Ashby [19]. Defineix les estructures presents dins les espumes polimèriques com cubs de llargada l amb branques de gruix t . D'aquesta forma estableix una dependència entre el mòdul elàstic i la geometria de les cel·les pels casos de cel·la oberta:

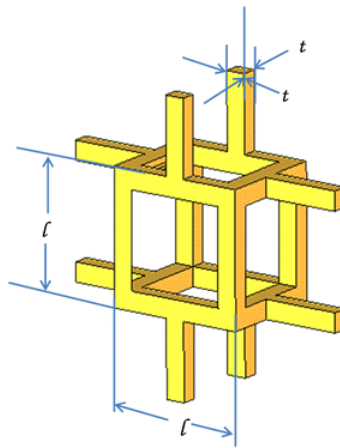


Figura 5. Cel·la unitària oberta [18]

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \left\{ \frac{t^4}{l^4} \right\} \approx \left\{ \frac{\rho^*}{\rho_s} \right\}^2 \quad (\text{Equació 10})$$

4. Metodologia i equipament experimental

4.1. Disseny de provetes i d'estructures

Com ja s'ha comentat anteriorment, aquest treball té com a objectiu l'anàlisi de 3 estructures cel·lulars diferents. Aquestes són l'estructura cúbica simple, l'estructura BCC i l'estructura FCC. Per dur a terme el disseny s'ha utilitzat el programa nTopology que permet modelar objectes en 3D especialitzant-se en l'optimització topològica i en la construcció d'enreixats. La part d'enreixats es que la que s'ha fet servir perquè el software inclou una àmplia llibreria d'estructures cel·lulars.

Paral·lelament, s'ha fet servir el programa SolidWorks per a dissenyar les provetes que s'assajaràn a tracció. Aquesta aplicació té, entre moltes altres funcions, el modelatge 3D bàsic. El programari ha servit per poder construir objectes d'una complexitat baixa de forma molt més senzilla que amb el nTopology.

Per tal de fer un correcte disseny s'han tingut en compte les especificacions i limitacions de la màquina de fabricació additiva en el que es conformaran els sòlids. També s'han d'optimitzar els models per no fer servir massa material sempre mantenint la integritat més gran de la peça.

4.1.1. Provena sòlida

Segons la normativa E466 – 15 [21] per fer assajos a tracció i fatiga, les provetes han de tenir una zona d'estudi amb una secció reduïda per tal d'afavorir el trencament en aquesta àrea. Es recomana que la ràtio entre la zona de fixació i la de fallada no sigui més petit que 1,5. D'aquesta forma s'ha dissenyat la proveta d'estructura sòlida.

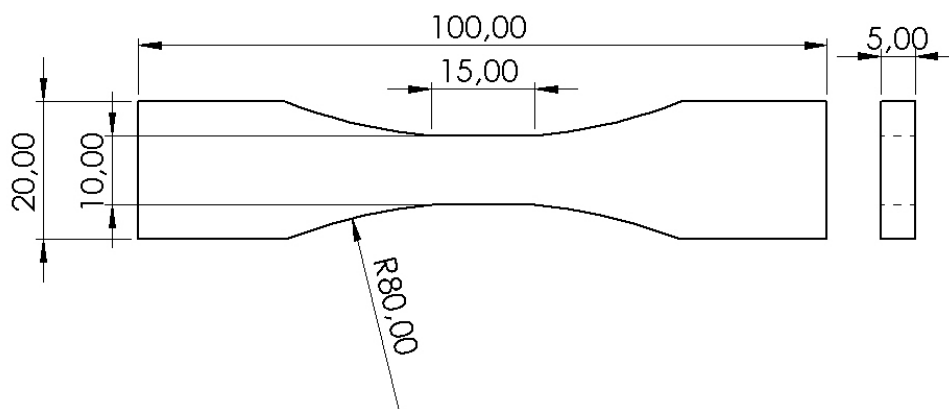


Figura 6. Plànol de la proveta següent la normativa E466 (mides en mm)

4.1.2. Provetes d'estructures

Els models de les provetes amb les estructures cel·lulars s'han basat en un projecte de l'*Ohio State University* [22] que busca l'estandardització de les provetes amb reixats similars als utilitzats en aquest treball. Consisteixen en dues parts principals: la part d'estudi i la part de fixació. La part d'estudi està ubicada a la zona central i és on s'ubiquen les cel·les. Per altra banda, la part de fixació, té una amplitud inferior i és la zona per la qual la proveta s'acoblarà a la màquina d'assajos a tracció. Tot i que la zona de fixació té una amplitud inferior, la zona central té una menor superfície transversal a l'esforç doncs es pretén que la ruptura succeeixi en aquest indret de la peça.

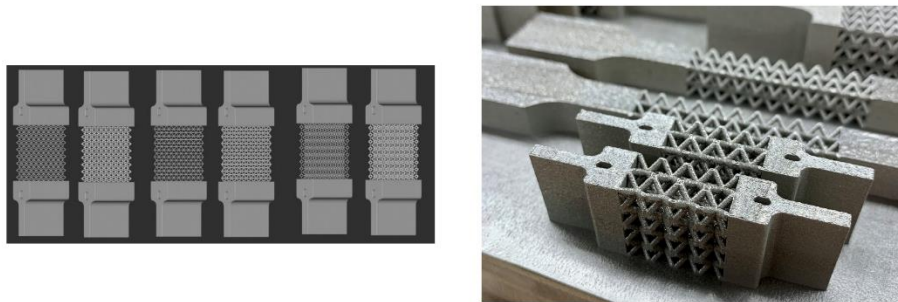


Figura 7. Provetes desenvolupades per la *Ohio State University* [22]

A partir d'aquesta idea i, seguint la normativa E466 abans esmentada, s'ha fet el disseny a SolidWorks amb les següents mides:

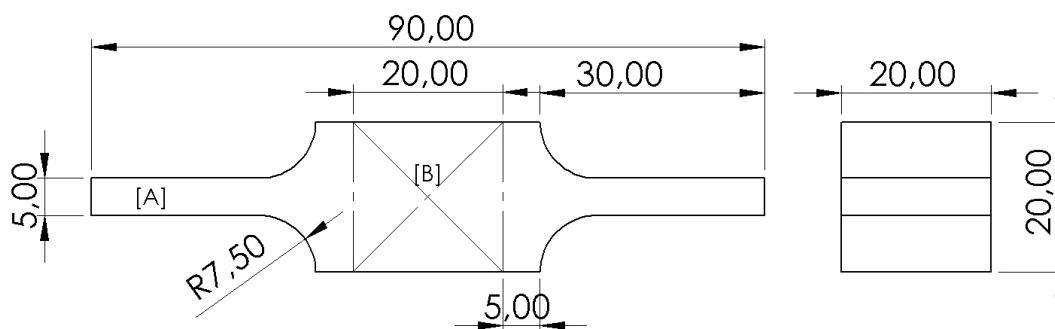


Figura 8. Plànol de proveta amb estructures cel·lulars (cotes en mm)

Com es pot veure al plànol de la **figura 8**, la zona de fixació [A] es suficientment estreta com per poder-se acoblar correctament a la maquinària per fer assajos de tracció. Per altra banda, la zona d'estudi [B] és on estaran localitzades les diferents estructures

cel·lulars. A cada proveta s’hi trobaran 8 cel·les distribuïdes cúbicament, per això la part central ha de tenir una forma cúbica.

4.1.3. Estructures cel·lulars

Per a dissenyar les diferents estructures cel·lulars, s’ha fet servir nTopology. A partir de diferents paràmetres, es pot anar ajustant la mida i la forma de la construcció que es vulgui fer.

Com la part central que es vol estudiar de la proveta és un cub, es parteix de la forma esmentada de 20x20x20mm. Una vegada seleccionada l’estructura desitjada de la llibreria d’enreixats que incorpora el programa, s’aplica al cub prèviament creat i s’ajusta la mida (10x10x10mm) de tal forma que quedin 8 cel·les agrupades cúbicament. També es pot ajustar l’orientació de les cel·les, però com que totes són simètriques, és un paràmetre insignificant.

Si es va variant el gruix de les branques de les cel·les, es pot veure que el cub no presenta una estructura d’enreixat si el valor és superior a uns 4,5 mm. Per altra banda, l’extrusor de la màquina de fabricació additiva que s'utilitza té un diàmetre de 0,4 mm i per aconseguir uns acabats i una precisió més alta a l'hora de conformar les peces és recomanable utilitzar gruixos múltiples d'aquest valor. A més, segons l'empresa HUBS, especialitzada en fabricació additiva [23], afirma que per a assegurar la integritat de la peça, totes aquelles estructures en forma d'agulla o cilindre han de tenir un diàmetre mínim de 3 mm. Per aquest motiu el gruix de les branques s'ha fixat en 3,2 mm.

DESIGN RULES FOR 3D PRINTING

HUBS
A PHOTOLABS COMPANY












	Supported walls	Unsupported walls	Support & overhangs	Embossed & engraved details	Horizontal bridges	Holes	Connecting /moving parts	Escape holes	Minimum features	Pin diameter	Tolerance
	Walls that are connected to the rest of the print on at least two sides.	Unsupported walls are connected to the rest of the print on less than two sides.	The maximum angle a wall can be printed at without requiring support.	Features on the model that are ribbed or recessed below the model surface.	The span a technology can print without the need for support.	The minimum diameter a technology can successfully print a hole.	The recommended clearance between two moving or connecting parts.	The minimum diameter of escape holes to allow for the removal of build material.	The recommended minimum size of a feature to ensure it will not fall to print.	The minimum diameter a pin can be printed at.	The expected tolerance (dimensional accuracy) of a specific technology.
											
Fused deposition modeling	0.8 mm	0.8 mm	45°	0.6 mm wide & 2 mm high	10 mm	Ø2 mm	0.5 mm		2 mm	3 mm	±0.5% (lower limit ±0.5 mm)
Stereolithography	0.5 mm	1 mm	support always required	0.4 mm wide & high		Ø0.5 mm	0.5 mm	4 mm	0.2 mm	0.5 mm	±0.5% (lower limit ±0.5 mm)
Selective laser sintering	0.7 mm			1 mm wide & high		Ø1.5 mm	0.3 mm for moving parts & 0.1 mm for connections	5 mm	0.8 mm	0.8 mm	±0.3% (lower limit ±0.3 mm)
Material jetting	1 mm	1 mm	support always required	0.5 mm wide & high		Ø0.5 mm	0.2 mm		0.5 mm	0.5 mm	±0.1 mm
Binder jetting	2 mm	3 mm		0.5 mm wide & high		Ø1.5 mm		5 mm	2 mm	2 mm	±0.2 mm for metal & ±0.3 mm for sand
Direct metal Laser sintering	0.4 mm	0.5 mm	support always required	0.1 mm wide & high	2 mm	Ø1.5 mm		5 mm	0.6 mm	1 mm	±0.1 mm

Figura 9. Normes de disseny per diferents tècniques de fabricació additiva [23]

Una vegada creada la zona d'estudi, s'ha fusionat amb la resta d'elements que conformen les provetes d'estructures cel·lulars.

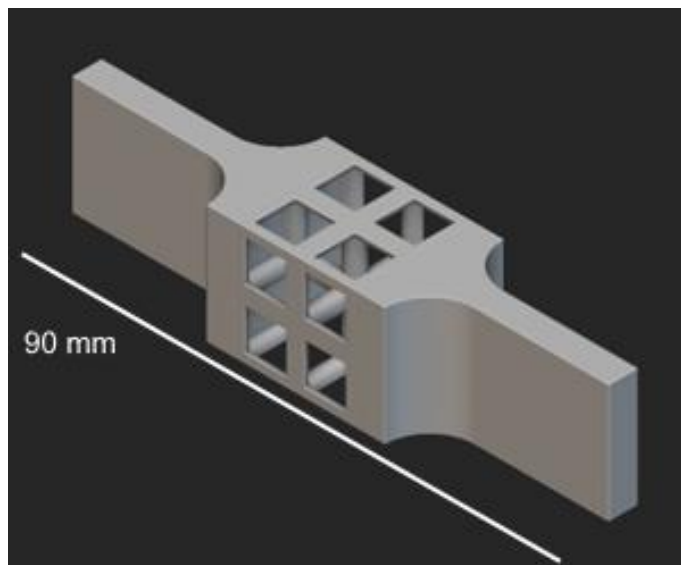


Figura 10. Provena amb estructura cúbica simple

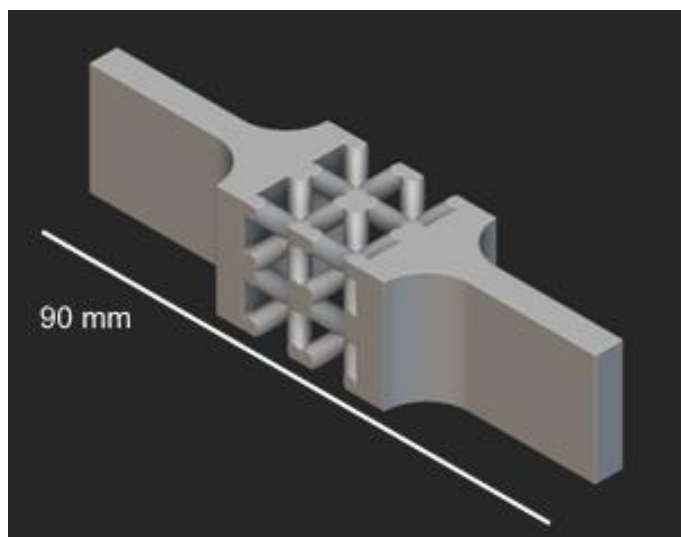


Figura 11. Provena amb estructura BCC

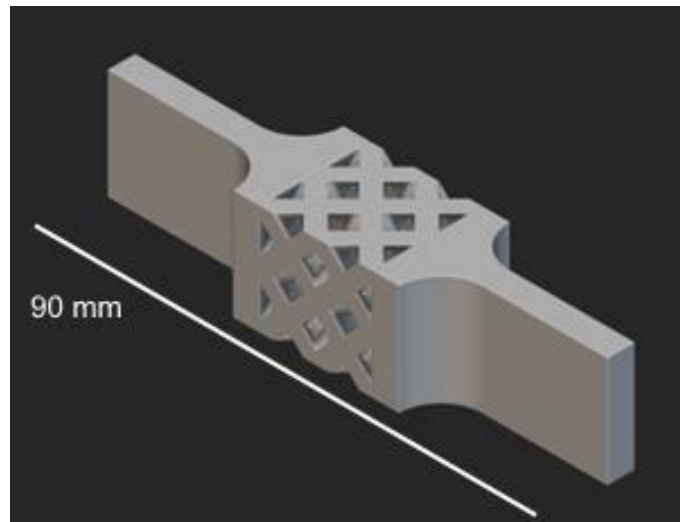


Figura 12. Proveta amb estructura FCC

Les propietats físiques de les diferents peces dissenyades són les següents tenint en compte que el material de fabricació es el PLA:

Estructura	Densitat estructura	Volum total (mm^3)	Massa total (g)
Sòlida	1	7970,35	9,88
Cúbica simple	0,1950	12530,66	15,54
BCC	0,3966	14149,44	17,55
FCC	0,4588	14639,82	18,15

Taula 1. Propietats físiques de les provetes

La densitat d'estructura correspon al quocient entre el volum que ocupa l'enreixat cel·lular i el volum total d'un cub de 20x20x20mm. Per altra banda, el volum total mesurat en mm^3 és el volum que té la proveta sencera, ajuntant la zona d'estudi i la de fixació. En últim lloc, la massa (en g), indica la quantitat de PLA que té cada proveta, utilitzant per al càlcul una densitat orientativa de $\rho = 1,24 g/cm^3$.

