

Treball final de Màster

Estudi: Màster Universitari en Enginyeria Industrial

Títol: Disseny paramètric i assaig d'estructures multimaterial bioinspirades enfocades a la fabricació additiva.

Document: Memòria i Annexes

Alumne: Jordi Muñoz Galmés

Tutor: Ines Ferrer Real i Maria Luisa Garcia-Romeu De Luna

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria dels processos de fabricació

Convocatòria (mes/any): Setembre 2024

Índex

1. Introducció:	1
1.1. Motivació/Antecedents:	1
2. Estat de l'art / Recerca prèvia:	2
2.1. Fabricació additiva i geometries bioinspirades:	2
2.2. Problemàtica amb el disseny de geometries complexes:	5
2.3. Fabricació d'estructures multimaterial i materials compostos:	5
2.4. Problemàtica al voltant de la determinació d'algunes propietats mecàniques:	7
2.5. Assaigs de caracterització relacionats amb impacte:	7
2.5.1. Impacte de caiguda de pes (<i>Drop weight impact</i>):	7
2.5.2. Indentació quasi-estàtica (<i>Quasi-static indentation, QSI</i>):	9
3. Objecte del projecte:	10
4. Metodologia:	11
4.1. Materials:	11
4.2. Geometries:	11
4.2.1. Geometria BM:	11
Definició de paràmetres:	12
Definició de variables:	13
4.2.2. Geometria HC:	13
Definició de paràmetres:	13
Definició de variables:	14
4.3. Assaig mecànic i provetes:	14
4.4. Equipament i programari:	14
4.4.1. Disseny de les provetes:	14
4.4.2. Fabricació de les provetes:	14
4.4.3. Caracterització de les provetes:	15
4.4.4. Microscopi òptic:	16
5. Modelització paramètrica:	17
5.1. Brick and mortar:	17
5.1.1. Diagrames de flux per definir la geometria:	17
A0: Definició <i>general de l'estructura Brick&Mortar</i> :	17
A1: Definició del mòdul BrickStructure:	18
A1.1: Definició <i>del mòdul BrickLevel</i> :	19
A2: Definició <i>del mòdul Mortar</i> :	19
5.1.2. Versions del programa:	20
5.2. Honeycomb:	22
5.2.1. Descripció del programa:	22
5.2.2. Versions del programa:	22
6. Procediment experimental:	23
6.1. Configuració de la geometria experimental:	23
Dimensions de la proveta (capes per la impressió):	23
6.2. Disseny d'experiments:	24

6.3. Paràmetres de procés:.....	27
7. Resultats de fabricació:.....	28
7.1. Primeres proves:.....	28
7.1.1. <i>Brick and Mortar</i> :.....	28
7.1.2. <i>Honeycomb</i> :.....	30
7.2. Proves de infill:.....	31
7.3. Impressió provetes finals.....	33
8. Experiment i resultats de QSI. Mètode experiment.....	37
8.1. L'experiment:.....	37
8.2 Resultats i anàlisi de les dades:.....	38
9. Discussió dels resultats:.....	42
10. Modificació de G-Code, programes per millorar la influència del refredament durant la impressió a l'adherència entre els materials.....	45
10.1. Estudi i modificació del G-Code:.....	45
10.1.1. Prova canvi d'origen de coordenades - G92.....	46
10.1.2. Prova de concatenació:.....	46
10.2. Python.....	46
11. Pressupost:.....	48
12. Conclusions i treballs futurs:.....	48
13. Glossari:.....	49
14. Referències.....	50
Annex 1: Proves preliminars d'impressió amb multimaterial.....	52
1. Introducció:.....	52
2. <i>Brick and mortar</i> :.....	52
3. <i>Honeycomb</i> :.....	55
4. Proves amb capa internivell:.....	55
5. Cel·la única:.....	57
Annex 2: Proves preliminars del <i>infill</i> amb multiestructura <i>brick and mortar</i> :.....	59
Dimensions de les provetes:.....	59
Paràmetres d'impressió:.....	60
Resultats de les impressions:.....	60
Annex 3: Estudi de les versions del programa de la multiestructura <i>brick and mortar</i>	66
1. Introducció:.....	66
2. Versió 1:.....	66
3. Versió 2:.....	67
4. Versió 3:.....	69
5. Versió 4:.....	71
6. Versió 5:.....	72
7. Versió 6:.....	73
Annex 4: Estudi de les versions del programa de la multiestructura <i>honeycomb</i>	74
1. Introducció:.....	74
2. Versió 1:.....	74
3. Versions 2 i 3:.....	75
Annex 5. Estudi dels paràmetres de G-Code de l'Ultimaker 3:.....	78

Paràmetres universals:	78
Funcions G:	78
Moviment lineal - G0 i G1:	78
G92 - <i>Set Current Position</i> :	79
G90 - Posicions Absolutes:	79
G91 - Coordenades Relatives:	79
G280 - <i>Prime blob</i> :	79
Funcions M:	80
M82 - <i>Absolute extrusion mode</i> :	80
M104 i M109 - Comandes de temperatura de l'extrusor:	80
M106 i M107 - Ventilador:	80
M204 - <i>Set default acceleration</i> :	81
Annex 6. Resultats:	82
1. Introducció:	82
Numeració dels assajos:	82
2. Prova i assaig descartat:	83
3. Comparativa per parells:	85
3.1. BM-08-04:	85
3.2. BM-08-12:	88
3.3. BM-10-04:	90
3.4. BM-10-12:	92
3.5. HC-16-04:	94
3.6. HC-16-12:	96
3.7. BM-05-04:	98
3.8. BM-05-12:	100
4. Comparació de dades per <i>brick gap</i> :	102
4.1. <i>Brick gap</i> de 0,4 mm:	102
4.2. <i>Brick gap</i> de 1,2 mm:	103
5. Comparació de dades per mida dels brics, <i>brick depth</i> i <i>brick diameter</i> :	104
5.1. <i>Brick depth</i> de 5 mm:	104
5.2. <i>Brick depth</i> de 8 mm:	105
5.3. <i>Brick depth</i> de 10 mm:	106
5.4. <i>Brick diameter</i> de 16 mm:	107
6. Comparativa <i>Honeycomb</i> i <i>Brick and Mortar</i> :	108
6.1. Comparació amb <i>brick gap</i> de 0,4 mm:	108
6.2. Comparació amb <i>brick gap</i> de 1,2 mm:	109
7. Conclusions:	109
Annex 7. Configuració de l'Ultimaker Cura:	110
Com configurar la impressora:	111
Annex 8. Diagrama del mòdul <i>BrickLevel</i> :	115
Annex 9. Diagrama del mòdul <i>HexagonLevel</i> :	116

1. Introducció:

1.1. Motivació/Antecedents:

En present treball s'integra dintre d'un projecte del grup de recerca GREP titulat *Desarrollo de productos a medida basados en estructuras multimaterial bioinspiradas mediante fabricación aditiva (BISTAPAM)*.

El projecte en qüestió se centra en el desenvolupament d'estructures multimaterial (MM) inspirades en geometries i estructures biomimètiques o bioinspirades mitjançant tecnologies de fabricació additiva, en anglès *Additive Manufacturing (AM)*, per tal de millorar la seva aplicació en els àmbits de salut i benestar.

Una de les primeres problemàtiques a les quals s'enfronta el treball recau en la creació i disseny per un programa CAD de la geometria que després s'haurà de llescar per ser fabricada per AM. Lligat amb aquesta idea, està el fet que, en cap dels articles o publicacions consultades he trobat cap menció al programa informàtic o programari utilitzat per a dissenyar els diagrames voronoi i cap de les diferents geometries i estructures dels diferents espècimens d'impressió.

Alhora, tampoc s'han trobat els paràmetres d'impressió usats més enllà de la temperatura i velocitat d'impressió i el patró del filament. No s'han determinat ni el gruix del filament, l'alçada de capa, el percentatge de *infill* ni el *flow rate*.

Les geometries multimaterials, en aportar la combinació de dos o més materials s'aconsegueix una millora en les seves propietats mecàniques. Per aquest motiu s'assagen a través de diferents assajos: tracció, compressió, impacte, etc. El problema radica en el fet que no hi ha estàndards encara per a la fabricació additiva, i menys per MM, i per això s'ha d'aprofitar o basar-se en altres. Un exemple bastant comú d'estructura multimaterial seria el formigó armat (figura 1) en el qual s'utilitzen barres metàl·liques que milloren la resistència a la tracció i la flexió.



Figura 1: El formigó armat és un exemple d'estructura MM, que combina formigó amb reforç intern de barres d'acer. Font [1]

La fabricació additiva és un conjunt de tecnologies de fabricació consistents en l'addició de material. Una de les més comunes i conegudes, i la que es farà servir en aquest projecte, és la impressió 3D o el *Fused Deposition Modeling* (FDM) que consisteix a dipositar material, normalment polímers, capa a capa. Per altra banda, també hi ha altres tecnologies que fan ús de làsers com és el cas del *Selective Laser Sintering* (SLS) o l'*Stereolithography* (SLA).

Actualment, no existeixen assajos específicament dissenyats per peces fabricades mitjançant AM. Per la qual cosa, s'adapten o modifiquen assajos ja existents de materials metàl·lics o polimèrics.

Les problemàtiques principals es detallaran a la secció 2.

2. Estat de l'art / Recerca prèvia:

2.1. Fabricació additiva i geometries bioinspirades.

Es coneixen com a geometries bioinspirades a aquelles que imiten o repliquen les estructures de materials biològics, tals com poden ser el nacre dels mol·luscs o la queratina dels cascs dels cavalls. A la taula 4, es mostren diferents tipus d'estructures biològiques.

El més interessant d'aquests materials i estructures són les propietats mecàniques que posseeixen [2]. El nacre, per exemple, es compon en un 95 % en massa de plaquetes de carbonat de calci (CaCO_3) i un 5 % de matrius toves de biopolímers, formant una mena d'estructura de blocs i morter, de l'anglès *brick and mortar* [2][3][4]. Això fa que el nacre presenti una resistència a la fractura i a l'impacte superiors als dels materials constituents. [5].

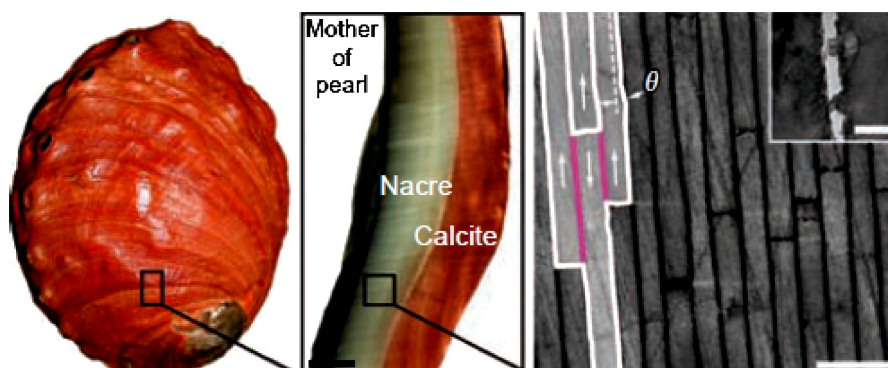
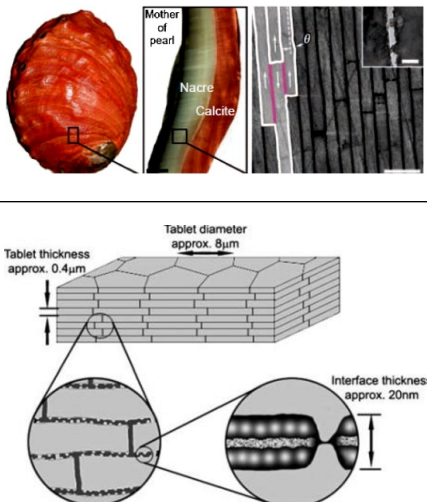
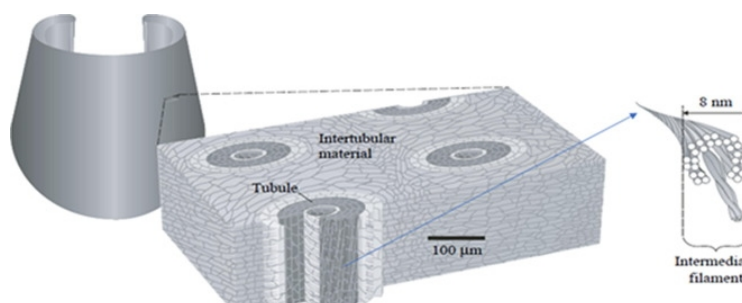


Figura 2: Jerarquia i microestructura d'una orel·la de mar.[2]

Bàsicament, tant el tipus de geometria que presenten com la combinació de materials amb característiques diferents, donen lloc a materials compostos amb propietats mecàniques superiors a les de les estructures monolítiques [4][5].

Taula 1: Exemples d'estructures biològiques

	Geometria	Dimensions	Materials i propietats de l'estructura
Orella de mar i nacre	 Figura 3: Microestructura del nacre[6]	Estructura multinivell. Disposició <i>Brick&Mortar</i> Plaquetes hexagonals disposades en làmines paral·leles contínues. Plaquetes d'aragonita: • 5-8 μm Ø • 0.5 μm de gruix. Capès orgànics: • 20-30 nm de gruix.	Multimaterial Les closques estan compostes per una capa exterior de calci i una de capa interior de nacre. Plaquetes d'aragonita o carbonat de calci (CaCO_3) i matrius toves de biopolímers (proteïnes i polisacàrids) La resistència és superior a la dels materials constituents. Permet dissipar una considerable quantitat d'energia.[2]
Casc de cavalls	Túbuls. Estructura laminada. Les cèl·lules formen plans de material intertubular, que estan orientats oblics als túbuls. Filaments de queratina.  Figura 4: Microestructura del casc[7]	Túbuls: • 40-100 μm Ø Filaments: Escala nanomètrica	Queratina Capacitat suportar de condicions d'impacte d'alt estrès absorbint l'energia.
Peülles de bòvids	Similars a les de cavall		Queratina

Actualment, un mètode utilitzat per a la producció d'aquest tipus d'estructures multimaterial és la fabricació additiva (AM), com pot ser FDM [4][8].

2.2. Problemàtica amb el disseny de geometries complexes.

Dissenyar determinades geometries complexes pot ser tediós si s'utilitza un programa CAD convencional, és a dir, interactius, a part que aquests són molt rígids a l'hora de modificar models ja existents. Els programes més habituals estan enfocats al modelatge d'objectes a partir de croquis o dibuixos en diferents vistes i, a partir d'elles, mitjançant diverses operacions, obtenir el disseny final. No estan enfocats a la definició d'aquests objectes des d'equacions o fórmules matemàtiques.

Si una geometria pot ser definida mitjançant funcions matemàtiques, aquesta pot ser modelada mitjançant l'ús de programes CAD paramètrics, com per exemple OpenSCAD.

Un programari de modelatge CAD paramètric, el que fa és generar les geometries a partir de condicions i paràmetres, cosa que permet que a posteriori es puguin modificar certes parts d'un model i que aquest s'adapti automàticament als canvis.

Solidworks per exemple permet definir cotes a partir de variables globals i funcions matemàtiques.

OpenSCAD, per altra banda, és més complex, ja que funciona com un compilador de codi amb el seu propi llenguatge de programació, amb el qual l'usuari defineix totes les variables, dimensions i operacions del modelatge. En aquest cas al contrari que en la resta de programes, la construcció del model es pot definir de manera holística.

2.3. Fabricació d'estructures multimaterial i materials compostos.

La idea de la fabricació multimaterial (MM) consisteix a produir estructures compostes per dos o més materials diferents i d'aquesta forma obtenir el que es coneix com a materials compostos o compòsits, *composites* en anglès. Aquests tipus de materials consistents en dos o més materials separats combinats en una estructura, se solen utilitzar perquè tenen propietats desitjables que no poden ser assolides per cap dels materials constituents actuant en solitari [10].

Un cas de materials compostos són els plàstics reforçats amb fibres (*fiber-reinforced plastic* en anglès), els quals consisteixen en una matriu polimèrica reforçada amb fibres. Alguns dels avantatges d'aquest tipus de materials són la combinació de baix pes i baixa densitat amb una alta resistència mecànica, resistència a la corrosió, etc. [11]

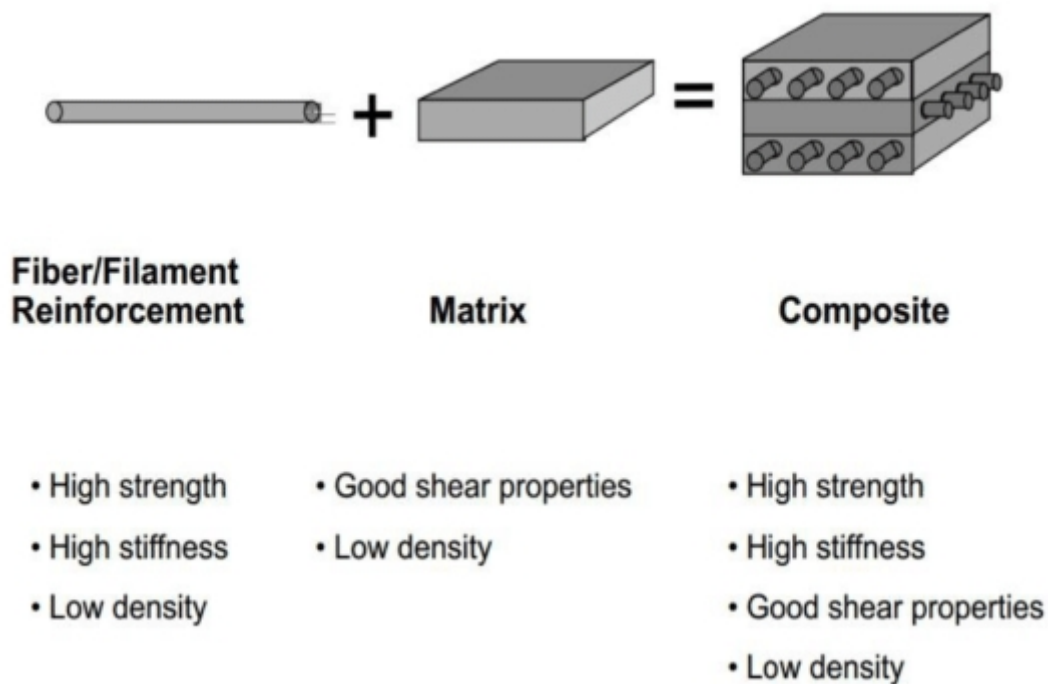


Figura 5: Esquema gràfic d'una estructura reforçada amb fibres. Font [12]

Un altre exemple de materials compostos són els panells o estructures sandvitx són un altre cas de materials compostos, els quals consisteixen en làmines externes separades per una estructura interna en forma de panell d'abella de resina o alumini, o amb foam [13]. Aquesta combinació de materials fa que aquests panells posseeixin una elevada rigidesa i força mentre presenten un pes reduït.

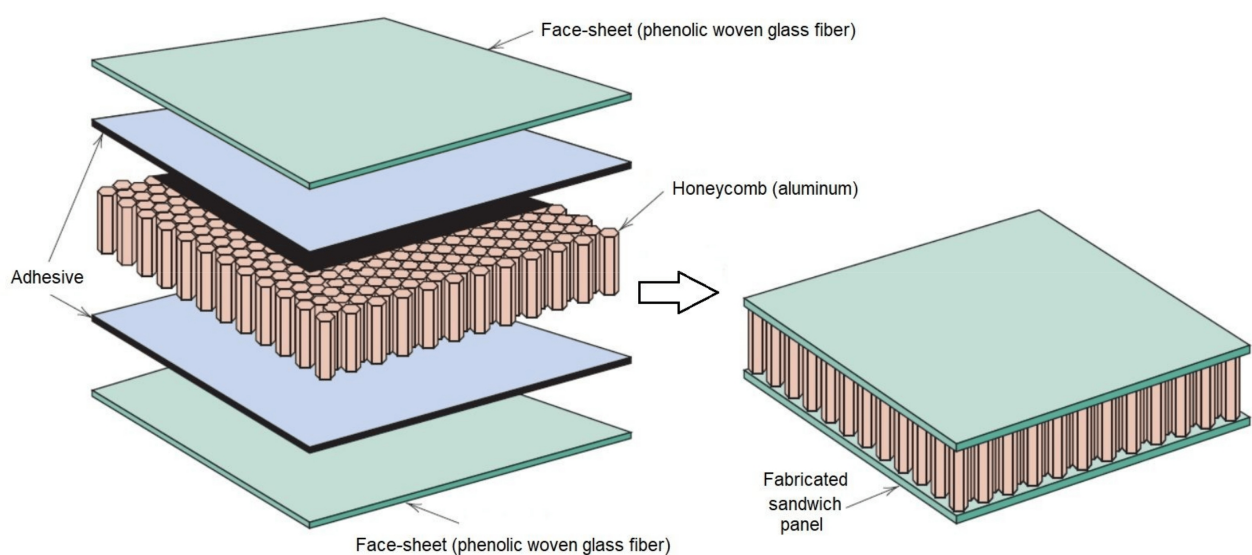


Figura 6: Esquema de l'estructura d'un panell sandvitx.[11]

Els compòsits són fets servir en la indústria aeroespacial, naval i de l'automoció entre d'altres. Per exemple, els plàstics reforçats amb fibres es fan servir en la fabricació d'aeronaus gràcies al seu baix pes i les propietats abans esmentades [10][11].

2.4. Problemàtica al voltant de la determinació d'algunes propietats mecàniques.

Fins al moment, no existeixen assajos normalitzats per determinar les propietats mecàniques de les estructures fabricades amb FDM. Les publicacions el que fan és adaptar les existents per materials polimèrics, en els millors dels casos, o metàl·lics, assajar provetes i materials obtinguts amb altres processos de fabricació, i la majoria d'estudis se centren en com la manera d'imprimir la peça varia en les propietats mecàniques que s'obtenen.

Per a la caracterització dels monomaterials que s'utilitzen en FDM se solen realitzar assajos de tracció a més de flexió i compressió. És el cas de Wu *et al.* [14] que va dur a terme un estudi comparatiu de les propietats mecàniques del PEEK i per l'ABS fent ús d'aquest tres tipus d'assajos.

Tanmateix, les propietats mecàniques dels materials individuals poden no ser del tot rellevants en el cas dels materials compostos on la geometria o el tipus d'estructura poden ser més determinants. Kim *et al.* [15] va observar que amb espècimens de PLA-ABS en una proporció del 50%, la resistència a la tracció variava considerablement depenent de l'estructura.

Altres assajos que es fan per comprovar les característiques dels compòsits són per exemple l'assaig de flexió de tres punts per avaluar la capacitat d'absorció d'energia dels espècimens [16]. O també hi ha assajos que tenen com a objectiu estudiar la resistència a l'impacte com poden ser el QSI o l'impacte de caiguda de pes, els quals s'expliquen a continuació.

2.5. Assaigs de caracterització relacionats amb impacte:

A continuació s'expliquen dos assajos d'impacte que s'utilitzen per avaluar la resistència al dany de compòsits consistents en plaques laminades polimèriques. Aquest són l'impacte de caiguda de pes i el QSI o indentació quasi-estàtica.

2.5.1. Impacte de caiguda de pes (*Drop weight impact*):

D'acord amb l'estàndard ASTM D7136/D7136M [17], aquest mètode d'assaig determina la resistència al dany de plaques laminades compostes de matriu polimèrica multidireccional (*multidirectional polymer matrix composite laminated plates* en anglès), subjectes a l'impacte provocat per la caiguda d'un pes. Els materials compostos estan limitats a materials compostos de matriu polimèrica reforçats per fibres contínues (en anglès, *continuous-fiber reinforced polymer matrix composites*).

L'assaig en qüestió es realitza sobre làmines planes rectangulars, sobre les quals s'impacta un pes d'impacte semiesfèric. La força de contacte es mesura mitjançant una cel·la de càrrega.

Per investigar la resistència a l'impacte a baixa velocitat, Ko *et al.* [4] va dur a terme un test el qual va anomenar *drop weight impact test*. Tot i que no es menciona l'estàndard seguit, per la descripció que fa de l'assaig, és molt possible que sigui l'ASTM D7136/D7136M. Aquest experiment consistia a deixar caure un impactador semiesfèric de 20 mm de diàmetres i 20,41 kg des d'una altura determinada i que impactes amb l'espècimen de prova a 3,13 m/s i es va fer amb provetes monolítiques de PLA, de PLA-TPU i PLA-nylon amb geometria voronoi (figura 7) inspirada en el nacre i construïdes mitjançant FDM.

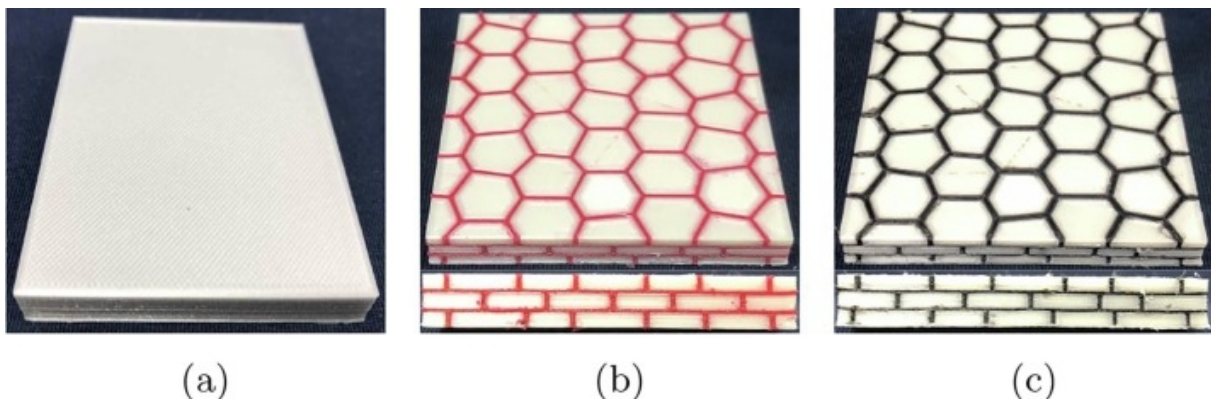


Figura 7: Diferents provetes que va fer servir Ko. a) PLA monolític, b) PLA-TPU, c) PLA-nylon. [4]

En el seu treball, van observar que els espècimens monolítics de PLA experimentaven falla per fractura fràgil i un col·lapse sobtat de l'estructura, resultant en la completa perforació de l'espècimen, indicant a més una limitada capacitat d'absorbir l'energia de l'impacte i dissipar-la. En canvi, les provetes compostes experimentaven un tipus diferent de falla, patint una desadhesió gradual dels materials, conjuntament amb una fractura parcial de les plaquetes i la deformació plàstica de les matrius, prevenint d'aquesta manera la completa perforació de l'estructura. A més, van comprovar que els espècimens multimaterial tenien una major capacitat per dissipar i absorbir l'energia de l'impacte.

També van constatar que augmentar la mida de les plaquetes, feia més probable que la fractura fràgil fos la principal causa de falla i incrementant la possibilitat de perforació de la proveta, degradant així la resistència a l'impacte del compòsit. En canvi, la capacitat d'absorbir i dissipar l'energia d'impacte augmentava a mesura que gruix de la matriu tova creixia, permeten la deformació plàstica sense fractura dúctil.

Finalment, van determinar que el material per la matriu requeria una alta ductilitat i bona adhesió amb el material rígid de les plaquetes, per a millorar la resistència d'impacte, per damunt d'una alta elasticitat i resistència de tracció.

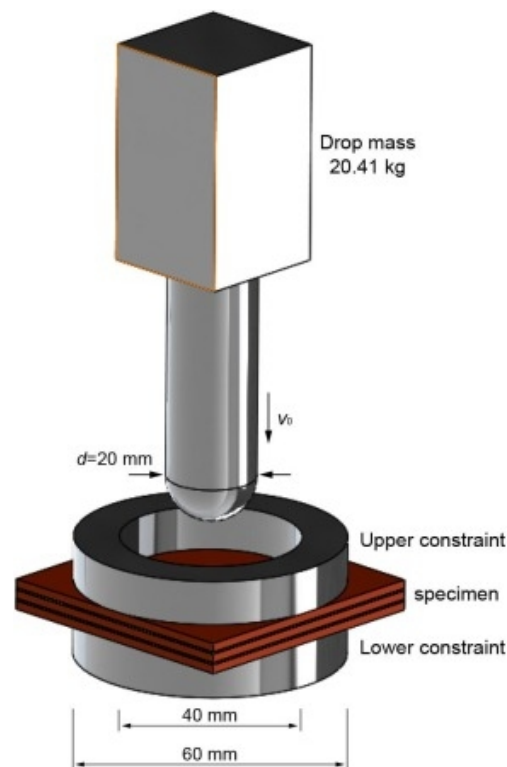


Figura 8: Esquema del drop weight impact test de Ko.[4]

Gu *et al.*[5] va realitzar un experiment molt similar al de Ko, que va anomenar *droptower impact testing*. També van constatar que els espècimens compostos amb estructura basada en el nacre exhibien un mode de falla diferent que els monomaterials i no experimentaven un col·lapse sobtat de l'estructura. Així i tot, no dona valors d'energia que puguin ser utilitzats per a comparar.

2.5.2. Indentació quasi-estàtica (*Quasi-static indentation, QSI*):

L'assaig QSI, d'acord amb l'estàndard ASTM D6264/D6264M-17 [19], serveix per determinar la resistència al dany de plaques laminades compostes de matriu polimèrica multidireccional (*multidirectional polymer matrix composite laminated plates* en anglès), sotmeses a una força concentrada d'indentació. Segons l'estàndard, els materials compostos es limiten a materials compostos de matriu polimèrica reforçada amb fibres contínues (*continuous-fiber reinforced polymer matrix composites* en anglès) però pot ser útil per altres classes de compòsits.

La prova consisteix a aplicar una força concentrada la qual s'aplica en pressionar lentament un indentador semiesfèric sobre una de les cares d'una proveta rectangular la qual es troba fixada en un suport circular.

El test QSI pot donar informació important sobre els esdeveniments de dany que ocorren durant un impacte a baixa velocitat, així com la seqüència i interaccions [25].

En el seu treball, Daniela Rico va realitzar assajos QSI, en aquests, va utilitzar un indentador semiesfèric d'acer de 12,7 mm de diàmetre i va subjectar l'espècimen de geometria voronoi de PLA-TPU mitjançant dues plaques cilíndriques amb un forat de 50 mm cada una [18]. El seu treball consta d'una part experimental i una altra part d'experimentació. En canvi, aquest treball se centra més en la parametrització de les estructures.

Islam *et al.*[7], també va fer servir ser aquest assaig sobre provetes de PLA creades per FDM. La forma de les provetes que es van fabricar en el seu treball, veure figura 9, són molt diferents de les que s'han imprès en aquest projecte, fent que els resultats no es puguin comparar.

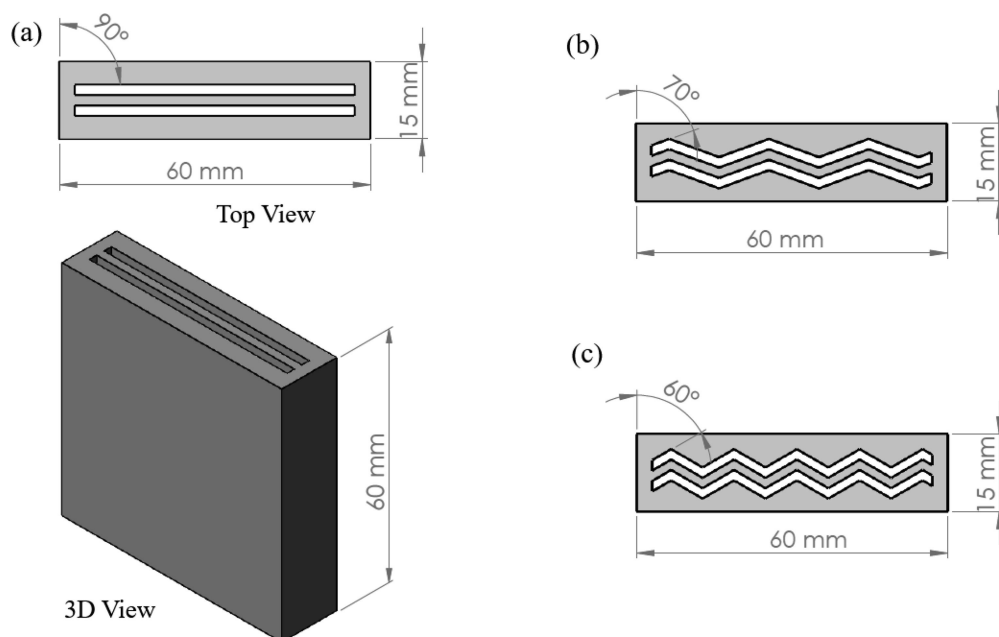


Figura 9: Dissenys de les provetes de Islam. Font [7]

3. Objecte del projecte:

L'objectiu principal del projecte és dissenyar mitjançant modelatge paramètric estructures *brick and mortar* i *honeycomb*, per posteriorment construir-les amb la tècnica de fabricació additiva FDM i assajar-les per tal de comprovar les propietats mecàniques d'aquestes estructures.

Un altre propòsit és millorar l'estratègia d'impressió mitjançant la creació d'un codi de Python per modificar els fitxers G-Code.

4. Metodologia:

4.1. Materials:

Per a la fabricació de les provetes, els materials que s'han fet servir són PLA black per les plaquetes i TPU 95A per les matrius de morter, ambdós són de la marca Ultimaker. El PLA, de l'anglès *polylactic acid*, és un material que es pot imprimir amb una alta precisió dimensional i un bon acabat superficial [20]. Per altra banda, el TPU 95A, de l'anglès *thermoplastic polyurethane*, és un material flexible ideal per aplicacions que demanden de les qualitats de la goma i plàstics [21].

En combinar aquests dos materials, s'espera que durant l'assaig de la proveta el material que treballi sigui el PLA, que gràcies a la seva rigidesa, la proveta presenti un comportament elàstic. Quan aquest material falli, ja sigui per la ruptura dels brics o perquè aquest se separi del morter, s'espera que el TPU prengui el relleu, fent que la proveta presenti un comportament plàstic.

La combinació de materials utilitzada ha estat anomenada en aquest treball com PLA-TPU, essent el primer material l'usat pels brics i el segon pel morter.

4.2. Geometries:

En el present projecte s'ha treballat amb estructures *brick and mortar* (BM) i *honeycomb* (HC).

4.2.1. Geometria BM:

Consisteix a ordenar plaquetes rectangulars, també anomenades *bricks*, seguint un patró ordenat. Aquest tipus d'estructures són comunes en el sector de la construcció i deuen el seu nom a les parets que es construeixen amb blocs els quals s'uneixen amb morter.

La diferència en el cas del present projecte resideix en què en lloc de ser una paret vertical, aquesta estructura es construeix en pla.

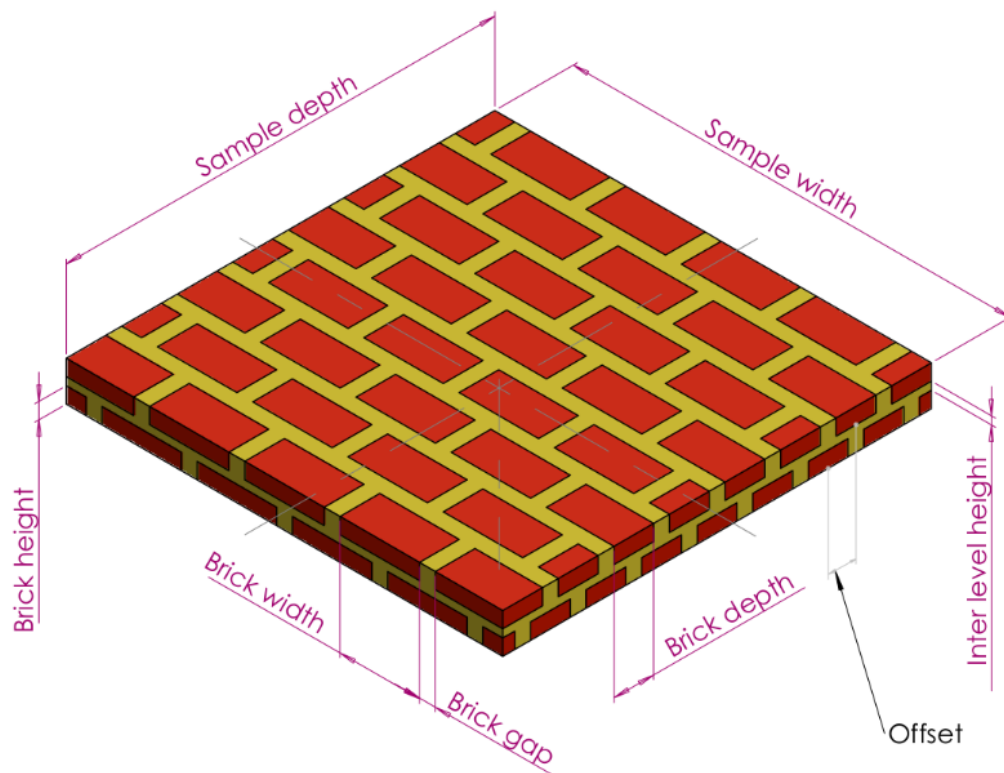


Figura 10: Taxonomia d'exemple d'una estructura Brick&Mortar.

Definició de paràmetres:

Els paràmetres són valors introduïts per l'usuari i s'utilitzen per a definir la geometria de l'estructura.

- **sample_width**: Longitud de la proveta en direcció X.
- **sample_depth**: Longitud de la proveta en direcció Y.
- **brick_width**: Longitud dels brics o plaquetes rectangulars en direcció X.
- **brick_depth**: Longitud dels brics o plaquetes rectangulars en direcció Y.
- **brick_height**: Alçada dels brics o plaquetes.
- **brick_gap** (intralaminar): Distància de separació de les plaquetes d'un mateix nivell.
- **interlevel_height** (interlaminar): Distància de separació entre nivells.
- **offset**: Desfasament en direcció Y de les plaquetes de nivells alterns. A causa que en OpenSCAD ja existeix una funció amb el mateix nom, aquest paràmetre és nomenat *off_set*.
- **levels**: Nombre de nivells.

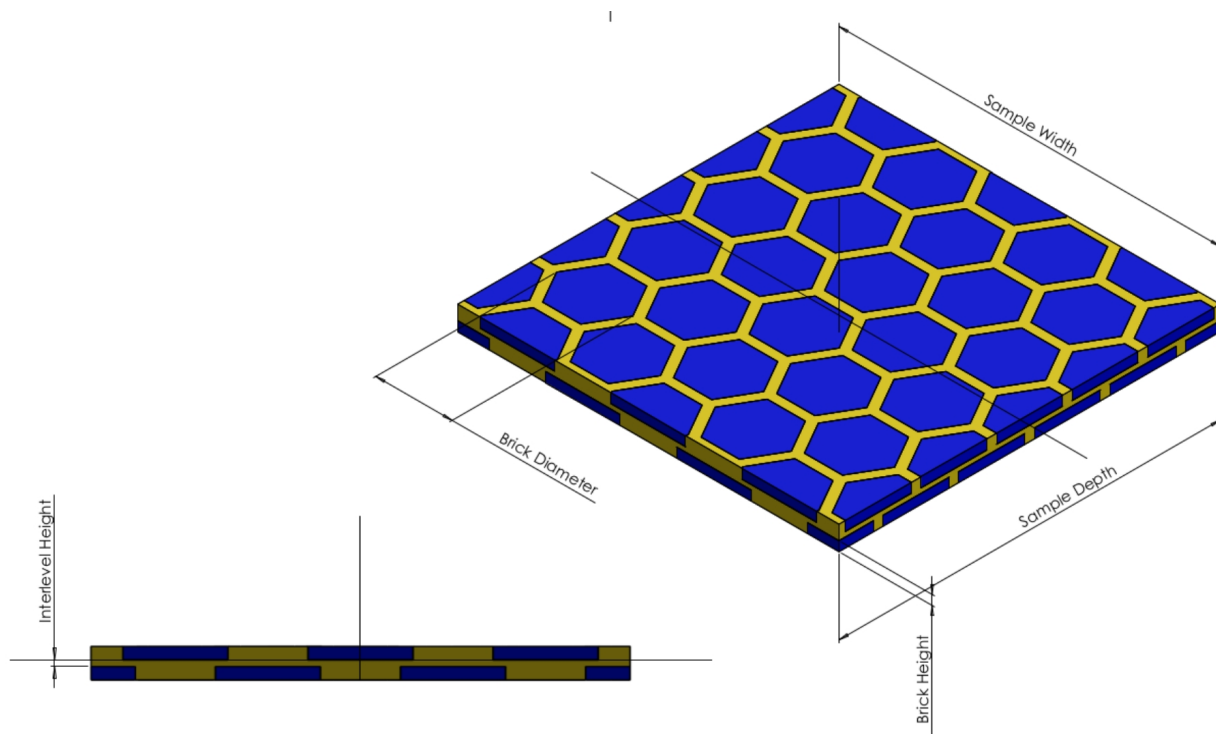
Definició de variables:

Les variables són valors que s'han definit per ajudar a dissenyar l'estructura, aquests valors no són introduïts per l'usuari, sinó que es calculen a partir dels paràmetres.

- **total_height:** Alçada total de la proveta, s'utilitza per definir l'alçada de la matriu de morter.
- **row:** Nombre de files de brics, aquesta variable serveix per a facilitar la distribució dels brics en l'estructura.
- **a:** Nombre de brics per filera, igual que l'anterior, serveix per a facilitar la distribució dels brics.

4.2.2. Geometria HC:

La geometria *honeycomb* es tracta d'una geometria formada per hexàgons regulars que emula la forma d'un rusc d'abelles. En moltes ocasions, les geometries hexagonals solen estar buides per dins, perquè l'objectiu és reduir el pes de l'estructura, com és el cas dels panells sandvitx. Això no obstant, en aquest projecte, les plaquetes hexagonals són massisses.



Definició de paràmetres:

Els paràmetres utilitzats per definir la geometria són els mateixos que s'han fet servir per a la geometria *brick and mortar*, amb l'excepció dels paràmetres *brick_width* i *brick_depth* els quals són reemplaçats pel paràmetre ***brick_diameter***.

El paràmetre *brick_diameter* defineix el diàmetre circumscrit dels hexàgons que conformen la geometria.