4.2. Conformació de les provetes

El procés de conformament de les provetes a estudiar s'ha fet mitjançant la fabricació additiva. Concretament amb la tecnologia de filament fos utilitzant una màquina FlashForge Creator Pro 2.

Per tal de dur a terme les diferents fabricacions és necessari un arxiu de tipus STL de cada geometria. El format STL [24] aproxima les construccions de models sòlids realitzades d'un arxiu CAD a superfícies triangulars. D'aquesta forma, se simplifica la transmissió i la lectura de dades per part de la màquina.

A partir dels arxius STL es deu configurar la màquina per tal de fabricar les peces amb el major grau de precisió i per tal d'evitar errors greus durant el conformament. S'ha emprat

el programari de control de màquines de fabricació additiva de l'empresa FlashForge que es diu FlashPrint. Permet canviar paràmetres de conformació així com ajustar els suports necessaris per garantir l'estabilitat de la peça en construcció.

Una de les parts que s'ha de tenir en compte de la fabricació per fusió de filament és que les peces que s'imprimeixen no solen ser massisses. A l'interior de les peces s'hi poden trobar estructures que segueixen patrons de figures geomètriques com triangles, quadrats o hexàgons. Aquesta tècnica s'utilitza per a estalviar material i es mesura amb el percentatge de densitat farcit o *infill*. Les estructures cel·lulars que s'estudien han de tenir un caràcter homogeni i d'aquesta forma, les peces han de ser totalment massisses i tenir un *infill* del 100%.

L'error més comú a la fabricació additiva amb filament fos és el warping. És provocat a causa de les diferències de calor presents entre les diverses zones de la superfície que està en contacte amb el llit on s'està conformant l'element [25]. Per culpa d'aquest efecte, es produeixen deformacions a les cantonades de la superfície inferior de la peça provocades per la contracció del material de conformació. Per tal d'evitar en gran manera aquest efecte s'imprimeix una àrea a mode de base sobre la qual es fabrica la peça desitjada.

Una altra característica important dels mètodes de fabricació additiva és la utilització de suports a l'hora d'imprimir peces. Com que el material es va dipositant en capes horitzontals una a sobre l'altre, són necessaris perquè no hi hagi errors a les provetes resultants. A partir de superfícies inclinades amb un angle superior als 45° respecte al pla horitzontal [23].

L'extrusor de la màquina de fabricació additiva realitza el recorregut de deposició de material de forma que dues capes consecutives tenen traçats perpendiculars. Depenent de la direcció d'aquestes trajectòries la proveta tindrà diferents propietats mecàniques. Per tal d'obtenir una fractura més ràpida i fràgil i així facilitar l'anàlisi, les fabricacions utilitzaran l'estil de capa longitudinal-transversal. [26]

Tenint en compte les anteriors restriccions a l'hora de conformar les diferents provetes, a continuació es mostra la configuració feta servir en aquestes fabricacions.

Tipo de máquina	Creator Pro 2	
Tamaño de boquilla	0.4 mm	
Material - Derecha	Flashforge-PLA	1.75mm
Materia - Izquierda	Flashforge-PLA	1.75mm
Perfil de corte	Standard	
Temperatura de extrusora derecha	210°C	
Temperatura de extrusora izquierda	210°C	
Temperatura de plataforma	40°C	

Alto de capa		
Modo altura de capa	Altura de capa fija	
Alto de capa	0,18mm	
Alto de primera capa	0,27mm	
Velocidad		
Velocidad de impresión de base	60mm/s	
Velocidad de trayectoria	100mm/s	
Velocidad mínima	5mm/s	
Velocidad máxima de primera capa	10mm/s	
Velocidad máxima de trayectoria de primera capa	70mm/s	
Reducir velocidad en las primeras capas	0	
Máxima velocidad en las primeras capas	30mm/s	

General	
Capas sólidas superiores	3
Capas sólidas inferiores	3
Densidad de relleno	100%
Densidad de patrón	Hexágono
Perímetro de superposición	15%
Modo recipiente	No
Velocidad	
Velocidad de sólido	70%
Velocidad de dispersión	100%
Relleno combinado	
Combinación de sólidos máxima	1
Combinación de dispersiones máxima	2
Umbral de superficie combinado	150mm ²
Tipo de soportes	
Velocidad	70%
Espacio hasta el modelo (X/Y)	0,35mm
Espacio hasta el modelo (Z)	0,20mm
Espacio hasta la plataforma (Z)	0,15mm
Forma de ruta	Polilínea
Espacio de recorrido	2,0mm
Espesor del soporte	70%
Capas sólidas superiores	0
Angulo de Trayectoria	45°
Densidad de sólido superior	100%
Expansión horizontal	0,0mm
Contorno de impresión	No

Figura 13. Configuració avançada de la màquina de fabricació additiva

Un cop feta tota la configuració de la màquina de fabricació additiva, els arxius ja estan llestos per ser conformats.

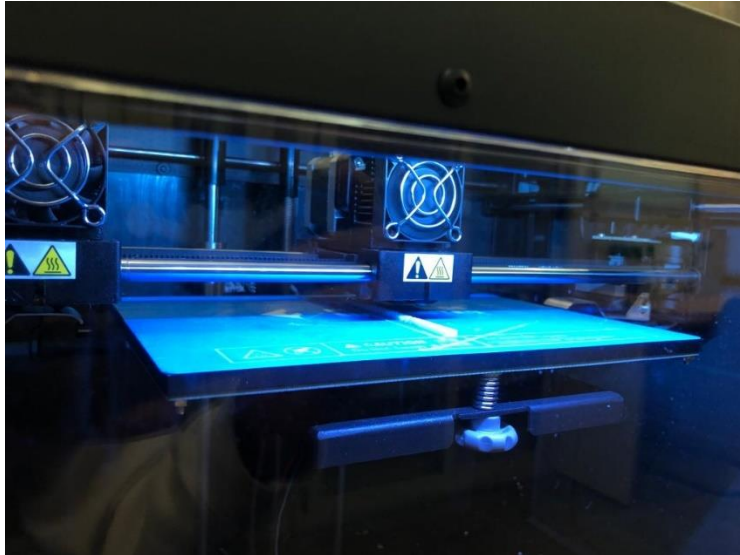


Figura 14. Procés de fabricació d'una proveta sòlida

Un cop fabricades les provetes, amb un peu de rei, s'han mesurat les cotes de les peces per tal de comprovar la precisió i toleràncies de les peces conformades.



Figura 15. D'esquerra a dreta: proveta sòlida, proveta cúbica simple i proveta FCC

4.3. Assajos a tracció

La caracterització de les diferents propietats del PLA i de les estructures cel·lulars s'ha realitzat mitjançant diversos assajos a tracció uniaxial. Tots els assajos s'han fet al Laboratori d'Elasticitat i Resistència de Materials (LERMA), ubicat a l'ETSEIB i s'ha utilitzat una màquina d'assaig a tracció INSTRON 3300.

Un cop obtingudes les provetes que es desitgen imprimir, aquestes s'han fixat a les mordasses de la màquina i s'ha mesurat la distància entre les dues pinces que immobilitzen la peça. Aquesta mesura és important per saber la longitud inicial a la qual es troba l'estructura cel·lular (L_i) i poder calcular el Mòdul de Young (**equació 3**). En el cas de les provetes sòlides, la geometria permet utilitzar un extensòmetre per la presa de dades

d'allargament. Aquest instrument realitza mesures més precises i no es pot fer ús en les provetes amb estructura perquè són massa gruixudes perquè encaixi correctament. La longitud inicial de l'extensòmetre és de 10 mm.

Per tal de poder enregistrar la càrrega que s'exerceix i el desplaçament que pateixen les provetes, la màquina d'assajos va connectada a un ordinador amb un programari que va desant les dades. A part l'aplicació també és necessària per a caracteritzar els paràmetres amb els quals es duren a terme els diferents assajos. La velocitat de desplaçament de la mordassa s'ha fixat en 2,6 mm/min en totes les provetes menys en les d'estructura cúbica simple que s'ha fixat en 1 mm/min. Després de fer tots aquests passos, l'assaig ja està llest per ser efectuat.



Figura 16. Exemple de proveta BCC llesta per ser assajada

En finalitzar una sèrie d'assajos, es desen totes les dades en un arxiu .DAT. La informació present en aquest arxiu són tots els punts de mesura amb la càrrega (en kN) i el desplaçament (en mm). Per tractar aquestes dades, s'exporten a un full de càlcul on es calcula la tensió (**equació 1**) com la càrrega entre la superfície perpendicular de la zona que es vol analitzar. La deformació es calcula com el desplaçament entre la longitud inicial (**equació 2**). Un cop fets tots els càlculs, es fa un gràfic tensió-deformació per tal d'analitzar amb claredat l'assaig i poder determinar les diferents propietats de les provetes.

4.4. Simulació per correlació digital

Per poder realitzar comparatives entre diferents resultats es fa una anàlisi de deformacions de les diferents provetes utilitzant el fotoanàlisi per correlació digital. Segueix una metodologia similar als assajos de tracció perquè és necessària l'aplicació d'una càrrega per a provocar desplaçaments en les peces.

El procés comença fent un tractament previ a les provetes a assajar, ja que s'ha d'aconseguir una superfície amb una textura de grans per facilitar la lectura que farà una càmera de les deformacions. Per fer-ho s'han emprat esprais de pintura negra i blanca per tal de generar un contrast i un patró aleatori de textura.

Un cop s'ha assolit l'aspecte desitjat, la proveta es fixa en una màquina d'assajos a tracció uniaxials de la mateixa forma que s'ha fet anteriorment. En aquesta iteració, s'ha fixat la velocitat d'allargament en 2,6 mm/min per totes les provetes, exceptuant la proveta cúbica simple amb una velocitat d'1 mm/min. Paral·lelament, es prepara una càmera que fotografia cíclicament la superfície d'una proveta durant l'assaig a tracció amb un període d'una fotografia cada 5 segons. Quan la màquina de tracció i la càmera estan llestes, s'inicia l'assaig.

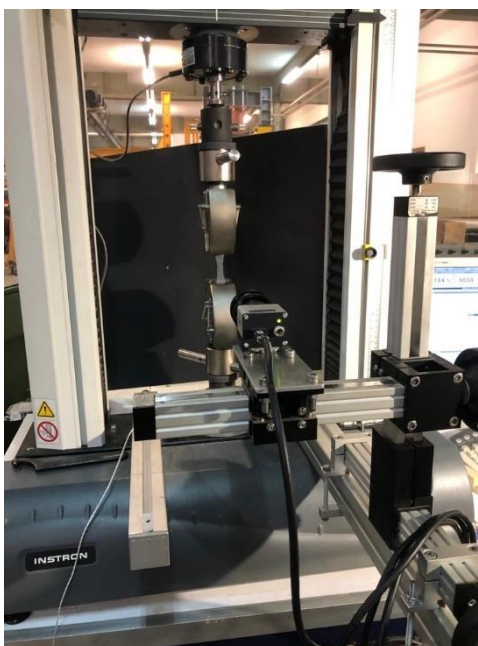


Figura 17. Exemple de proveta sòlida llesta pel fotoanàlisi

Les fotografies que s'han fet s'emmagatzemen per tal de fer l'anàlisi en el software de correlació digital GOM. Una vegada importades les imatges, es calibra l'escala de les mesures i es crea un element bidimensional i se simulen les deformacions seqüencialment. A la superfície analitzada, es representen les deformacions patides per la proveta. Finalment, amb l'ús d'extensòmetres digitals, es pot obtenir la deformació en diferents

eixos de la proveta. Amb aquests valors es pot trobar el coeficient de Poisson i el Mòdul de Young de les diferents estructures.

4.5. Anàlisi per elements finits

Una vegada realitzats els assajos de tracció i de fotoanàlisi per correlació digital, s'ha utilitzat un software d'enginyeria assistida per ordinador (CAE) nomenat MSC.Marc. Aquest programa pertany a l'entorn MSC.Hexagon i permet la simulació d'objectes mallats en l'àmbit mecànic i estructural. D'aquesta forma s'han simulat les càrregues dels diferents assajos a les diferents provetes d'estructures cel·lulars per tal de comprovar resultats i obtenir una visió més precisa del càlcul de tensions.