Definició de variables:

Les variables d'ajuda per utilitzades per a definir la geometria *honeycomb* són:

- ***total_height***: Alçada total de la proveta.
- ***r_ext***: Equival a la suma del radi circumscrit dels hexàgons més la meitat del *brick_gap*. Serveix per col·locar els hexàgons.
- ***columns***: Nombre de columnes d'hexàgons.
- ***rows***: Nombre de files d'hexàgons.

4.3. Assaig mecànic i provetes:

L'assaig que es durà a terme en aquest treball serà l'assaig QSI, el qual ja s'ha detallat anteriorment. Per altra banda, les provetes seran de planta quadrada de 80 mm de costat i de 5 mm d'alçada.

4.4 Equipament i programari:

4.4.1. Disseny de les provetes:

Les provetes descrites han estat dissenyades utilitzant el programari OpenSCAD, un programa de modelatge CAD paramètric de codi lliure i gratuït, el qual permet la creació d'estructures tant en 3D com en 2D.

OpenSCAD, el que fa és generar un model 3D a partir d'un *script* o codi en el qual es descriu l'objecte en qüestió. D'aquesta forma, l'usuari té un control total sobre el procés de modelatge i permet realitzar canvis en qualsevol punt del procés i crear dissenys definits per paràmetres configurables [9]. Permetent per exemple, modificar les dimensions de certes parts d'un model i que aquest s'adapti als canvis.

OpenSCAD permet exportar els sòlids creats a documents en formats DXF, OFF i STL.

4.4.2. Fabricació de les provetes:

Per al tractament dels fitxers STL i la seva conversió en arxius GCODE, s'ha fet servir el *software* de *slicer* UltiMaker Cura en la seva versió 5.3.1 [23]. Amb aquest programa s'han definit els paràmetres d'impressió utilitzats per a la fabricació de les provetes.

Pel que fa al procés de creació de les provetes, aquest s'ha realitzat fent ús d'una impressora Ultimaker 3 que fa servir la tecnologia de fabricació additiva FDM, de l'anglès *Fused depositon modeling*.

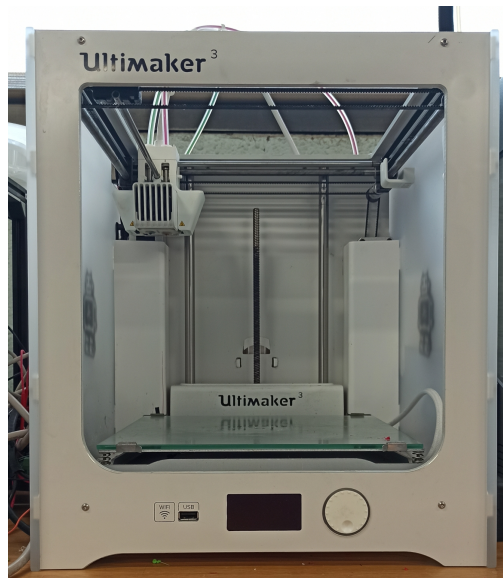


Figura 11: Impressora Ultimaker 3

4.4.3. Caracterització de les provetes:

Per a realitzar l'assaig QSI s'ha utilitzat una màquina MTS *Insight Electromechanical*, equipada amb una cel·la de càrrega de 5 kN amb un punxó semiesfèric de 13 mm de diàmetre.

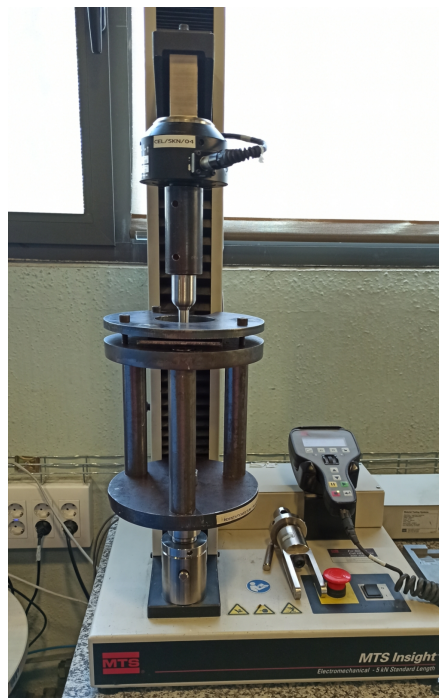


Figura 12: Fotografia de la MTS *Insight Electromechanical* utilitzada.

4.4.4. Microscopi òptic:

Per tal de comprovar la qualitat d'impressió del filament de les provetes, s'ha fet servir un microscopi òptic *Nikon SMZ745T*.



Figura 13: Microscopi Nikon SMZ745T

5. Modelització paramètrica

La finalitat d'aquesta secció és exposar el procés de modelatge de les estructures dissenyades en el projecte. D'aquestes s'ha seleccionat les més rellevants per a la seva fabricació i posterior assaig que ens permeti entendre el seu comportament.

5.1. Brick and mortar

5.1.1. Diagrames de flux per definir la geometria:

A causa de com funciona del programa OpenScad, s'ha decidit dissenyar la geometria *brick and mortar* per mòduls. En total s'han creat un total de tres mòduls, *Mortar*, *BrickStructure* i *BrickLevel*; on cada un d'ells té una funció diferent.

A0: Definició general de l'estructura Brick&Mortar:

L'script comença llegint els paràmetres que defineixen l'estructura *brick and mortar*. Tot seguit, el que fa és modelar l'estructura de brics definida pel mòdul *BrickStructure*, per a continuació modelar l'estructura definida pel mòdul *Mortar*.

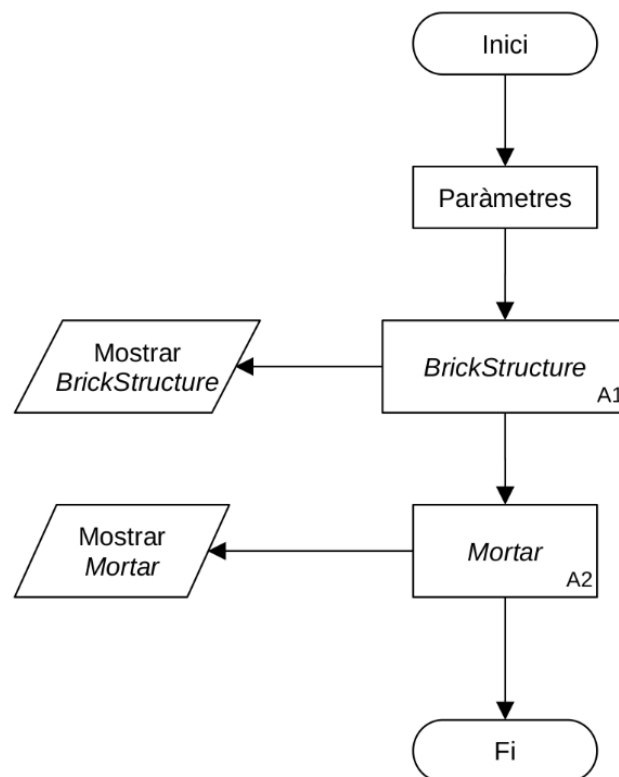


Figura 14: Diagrama de flux general del modelatge de l'estructura Brick and Mortar.

A1: Definició del mòdul *BrickStructure*:

El mòdul *BrickStructure* el que fa és construir l'estructura de brics mitjançant la col·locació dels nivells de brics, definits pel mòdul *BrickLevel* (A1.1), l'un sobre l'altre.

El procés del mòdul comença llegint els paràmetres de disseny i seguidament, es defineix la variable *i* amb valor 0 i així iniciar un bucle, utilitzant el paràmetre *levels* com a condició de finalització. En cada iteració del bucle, es crea un nivell de brics a partir dels paràmetres de disseny i el trasllada en direcció Z una distància equivalent a la suma dels valors dels paràmetres *brick_height* i *interlevel_height* i proporcional al valor de la variable *i* per a cada iteració. Al final de cada iteració, el valor de *i* s'incrementa en 1.

El bucle finalitza quan el valor de *i* és igual o major al valor del paràmetre *levels*.

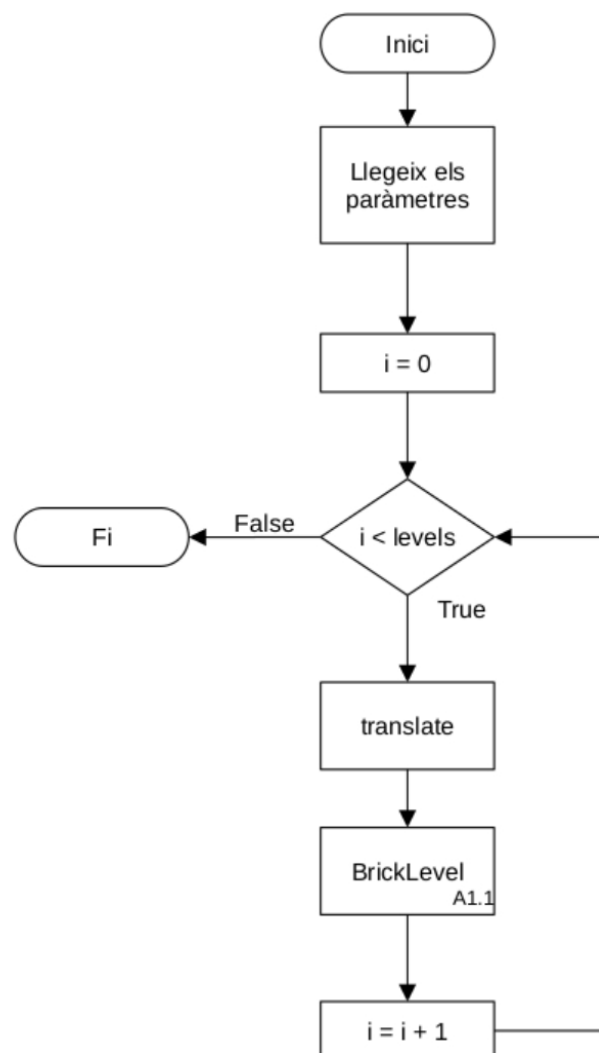


Figura 15: Diagrama de flux del mòdul *BrickStructure*.

El mòdul *BrickLevel* (A1.1), el qual s'explica a continuació, serveix per definir els nivells.

A1.1: Definició del mòdul *BrickLevel*:

El mòdul *BrickLevel* serveix per construir un nivell de blocs a partir dels paràmetres de disseny donats. Bàsicament, el que fa és col·locar els brics per files amb una distància de separació entre ells constants. El com s'ordenen les files variarà depenent si el paràmetre *levels* és un nombre parell o senar.

Tot i que teòricament és senzill, a causa de la quantitat de bucles i condicionals utilitzats per distribuir els blocs per files i nivells, el diagrama de flux del mòdul *BrickLevel* és molt extens. Aquest pot ser consultat a l'**Annex 8**.

A2: Definició del mòdul *Mortar*:

El mòdul *Mortar* comença llegint els paràmetres de dissenys, a continuació, calcula l'alçada total que haurà de tenir l'estructura de morter, mitjançant la fórmula:

$$total_height = (brick_height + interlevel_height) \cdot levels - interlevel_height \quad \text{Eq. 1}$$

A continuació, crea un cuboide de dimensions *sample_width*, *sample_depth* i *total_height* i el trasllada. Aquesta translació és una correcció necessària per facilitar el modelatge, ja que per defecte, OpenSCAD genera els cuboides a l'octant positiu.

Finalment, un cop el cuboide ha estat creat i desplaçat correctament, es resta l'espai haurien d'ocupar els brics. Per això, fent ús de la funció *difference* d'OpenSCAD, es buida l'espai que coincideix amb l'ocupat pel mòdul *BrickStructure*. Així, d'aquesta forma, s'obté l'estructura de morter que s'encarrega d'unir els brics.

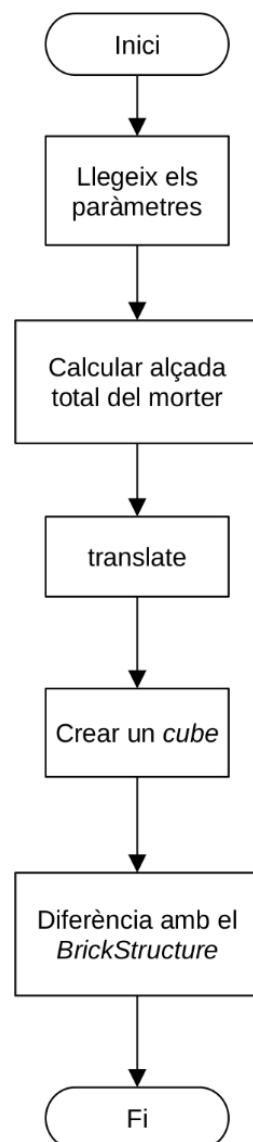


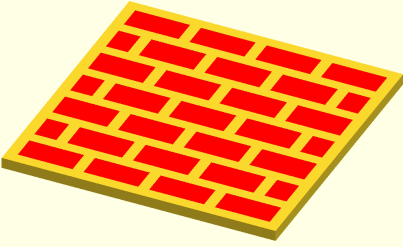
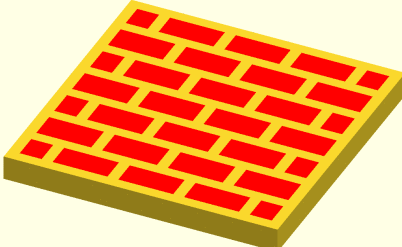
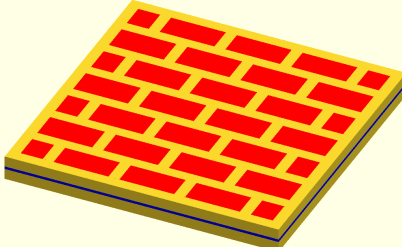
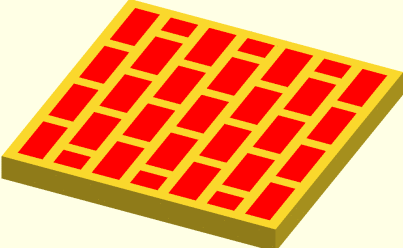
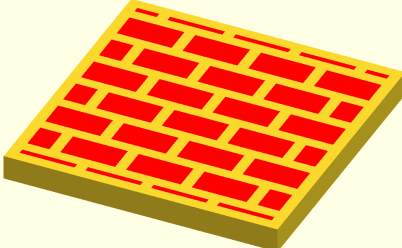
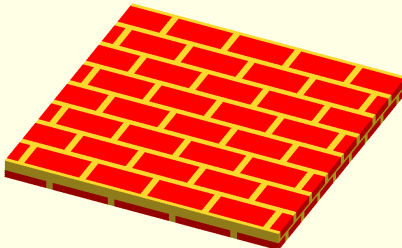
Figura 16: Diagrama de flux del mòdul Mortar.

5.1.2. Versions del programa:

Al llarg del projecte, s'han desenvolupat diverses versions del codi que defineix l'estructura *Brick and Mortar*. En total s'han creat sis versions diferents, veure taula 2, essent la sisena, la versió definitiva.

Aquestes versions són diferents propostes que s'han realitzat sobre com hauria de ser l'estructura de la proveta.

Taula 2: Versions del modelatge brick and mortar.

V1	V2	V3
		
V4	V5	V6
		

A l'Annex 3 s'explica de manera més detallada cadascuna de les versions.

Pel que respecte a la relació entre les diferents versions del model i la seva evolució, aquesta és mostra a la figura 17.

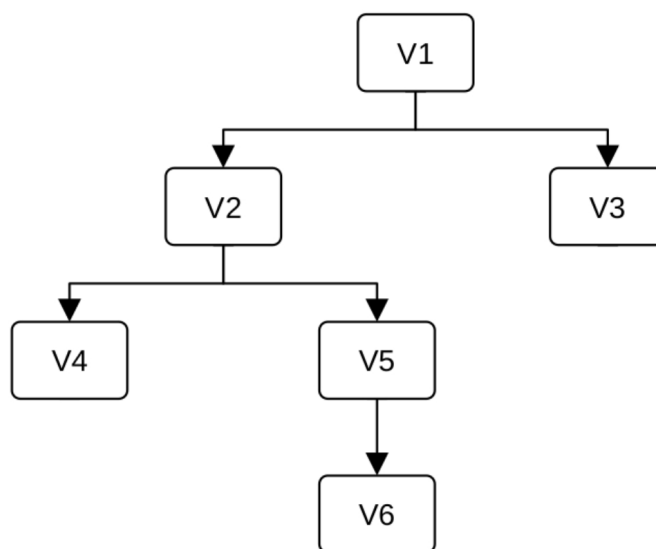


Figura 17: Esquema de la relació entre les diferents versions del model.

5.2. Honeycomb:

5.2.1. Descripció del programa:

L'script creat que genera la geometria *honeycomb* funciona de manera molt similar al creat per definir la geometria *brick and mortar*. Modificant la forma de com es construeixen els nivells de plaquetes.

Els mòduls creats per aquesta geometria són el mòdul *Mortar*, *HexagonStructure*, *HexagonLevel*.

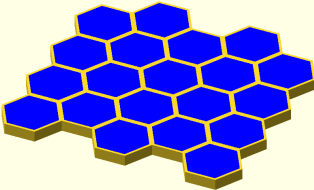
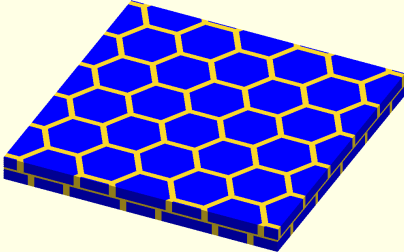
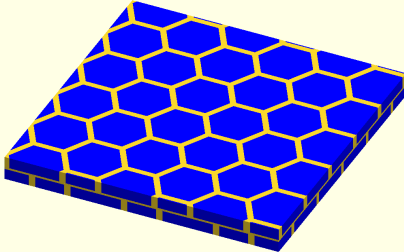
Els dos primers funcionen exactament igual que els mòduls *Mortar* i *BrickStructure* del *brick and mortar* i no s'explicaran. Per altra banda, la construcció del mòdul *HexagonLevel* és similar a la del mòdul *BrickLevel*, però no igual, per aquest motiu, s'ha dibuixat un diagrama de flux per poder entendre millor el seu funcionament.

Els hexàgons són en realitat cilindres de 6 costats.

5.2.2. Versions del programa:

Igual que en el *brick and mortar*, pel disseny de la geometria *honeycomb* s'han creat un total de tres versions diferents, les quals es mostren en la següent taula 3.

Taula 3: Versions del modelatge honeycomb.

V1	V2	V3
		

La versió que finalment s'ha escollit és la segona.

Tota aquesta informació es troba més detallada en l'**Annex 9**.

6. Procediment experimental:

Abans de començar a imprimir els espècimens, és important acabar de definir les dimensions de la proveta com el *brick depth*, el *brick gap* o el *brick height* entre altres, i també establir els paràmetres d'impressió que s'han d'utilitzar.

6.1. Configuració de la geometria experimental:

Inicialment, es va fer un estudi per definir el nombre de capes que haurien de tenir les provetes per intentar garantir la màxima qualitat d'impressió possible, entre altres coses.

D'aquest estudi, es van extreure el número de capes de filaments que haurien de tenir les diferents parts de l'estructura (làmina internivell i brics), d'acord amb les dimensions desitjades.

Dimensions de la proveta (capes per la impressió):

- Definició de les dimensions de la proveta: longituds dels costats, alçada total de la proveta, nombre de nivells i internivells.
- Per tal d'assegurar la qualitat de la impressió, és important que tants els nivells de plaquetes i els internivells de morter estiguin formats per capes de filament enteres.
- El tipus d'extrusor utilitzat és un *nozzle* de 0,4 mm i, per tant, l'alçada de les capes de filament seleccionada és de 0,2 mm.
- A partir de les dimensions de la proveta establertes i de l'alçada de capa escollida, es va seleccionar la combinació de morter i brics que dona capes enteres. De forma que la configuració final de la proveta queda de la següent forma:
 - *Sample_width*: Amplada de la proveta, equival a *sample_width*, serà de 80 mm.
 - *Sample_depth*: Llarg de la proveta, equival a *sample_depth*, serà de 80 mm.
 - *Height*: Alçada de la proveta, equival a *total_height*, serà de 5 mm.
 - *Level number*: Número de nivells, equival a *levels*, hi haurà un total de 3 nivells.
 - *Interlevel number*: Quantitat d'internivells de morter, seran un total de 2 internivells.
 - *Layer height*: Alçada d'una capa de filament, seran 0,2 mm.
 - *Interlevel layers*: Nombre de capes de filament que componen un *interlevel*.
 - *Interlevel height*: Alçada de l'internivell.
 - *Level height*: Alçada d'un nivell, equival a *brick_height*.
 - *Level layers*: Quantitat de capes de filament per nivell.
- Amb tot, s'ha comprovat en un full de càlcul que el nombre de capes a l'*interlevel* haurà de ser de 2, implicant d'aquesta forma una alçada de 0,4 mm. Condicionant al mateix temps

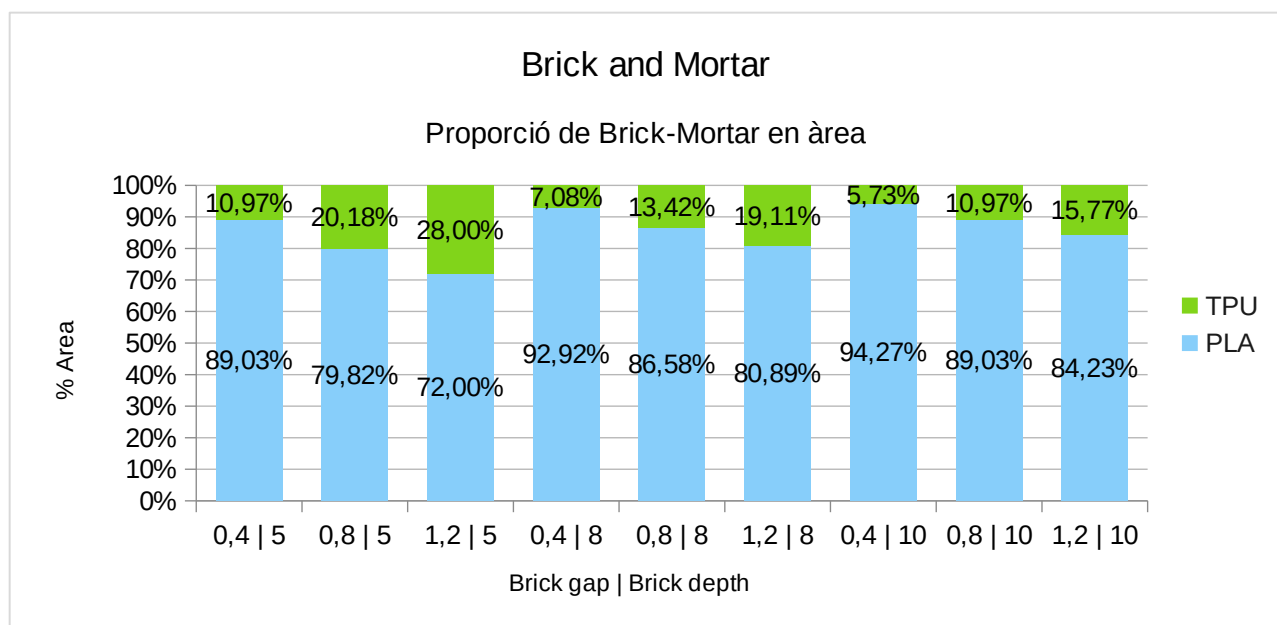
que l'alçada de les plaquetes sigui d'1,4 mm i que seran formades per 7 capes de filament per nivell. L'alçada total serà de 5 mm.

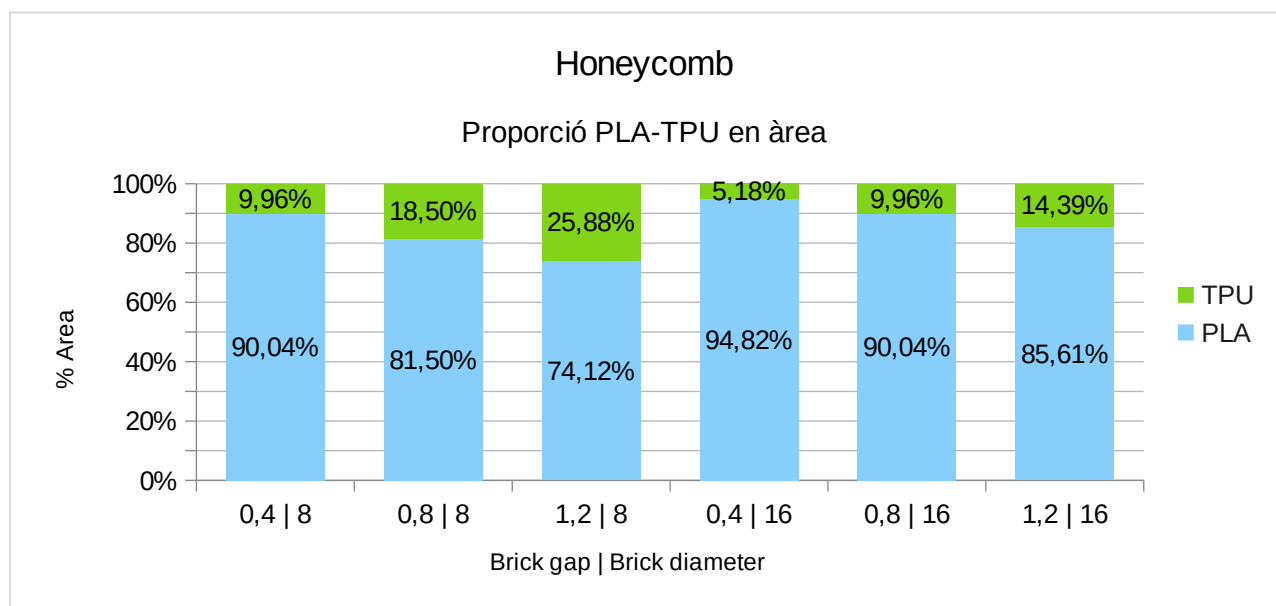
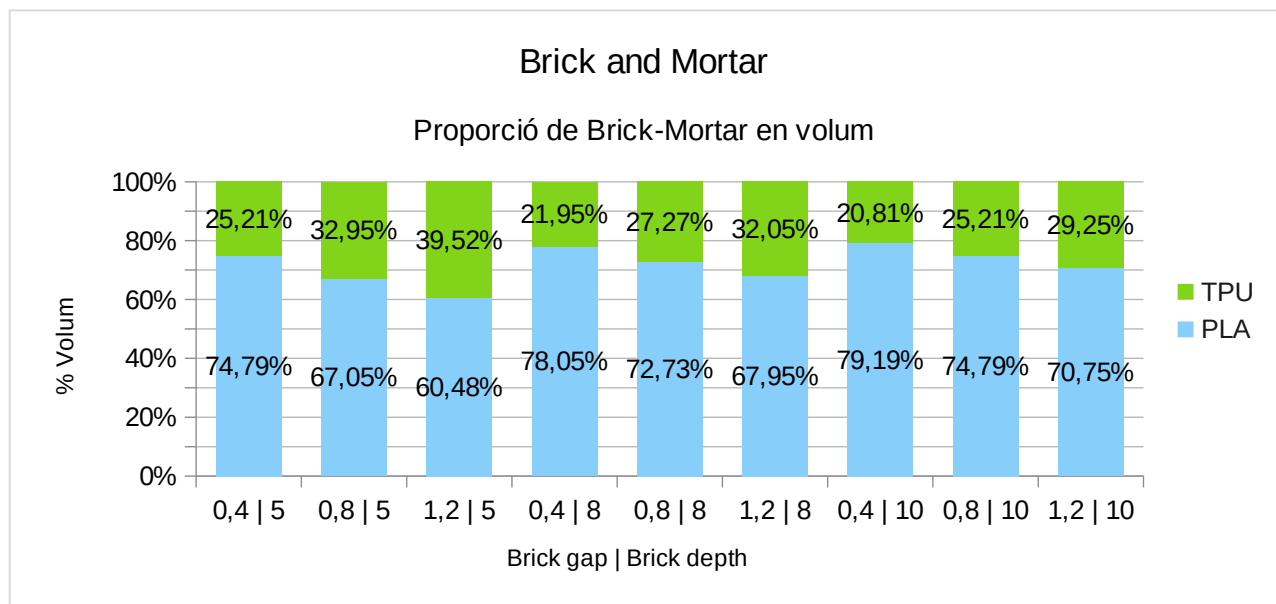
6.2. Disseny d'experiments:

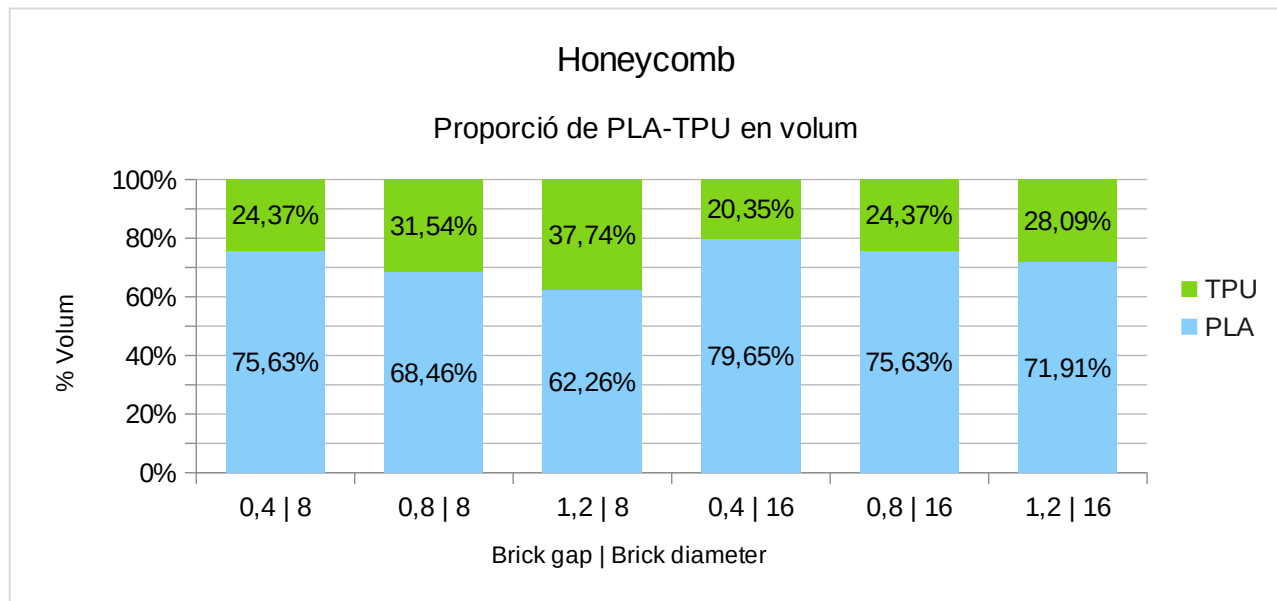
En fixar les dimensions dels costats, l'alçada total i el nombre de nivells, resten per definir les dimensions de les plaquetes i la separació entre elles. Així, és important acabar de definir els paràmetres *brick_depth*, *brick_width*, *brick_gap*, etc. Aquests valors condicionen les concentracions de PLA i TPU de les provetes, afectant d'aquesta forma les propietats mecàniques d'aquestes.

Per aquest motiu, s'ha considerat rellevant conèixer les proporcions dels materials dels espècimens i com varien amb els valors dels paràmetres esmentats.

- Es vol saber les proporcions de material amb relació a l'àrea en la superfície i al volum de la proveta.
- Es proven diferents valors de *brick_gap*, *brick_depth* (brick and mortar) i *brick_diameter* (*honeycomb*), considerant que el *brick_width* serà sempre el doble que el *brick_depth*.
- Per les diferents configuracions dels paràmetres de disseny, es calculen les proporcions de materials en àrea i volum i es representen gràficament.
- Amb els resultats obtinguts, es decideixen quines són les configuracions més interessants per assajar i comparar entre elles.







En vista dels resultats obtinguts s'ha decidit que les provetes que es fabricaran per assajar seran:

- Per **Brick and mortar** s'utilitzaran les provetes amb *brick_depth* de 5 mm, 8 mm i 10 mm i amb *brick_gap* de 0,4 mm i 1,2 mm (originalment, el volia utilitzar un *gap* de 0,2 mm i no de 0,4 mm).
- Per **Honeycomb**, les provetes tindran un *brick_diameter* de 16 mm i amb valors de *brick_gap* de 0,4 mm i 1,2 mm. Aquestes provetes també es compararan amb les de *brick_depth* de 10 mm, en ser la superfície dels brics molt similar i comprovar així la influència que pot tenir la forma de les plaquetes en les propietats mecàniques.

A la taula 4 a sota, es recullen les proporcions tant en àrea com en volum dels materials de les provetes.

Taula 4: Taula amb les proporcions dels materials en volum i superfície de les provetes.

Proveta	% en àrea		% en volum	
	PLA	TPU	PLA	TPU
BM-05-04	89,03 %	10,97 %	74,79 %	25,21 %
BM-05-12	72 %	28 %	60,48 %	39,52 %
BM-08-04	92,92 %	7,08 %	78,05 %	21,95 %
BM-08-12	80,89 %	19,11 %	67,95 %	32,05 %
BM-10-04	94,27 %	5,73 %	79,19 %	20,81 %
BM-10-12	84,23 %	15,77 %	70,75 %	29,25 %
HC-16-04	94,82 %	5,18 %	79,65 %	20,35 %
HC-16-12	85,61 %	14,39 %	71,91 %	28,09 %

6.3. Paràmetres de procés:

A la Taula 5 que es troba a continuació es mostren els paràmetres d'impressió que s'han utilitzat en la fabricació de les provetes.

Taula 5: Paràmetres d'impressió de les provetes.

Material	PLA	TPU
Printing temperature	210 °C	225 °C
Printing speed	20 mm/s	10 mm/s
Layer height	0,2 mm	0,2 mm
Flow rate	106 %	106 %
Bed temperature	60 °C	60 °C
Infill Density	105 %	105 %
Infill pattern	0, 45, 90, -45	0, 45, 90, -45
Raster angle	Variable	Variable
Top layer	0	0
Bottom layer	0	0
Wall line count	0	0
Line width	0,4 mm	0,4 mm

7. Resultats de fabricació:

En aquest apartat es recullen les diferents impressions que es van realitzar, des de les primeres impressions de prova per comprovar la geometria, les proves per decidir els paràmetres fins a la fabricació de les provetes finals per assajar.

7.1. Primeres proves:

Les primeres provetes de les geometries *brick and mortar* i *honeycomb* produïdes en el transcurs del treball, es van realitzar amb la intenció de comprovar quins eren els millors materials més adequats i el com quedarien aquestes estructures.

A l'**Annex 1** es desenvolupa de forma molt més detallada, tant de BM com HC, el que ara exposem de forma resumida.

7.1.1. *Brick and Mortar*:

Després de dissenyar la primera versió del *brick and mortar*, es van fer diverses impressions que tenien com a objectius validar la viabilitat de l'estructura i determinar quins serien els millors materials per a la seva fabricació.

Les combinacions de materials que es van utilitzar per a les proves foren PCL-PLA, PLA-PLA, TPU-PLA i PLA-TPU. A sota es mostra una taula amb les imatges de les impressions de prova.



Figura 18: Probeta de prova PCL-PLA, d'un únic nivell.

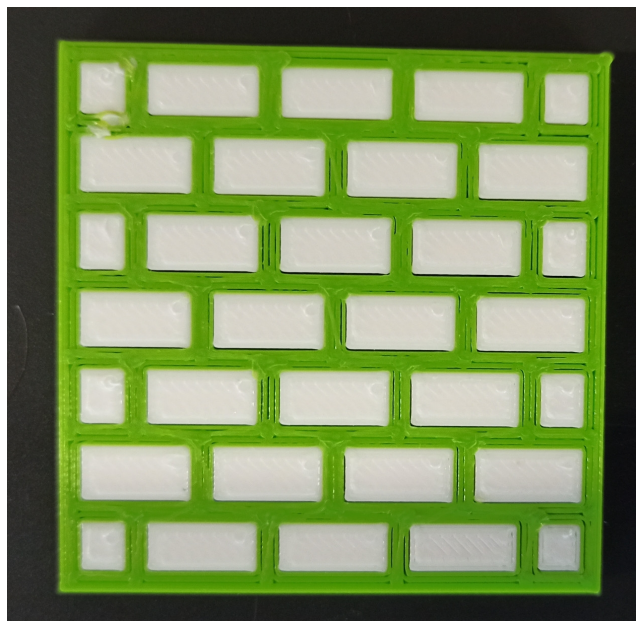


Figura 19: Probeta de prova PLA-PLA, de dos nivells.

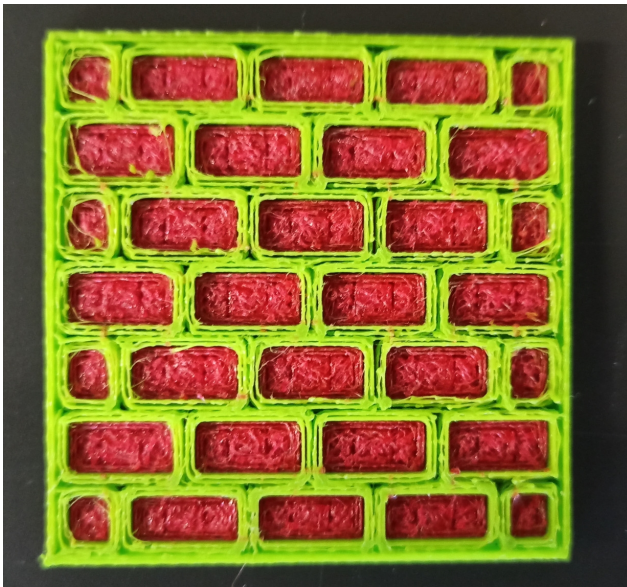


Figura 20: Proveta de prova TPU-PLA, de dos nivells.

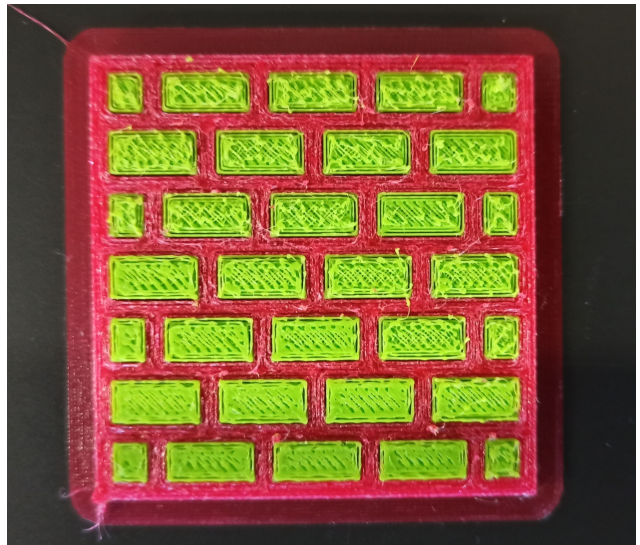


Figura 21: Proveta de prova PLA-TPU, de dos nivells.

D'aquestes prova, es va escollir la combinació de PLA-TPU.

Posteriorment, es van realitzar proves amb una làmina de morter entre els diferents nivells de blocs, la primera d'aquestes, figura 22, va sortir malament, a causa del fet que el PLA del segon nivell no es va adherir correctament a la capa de TPU. Però aquest problema no va aparèixer a dues proves que es van fer immediatament després on únicament es va modificar la temperatura d'impressió del PLA, figura 23. Com a curiositat, aquestes provetes es varen fer amb planta circular.

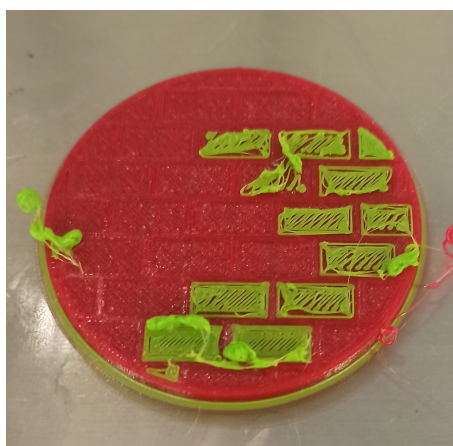


Figura 22: Primera prova amb làmina entre nivells. Es pot observar la mala adherència del PLA al TPU.



Figura 23: Proves d'impressió amb làmina entre nivells. No va haver-hi cap problema d'adherència entre els materials.

Temps després, durant l'impressió de les provetes finals, va tornar a sorgir aquest inconvenient de l'adhesió entre ambdós materials. Es va descobrir que aquest fet era més comú amb el PLA verd que amb el PLA de color negre, tot i que ambdós fossin de la mateixa marca, Ultimaker, i tinguessin les mateixes especificacions. Probablement la causa fos l'additiu de color.

Es va descobrir que amb el PLA negre no sorgia aquest inconvenient perquè en les proves d'*infill* es van fer amb aquest material i amb làmines internivell de TPU.

Per aquest motiu, les provetes finals es van fabricar amb PLA negre i no verd.

7.1.2. Honeycomb:

Igual que amb les provetes *brick and mortar*, també s'han imprès provetes de *honeycomb* de prova. En total dues, una de la versió 1 i una altra de la versió 3, figures 24 i 25. Com que les proves de material ja es van realitzar amb el *brick and mortar*, aquestes proves se'n van imprimir ja amb la combinació de materials final, la de PLA-TPU.

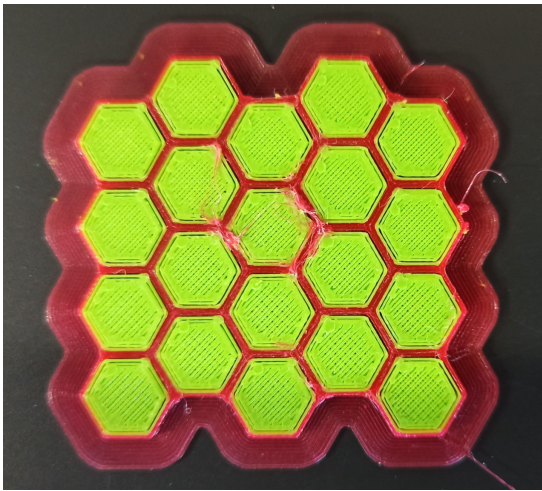


Figura 24: Prova d'impressió de la versió 1.