4.5.1. Obtenció de cossos mallats

Per tal d'aconseguir els mallats de cada proveta, s'ha utilitzat de nou el software nTopology. Concretament, les funcions per obtenir mallats volumètrics, molt útils per programes de simulació com MSC.Marc. Un problema, però, de la utilització de MSC.Marc són les limitacions que imposa la llicència d'alumnat de la que es disposa. Aquestes han afectat el procés de creació de les geometries mallades perquè es restringeix el nombre total de nodes de les cel·les a un valor de 50000 unitats limitant el refinament de les cel·les.

Primerament, s'ha introduït el cos implícit de la proveta per tal de fer una primera iteració d'un mallat de cel·les triangulars bidimensionals molt simplificat. Aquestes cel·les preserven el caràcter agut de les arestes de la geometria original i és important per tal de tenir a l'anàlisi un model fidel als assajos reals. Finalment, s'ha fixat la tolerància respecte al cos implícit en 2 mm pel tema de la limitació de nodes de MSC.Marc.

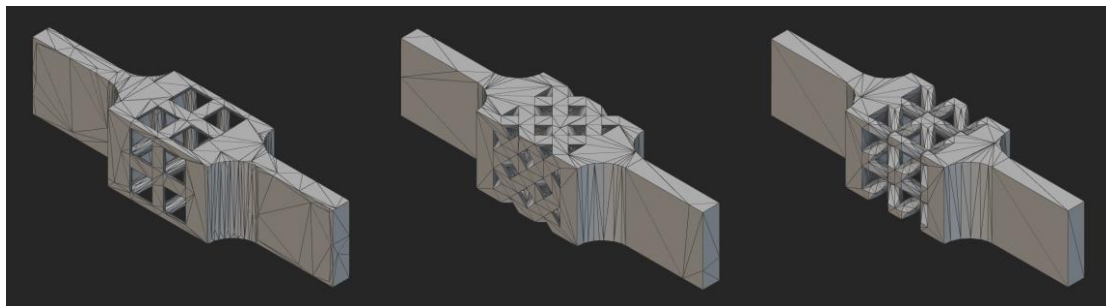


Figura 18. Primera iteració del mallat de les provetes

Seguidament, s'ha remallat la geometria anterior per tal de refinar el mallat mantenint la geometria triangular de les cel·les. S'ha fixat la màxima longitud d'elements generats en 10 mm i la mínima en 0 mm. D'aquesta forma s'aconsegueix que les zones que no són

significatives com les parts de fixació de les provetes tinguin un mallat simple amb elements grans. Per altra banda, les zones crítiques on estan localitzades les estructures cel·lulars tinguin cel·les més petites per tal d'assolir resultats més precisos i fidels amb els assajos reals. La ràtio de creixement entre cel·les adjacents s'ha fixat en 10 per tal d'optimitzar el nombre de nodes del mallat.

A continuació s'ha fet un mallat volumètric. Això significa que a partir d'un mallat superficial com el dissenyat anteriorment es generen tetraedres o piràmides quadrilàteres dependent en la forma de les cel·les triangulars o quadrilàter, respectivament. Per tal de mantenir el nivell de refinat igual a la malla superficial, la màxima longitud d'elements és igual a 10 mm i la mínima és igual a 0 mm i la taxa de creixement en 10.

Finalment, a partir de la geometria volumètrica, es fa la conversió a mallat d'elements finits (FE) mitjançant l'addició de punts d'integració a cada element del mallat. Aquests punts d'integració poden ser d'ordre lineal o quadràtic. Per tal d'aconseguir una major compatibilitat amb el programa MSC.Marc i així una obtenció de resultats més fiables, s'ha escollit l'ordre quadràtic.

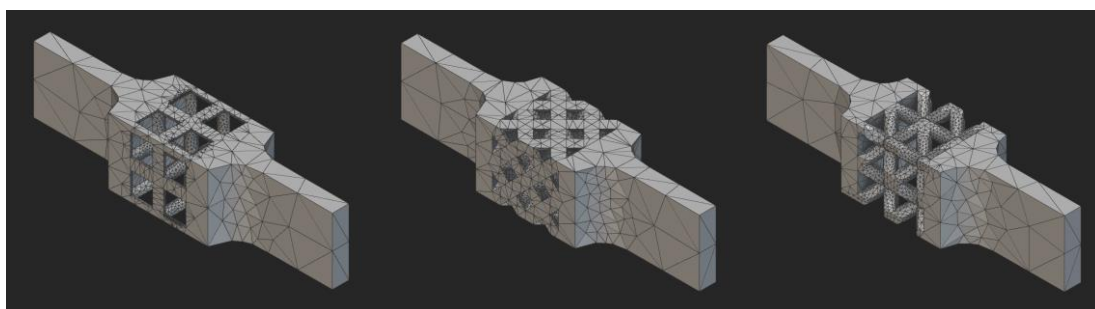


Figura 19. Mallat de les provetes refinades

Per últim, s'ha exportat l'arxiu en format Nastran Bulk Data file (.bdf) ja que és compatible amb el software que s'ha utilitzat per les simulacions. A la següent taula es mostren les característiques tècniques dels mallats:

Estructura	Nombre d'elements	Nombre de nodes
Cúbica simple	9.317	20.560
BCC	17.344	35.976
FCC	16.430	34.438

Taula 2. Propietats dels mallats de les provetes

4.5.2. Simulacions amb MSC.Marc

Les simulacions amb el software MSC.Marc requereixen diversos paràmetres per tal d'obtenir uns resultats fiables. El primer de tots és la importació de la geometria definida a l'apartat anterior.

El material utilitzat en les provetes (PLA) es pot definir introduint les propietats físiques i mecàniques d'aquest. La densitat del PLA és de 1240 kg/m^3 . El Mòdul de Young s'ha aconseguit assajant les provetes sòlides i ha resultat en $2719,04 \text{ MPa}$. Per acabar, el Coeficient de Poisson és d'aproximadament $0,33$.

Els esforços patits per les provetes s'ha definit basant-se en els assajos realitzats a tracció: aplicant una força vertical a un extrem i fixant el desplaçament de l'altre. D'aquesta forma s'han establert les condicions de contorn on s'han fixat els nodes d'un extrem de la proveta i s'ha aplicat una càrrega a la cara de l'extrem oposat de la proveta. El valor de la càrrega aplicada varia segons el límit elàstic de cada proveta (mesurat amb els assajos a tracció), ja que serà el límit elàstic multiplicat per la superfície de l'estructura a analitzar.

Un cop introduïts tots els paràmetres requerits pel correcte càlcul del treball amb el programari, s'inicialitza la simulació. En finalitzar aquesta, es representa la variació de diferents paràmetres al llarg de la geometria.

5. Resultats i discussió

5.1. Resultats d'assajos a tracció

Els resultats dels diversos assajos a tracció que s'han fet de les diferents provetes han caracteritzat diferents propietats mecàniques del material utilitzat i de les estructures cel·lulars.

5.1.1. Provetes sòlides

Com ja s'ha citat anteriorment, les característiques mecàniques de les provetes sòlides serveixen per comparar el resultat amb les estructures cel·lulars i per tal d'aconseguir dades sobre el material PLA i així parametritzar correctament l'anàlisi d'elements finits. La **figura 20** mostra les corbes de tensió-deformació resultants dels tres assajos realitzats a les provetes sòlides.

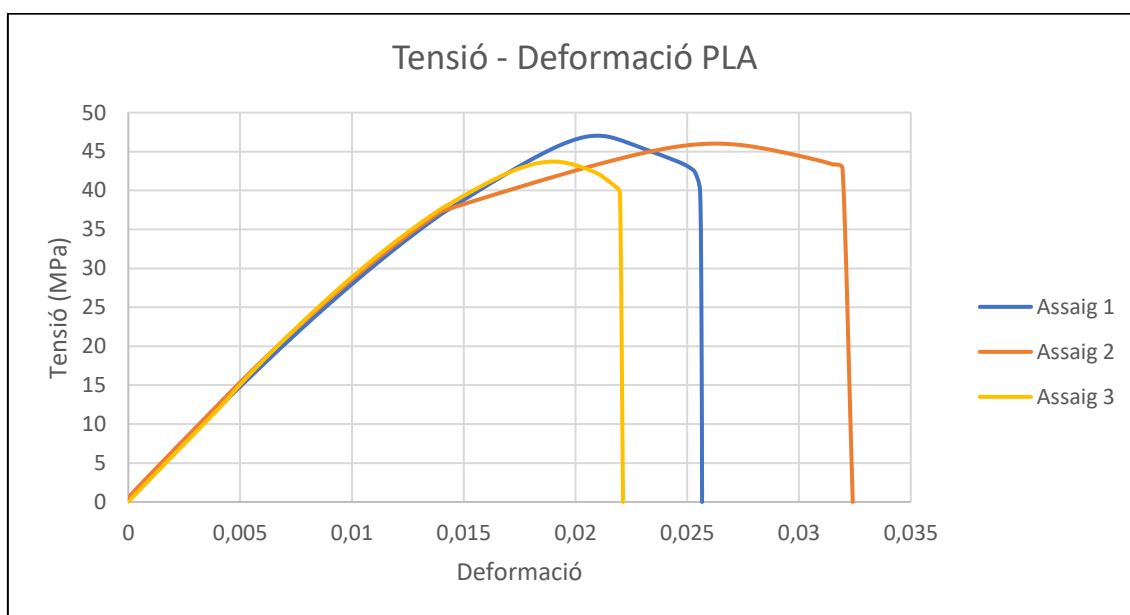


Figura 20. Gràfic tensió-deformació de les provetes sòlides

Al gràfic anterior, es pot observar que la zona plàstica és petita, i indica que el material no és propens a patir deformacions permanents. A part, la fractura que pateix el material és molt ràpida i fràgil. En conclusió, el material és prou rígid tot i que no necessita esforços gaire grans per ser deformat. En patir-se una fractura fràgil s'utilitza el criteri de Rankine (**equació 4**) per analitzar les tensions a les estructures cel·lulars.

Per altra banda, al gràfic es pot veure que la fractura del material dista molt entre les 3 provetes diferents. Aquest fet es deu al fet que els objectes fabricats de forma additiva fent servir una tecnologia FFF solen tenir toleràncies molt grans entre ells, causant pe-

ces molt diferents entre si que provoquen errors a la presa de dades. Tot i això, el comportament de la zona elàstica té un comportament gairebé idèntic en tots els assajos. D'aquesta forma, les propietats calculades a partir dels assajos són les següents i es mostren a la **taula 3**, on l'error absolut del càlcul dels valors de les mitjanes és e .

N. assaig	E (MPa)	e_E (MPa)	σ_o (MPa)	e_{σ_o} (MPa)
1	2641,05	-	47,81	-
2	2628,23	-	43,94	-
3	2751,21	-	41,19	-
Mitjana	2719,04	$\pm 56,28$	44,31	$\pm 1,562$

Taula 3. Característiques mecàniques de les provetes sòlides

5.1.2. Provetes amb estructura cúbica simple

A partir de la realització de tres assajos a tracció, s'ha confeccionat un gràfic tensió-deformació de les provetes cúbiques simples:

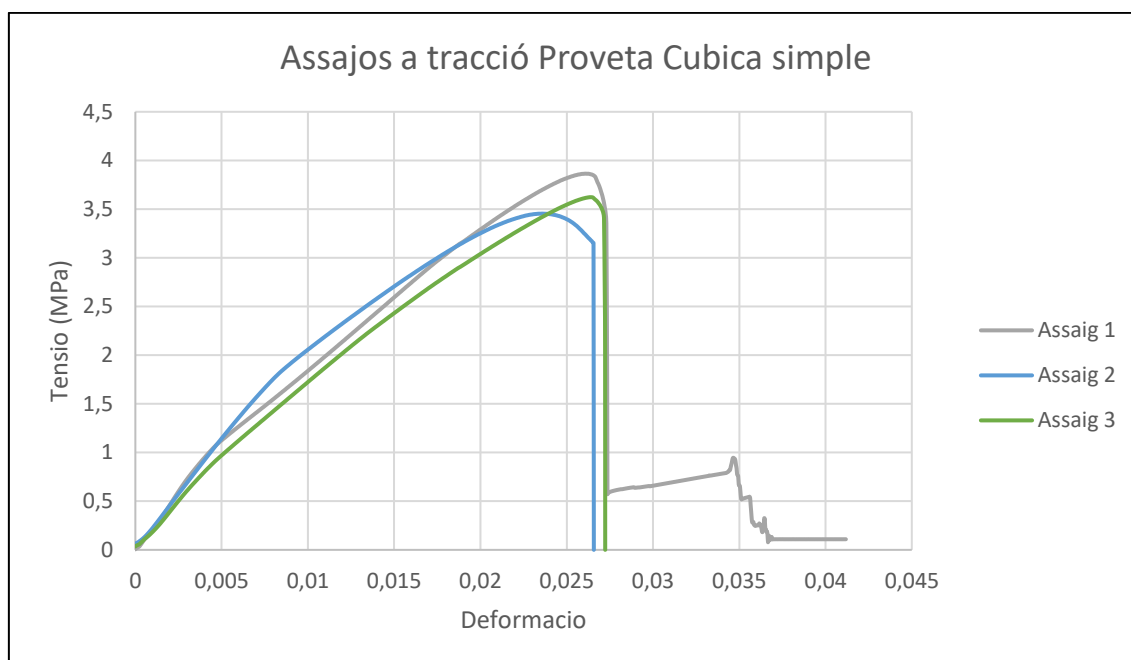


Figura 21. Gràfic tensió-deformació de les provetes cúbiques simples

Com es pot observar a la **figura 21**, es pot concloure que l'estructura cúbica simple és una estructura amb una elevada rigidesa ja que la regió plàstica té un rang molt petit i la fractura és ràpida. D'aquesta forma es pot saber que els esforços a tracció produeixen sobretot deformacions elàstiques. A la **taula 4** es troben les dades obtingudes:

N. assaig	E' (MPa)	$e_{E'}$ (MPa)	σ_o (MPa)	e_{σ_o} (MPa)
1	155,39	-	3,61	-
2	168,86	-	3,43	-
3	141,40	-	3,48	-
Mitjana	155,22	$\pm 13,81$	3,51	$\pm 0,103$

Taula 4. Característiques mecàniques de les provetes cúbiques simples

Per altra banda, un succés que es produeix en tots els assajos de provetes amb enreixats cel·lulars és que la zona elàstica té dos valors de pendents diferenciats. A la **figura 21** es pot observar que el primer tram de pendent és més elevat que el següent. Així doncs, s'ha calculat 1 valor de Mòdul de Young per cada tram de pendent diferent, essent el mòdul corresponent al primer sector el E'_I i el corresponent al segon sector E'_{II} .