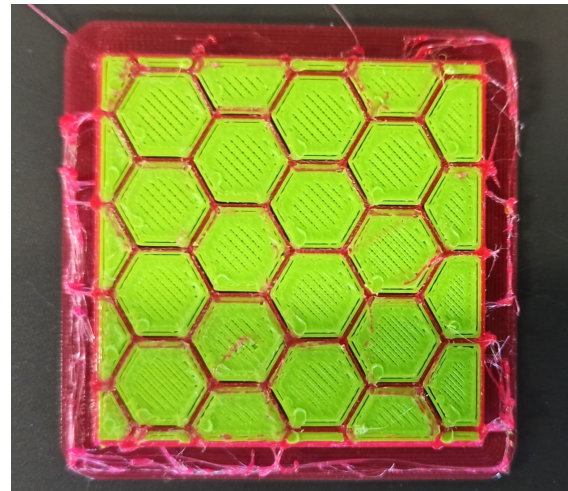


Figura 25: Prova d'impressió de la versió 3, dos nivells.

7.2. Proves de infill:

Les primeres impressions van servir per determinar els materials a utilitzar i fer-se amb una idea general sobre quins haurien de ser els paràmetres d'impressió. Amb tot, es va considerar que el paràmetre *infill density* podria ser d'especial interès per a la qualitat de la impressió.

D'acord amb la informació d'Ultimaker, aquest paràmetre configura la densitat del volum a dintre de la impressió, el qual és un element important per a la força de la impressió final com també per a la qualitat superficial de la capa superior. Com més gran sigui la densitat, més propers estaran els filaments [22].

Així, es van produir tres provetes amb diferents valors de *infill density* del 100 %, 105 % i 110 % i una quarta proveta amb una densitat del 105 % però sense murs de filaments als brics.

Un cop fabricades les provetes, es va utilitzar un micròmetre per a mesurar l'alçada de la proveta tant en les seccions de PLA com a les de TPU i comprovar si s'ajustava al valor teòric. Amb una idea semblant, es va fer servir el microscopi òptic, el qual es va usar per analitzar l'estat dels filaments de la capa superior, comprovar l'adhesió entre el PLA i el TPU i mesurar el gruix dels filaments de TPU. A la figura 26 es mostra un exemple d'aquestes mesures.

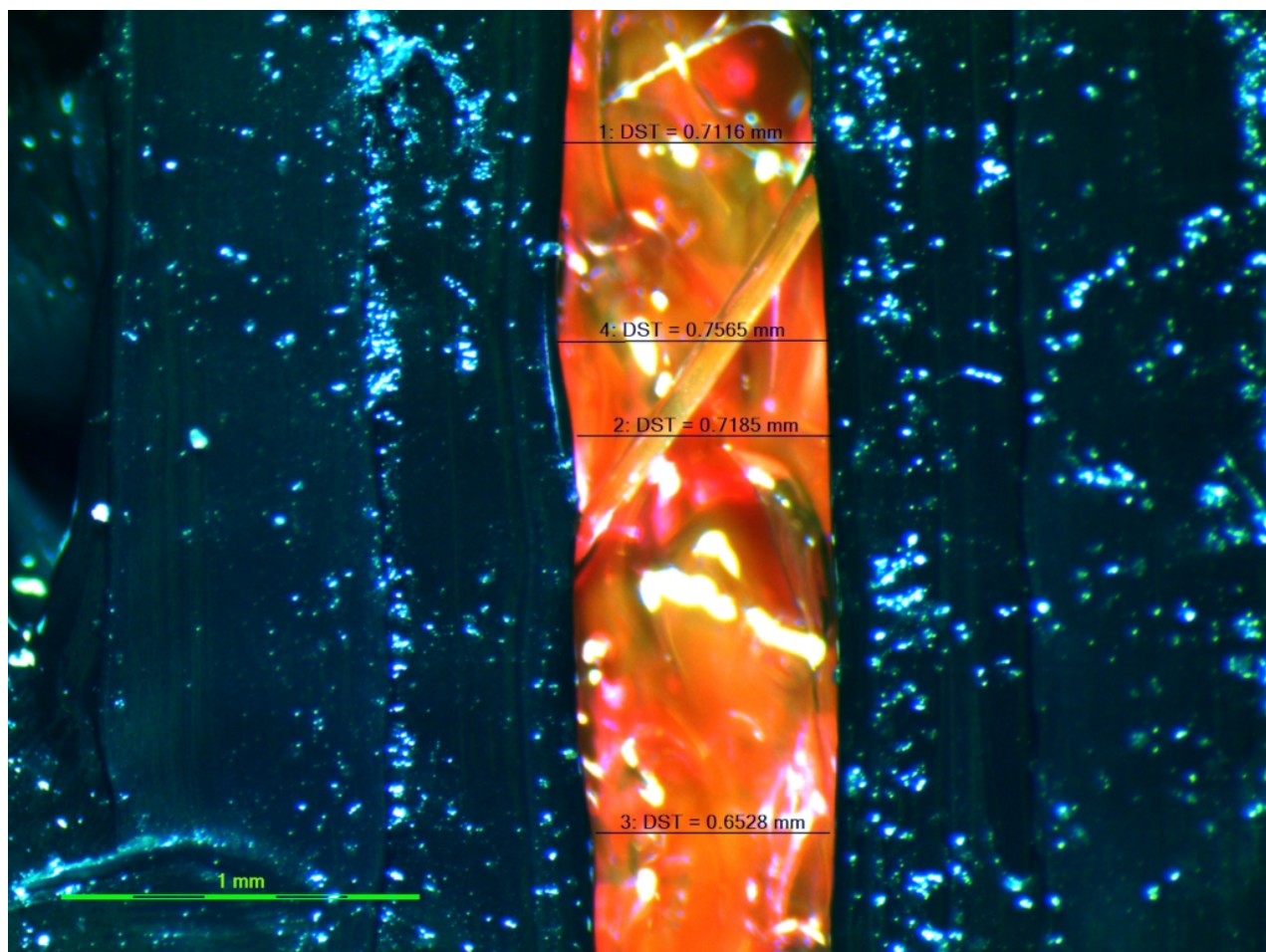


Figura 26: Fotografia de la proveta de prova amb un infill del 100 % realitzada amb el microscopi. Es poden veure les mesures realitzades al filament de TPU.

Tant les mesures del gruix del morter com d'alçada de les provetes han estat recollits en les taules 6 i respectivament, i es van calcular tant la mitjana com la desviació estàndard, per tal d'ajudar a decidir quins valors escollir.

Taula 6: Mesures dels gruixos del brick gap.

	Infill 100%			Infill 105%			Infill 110%			Infill 105% no wall		
	Tot	TPU	PLA	Tot	TPU	PLA	Tot	TPU	PLA	Tot	TPU	PLA
Mitjana	5,119	5,174	5,065	5,068	5,123	5,014	5,188	5,229	5,148	5,069	5,081	5,056
Error mitjana	0,119	0,174	0,064	0,068	0,123	0,014	0,188	0,229	0,148	0,069	0,081	0,056
Desviació estàndard	0,063	0,033	0,017	0,070	0,030	0,052	0,053	0,047	0,010	0,053	0,057	0,051
Dades		5,175	5,075		5,091	5,102		5,224	5,150		5,069	5,080
		5,156	5,060		5,144	4,973		5,275	5,161		5,153	4,995
		5,174	5,050		5,127	5,019		5,257	5,144		5,033	5,007
		5,211	5,094		5,081	5,039		5,184	5,141		5,004	5,114
		5,207	5,060		5,149	4,959		5,270	5,156		5,094	5,105
		5,123	5,048		5,145	4,990		5,161	5,135		5,132	5,036

Taula 7: Mesures de les alçades de les provetes.

Gruix	Infill 100%			Infill 105%			Infill 110%			Infill 105% no wall		
	Tot	H	V	Tot	H	V	Tot	H	V	Tot	H	V
Mitjana	0,6910	0,6966	0,6855	0,8551	0,8090	0,9012	0,7825	0,8321	0,7506	0,9244	0,9565	0,8924
Error mitjana	0,1090	0,1034	0,1145	0,0551	0,0090	0,1012	0,0175	0,0321	0,0494	0,1244	0,1565	0,0924
Desviació estàndard	0,0730	0,0751	0,0749	0,0651	0,0405	0,0508	0,0929	0,0517	0,1008	0,1684	0,1750	0,1625
Dades		0,7323	0,6287		0,8428	0,8048		0,8394	0,7772		0,9361	0,8117
		0,7185	0,7219		0,8497	0,9085		0,8359	0,8566		0,9361	0,7392
		0,5976	0,7807		0,8359	0,8636		0,7289	0,8048		0,7530	0,7876
		0,7288	0,7116		0,7737	0,9361		0,8463	0,9085		0,9603	0,7634
		0,7254	0,7565		0,7876	0,9085		0,8739	0,6839		1,1470	0,7254
		0,7599	0,6528		0,8221	0,9361		0,7634	0,6909		0,7496	0,7496
		0,5458	0,7219		0,7254	0,9361		0,8808	0,7565		0,8359	0,8705
		0,7668	0,5355		0,8359	0,9637		0,8670	0,8982		1,1810	0,9257
		0,6943	0,6598		0,8083	0,8532		0,8532	0,8256		0,8566	0,9223
									0,7392		1,0020	1,1050
									0,6701		1,3020	1,1610
									0,6045		0,8187	1,1470
									0,7047			
									0,5872			

Al final, després d'analitzar els resultats, es va decidir fer ús d'un valor de *infill density* del 105 % i sense murs.

Tot aquest procés està explicat de forma molt més detallada i completa en l'**Annex 2**.

7.3. Impressió provetes finals.

Un cop completades totes les proves anteriors i decidits els paràmetres d'impressió, es va procedir a imprimir les provetes finals. La idea inicial era fabricar tres provetes de cada tipus, però a causa del temps es va optar reduir-les a dues per tipus i si finalment era possible, imprimir una tercera.

També es va decidir utilitzar PLA verd, ja que acabava d'arribar un aprovisionament nou d'aquest material i no estava clar que el PLA negre que hi havia al GREP en aquell moment fos suficient.

La primera proveta, veure la figura 27, que es va imprimir tenia un *brick gap* de 0,2 mm i un *brick depth* de 5 mm, però sembla que aquest valor era massa petit i els filaments de TPU no es van adherir correctament. Tot i això, la proveta es va produir sense cap altre inconvenient. A més, en analitzar-la amb el microscopi, es va observar que el *brick gap* real en comptes de ser de 0,2 mm com s'havia planificat, era de 0,4 mm, per culpa del tipus d'extrusor. A conseqüència, es va optar per descartar la proveta en qüestió i augmentar el *brick gap* a 0,4 mm.

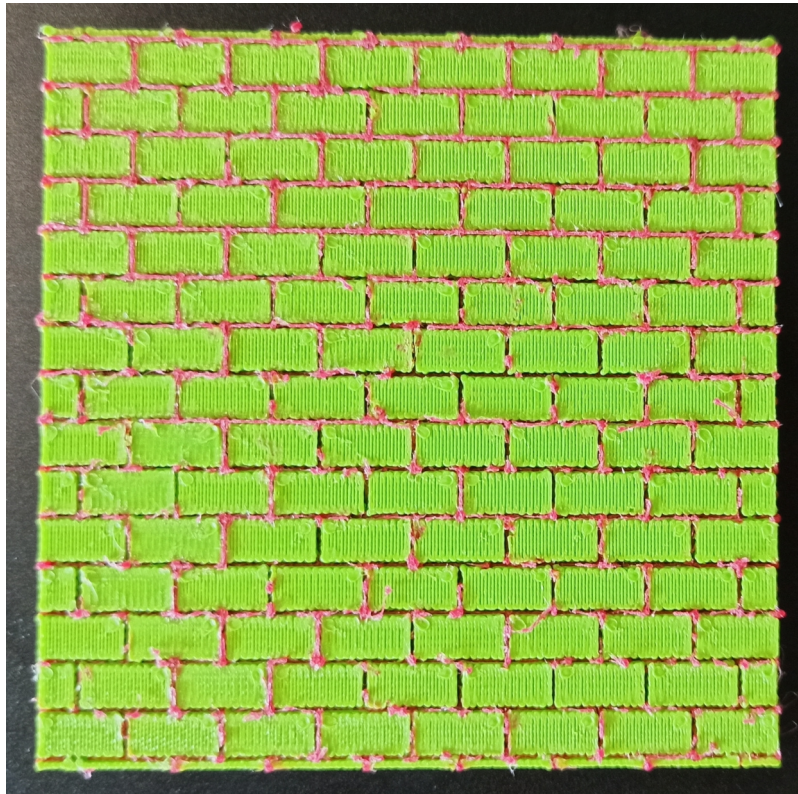


Figura 27: Primera proveta, es pot veure que el TPU no s'ha adherit correctament.

A partir d'aquí van començar les dificultats. Després d'aquesta primera proveta, es van imprimir quatre més, tres amb *brick gap* d'1,2 mm, figures 28, 29 i 30 i una amb *brick gap* de 0,4 mm, figura 31. I totes va sortir malament i presentaven el mateix problema, una falta d'adherència en imprimir el PLA sobre el TPU en començar amb el segon nivell de brics.

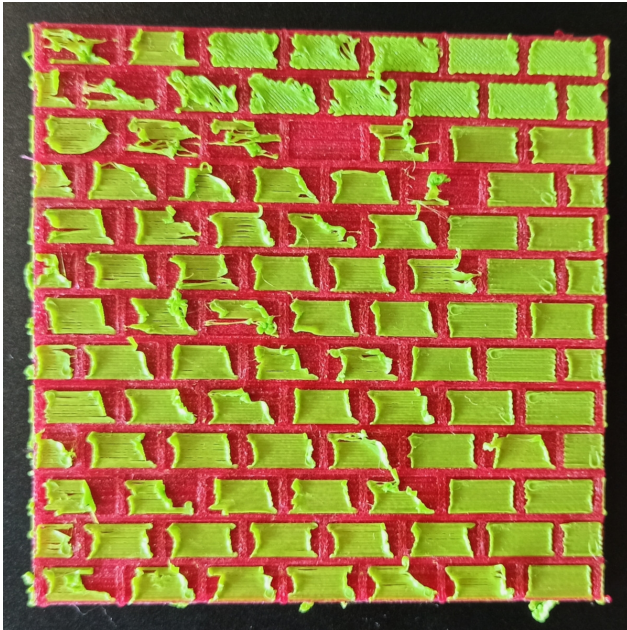


Figura 28: Proveta BM-05-12, el PLA no s'adhereix bé al TPU.

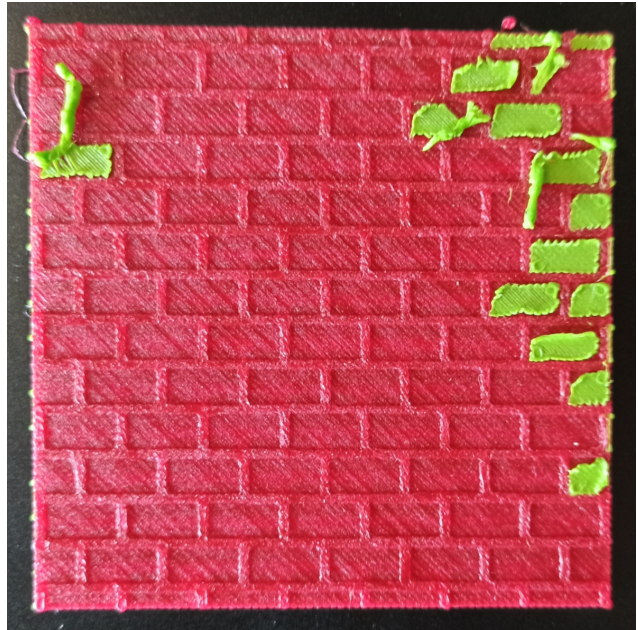


Figura 29: Proveta amb brick gap de 1,2 mm, problemes d'adhesió.

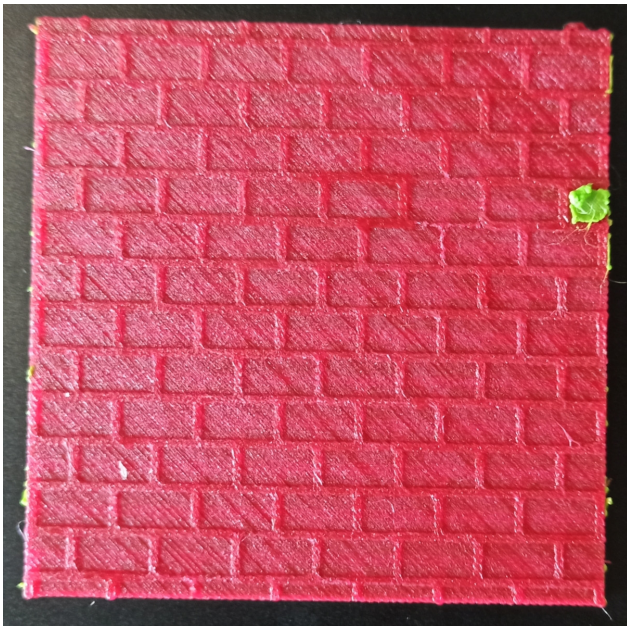


Figura 30: Proveta amb brick gap de 1,2 mm, problemes d'adhesió.

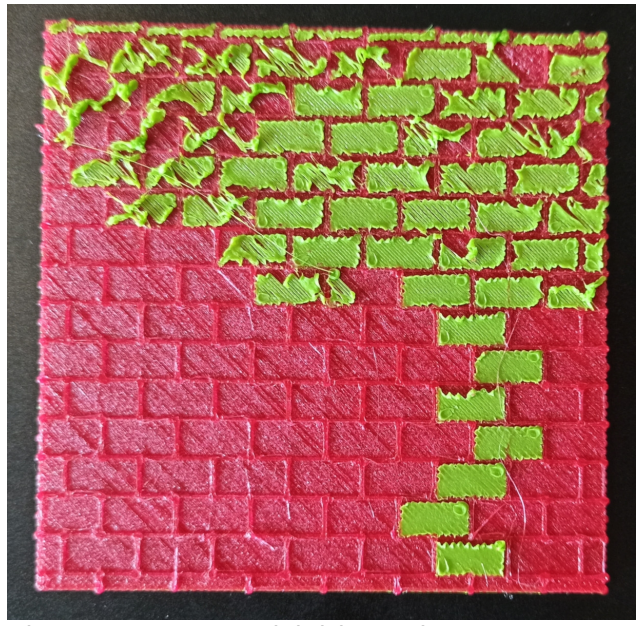


Figura 31: Proveta amb brick gap de 0,4 mm, problemes d'adhesió.

Com es mostra en les figures, el problema en qüestió era que el PLA no s'adheria correctament a la làmina de TPU. La causa podrien ser paràmetres d'impressió, però eren els mateixos que en la primera proveta la qual no va experimentar aquest inconvenient. També podria ser perquè el filament estigues humit, però les bobines eren noves i en teoria estaven seques.

Amb tot això, està el fet que en les proves preliminars, la primera prova amb làmina entre nivells va patir el mateix problema però les dues proves següents no.

Atès que es disposava de PLA d'un altre color (negre) es van repetir el procés d'impressió amb el nou color i, en aquesta ocasió, els resultats van ser satisfactoris, el que ens porta a pensar que el tipus de pigment del filament pot influir en l'adherència.

Un cop comprovat que el PLA negre s'adheria millor al TPU, es va procedir a imprimir les provetes finals. En total es van fabricar 16 espècimens, dos de cada tipus, els quals es mostren a continuació en les figures 32 i 33.