N. assaig	E'_I (MPa)	$e_{E'_I}$ (MPa)	E'_{II} (MPa)	$e_{E'_{II}}$ (MPa)
1	249,97	-	145,84	-
2	225,38	-	136,01	-
3	201,29	-	133,30	-
Mitjana	225,55	$\pm 24,42$	138,39	$\pm 7,45$

Taula 5. Valors de Mòdul de Young de les provetes cúbiques simples

5.1.3. Provena amb estructura BCC

Els tres assajos a tracció de les provetes amb estructura BCC han resultat en el següent gràfic tensió-deformació:

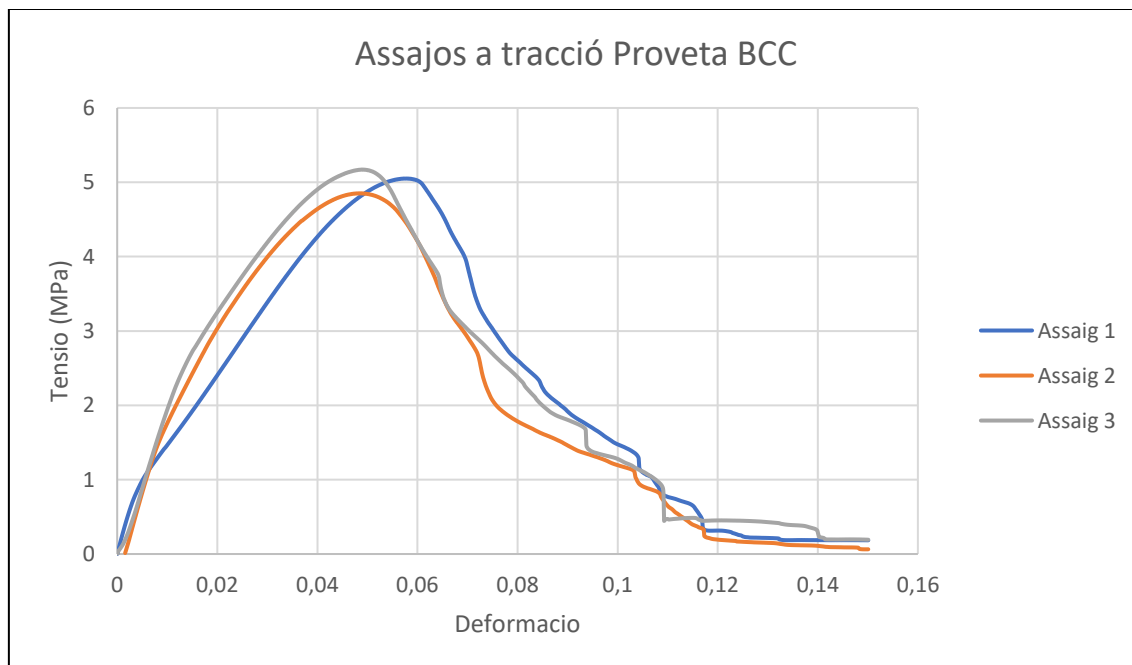


Figura 22. Gràfic tensió-deformació de les provetes BCC

Com es pot observar a la **figura 22**, l'estructura pateix una fractura molt lenta. Des del punt de tensió màxima fins el punt de fractura, hi ha una deformació aproximadament del 10%. Les propietats calculades a partir dels assajos es troben a la següent **taula 6**:

N. assaig	E' (MPa)	$e_{E'}$ (MPa)	σ_o (MPa)	e_{σ_o} (MPa)
1	97,16	-	4,26	-
2	129,64	-	4,62	-
3	132,45	-	5,01	-
Mitjana	119,75	$\pm 22,60$	4,63	$\pm 0,380$

Taula 6. Característiques mecàniques de les provetes BCC

De nou, a la **figura 22**, s'hi poden diferenciar dos pendents diferents a la zona elàstica del gràfic tensió-deformació que resulta en dos Mòduls de Young diferents.

N. assaig	E'_{I} (MPa)	$e_{E'_{I}}$ (MPa)	E'_{II} (MPa)	$e_{E'_{II}}$ (MPa)
1	231,87	-	94,30	-
2	228,39	-	112,19	-
3	205,58	-	101,52	-
Mitjana	221,95	$\pm 16,36$	102,67	$\pm 9,52$

Taula 7. Valors de Mòdul de Young de les provetes BCC

5.1.4. Provetes amb estructura FCC

Els assajos de les provetes amb estructura FCC han resultat en el següent gràfic tensió-deformació:

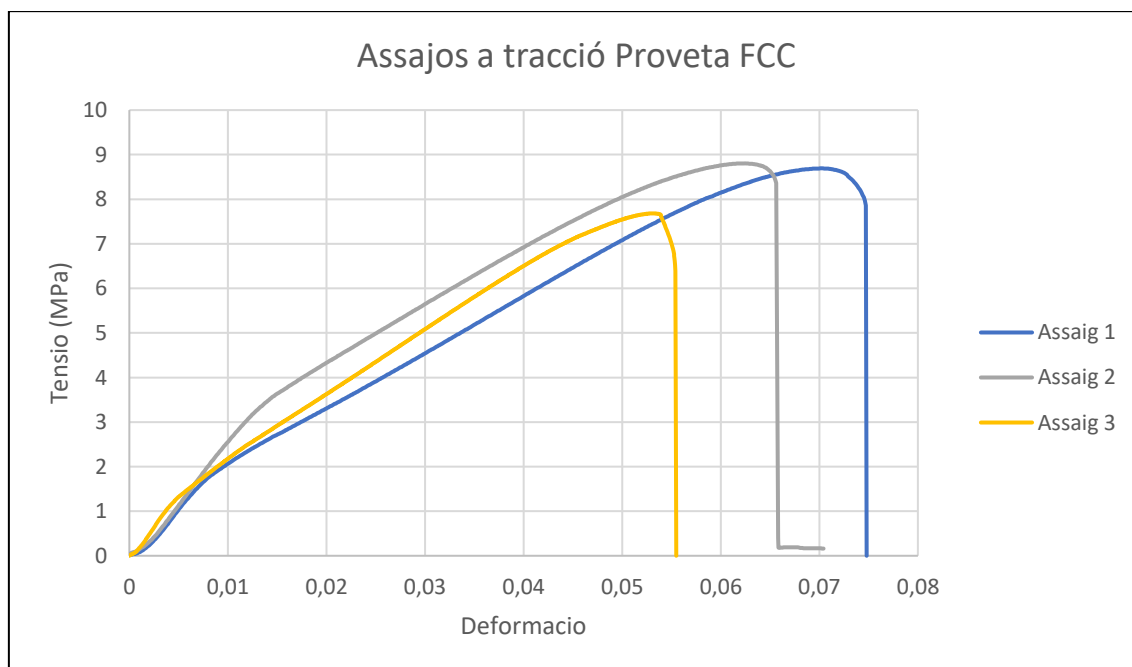


Figura 23. Gràfic tensió-deformació de les provetes FCC

A la **figura 23** es pot observar que l'estructura té una regió plàstica pràcticament inexistent i pateix una fractura ràpida. Aquestes característiques indiquen que l'estructura es

rígida i poc propensa a deformatar-se de forma permanent. Les dades obtingudes amb els assajos de tracció es poden veure a la següent **taula 8**:

N. assaig	E' (MPa)	$e_{E'}$ (MPa)	σ_o (MPa)	e_{σ_o} (MPa)
1	132,74	-	7,97	-
2	160,41	-	8,76	-
3	151,35	-	7,55	-
Mitjana	148,17	$\pm 15,12$	8,09	$\pm 0,666$

Taula 8. Característiques mecàniques de les provetes FCC

Com a les provetes amb estructures cel·lulars analitzades anteriorment, de la **figura 23** s'hi poden obtenir dos valors de Mòdul de Young diferents ja que la zona elàstica presenta dos pendents diferenciats.

N. assaig	E'_{I} (MPa)	$e_{E'_{I}}$ (MPa)	E'_{II} (MPa)	$e_{E'_{II}}$ (MPa)
1	231,05	-	126,02	-
2	272,56	-	131,69	-
3	293,26	-	145,28	-
Mitjana	265,62	$\pm 34,57$	134,33	$\pm 10,95$

Taula 9. Valors de Mòdul de Young de les provetes FCC

5.2. Anàlisi de fractures

A continuació s'analitzaran les fractures produïdes a les diferents provetes durant els assajos de tracció uniaxial.

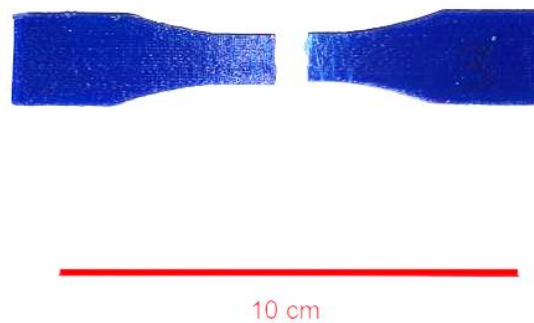


Figura 24. Fractura de la proveta sòlida

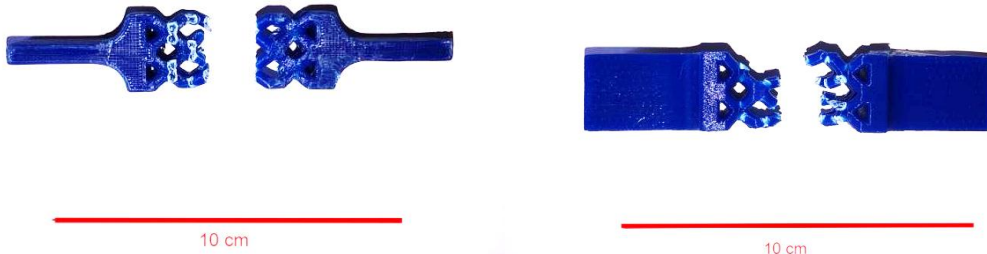
Com es pot observar a la **figura 24**, la fractura que s'ha produït a la proveta d'estructura sòlida es de tipus fràgil doncs ha sigut molt neta i no s'han esquinçat les fibres de PLA que conformen la peça.



10 cm

Figura 25. Fractura de la proveta amb estructura cúbica simple

A la **figura 25** es pot veure la fractura de la proveta amb estructura cúbica simple, de nou, és una fractura fràgil que afecta als punts de les branques més propers a l'esforç vertical. Només s'ha produït fallada a les branques ubicades a al front i a l'interior de l'enreixat de forma que la secció fracturada es la mínima.



10 cm

10 cm

Figura 26. Fractura de la proveta amb estructura BCC

Com es pot veure a la **figura 26**, la fractura a l'estructura BCC és de tipus dúctil. Es pot comprovar ja que a les branques fracturades s'hi pot observar esquinçament de les fibres de PLA. Per altra banda, totes les unions de les branques han patit altes deformacions provocant que la fractura sigui lenta. La secció fracturada forma aproximadament un angle de 45° amb l'esforç de tracció i s'ubica als nusos de les diverses branques ja que es la secció de mínima superfície.

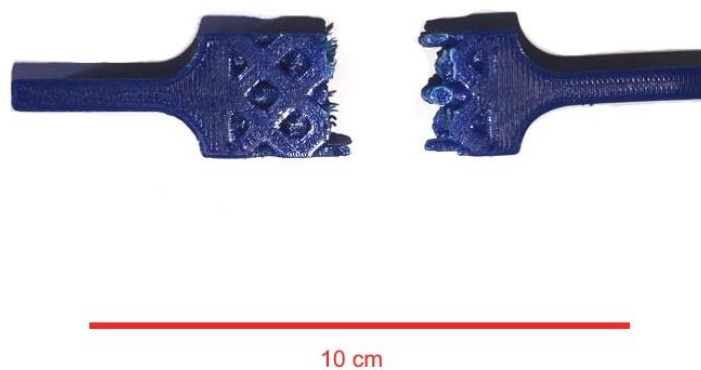


Figura 27. Fractura de la proveta amb estructura FCC

A la proveta FCC assajada, a la **figura 27**, es pot veure que la fractura ha estat fràgil i ràpida doncs no hi ha esquinçament de fibres de PLA. La fallada s'ha produït a la secció de mínima àrea que es localitza al centre d'una cel·la unitària i perpendicular a la càrrega de tracció.

5.3. Resultats dels anàlisis per elements finits

5.3.1. Provetna amb estructura cúbica simple

L'anàlisi per elements finits de l'estructura cúbica simple s'ha realitzat amb una càrrega de 1404 N.

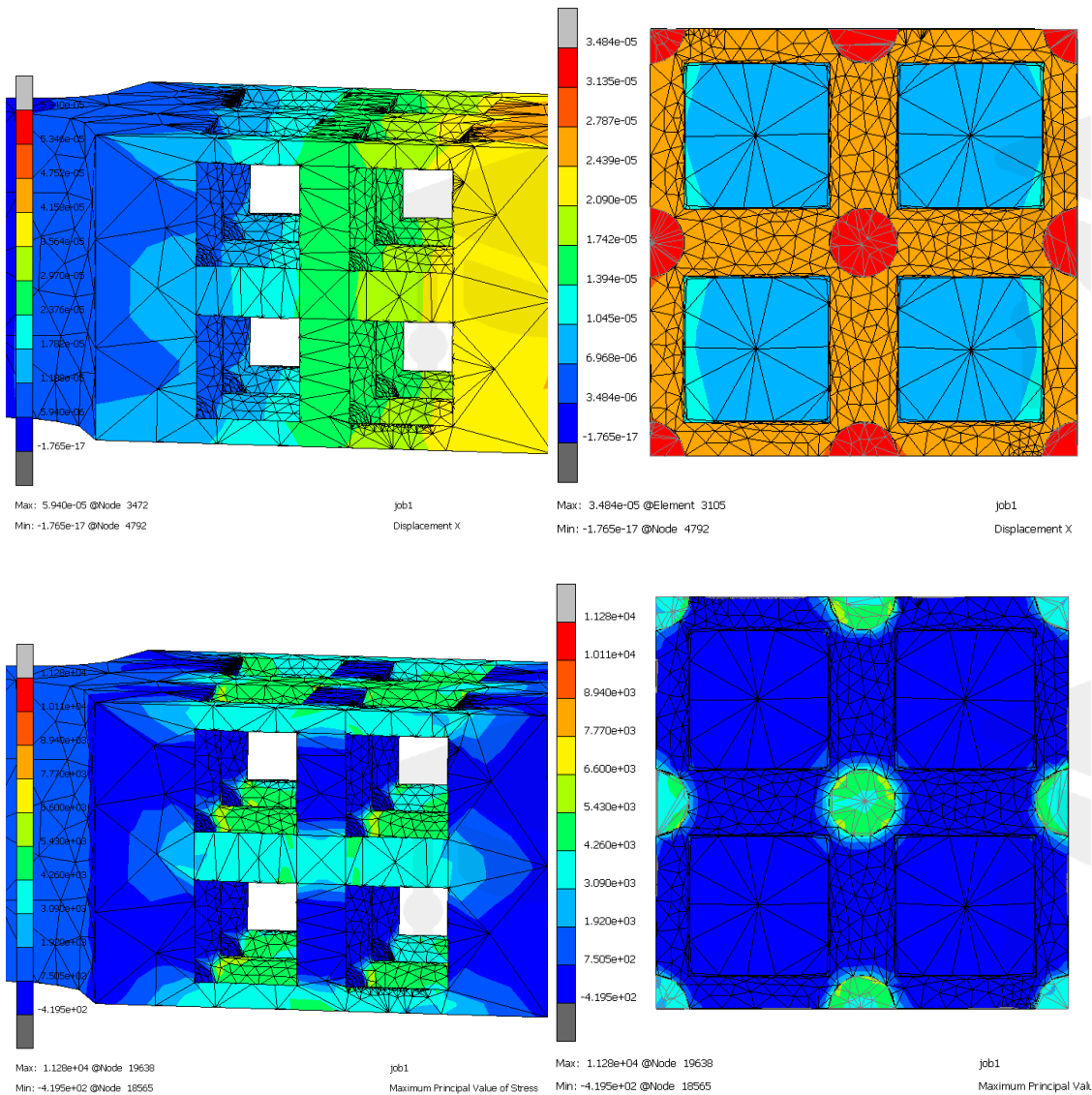


Figura 28. Anàlisi FEM estructura cúbica simple de la vista general (esquerra) i la secció de ruptura (dreta). De dalt a baix: distribució de desplaçaments i distribució de màxima tensió principal

Com es pot observar a la **figura 28**, la deformació màxima es pateix a la secció de fractura amb un valor del 2,261%. De la mateixa forma, analitzant la distribució de màxima tensió principal, el criteri de Rankine indica que la fractura es produeix a la zona de secció més petita amb un valor de 4,26 MPa.

5.3.2. Proveta amb estructura BCC

L'anàlisi per elements finits de l'estructura BCC s'ha realitzat amb una càrrega de 1852 N.

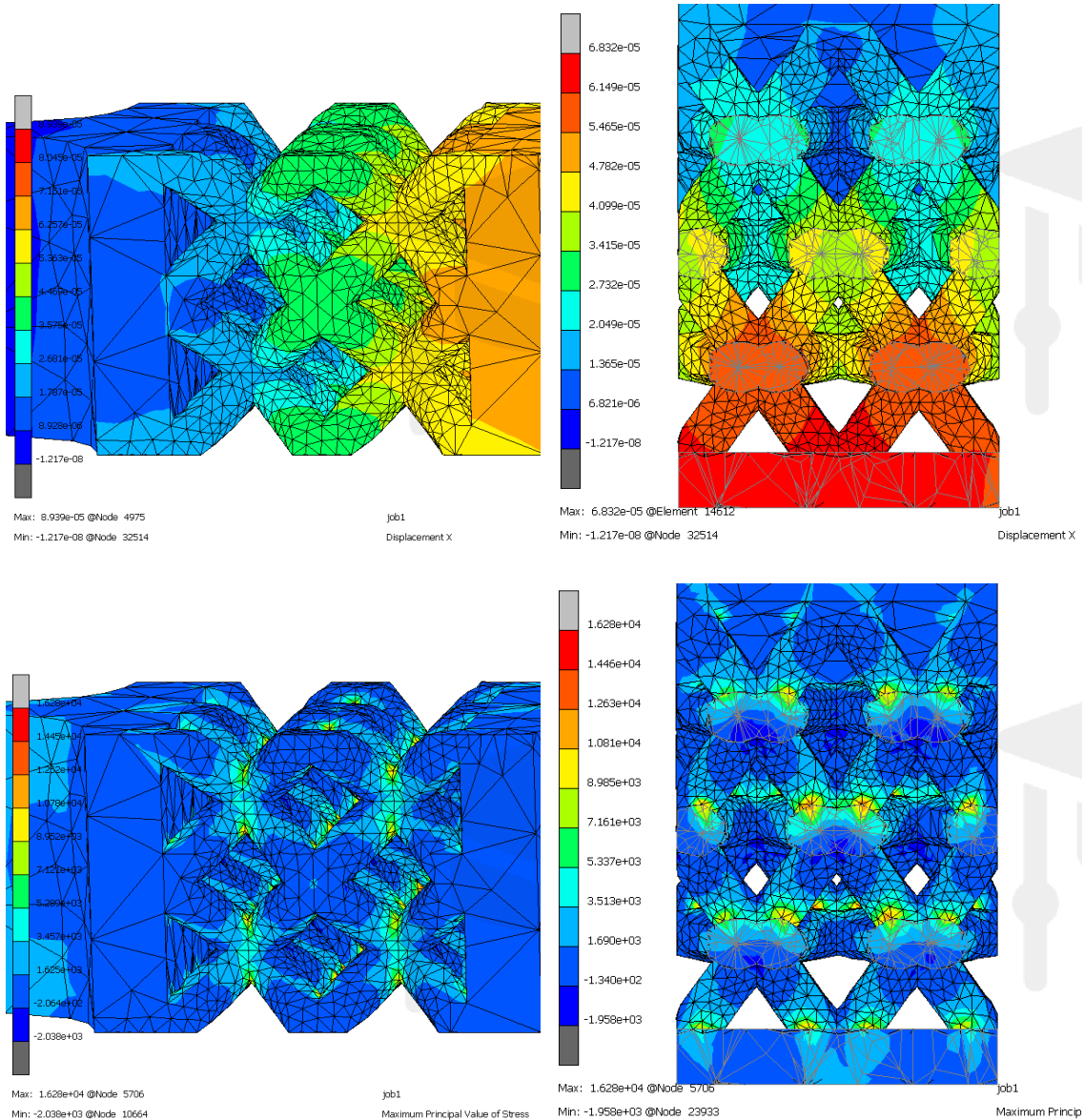


Figura 29. Anàlisi FEM estructura BCC de la vista general (esquerra) i la secció de ruptura (dreta). De dalt a baix: distribució de desplaçaments i distribució de màxima tensió principal

Observant la **figura 29** es pot veure que la màxima deformació es produeix a la secció de fractura, concretament a la zona més propera a l'esforç, amb un valor de 5,465%. Utilitzant el criteri de Rankine, la tensió màxima principal també s'ubica a la secció de fractura amb un valor de 5,337 MPa.

5.3.3. Provetta amb estructura FCC

L'anàlisi per elements finits de l'estructura FCC s'ha realitzat amb una càrrega de 3236 N.

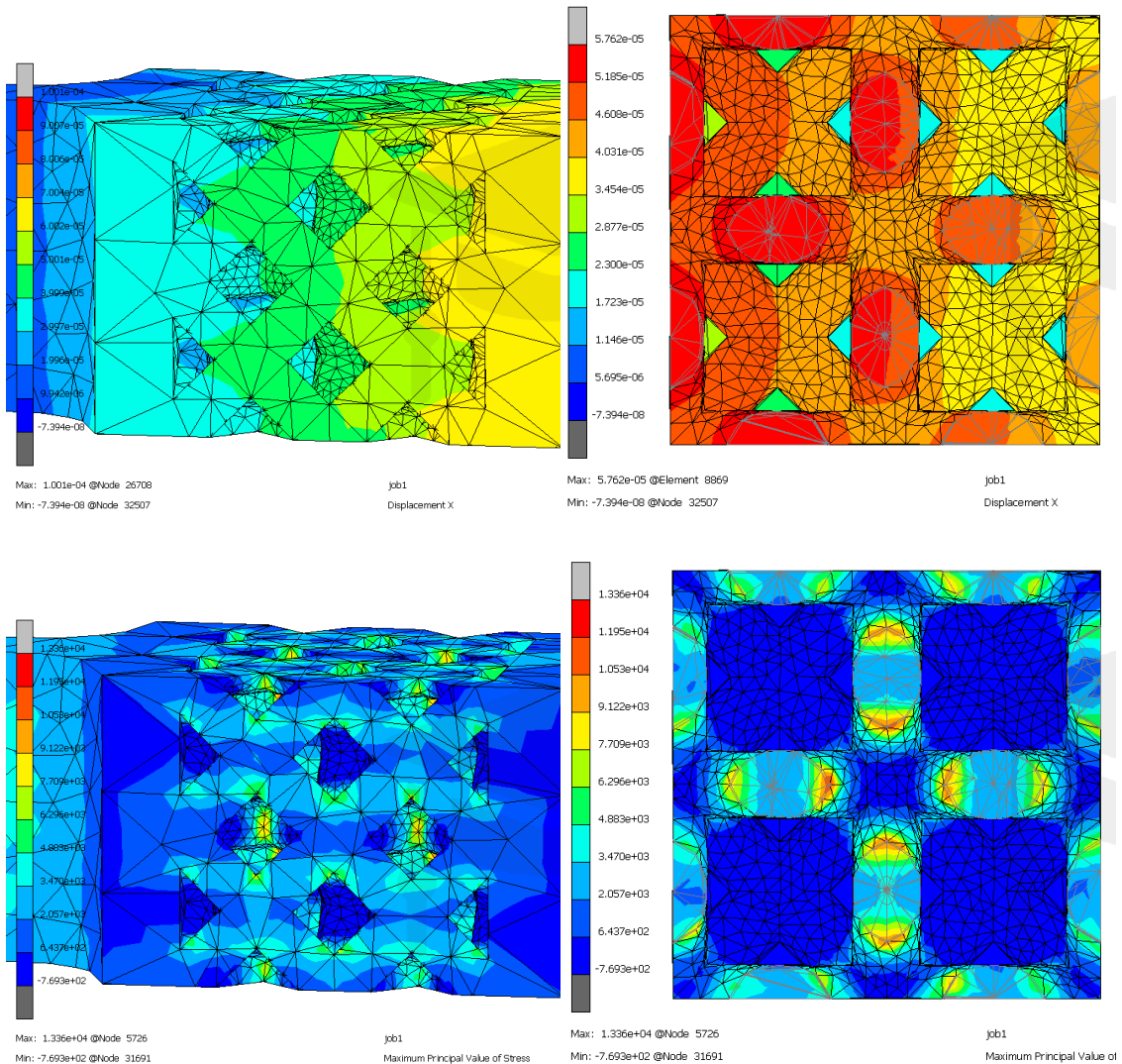


Figura 30. Anàlisi FEM estructura FCC de la vista general (esquerra) i la secció de ruptura (dreta). De dalt a baix: distribució de desplaçaments i distribució de màxima tensió principal

La figura 30 mostra el camp de deformacions que pateix l'estructura FCC, sent el màxim valor del 5,185% ubicat a la zona de ruptura de la proveta. Per altra banda utilitzant el criteri de Rankine, es pot observar que la màxima tensió principal també es localitza a la secció de ruptura amb un valor de 10,53 MPa.

5.4. Resultats d'anàlisi per correlació digital

5.4.1. Provetta sòlida

El fotoanàlisi per correlació digital de la proveta sòlida ha resultat en el següent camp de deformacions a l'eix Y en el moment de ruptura de la peça.

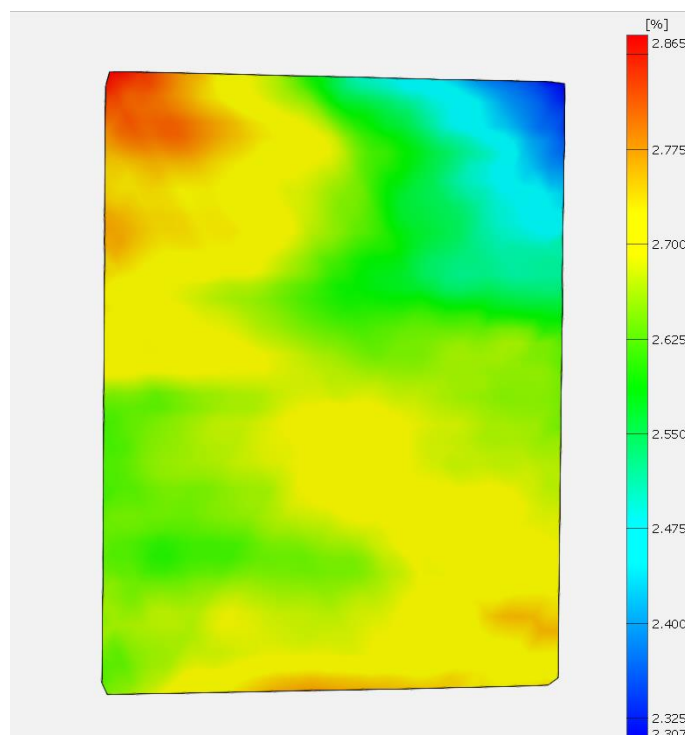


Figura 31. Camp de deformacions de la proveta sòlida per correlació digital

Com es pot observar a la **figura 31**, la màxima deformació s'ha produït a la part superior de la proveta. Aquesta té un valor del 2,865%. Conseqüentment, la fractura s'ha produït a la mateixa zona.