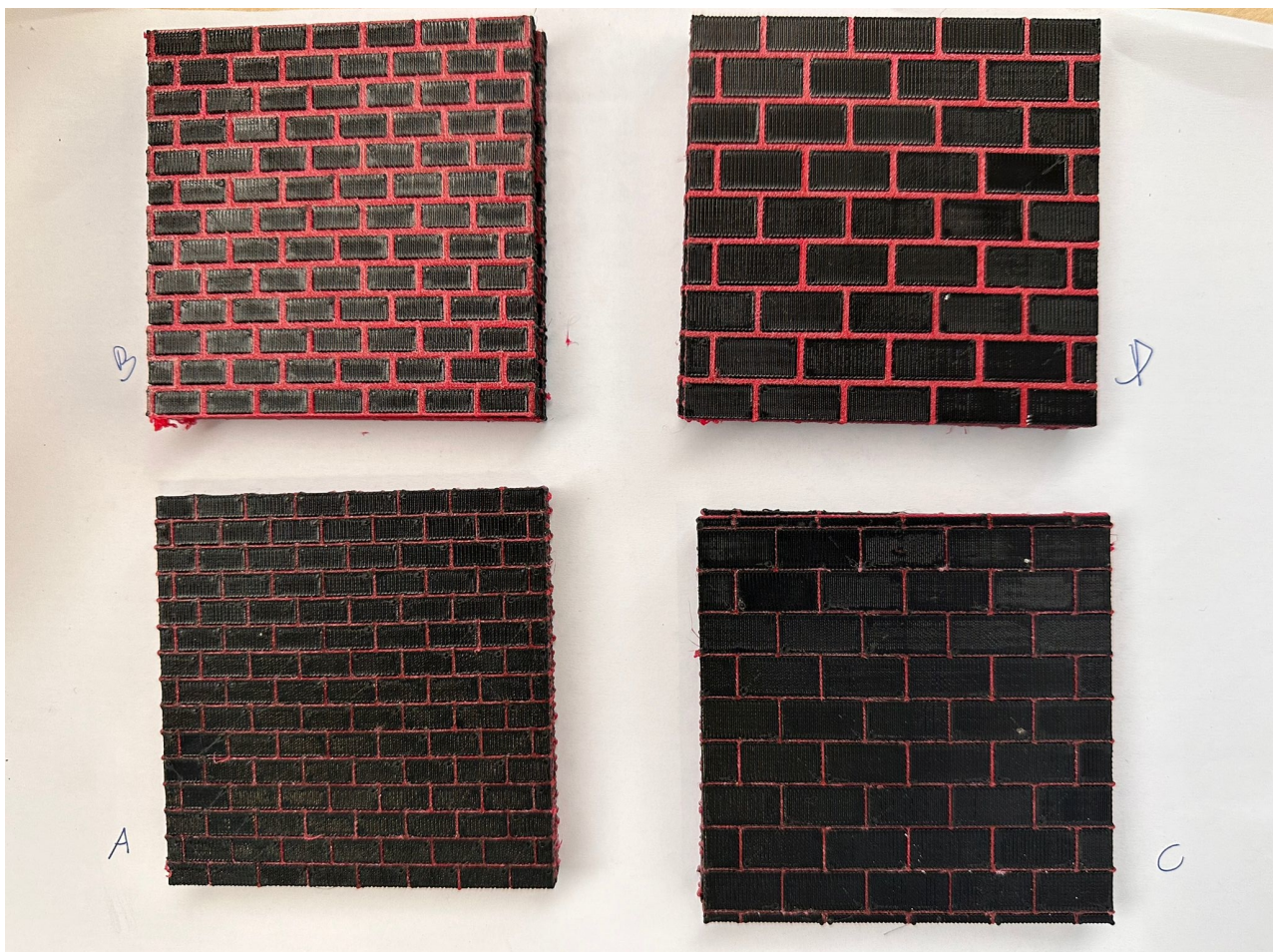


Figura 32: A: BM-05-04; B: BM-05-12; C: BM-08-04; D: BM-08-12

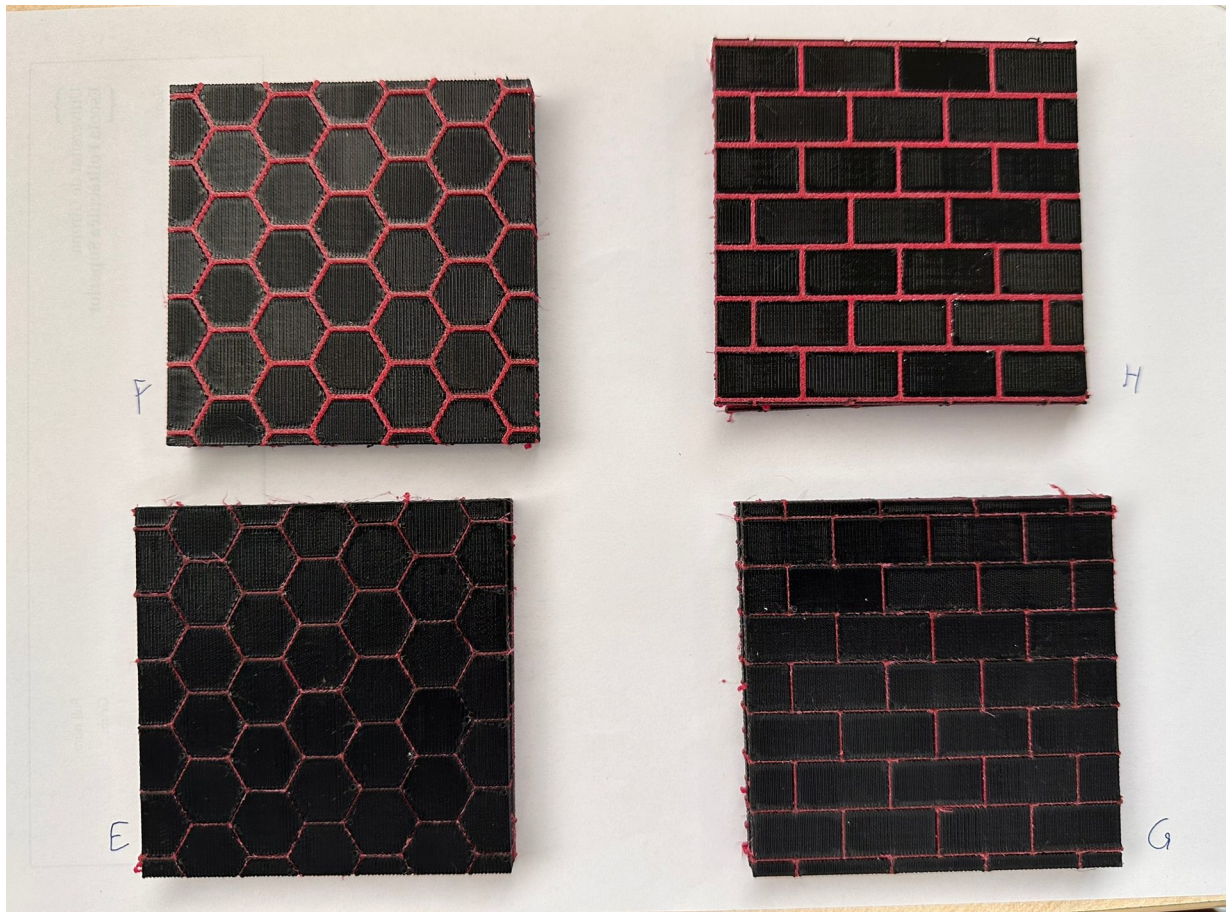


Figura 33: E: HC-16-04; F: HC-16-12; G: BM-10-04; H: BM-10-12

8. Experiment i resultats de QSI. Mètode experiment.

En aquest apartat, s'explicarà el procés experimental i el com han estat recollides i tractades les dades obtingudes dels assajos.

8.1. L'experiment:

Per dur a terme els assajos QSI, la proveta s'ancorava en el suport circular, un cop fixada, es col·locava el punxó de tal manera que estigues en contacte amb l'espècimen però sense fer força. Així, un cop està tot preparat i a punt, es pot procedir a iniciar l'assaig.

La velocitat de descens del punxó es va definir en 0,5 mm/min per a totes les provetes, sense un termini de temps determinat per a la duració de l'experiment. Les proves es van finalitzar manualment que es feia evident que el comportament del material havia canviat i era el TPU, més flexible que el PLA, el material que estava realitzant tot o la major part del treball.

Durant tot el procés, es van dur a terme fotografies de la part inferior de la proveta, figura 34, i de la part superior, figura 35.



Figura 34: Fotografia de la part inferior d'una proveta durant l'assaig, es pot veure com els brics s'han començat a separar del TPU.

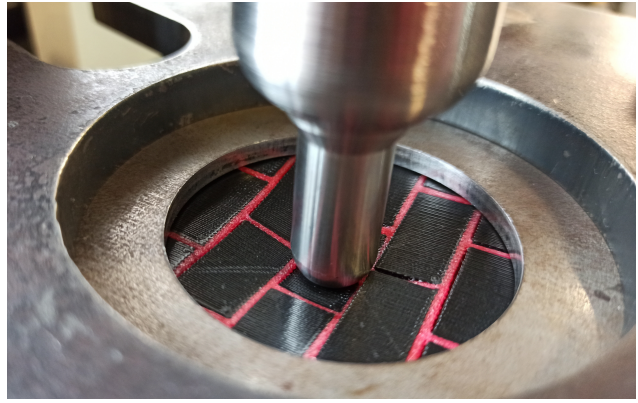


Figura 35: Fotografia de la part superior d'una proveta, es pot apreciar la deformació provocada pel punxó.

A més de les fotografies durant la càrrega, també se'n van gravar vídeos de la descàrrega per registrar el com es recuperava el material i posteriorment, en extreure les provetes de la màquina d'assaig, aquestes es van tornar a fotografiar per veure el com havien quedat després de la prova.

Les dades que recollides dels assajos de les proves es limiten a l'etapa de càrrega i van ser exportades en format TXT per la seva anàlisi posterior.

Els vídeos de la descàrrega poden ser consultats en aquest [enllaç](#).

8.2 Resultats i anàlisi de les dades:

Per poder analitzar les dades obtingudes dels assajos, s'han representat gràficament per observar millor l'evolució de la força de càrrega sobre les provetes amb desplaçament del punxó.

Els gràfics s'han dibuixat mitjançant un *script* de Python, fent ús de la llibreria Matplotlib i els fitxers TXT originals han estat convertits en format CSV per facilitar el processament de les dades amb Python.

Les dades representades gràficament han estat agrupades per tipus de proveta, per valor de *brick_depth* en BM o *brick_diameter* en HC, per valor de *brick_gap* en BM. També s'han fet gràfics comparant les dades de les provetes BM-10-04 amb HC-16-04 i les provetes BM-10-12 amb HC-16-12. Per exemple, figura 36 que es mostra a continuació és un exemple de la comparativa de l'evolució de la càrrega de les provetes BM amb *brick gap* de 1,2 mm i la figura 37 mostra una comparació amb les provetes BM-10-04 i HC-16-04.

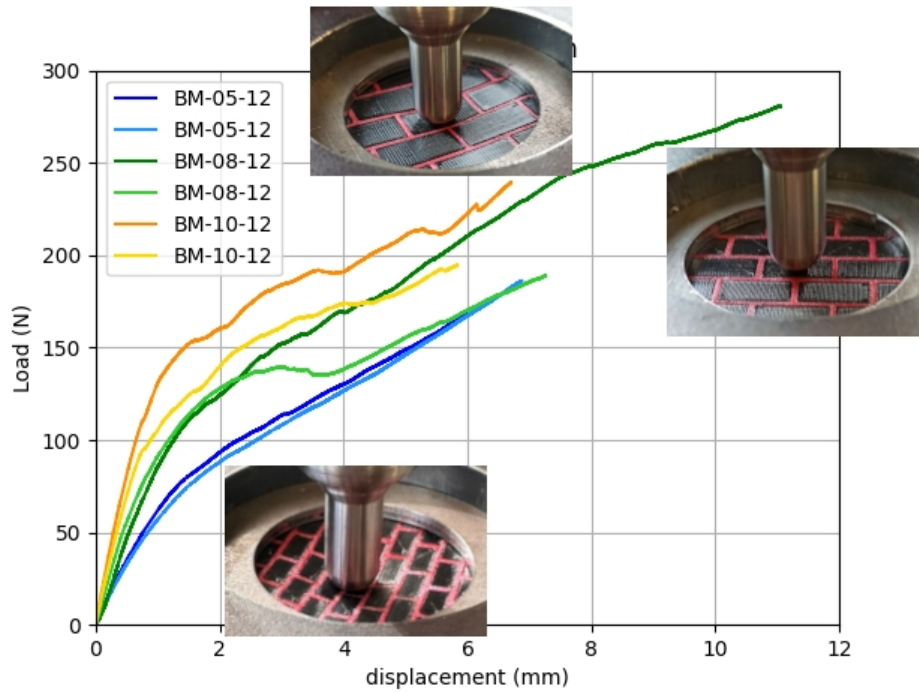


Figura 36: Gràfic comparatiu de les provetes BM amb brick gap de 1,2 mm. Les imatges mostren els diferents tipus de provetes durant l'assaig.

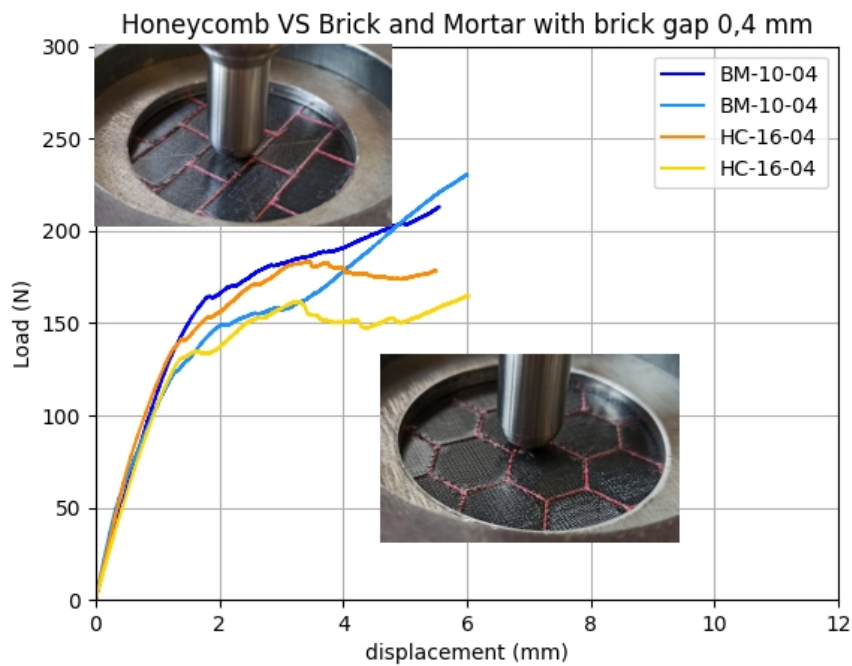


Figura 37: Gràfic comparatiu de les provetes BM-10-04 i HC-16-04. Les imatges mostres diferents provetes durant l'assaig

A part de la representació gràfica de les dades, en les gràfiques per tipus de proveta, s'han marcat els punts de les corbes que s'han considerat d'interès i s'ha calculat l'energia de la deformació per aquests punts mitjançant el mètode trapezoidal de càlcul per integració numèrica. S'han seleccionat de partida aquells punts on visualment s'identifica un canvi de tendència. Aquesta selecció és vàlida per a la majoria dels casos, però també es dona la circumstància en què en algunes provetes els canvis de tendència són més d'un i s'identifiqués diverses disruptcions en la gràfica de la prova, en aquest cas escollim aquell en el que la disruptió és més evident. A continuació, es mostra una imatge d'exemple (figura 38) d'un dels gràfics on s'assenyalen els diferents d'interès així com els que s'han considerat vàlids en la selecció per canvi de tendència.

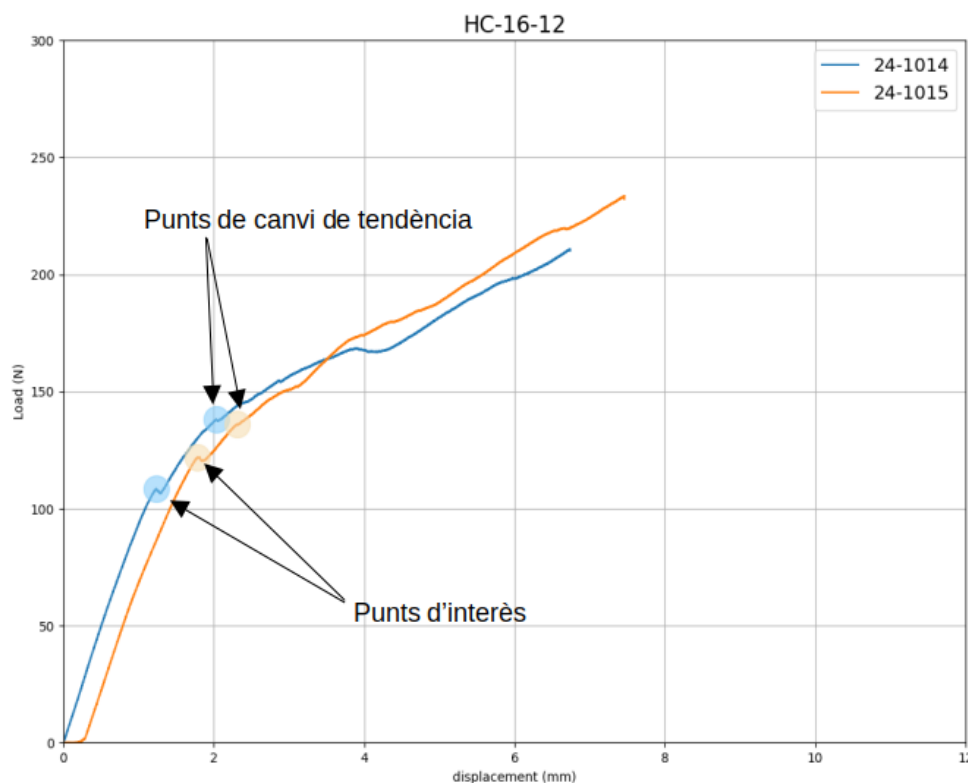


Figura 38: Gràfic d'exemples amb els punts d'interès marcats.

El motiu en aquest, i en altres, de triar-ne el segon punt en cada proveta parteix del fet que s'ha considerat que la primera disruptió pot venir motivada per la ruptura o desadhesió d'algun dels brics de l'espècimen provocant aquest desplaçament de la gràfica. En ser una estructura composta per múltiples brics, resulta evident que la falla d'un únic element, en la majoria de casos, no altera de forma significativa el comportament del conjunt. Per altra banda, el canvi de tendència en el comportament de la peça resulta més evident a partir del segon punt.

En la taula 8, a continuació, es recullen les energies i el desplaçament en els punts de canvi de tendència de les provetes.

Taula 8: Taula amb els resultats d'energia i valor del desplaçament dels punts de canvi de tendència.

Proveta	% en volum		Energia		Energia mitjana	Desplaçament - canvi de tendència	
	PLA	TPU	1ª proveta	2ª proveta		1ª proveta	2ª proveta
BM-05-04	74,79 %	25,21 %	135,284 mJ	73,441 mJ	104,363 mJ	2,522 mm	1,393 mm
BM-05-12	60,48 %	39,52 %	61,327 mJ	67,653 mJ	64,490 mJ	1,392 mm	1,540 mm
BM-08-04	78,05 %	21,95 %	224,130 mJ	-	224,130 mJ	2,107 mm	-
BM-08-12	67,95 %	32,05 %	130,724 mJ	205,350 mJ	168,037 mJ	1,819 mm	2,314 mm
BM-10-04	79,19 %	20,81 %	175,097 mJ	199,356 mJ	187,227 mJ	1,811 mm	2,049 mm
BM-10-12	70,75 %	29,25 %	154,122 mJ	130,566 mJ	142,344 mJ	1,546 mm	1,568 mm
HC-16-04	79,65 %	20,35 %	119,813 mJ	101,034 mJ	110,424 mJ	1,412 mm	1,375 mm
HC-16-12	71,91 %	28,09 %	170,332 mJ	168,585 mJ	169,459 mJ	2,033 mm	2,310 mm

Els gràfics i l'energia es troben recollits en l'Annex 6, juntament amb fotografies de les provetes durant els assajos.

9. Discussió dels resultats:

En comparar les dades per un mateix valor de *brick_gap*, s'ha observat que les provetes BM-05-04 i BM-05-12 difereixen notablement de la resta provetes assajades, alhora que aquestes tenen un comportament bastant semblant. Aquest comportament no s'explica per la quantitat de TPU dels espècimens, ja que, si es comproven les dades de la Taula 5, es veu que la diferència entre aquest dos tipus de provetes és major que amb altres. Per exemple, sent la proporció de TPU en les BM-05-04 és del 25,21 % en volum, en les BM-10-04 la proporció és del 21,95 % i en les BM-05-12 és del 39,52 %, el comportament de les provetes BM-05-04 és semblant a les BM-05-12, com es pot veure en la figura 39 a sota, i molt diferent de les BM-10-04, com es mostra en la figura 40.

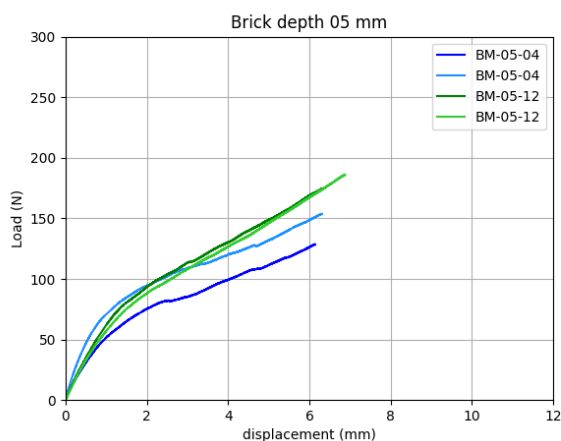


Figura 39: Comparativa de les provetes de brick depth 5 mm, l'evolució de les provetes es bastant semblant.

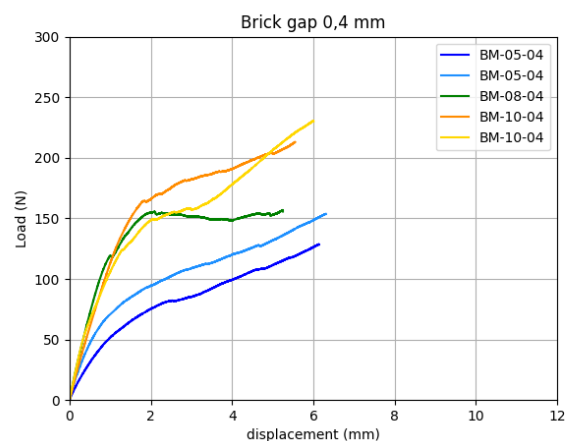


Figura 40: Comparativa de les provetes BM de brick gap de 0,4. S'observa que les provetes BM-05-04 divergeixen notablement de la resta.

Per altra banda, les provetes BM-08-04 i BM-10-04 tenen un comportament molt semblant, figura 40, especialment a l'inici, i les provetes BM-08-12 i BM-10-12 tot i diferir una mica, també tenen un comportament similar, figura 41.

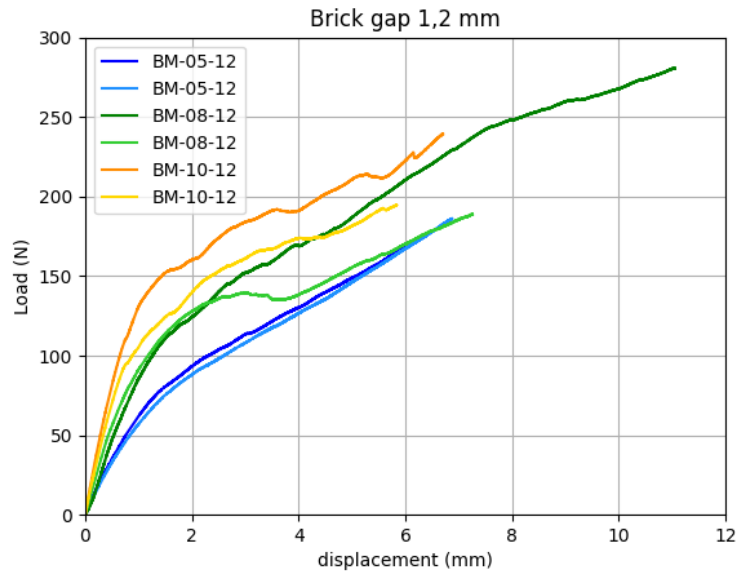


Figura 41: Comparativa de les provetes BM amb brick gap de 1,2 mm.

A més, en comparar els resultats agrupats pel valor de *brick_depth*, s'ha vist que els no varien gaire, i en el cas de les BM-10 no hi ha una diferència notable, veure figura 42. El mateix passa amb les *honeycomb* on no sembla que el valor de *brick_gap* afecti el seu comportament durant l'aplicació de la càrrega, veure figura 43.

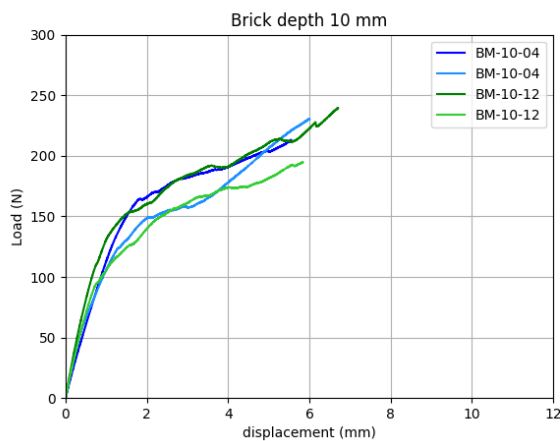


Figura 42: Comparativa de les provetes BM amb brick depth de 10 mm.

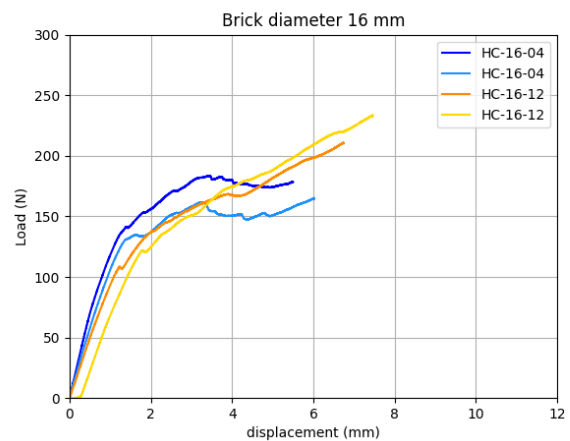


Figura 43: Comparativa de les provetes HC.

Finalment, en comparar les provetes BM-10 amb les HC-16, no s'ha vist que les dades divergeixin notablement, tal com es mostra en les figures a sota, la qual cosa indicaria que

almenys en aquest cas, la forma de les plaquetes condiciona les propietats mecàniques dels espècimens.

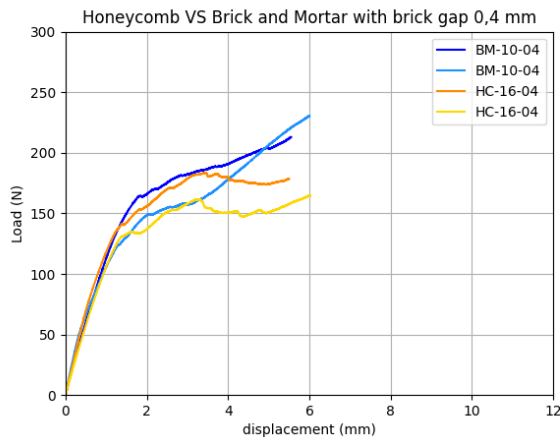


Figura 44: Comparativa de les provetes BM-10-04 i HC-16-04.

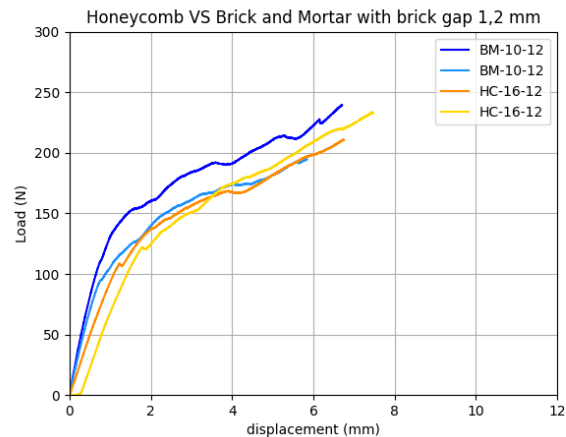


Figura 45: Comparativa de les provetes BM-10-12 i HC-16-12.

A la vista dels resultats, sembla que el que més afecta les propietats mecàniques de les provetes és la mida dels brics i no la proporció de TPU de les provetes. Hi ha més diferència entre dues provetes amb diferent mida brics però semblant proporció de TPU que en provetes amb brics iguals però amb diferent quantitat de TPU, o la forma de les plaquetes.

És possible que el comportament de les provetes BM-05-04 i BM-05-12, amb una transició entre etapes més suau que la resta, podria ser degut al fet que en disminuir la mida dels brics, cosa que implica incrementar la quantitat d'aquests, facilita que el conjunt de brics i morter absorbeixi millor la força sense que la deformació del conjunt impliqui la ruptura d'algun bric. En canvi, en augmentar les dimensions de les plaquetes disminueix la malla de morter implicada en la unió dels brics. En conseqüència: La malla de morter suporta una major tensió alhora que l'esforç sobre els brics implicats és més gran. En les figures 46 i 47 de sota, es pot observar el que s'ha descrit.



Figura 46: Proвета BM-05-04 durant l'assaig QSI.

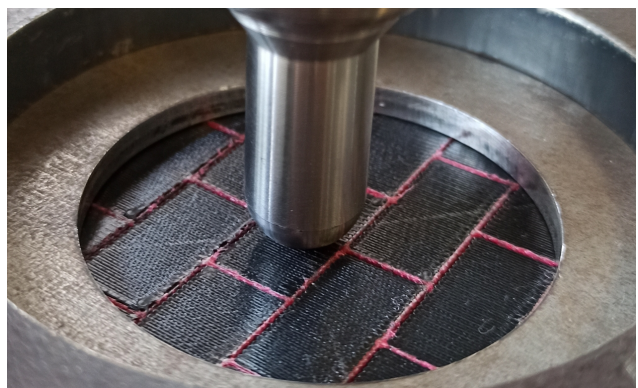


Figura 47: Proвета BM-10-04 durant l'assaig QSI.

Tota aquesta informació està més detallada en els apartats del 4 fins al 7 de l'**Annex 6**.

Per acabar, a priori no sembla que els resultats es puguin comparar amb els de Ko, principalment pel tipus d'assaig. No tampoc amb els d'Islam a causa de la diferència de l'estructura de les provetes.

10. Modificació de G-Code, programes per millorar la influència del refredament durant la impressió a l'adherència entre els materials.

En les primeres impressions de prova que es van realitzar amb les geometries *brick & mortor* i *honeycomb*, es va observar que l'adherència entre les cel·les de PLA i el morter TPU no era la desitjada.

Es va teoritzar que aquest fet es deu al refredament d'un dels materials a conseqüència de l'estratègia d'impressió que estableix l'*slicer*. El programari Ultimaker Cura, a l'hora de tractar una estructura multimaterial, determina una estratègia que impliqui la menor quantitat de canvis d'eina o extrusors possibles, en els casos provats un canvi per capa. Això fa que a cada capa, es faci primer tot d'un material i després l'altre. A més, que el programa no permet modificar o definir la ruta que ha de seguir l'extrusor a l'hora d'imprimir.

El problema és el refredament que pateix el primer material a ser extrudit quan es comença amb el segon, especialment en superfícies grans.

Per aquest motiu es va decidir comprovar com seria l'adherència entre el PLA i el TPU si en lloc d'imprimir primer totes les parts d'un material i en acabar, les de l'altre, és a dir primer les cel·les i després el morter o viceversa, la impressió es realitzés cel·la a cel·la.

10.1. Estudi i modificació del G-Code:

El G-Code és un llenguatge que s'utilitza per dir a la màquina la seqüència o passos a seguir en el procés de fabricació d'un objecte. En el cas de la impressió 3D, aquest conté les comandes per moure les parts dins la impressora. Aquest codi consisteix en comandes G i M que assignen moviments i accions [24].

En el cas d'Ultimaker, aquest codi és creat automàticament pel programa de *slicer Ultimaker Cura* al processar el model que es vol imprimir. És important tenir en compte que tot i que sembla haver-hi una espècie d'estàndard, el G-Code pot presentar diferències depenent de quina sigui la impressora a la qual estigui dirigit, és per això que és important indicar-la en el programa. Aquesta mena de variacions del G-Code depenent de la màquina són anomenades *flavors*[24].

Investigant, es va trobar que a la pàgina de GitHub d'Ultimaker hi ha informació sobre el funcionament de les diferents comandes G i M [26][27]. Aquesta informació ha estat molt útil, no obstant això, aquestes comandes són principalment del G-Code amb *flavor Marlin*, que presenta

algunes diferències respecte al que utilitza la Ultimaker 3 la qual fa servir el *flavor* Griffin. Afortunadament, la majoria de les comandes G i M són les mateixes.

Per exemple, el Marlin posseeix la comanda G28 que fa que l'extrusor es desplaci cap a un dels extrems de la màquina[28], però aquesta comanda no existeix en el Griffin [29].

En l'**Annex 5** hi ha un recopilatori amb les diferents funcions del G-Code de l'Ultimaker 3 que s'han identificat en els codis estudiats, amb una explicació del que fa cada una i exemples.

Per altra banda, l'**Annex 7**, recull la forma de configurar el programa *Ultimaker Cura* per tal poder situar les peces a l'origen de coordenades de la impressora, o sigui en el zero màquina, cosa que per defecte no permet. Aquesta configuració a estat necessària, ja que facilita molt la modificació del G-Code.

10.1.1. Prova canvi d'origen de coordenades - G92.

El primer que es va fer va ser estudiar el funcionament del *gcode*, per això es va dissenyar una cel·la senzilla composta per un bric envoltat de morter. Això va servir per aprendre quines eren les funcions i el que feien, com s'indicava el canvi d'extrusor en el codi a més de com s'indica la ruta que el capçal ha de seguir.

Un dels punts importants en aquesta part, va ser aprendre el com es podia canviar la posició de l'origen de coordenades, cosa que s'ha de fer manualment. Això es pot fer gràcies a la comanda G92, la qual el que fa és canviar el valor de la posició actual de l'extrusor. Per exemple, si l'extrusor es mou a la posició X=100 i Y=20, amb la comanda G92 X0 Y0, el punt X100 Y20 passarà a ser considerat el punt X0 Y0. Aquest canvi és temporal i només s'aplica a l'execució del programa, recuperant-se en finalitzar.

10.1.2. Prova de concatenació:

Un cop coneguda la forma de canviar l'origen de coordenades, es va provar de concatenar dues cel·les de morter.

El que es va fer va ser, realitzar el canvi de coordenades, introduït manualment, i col·locar el codi de la peça. Posteriorment, tot de forma manual, es va introduir un desplaçament que feia que l'extrusor es desplaçés a una distància determinada del zero modificat i que es definís aquell punt com el nou zero i allà, torna a imprimir la peça.

Tot aquest procés es va fer modificant el codi manualment.

10.2. Python

La intenció original era crear un codi de Python el qual havia de llegir el codi del fitxer *gcode* per a una cel·la composta per un bric i morter. I a partir d'aquest codi, copiar el codi per a cada capa i concatenar diferents cel·les una al costat de l'altre.

Així, la idea era poder imprimir una estructura *brick and mortar* cel·la a cel·la i capa a capa. Això no obstant, només s'ha aconseguit crear un codi que llegeix el fitxer *gcode*, canvia la posició de l'origen de coordenades i imprimeix la primera capa de bric i morter d'una única cel·la.

No s'ha pogut dur a terme la concatenació de diferents cel·les, no és impossible però sí molt complex.

Per cada cel·la, implica fer 4 canvis de coordenades, 1 per la posició del morter, 1 per la posició del bric i 2 per recuperar l'origen de coordenades inicial. Això dificulta la concatenació de diferents cel·les, a més que per a cada canvi d'eina es realitzen tres canvis de coordenades, cada cel·la ha de tenir el seu propi origen de coordenades.

Per tal que el codi pugui identificar les parts que constitueixen part del bric o del morter, s'han establert dues paraules claus: *brick* i *mortar*, que es corresponen amb els noms dels fitxers STL, de manera que sigui identificable en quina part del codi ens hi trobem.

Per provar el codi, es va dissenyar una cel·la composta per un bric i un morter, com la que es mostra en la figura 48, sense modificar el G-Code, per tenir una referència de com hauria de quedar. Així i tot, al final el morter es va reduir una mica i es va imprimir amb PLA verd i PLA negre, figura 49, aquesta última sí que va ser impresa amb el G-Code modificat.

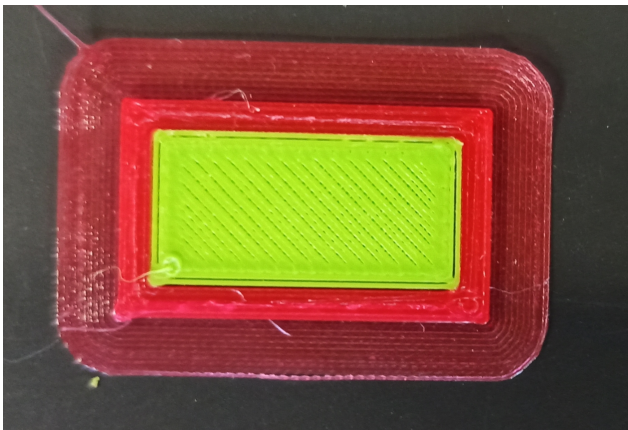


Figura 48: Cel·la PLA-TPU impresa sense modificar el codi.

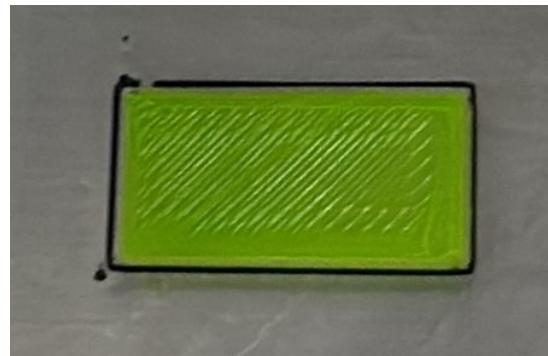


Figura 49: Cel·la PLA-PLA impresa amb el codi modificat.

Al final, només ha estat possible imprimir la primera capa d'una única cel·la a causa de la complexitat de modificar el G-Code.

A l'apartat 5 de l'**Annex 1** es mostren diferents cel·les que es van imprimir inicial per tenir com a referència. A més, també s'ha gravat un vídeo de la impressió de l'última cel·la el qual pot ser consultat en el següent [enllaç](#).

11. Pressupost:

El pressupost calcular per la feina realitza, té en compte el temps dedicat a recerca, fabricació, assaig, anàlisi de dades i redacció del document. En total, el cost ascendeix a 12.040 €.

Concepte	Hores	Cost/hora	Cost
Recerca	100 h	18 €/h	1800 €
Fabricació	129 h	50 €/h	6450 €
Assaig	20 h	50 €/h	1000 €
Anàlisi de resultats	30 h	18 €/h	540 €
Redacció del document	125 h	18 €/h	2250 €
Total	404 h		12040 €

12. Conclusions i treballs futurs:

Un dels principals objectius d'aquest projecte, el disseny paramètric d'estructures multimaterial bionspirades, ha estat assolit amb èxit. S'han creat dos fitxers d'OpenSCAD, un per *brick and mortar* i un altre per *honeycomb*, els quals permeten fer modificacions de l'estructura sense necessitat de refer el programa. I a més a més, s'han fet diversos esquemes que permeten conèixer el funcionament d'aquests programes.

Respecte a la fabricació de les estructures, aquestes s'han pogut imprimir, no sense dificultats. S'han imprès una selecció de 16 peces basades en les geometries *brick and mortar* i *honeycomb*, amb diferents proporcions de PLA i TPU i variacions en la mida dels brics i la separació que hi ha entre ells, i d'aquesta manera, poder estudiar si aquestes diferències poden afectar el seu comportament mitjançant un assaig QSI. Per altra banda, s'ha vist com és possible que els additius de color poden afectar d'alguna forma a la qualitat d'impressió, especialment a l'adhesió entre diferents materials, com s'ha pogut observar en aquest treball on dos PLAs de diferents colors (verd i negre), no s'adhereixen igual al TPU tot i ser de la mateixa marca i tenir les mateixes especificacions i propietats.

Pel que fa als resultats obtinguts, es pot afirmar que les proporcions dels materials no són tan determinant com podria semblar en un principi. Això ho demostra el fet de les provetes BM-05-04, amb una proporció de TPU del 25,21 % tinguin un comportament molt similar a les BM-05-12 que presenten una proporció de TPU del 39,52 %, però, en canvi, el comportament d'aquestes dues divergeixi considerablement de la resta de provetes.

Per altra banda, després de comparar les provetes per mida de bric i gruix del morter, no sembla haver-hi una divergència notable en els resultats de les provetes BM-08 i BM-10, el mateix ocorre amb les *honeycomb*, que el comportament és molt similar independentment de la quantitat morter. Al mateix temps, no hi ha diferències considerables entre les BM-10 i HC-16.

Així, es conclouria en un principi que en els casos estudiats, la proporció en volum de TPU, el gruix del morter i la forma dels brics no tenen un efecte gaire notable en les provetes. En canvi, la mida dels brics sí que semblaria que té un efecte rellevant en el comportament d'aquestes.

Finalment, respecte a la part d'estudi i modificació del G-Code, s'han pogut identificar i determinar el funcionament de les diferents comandes que conté. Respecte a la modificació del codi, mitjançant el llenguatge Python, s'ha aconseguit escriure un programa que llegeixi i identifica diferents parts del codi i que sigui capaç de canviar la posició de l'origen de coordenades a més d'imprimir la primera cada d'una cel·la composta per un bric i morter. Amb tot, queda pendent la seva ampliació per tal de que es pugui completar la construcció d'una geometria *brick and mortar*, mitjançant la concatenació de cel·les, a més d'augmentar el nombre de capes.

Pel que fa a possibles treballs futurs, seria important ampliar els assajos QSI, per una banda, amb els materials verges, o sigui amb làmines monomaterials de PLA i TPU i, per una altra banda, realitzar un tercer assaig per a cada model de proveta, per així tenir una mostra estadísticament més representativa. A més, es podria mirar d'assajar provetes amb una proporció de TPU menor que les d'aquest treball, per comprovar si tenen un comportament diferent. En aquesta línia, els treballs de Daniela Rico podran aportar encara més informació.

A més, com ja s'ha comentat abans, es podria estudiar en més profunditat la modificació del G-Code, mitjançant l'ús del llenguatge Python.

13. Glossari:

Plaqueta: Parts rectangulars o hexagonals de les estructures *brick and mortar* i *honeycomb*, en aquest treball també s'anomena bric o bloc.

Nivell: Per nivell, es refereix al conjunt de plaquetes i morter que es troben en un mateix pla.

Internivell: Es refereix a la làmina de morter la qual se situa entre dos nivells.

Cap: Làmina de material amb el gruix d'un filament.