A part, s'ha obtingut un valor del Coeficient de Poisson de 0,3326 i un Mòdul de Young de 2534,03 MPa.

5.4.2. Proveta amb estructura cúbica simple

El camp de deformacions verticals de la proveta amb estructura cúbica simple en el moment de la ruptura s'ha aconseguit gràcies a l'assaig de fotoanàlisi per correlació digital.

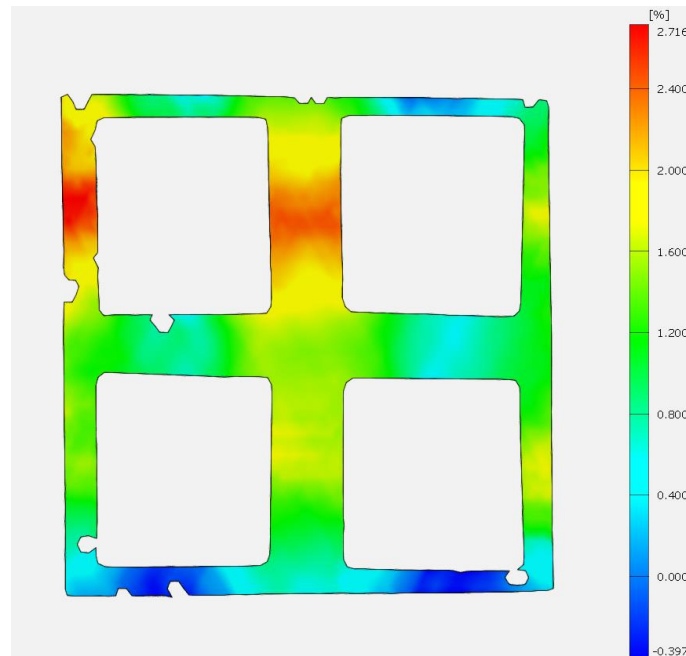


Figura 32. Camp de deformacions de la proveta cúbica simple per correlació digital

Observant la **figura 32**, la màxima deformació s'ha produït a la zona de secció mínima amb un valor del 2,716%. La fractura també s'ha produït al mateix indret de la proveta. Per altra banda, s'ha obtingut un Mòdul de Young de 204,23 MPa.

5.4.3. Proveta amb estructura BCC

Les provetes amb estructura BCC tenen una superfície frontal molt petita i les fractures es produeixen exclusivament a l'interior de la peça de forma tridimensional. Per fer un anàlisi de forma correcta s'hauria de realitzar utilitzant dues càmeres simultàniament fotografiant dos angles diferents per així captar les deformacions en tres dimensions. Aquesta metodologia, però, queda fora de l'abast del treball. Tot i així, s'ha pogut calcular el valor del Mòdul de Young que es igual a 145,96 MPa.

5.4.4. Probeta amb estructura FCC

El camp de deformacions verticals de la probeta amb estructura FCC en el moment de la ruptura es el següent.

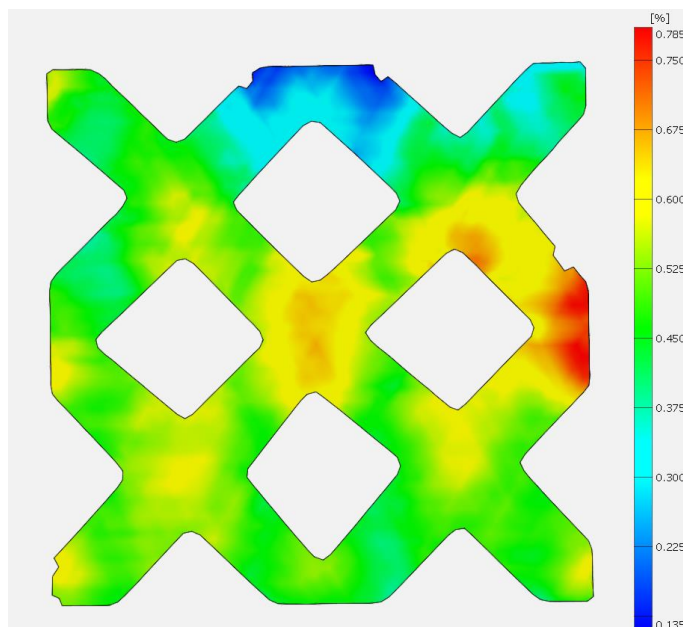


Figura 33. Camp de deformacions de la probeta FCC per correlació digital

A la **figura 33**, es pot veure que les deformacions màximes (valor del 0,785%) no es produeixen al mateix lloc que la ruptura, per tant, aquest resultat no és fiable per la comparació amb les deformacions obtingudes mitjançant els assajos de tracció uniaxial. Això es deu a que les deformacions màximes que s'aconsegueixen a l'anàlisi per elements finits, a la **figura 30**, succeeixen a l'interior de l'enreixat cel·lular, impossibilitant un correcte anàlisi per correlació digital d'imatges. Per altra banda, el Mòdul de Young obtingut es de 276,17 MPa.

5.5. Comparació i discussió de resultats

Havent obtingut totes les dades utilitzant les diferents metodologies exposades, a continuació es farà una comparativa i discussió del resultats.

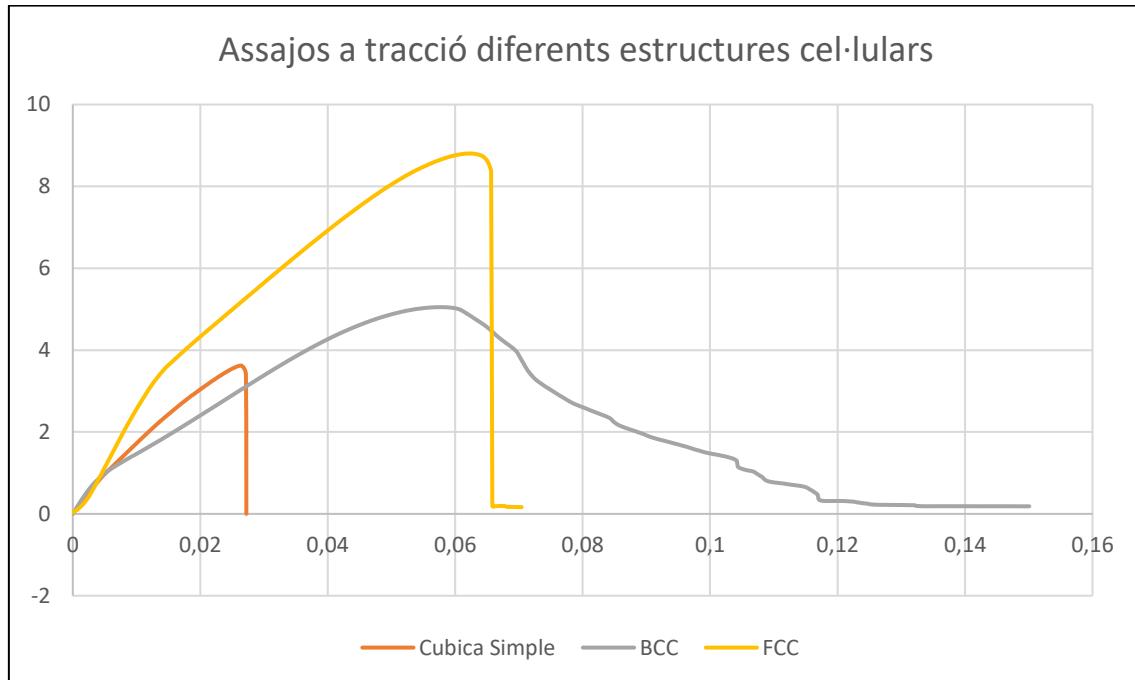


Figura 34. Assajos a tracció de les diferents estructures cel·lulars

En quant als diferents diagrames de tensió-deformació obtinguts mitjançant els assajos de tracció uniaxial, es poden veure grans diferències entre les diverses estructures cel·lulars, a la **figura 34**. El que més ressalta és que l'estructura FCC té un límit elàstic més elevat, seguit amb una alta diferència de l'estructura BCC i per últim la cúbica simple. Per altra banda, mentre que l'estructura cúbica simple i la FCC tenen fractures ràpides i fràgils, l'enreixat BCC té una fractura lenta i dúctil. Finalment, la deformació màxima abans de fractura més baixa és la de l'enreixat cúbic simple, seguit per un alt percentatge la BCC i la FCC.

Estructura	E_{Ass} (MPa)	E_{GOM} (MPa)	E_{GiA} (MPa)	E_G (MPa)
Sòlida	2719,04	2534,03	-	-
C. simple	155,22	204,23	103,81	103,39
BCC	119,75	145,96	428,25	427,68
FCC	148,17	276,17	572,98	572,35

Taula 10. Mesures del Mòdul de Young utilitzant diferents models

A la **taula** es poden observar els diferents valors de Mòduls de Young per la mateixa estructura. Aquests s'han obtingut utilitzant metodologia experimental amb els assajos de tracció uniaxial (E_{Ass}), per correlació digital (E_{GOM}), el model de Gibson i Ashby (E_{GiA} , **equació 8**) i el model de Goods (E_G , **equació 9**). S'han graficat aquests valors per tal de facilitar la seva lectura:

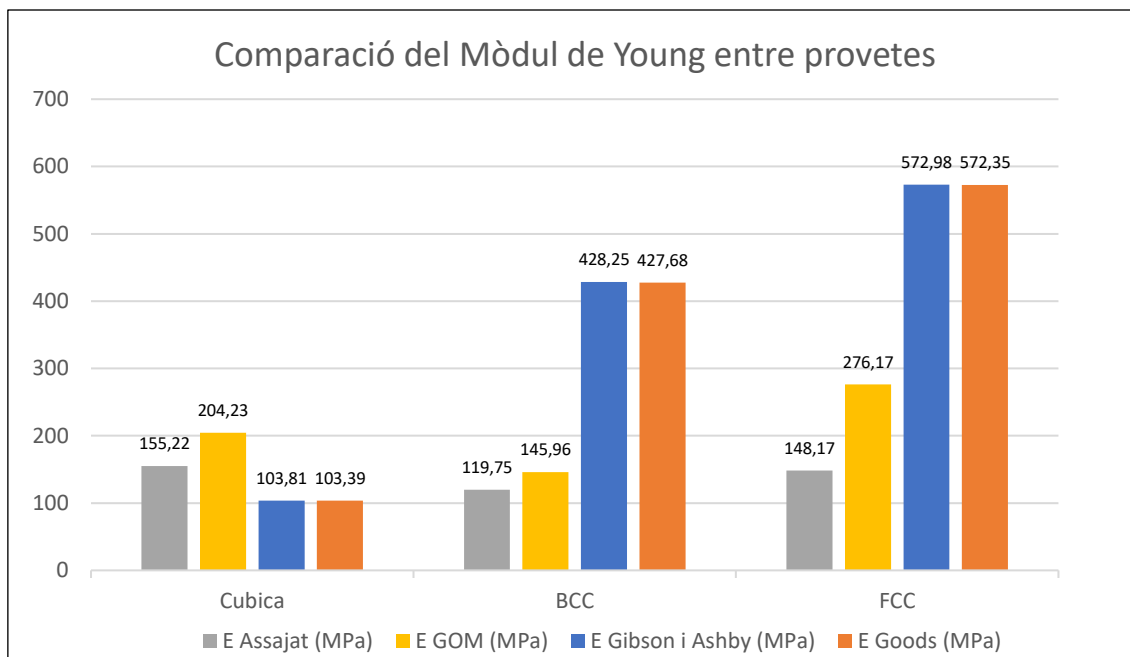


Figura 35. Comparació de Mòduls de Young entre provetes

Com es pot observar a la **figura 35**, tot i que els Mòduls de Young calculats mitjançant els models de Gibson i Ashby i de Goods són pràcticament idèntics entre si, tenen una discrepància molt elevada amb el valor obtingut experimentalment. Amb aquests resultats es pot demostrar que els models mecànics d'espumes polimèriques no són vàlids pel tipus de provetes que s'han assajat en aquest treball. Aquesta discrepància de resultats pot ser deguda a la diferència d'escala entre els enreixats cel·lulars que s'han estudiat en aquest treball i les espumes polimèriques. Per altra banda, els resultats obtinguts per DIC no són molt coherents amb els obtinguts amb els assajos a tracció. Un possible motiu és que les peces no estaven fixades de forma totalment vertical, la qual cosa provocava un moment flexor que distorsionava les deformacions verticals mesurades i conseqüentment el Mòdul de Young.

Per altra banda, observant els Mòduls de Young calculats mitjançant assajos de tracció es pot veure que l'estructura més rígida de les tres analitzades és la cúbica simple doncs té un mòdul més elevat seguit de prop per l'estructura FCC. Per altra banda l'enreixat BCC té una deformació molt més dúctil que les seves contraparts ja que el valor del Mòdul de Young és significativament més petit.

A la **figura 34** es pot observar una característica pròpia del diagrama tensió-deformació de les tres estructures cel·lulars que són els diferents pendents de la zona elàstica.

Estructura	E_{Ass} (MPa)	E_I (MPa)	E_{II} (MPa)
C. simple	155,22	225,55	138,39
BCC	119,75	221,95	102,67
FCC	148,17	265,62	134,33

Taula 11. Mesures dels diferents trams del Mòdul de Young

Com es pot observar a la **taula 11**, el valor del Mòdul de Young pertanyent al primer tram de la zona elàstica és més elevat que el del tram següent en tots els enreixats cel·lulars.

Estructura	m (g)	ρ (g/cm^3)	σ_o (MPa)	σ_o/ρ (MPa · cm^3/g)
Sòlida	0,93	1,24	43,56	35,13
C. simple	1,93396	0,241745	3,51	14,52
BCC	3,93409	0,491761	4,63	9,42
FCC	4,55176	0,568970	8,09	14,22

Taula 12. Mesures del límit elàstic de les diferents estructures

A la **taula 12** es pot observar la massa (m) de les diferents estructures de les diferents provetes assajades. La densitat (ρ), s'ha calculat tenint en compte que s'utilitza el volum útil de cada proveta, es a dir, pels enreixats s'ha fet servir un volum de 20x20x20 mm i a la proveta s'ha fet servir un volum de 5x10x15 mm. El límit elàstic (σ_o) s'ha calculat mitjançant els diagrames obtinguts a partir dels assajos a tracció. Per últim, el límit elàstic específic (σ_o/ρ) representa el límit elàstic entre unitat de densitat de cada proveta per tal de veure l'eficiència mecànica de cada cas tenint en compte que cada enreixat té una densitat diferent.

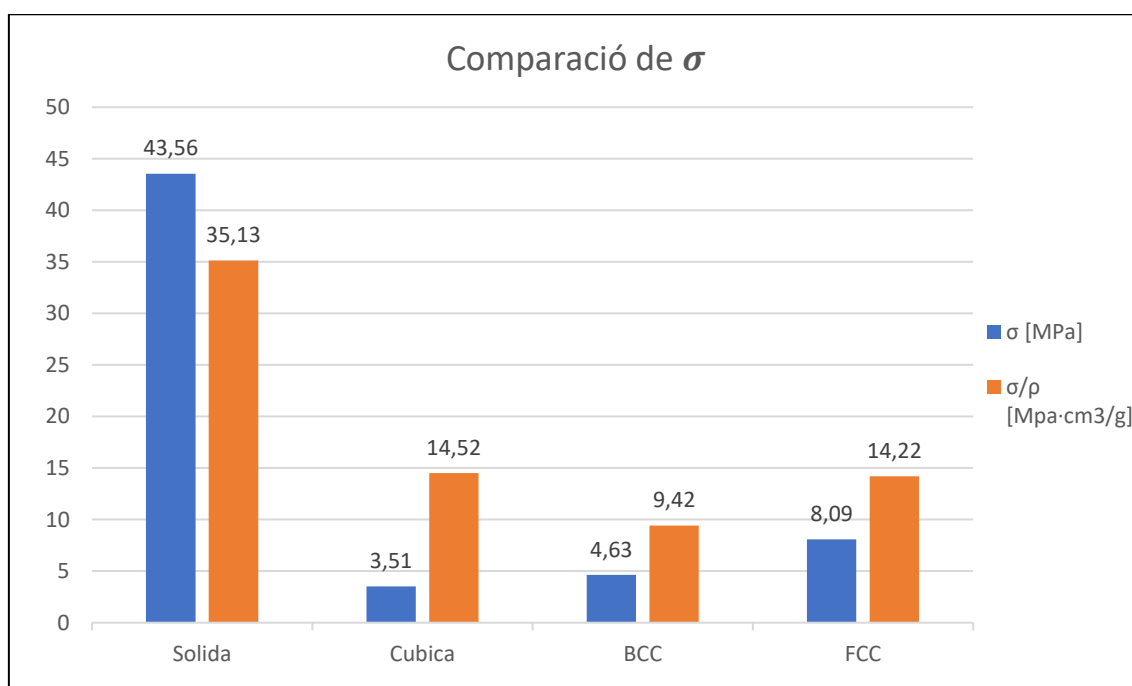


Figura 36. Comparació de límits elàstics entre provetes

A la **figura 36** es pot observar que per raons obvies, l'estructura amb un límit elàstic més elevat es la sòlida. Si es fixa la vista només als enreixats cel·lulars es pot veure que el valor del límit elàstic és directament proporcional a la massa de l'estructura. Per tal de fer un estudi obviant els valors de la massa observant el límit elàstic específic, es pot veure que l'estructura amb un millor rendiment mecànic és la cúbica simple seguida de prop per la FCC. L'estructura BCC per altra banda es la pitjor dels tres enreixats a nivell d'eficiència mecànica ja que té el valor més baix de límit elàstic específic.

Estructura	ε_{max} (%)	$\varepsilon_{fract.}$ (%)	ε_{FEM} (%)	ε_{DIC} (%)
Sòlida	1,602	2,56	-	2,865
C. simple	2,261	2,72	2,97	2,716
BCC	3,866	6,2	5,465	-
FCC	5,460	6,6	5,185	0,785

Taula 13. Mesures de deformacions de les diferents estructures

A la **taula 13** es poden observar les diferents deformacions per cada estructura. La deformació elàstica màxima (ε_{max}), s'obté a partir del diagrama de tensió-deformació indicat a la **figura 35**, utilitzant l'**equació 3** amb els límits elàstics i els Mòduls de Young mesurats experimentalment. La deformació de fractura ($\varepsilon_{fract.}$), s'obté també a partir del diagrama de tensió-deformació de la **figura 35** i representa el percentatge de deformació que pateix la proveta quan aquesta comença a fallar mecànicament. La deformació elàstica màxima obtinguda per FEM (ε_{FEM}) s'ha obtingut amb l'anàlisi d'elements finits amb el software MSC.Marc, a les **figures 28, 29 i 30**. Per últim, la deformació de fractura obtinguda per correlació digital (ε_{DIC}) s'ha obtingut mitjançant un fotoanàlisi amb el software GOM Correlate indicada a les **figures 31, 32 i 33**.

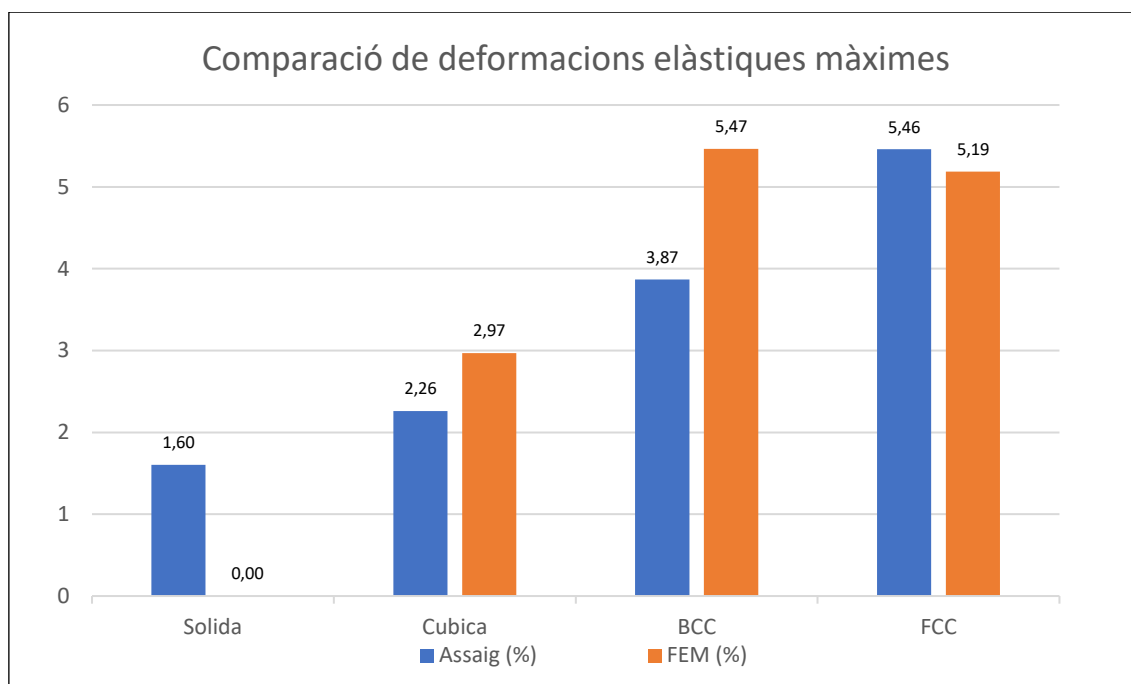


Figura 37. Comparació de deformacions elàstiques màximes

Com es pot observar a la **figura 37**, la proveta que més es deforma abans de patir deformacions plàstiques és la que té estructura BCC seguida de la FCC. Aquestes deformacions representen una relació entre la resistència a tracció i la rigidesa de cada estructura. Així doncs, la que té una resistència més baixa respecte a la seva rigidesa és l'estructura sòlida seguida de la cúbica simple. Per altra banda, les deformacions enregistrades pel software FEM tenen discrepàncies respecte les dades obtingudes per assajos de tracció. Una possibilitat d'aquest fet és que al ser un material anisotròpic,

el software no té en compte que les diferents direccions de les tensions que rep una proveta tenen diferents propietats.

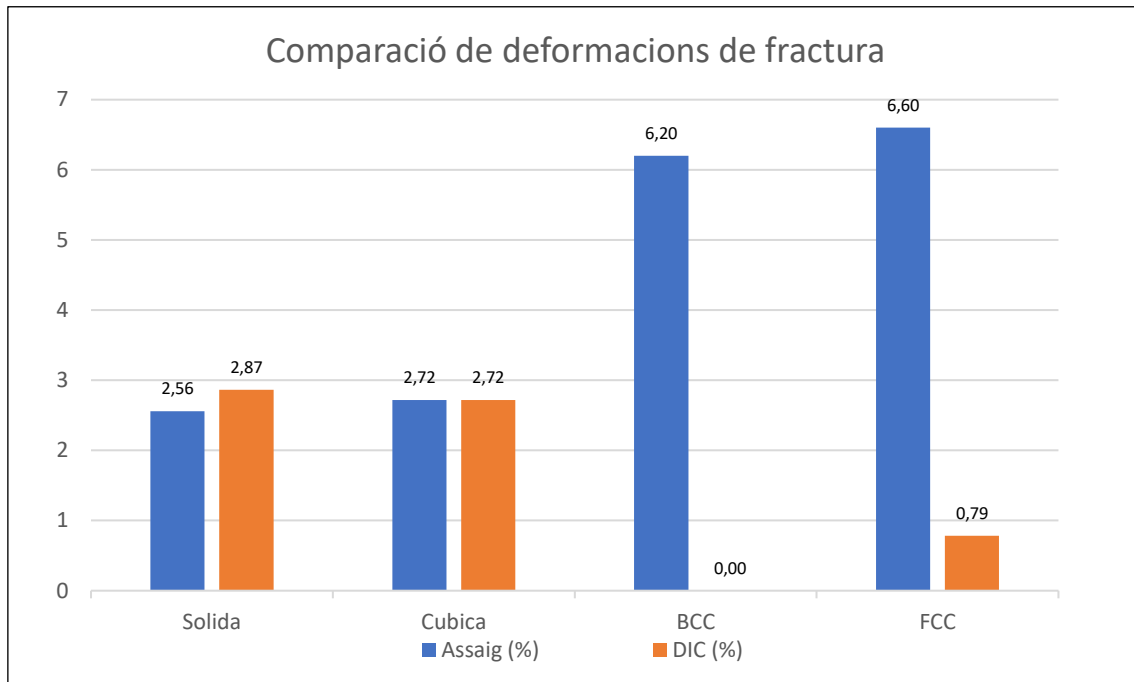


Figura 38. Comparació de deformacions de fractura

A la **figura 38** s'observa que les provetes que més es deformen abans de fallar a tracció són les que tenen estructura BCC i FCC, mentre les que tenen deformacions menors abans de fracturar-se són la sòlida i la cúbica simple. Es pot veure també que els resultats obtinguts a partir de DIC són molt precisos amb la proveta sòlida i l'estructura cúbica simple. En contraposició la proveta FCC presenta una alta discrepància entre resultats. El motiu d'aquest fet és que les màximes deformacions d'aquesta proveta succeeixen a l'interior de l'estructura i no es poden analitzar per correlació digital.

6. Planificació

La planificació que s'ha seguit per la realització d'aquest treball de fi de grau és la següent:

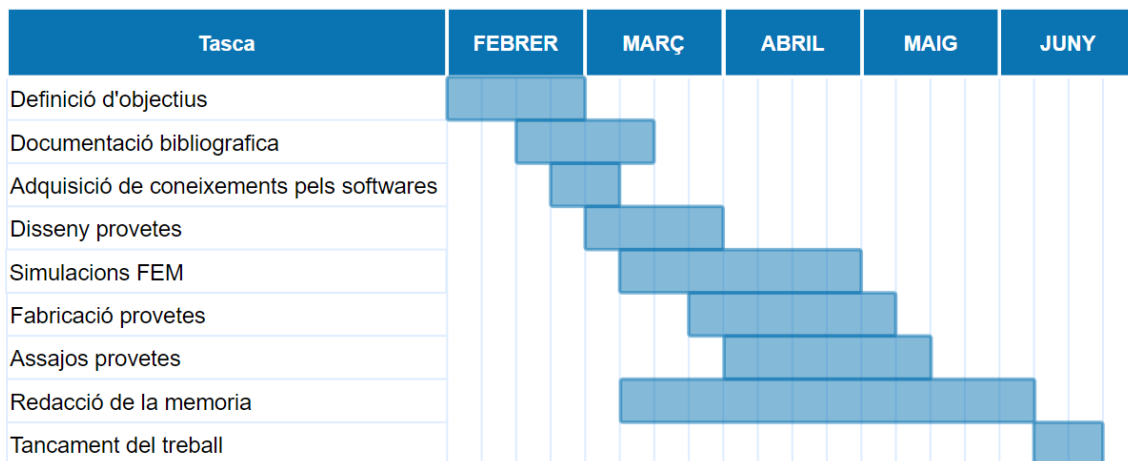


Figura 39. Diagrama de Gantt de la planificació del treball

7. Pressupost

El pressupost que s'ha destinat a la realització d'aquest treball s'ha calculat de la següent forma: [27]

Tipus de mà d'obra	Cost unitari (€/h)	Numero d'hores	Import (€)
Enginyeril	12,00	350	3600,00
Supervisió	24,00	20	480,00
Tècnica	8,00	20	160,00
Subtotal			4240,00

Taula 14. Pressupost destinat a la mà d'obra

Equip	Cost (€)	Temps d'ús	Import d'amortització (€)*
PC	1000	4 mesos	83,30
Subtotal			83,30

Taula 15. Pressupost destinat als equips informàtics

* El temps d'amortització dels equips informàtics és de 4 anys, és a dir, una taxa anual d'amortització del 25%. Com el temps d'ús és de 4 mesos: $25\% \cdot \frac{4}{12} = 8,33\%$.

Llicència	Tipus	Cost (€)	Temps d'ús	Import d'amortització (€)*
Office 2021	Familiar	150,00	4 mesos	16,67
SolidWorks	Estudiant	120,00	4 mesos	13,33
nTopology	Estudiant	Gratuïta	4 mesos	0,00
MSC.Marc	Estudiant	Gratuïta	4 mesos	0,00
Subtotal				30,00

Taula 16. Pressupost destinat a les llicències informàtiques

* El temps d'amortització dels equips informàtics és de 3 anys, és a dir, una taxa anual d'amortització del 33,33%. Com el temps d'ús és de 4 mesos: $33,33\% \cdot \frac{4}{12} = 11,11\%$.

Maquinària	Cost (€)	Temps d'ús	Import d'amortització (€)*
FlashForge Creator Pro 2	600,00	4 mesos	22,22
INSTRON 3300	2000,00	4 mesos	74,00
Subtotal			96,20

Taula 17. Pressupost destinat a la maquinària

* El temps d'amortització de la maquinària és de 9 anys, és a dir, una taxa anual d'amortització de l'11,11%. Com el temps d'ús és de 4 mesos: $11,11\% \cdot \frac{4}{12} = 3,70\%$.

Tipus de consum	Consum (W)	Temps d'us	Energia (kW·h)	Import energètic (€)*
PC	24	300 h	7,20	1,06
Màquina de fabricació additiva	320	31,5 h	6,88	1,01
Maquina d'assajos	2000	1 h	2,00	0,30
Subtotal			16,08	2,37

Taula 18. Pressupost destinat al consum energètic

* El preu de l'energia elèctrica que s'ha utilitzat per calcular el pressupost energètic és igual al preu mitjà de kW·h al mes de maig de 2023. Aquest valor és de 0,1475 €/kWh. [28]

Material	Cost unitari (€)	Quantitat	Import (€)
Filament PLA Blau	22,00 €/kg	334,57 g	7,36
Paper de vidre	6,00	1	6,00
Spray de pintura	4,00	2	8,00
Memoria USB 16GB	5,00	1	4,00
Subtotal			25,36

Taula 19. Pressupost destinat als materials

Concepte	Cost (€)
Ma d'obra	4240,00
Equip informàtic	83,30
Llicències	30,00
Maquinaria	96,20
Energia	2,37
Materials	25,36
TOTAL	4477,23

Taula 20. Pressupost total del treball de fi de grau

8. Estudi ambiental

L'impacte ambiental que ha tingut la realització d'aquest treball és degut principalment a la despesa energètica provocada per l'ús d'un ordinador, una màquina de fabricació additiva i una màquina d'assajos a tracció. El consum energètic total és el següent:

Tipus de consum	Consum (W)	Temps d'ús	Energia total (kW·h)	Percentatge de consum
PC	24	300 h	7,20	44,78 %
Màquina de fabricació additiva	320	31,5 h	6,88	42,79 %
Màquina d'assajos	2000	1 h	2,00	12,44 %
Total			16,08	100 %

Taula 21. Despesa energètica del treball

Com es pot observar a la taula , el consum total ha estat d'uns 16,08 kW·h, aproximadament. La part més significativa d'aquest total és l'energia que s'ha destinat a l'ús de l'ordinador amb el qual s'han dissenyat les peces, s'han realitzat les simulacions i s'ha redactat la memòria. Una altra part significativa d'aquest consum ha estat en la fabricació de les provetes mitjançant fabricació additiva. Finalment, tot i que els assajos a tracció consumeixen una gran quantitat d'electricitat, en tenir una duració reduïda no s'ha consumit molta energia comparada amb les altres despeses.

Per altra banda, un altre impacte ambiental que s'ha produït amb l'elaboració d'aquest treball és la generació de residus plàstics de PLA. Aquests resulten de la conformació amb fabricació additiva de les diferents provetes. Es calcula que de 334,57 g de PLA utilitzats en les fabricacions corresponents, 68,76 g (20,55 %) s'han destinat a fer suports i bases. Per tant, són rebutjats un cop s'ha finalitzat la conformació de les provetes, ja que no tenen cap funció mecànica i no són útils per a la realització dels assajos a tracció.

9. Estudi social i d'igualtat de gènere

Tot i que aquest treball no tracta de cap tema social de forma directa es poden diferents indicis que tractin la igualtat de gènere en l'àmbit de l'enginyeria.

L'equip que ha elaborat aquest treball de fi de grau hi predomina el gènere masculí, ja que tant l'autor i el director són homes. Si s'analitza l'entorn de treball on s'han realitzat els assajos a tracció, al LERMA, hi continua predominant el sexe masculí, tot i que hi ha presència femenina. Tot i això, l'accés a les diferents maquinàries i tecnologies utilitzades mai ha estat restringit ni s'ha discriminat a cap gènere, sexualitat o col·lectiu desfavorit. En últim lloc, la major part de la bibliografia consultada té autoria masculina cosa que s'hauria de millorar de cara a futur amb la inclusió de més dones al sector de l'enginyeria.

Com ja s'ha comentat anteriorment, una de les aplicacions dels enreixats cel·lulars és la construcció de pròtesis. Gràcies a l'elaboració d'aquest treball es contribueix a la investigació d'aquestes estructures la qual cosa ajudarà a la recerca i desenvolupament de nous instruments en l'àmbit de la salut. D'aquesta forma, es pot contribuir a facilitar el dia a dia de les persones amb mobilitat reduïda fent que la inclusió d'aquest col·lectiu en la societat sigui possible.

10. Conclusions

Amb la realització d'aquest treball, s'han pogut analitzar les propietats mecàniques del PLA així com les diferents característiques dels tres tipus d'estructures estudiades, totes conformades mitjançant fabricació additiva. Amb la finalització del treball de fi de grau, s'han obtingut les següents conclusions.

Quant a les propietats mecàniques del PLA mesurades a partir d'assajos a tracció uniaxial, es pot concloure que, com la majoria de termoplàstics, és un material fràgil perquè té una fractura ràpida.

Si s'analitza el límit elàstic específic de cada estructura, l'enreixat que presenta un major valor d'aquest paràmetre és la cúbica simple seguida, per un petit marge, de la FCC. Comprovant la rigidesa de les estructures comparant els diferents Mòduls de Young, de nou, la millor estructura és la cúbica simple seguida, per poc, de la FCC. Així i tot, considero que la proveta que ha demostrat un millor rendiment mecànic és la FCC, ja que pot resistir esforços a tracció molt més grans. D'altra banda, l'estructura cúbica simple és òptima per petits esforços en ser més rígida i tenir un límit elàstic específic major a la FCC tenint una despesa de material inferior. Per acabar, la proveta BCC, a diferència de les altres, ha patit una fractura dúctil i lenta durant els assajos atorgant una baixa rigidesa. Conjuntament amb el valor de mòdul elàstic específic més baix, es conclou que és l'enreixat cel·lular amb les pitjors propietats mecàniques dels 3.

Comparant els diferents mètodes que s'han utilitzat per obtenir el Mòdul de Young, es conclou que els models d'espumes polimèriques de Gibson i Ashby i de Goods no són vàlids pel càlcul de rigidesa d'enreixats cel·lulars. Això es deu al fet que s'han aconseguit unes altes discrepàncies entre aquests models i els valors obtinguts per assaigs. En últim lloc, les dades de rigidesa assolides a partir de la correlació digital presenten una alta desviació respecte als valors dels assajos a tracció.

El modelatge digital i la posterior anàlisi pel mètode d'elements finits ha donat resultats molt bons. Els valors de deformació elàstica màxima en l'eix paral·lel a l'esforç han sigut aproximats als assolits experimentalment amb assajos a tracció uniaxial. Per altra banda, les deformacions a fractura calculades a partir de correlació digital per fotoanàlisi també tenen valors aproximats als que es poden observar als diferents diagrames de tensió-deformació.

11. Agraïments

En primer lloc, vull agrair al meu tutor Julián Arnaldo Ávila per guiar-me durant el desenvolupament d'aquest treball els darrers mesos. Igualment, vull agrair al Jason Caccamo per encarregar-se de la fabricació de les provetes i assistir-me en la realització dels diferents assajos. També vull agrair als meus companys de grau per la seva disposició a ajudar-me. En últim lloc, vull agrair a la meva família i amics pel seu suport durant tot el grau.

12. Bibliografia

- [1] «ISO 527-4:2023(en), Plastics — Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites». <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:527:-4:ed-3:v1:en> (consulta 4 juny 2023).
- [2] «ISO 527-5:2021(en), Plastics — Determination of tensile properties — Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites». <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:527:-5:ed-3:v1:en> (consulta 4 juny 2023).
- [3] «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1», doi: 10.1520/D0638-14.
- [4] ASTM, «Designation: D 3039/D 3039M-00 e1 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1».
- [5] ASTM, «Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions 1», [En línia]. Disponible a: www.astm.org,
- [6] N. Saba, M. Jawaid, i M. T. H. Sultan, «An overview of mechanical and physical testing of composite materials», *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, p. 1-12, gen. 2019, doi: 10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1.
- [7] N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials*, 2013, p118-274
- [8] J.-C. Lavocat, «Stress-Strain curve for an elastic material». [En línia] https://www.researchgate.net/figure/Stress-Strain-curve-for-an-elastic-material-Within-the-elastic-region-if-the-material_fig27_305728176 (consulta 7 maig 2023).
- [9] M. Abasolo, S. Navalpotro, i J. Corral, «Teorías de fallo estático», *Diseño de Máquinas*, Universidad del País Vasco, 2021.
- [10] A. Freddi, G. Olmi, i L. Cristofolini, «Experimental Stress Analysis for Materials and Structures», 2015. [En línia]. Disponible a: <http://www.springer.com/series/10616>
- [11] E. Y. Tsymbal, «Section 1: Crystal Structure», *Physics 927*, University of Nebraska, 2011, p1-9.
- [12] Anònim, «The Arrangement of Atoms in Crystalline Solids», *Chemistry LibreTexts*, [En línia]. Disponible a: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Book%3A_General_Chemistry%3A_Principles_Patterns_and_Applicati

- ons_(Averill)/12%3A_Solids/12.02%3A_The_Arrangement_of_Atoms_in_Crystalline_Solids (consulta 29 abril 2023). [13] T. Wohlers i T. Gornet, «History of Additive Manufacturing», 2015.
- [14] S. H. Masood, «Advances in Fused Deposition Modeling», *Comprehensive Materials Processing*, vol. 10, p. 69-91, gen. 2014, doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01002-5.
- [15] J. Rampérez Barraji3n, «El 3cido polil3cctico (PLA): Un material innovador en la actualidad.», *Universidad de Almer3a*, 2021.
- [16] V. JAGOTA, A. P. S. SETHI, i K. KUMAR, «Finite Element Method: An Overview», *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, vol. 10, n3m. 1, p. 1-8, gen. 2013, Consulta: 11 maig 2023. [En l3nia]. Disponible a: <https://wjst.wu.ac.th/index.php/wjst/article/view/499>
- [17] V. M. P3rez, «Procedimiento novedoso para obtener espumas polim3ricas con diversas aplicaciones a partir de residuos pl3sticos», *Universitat d'Alacant*, Consulta: 4 maig 2023. [En l3nia]. Disponible a: <http://sgitt-otri.ua.es/es/empresa/ofertas-tecnologicas.html>.
- [18] V. Srivastava i R. Srivastava, «On the polymeric foams: modeling and properties», doi: 10.1007/s10853-013-7974-5.
- [19] L. J. Gibson i M. F. Ashby, «The mechanics of three dimensional cellular materials», *Proc R Soc Lond*, vol. A382, n3m. 1782, p. 43-59, 1982, doi: 10.1098/rspa.1982.0088.
- [20] S. Goods, ... C. N.-J. of A., i undefined 1998, «Mechanical properties of CRETE, a polyurethane foam», *Wiley Online Library*, Consulta: 14 maig 2023. [En l3nia]. Disponible a: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19980516\)68:7%3C1045::AID-APP2%3E3.0.CO;2-F](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1097-4628(19980516)68:7%3C1045::AID-APP2%3E3.0.CO;2-F)
- [21] ASTM E466-15, «Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials 1». doi: 10.1520/E0466-15.
- [22] America Makes, «Tensile Behavior of AM Lattice Structures», 2021, University of Ohio, Consulta: 15 març 2023. [En l3nia]. Disponible a: https://www.americamakes.us/wp-content/uploads/2021/03/5001-002-001_ProjectSummary_final.pdf.
- [23] HUBS, «What are the key design elements for 3D Printing?». [En l3nia]. Disponible a: <https://www.hubs.com/knowledge-base/key-design-considerations-3d-printing/> (consulta 16 març 2023).

- [24] 3D Systems «¿Qué es un archivo .STL?». [En línia]. Disponible a: <https://es.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file> (consulta 22 abril 2023).
- [25] M. S. Alsoufi, A. El-Sayed, i A. E. Elsayed, «Warping Deformation of Desktop 3D Printed Parts Manufactured by Open Source Fused Deposition Modeling (FDM) System», *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, vol. 17, p. 7, 2017, Consulta: 22 abril 2023. [En línia]. Disponible a: <https://www.researchgate.net/publication/318654219>
- [26] T. Yao, Z. Deng, K. Zhang, i S. Li, «A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations», *Compos B Eng*, vol. 163, p. 393-402, abr. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.01.025.
- [27] Infoautónomos, «¿Qué son las amortizaciones? ¿Cómo funcionan?», 20 gener 2023. <https://www.infoautonomos.com/contabilidad/tablas-de-amortizacion-para-los-bienes-de-una-empresa/> (consulta 2 juny 2023).
- [28] «Precio y horario diario del kWh de luz en el mercado regulado». <https://tarifas-gasluz.com/comparador/precio-kwh> (consulta 2 juny 2023).