14. Referències

- [1] <https://blog.structuralia.com/caracteristicas-de-hormigon-armado-usos-en-la-construccion> (01 de setembre, 2024)
- [2] Chen Q, Pugno N. Bio-mimetic mechanisms of natural hierarchical materials: A review. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013. DOI:10.1016/j.jmbbm.2012.10.012
- [3] Barthelat F, Tang H, Zavattieri P, Li C, Espinosa H. On the mechanics of mother-of-pearl: A key feature in the material hierarchical structure. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2007. DOI:10.1016/j.jmps.2006.07.007
- [4] Ko K, Jin S, Lee S, Hong J. Impact resistance of nacre-like composites diversely patterned by 3D printing. *Composite Structures*. 2020. DOI:10.1016/j.compstruct.2020.111951
- [5] Gu G, Takaffoli M, Hsieh A, Buehler, M. Biomimetic additive manufactured polymer composites for improved impact resistance. *Extreme Mechanics Letters*. 2016. DOI:10.1016/j.eml.2016.09.006
- [6] Eichner E, Dosta M, Heinrich S, Schneider G. Fabrication of composites via spouted bed granulation process and simulation of their micromechanical properties. *The European Physical Journal Conferences*. 2017. DOI:[10.1051/epjconf/201714013005](https://doi.org/10.1051/epjconf/201714013005)
- [7] Islam M, Wang H, Hazell P, Kader M, Escobedo J. Quasi-static response of horse hoof inspired biomimetic structures. *Materials Today: Proceedings*. 2022. DOI:10.1016/j.matpr.2022.03.185
- [8] Tran P, Ngo T, Ghazlan A, Hui D. Bimaterial 3D printing and numerical analysis of bio-inspired composite structures under in-plane and transverse loadings. *Composites Part B: Engineering*. 2017. DOI:10.1016/j.compositesb.2016.09.083
- [9] <https://opencad.org/about.html> (15 d'Abril, 2024)
- [10] Gibson, R.F. *Principles of Composite Material Mechanics* (2nd ed.). CRC Press. 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420014242>
- [11] Al-Fatlawi A, Jármai K, Kovács G. Optimal Design of a Fiber-Reinforced Plastic Composite Sandwich Structure for the Base Plate of Aircraft Pallets In Order to Reduce Weight. *Polymers*. 2021. DOI:10.3390/polym13050834.
- [12] https://www.researchgate.net/figure/Composition-of-Composite-COMPOSITION-OF-FIBER-REINFORCED-COMPOSITES-Common-fiber_fig1_305996572 (2 de setembre, 2024)
- [13] Montemurro, M. Catapano, A. Doroszewski, D. A multi-scale approach for the simultaneous shape and material optimisation of sandwich panels with cellular core. *Composites Part B: Engineering*. 2016. DOI:10.1016/j.compositesb.2016.01.030

- [14] Wu, W. Geng, P. Zhao, D. Zhang, H. Zhao, J. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*. 2015. DOI:10.3390/ma8095271.
- [15] Kim, H. Park, E. Kim, S. Park, B. Kim, N. Lee, S. Experimental Study on Mechanical Properties of Single- and Dual-material 3D Printed Products. *Procedia Manufacturing*. 2017. DOI:10.1016/j.promfg.2017.07.076.
- [16] Ko K, Jin S, Lee S, Lee I, Hong J. Bio-inspired bimaterial composites patterned using three-dimensional printing. *Composites Part B: Engineering*. 2019. DOI:10.1016/j.compositesb.2019.02.008
- [17] Standard Test Method For Measuring Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM D7136/D7136M-15, DOI:10.1520/D7136_D7136M-15.
- [18] Rico D. Optimization of 3D printed composite bio-inspired structures against out-of-plane loading. *Universitat de Girona - AMADE Research Group*. 2023.
- [19] Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to a Concentrated Quasi-Static Indentation Force. ASTM D6264/D6264M-17, DOI: 10.1520/D6264_D6264M-17.
- [20] <https://ultimaker.com/materials/s-series-pla/> (5 de Juny, 2024)
- [21] <https://ultimaker.com/materials/s-series-tpu-95a/> (5 de Juny, 2024)
- [22] <https://support.ultimaker.com/s/article/1667411002588> (20 d'Agost, 2024)
- [23] <https://github.com/Ultimaker/Cura/releases/tag/5.3.1>
- [24] <https://support.ultimaker.com/s/article/1667337572861> (18 d'Octubre, 2023)
- [25] Wagih A, Maimí P, Blanco N, Costa J. A quasi-static indentation test to elucidate the sequence of damage events in low velocity impacts on composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016. DOI:10.1016/j.compositesa.2015.11.041.
- [26] <https://github.com/Ultimaker/Ultimaker2Marlin> (20 de Setembre, 2023)
- [27] <https://github.com/Ultimaker/Marlin> (20 de Setembre, 2023)
- [28] <https://www.simplify3d.com/resources/articles/3d-printing-gcode-tutorial/> (20 de Setembre, 2023)
- [29] <https://community.ultimaker.com/topic/15555-inside-the-ultimaker-3-day-1-gcode/> (23 de Setembre, 2023)

Annex 1: Proves preliminars d'impressió amb multimaterial

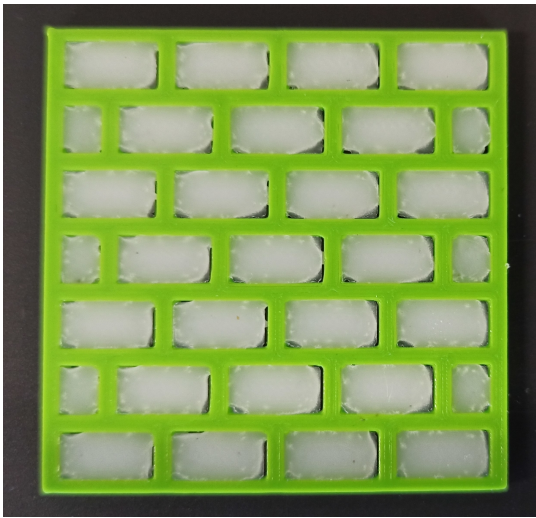
1. Introducció:

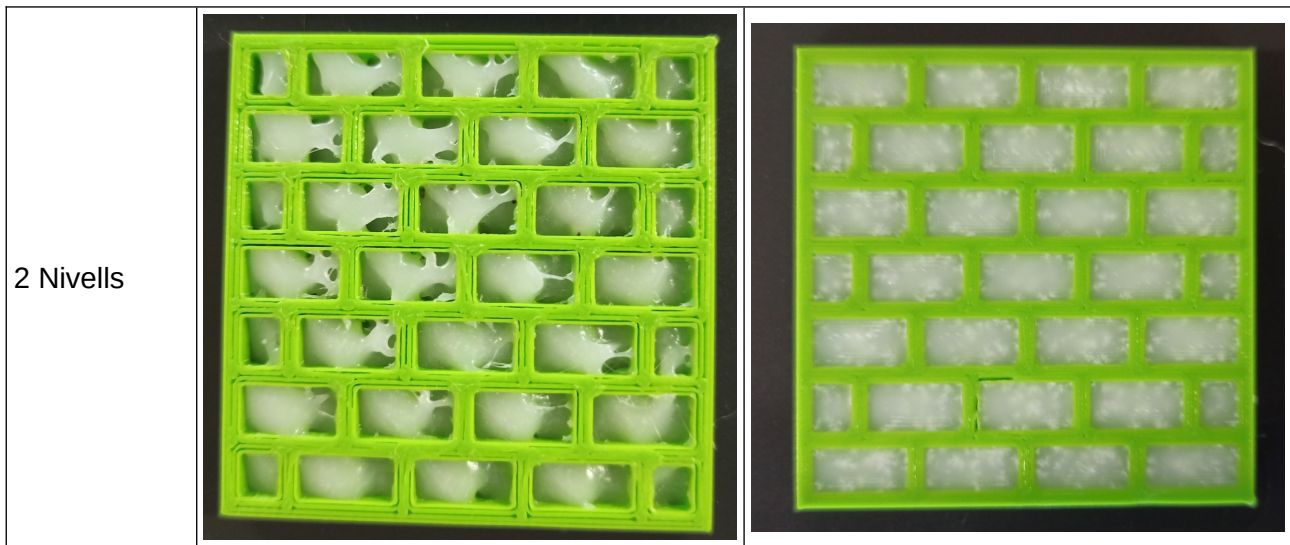
A l'inici del projecte, després d'haver-hi desenvolupat les primeres versions dels modelatges de *brick and mortar* i *honeycomb*, es van realitzar una sèrie d'impressions amb diferents materials per tal de comprovar el funcionament de la impressora quan funciona amb dos materials i la viabilitat de les estructures dissenyades.

Aquest annex és una recopilació d'aquestes primeres impressions.

2. *Brick and mortar*:

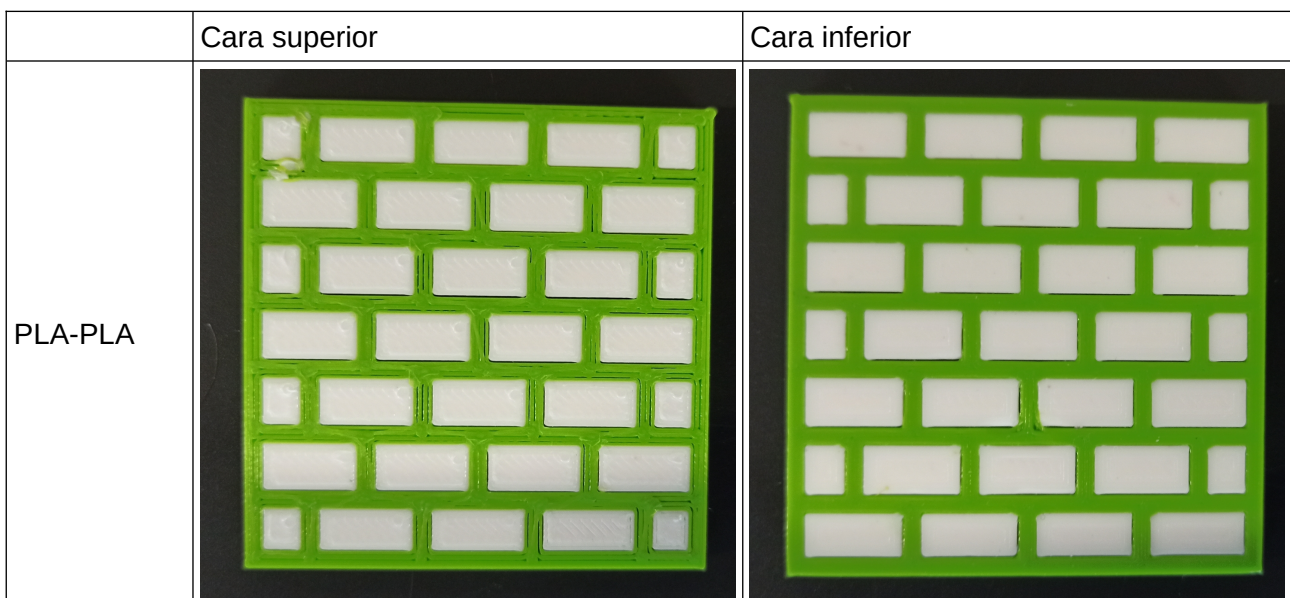
La primera impressió multimaterial que es va dur a terme va ser una peça de *brick and mortar*, d'un únic nivell amb morter de PLA i plaquetes de PCL, PCL-PLA, seguida per un altre dels mateixos materials però de dos nivells.

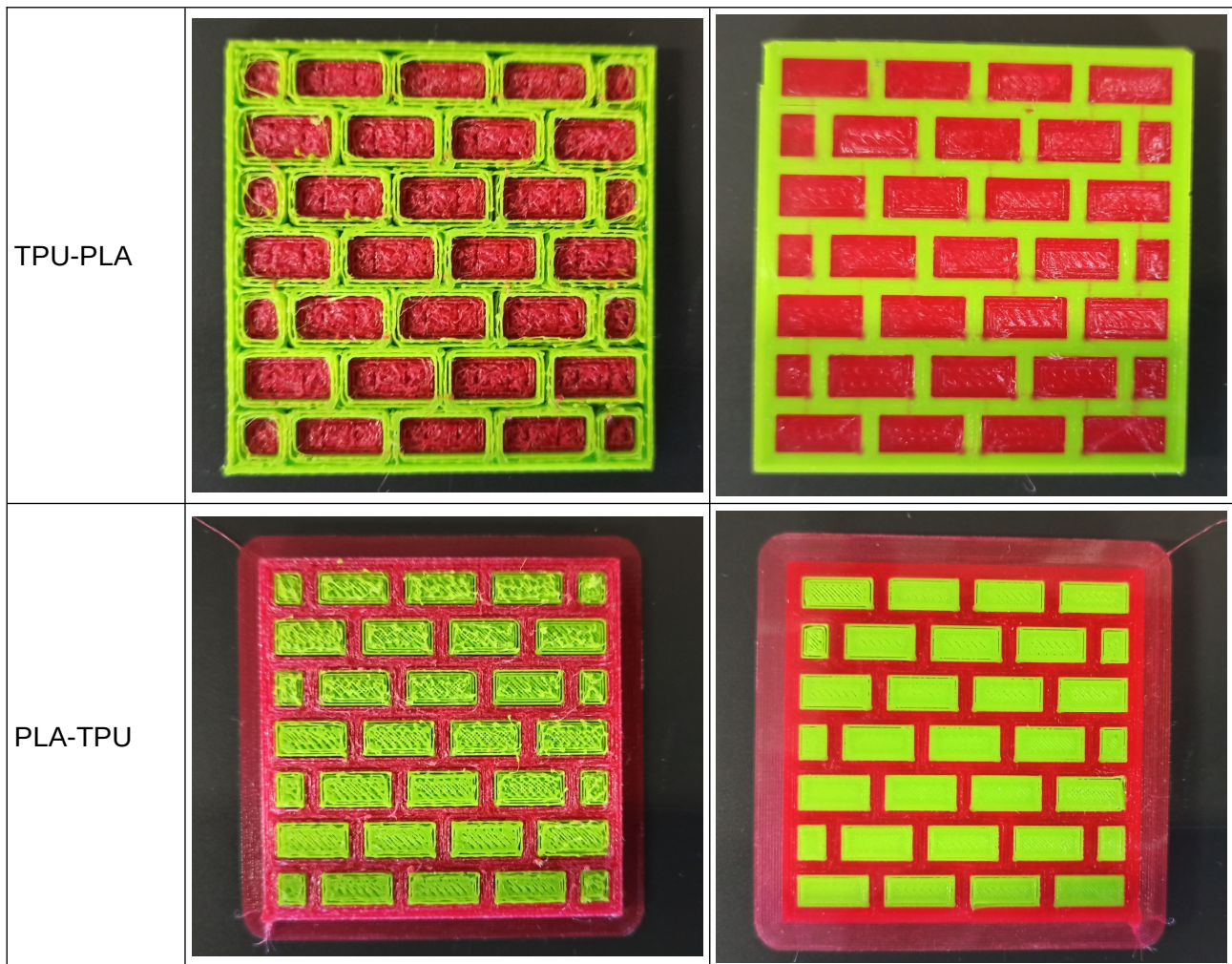
	Cara superior	Cara inferior
1 Nivell		



Com es pot veure en les figures de la taula, els brics de PCL no van quedar bé. El motiu d'utilitzar aquests dos materials es basa en el fet que eren els polímers que es trobaven carregats a la impressora en aquell moment i l'important d'aquesta primera prova era comprovar la viabilitat de l'estructura i no dels materials.

Posteriorment a aquestes dues proves, es van realitzar tres impressions més de dos nivells però de PLA-PLA, TPU-PLA i PLA-TPU.





La primera de les tres en ser fabricada va ser la de PLA-PLA i com es pot observar en les imatges, el resultat va ser molt bo. Això no obstant, aquesta no seria una estructura multimaterial com a tal.

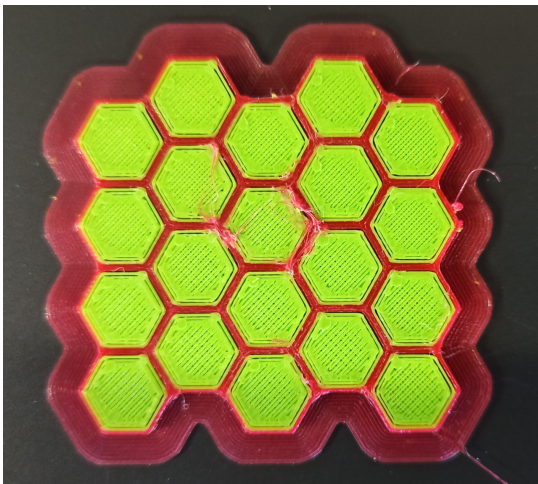
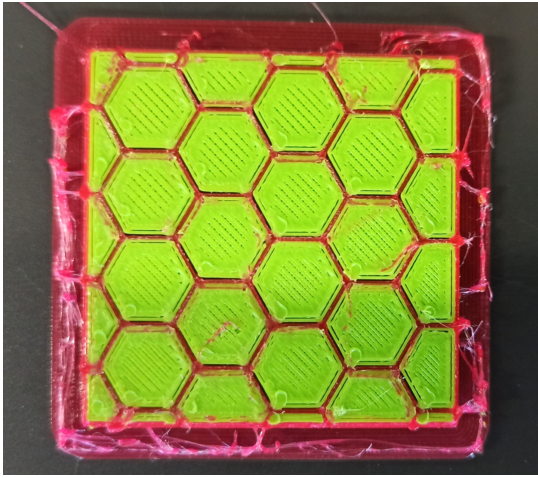
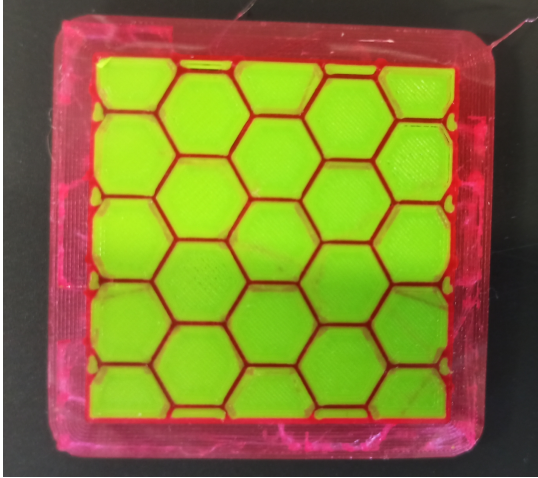
La següent peça va ser amb brics de TPU, però tot i que al principi va anar sense problemes, el resultat final va ser dolent perquè el filament de TPU es va enganxar i no va poder ser extrudit correctament. Més tard es va repetir aquesta impressió amb bons resultats.

La tercera proveta, com es pot veure, fa ús del PLA per fer els brics i el TPU, més flexible, pel morter. En aquest cas, el resultat va ser prou bo tot i que l'última capa de filament va ser una mica defectuosa.

Finalment, es va decidir usar l'última combinació de materials, la de PLA-TPU que a més ja ha estat emprada en estudis anteriors.

3. Honeycomb:

En el cas de les primeres proves amb *honeycomb*, es van realitzar únicament dues, una amb un únic nivell i un altre amb dos nivells, ambdues de PLA-TPU.

	Cara superior	Cara inferior
1 Nivell		
2 Nivells		

Com es pot observar les imatges, els resultats d'aquestes proves va ser satisfactori i amb un acabat superficial decent, amb excepció d'alguns filaments de TPU que sobresurten.

4. Proves amb capa internivell:

Després de desenvolupar la versió 2 del *brick and mortar* (consultar l'Annex 3), es va voler fer una prova per comprovar la seva viabilitat. En aquesta prova es va provar a més d'utilitzar una proveta de planta circular en lloc de quadrada. El resultat no va ser l'esperat.

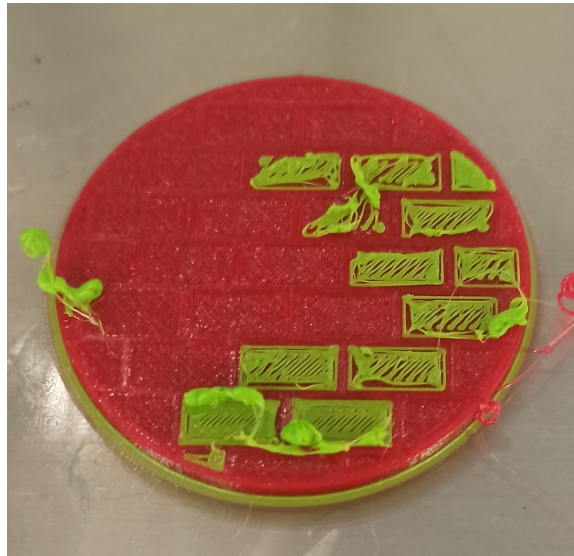


Figura 50: Primera prova d'impressió amb capa internivell de TPU

Com es pot comprovar, el PLA del segon nivell no es va adherir correctament al TPU de sota, en el seu moment, es va pensar que era un problema per culpa de la diferència de temperatures del material. Ja que el PLA s'imprimia a 200 °C i el TPU a 225 °C. Per això es van realitzar dues proves més amb les versions 2 i 3 de *brick and mortar*, però de planta circular, amb el PLA extrudit a 210 °C. A continuació es mostren els resultats.



Figura 51: Provetes circular de prova amb capa internivell.

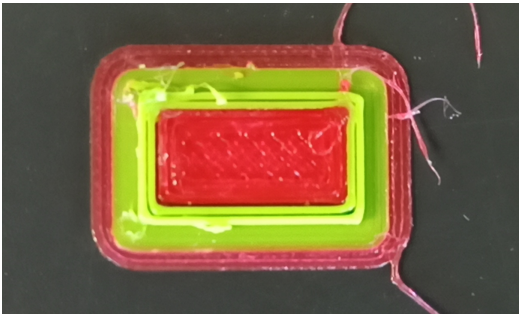
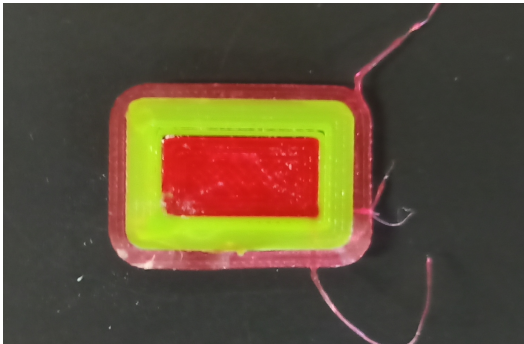
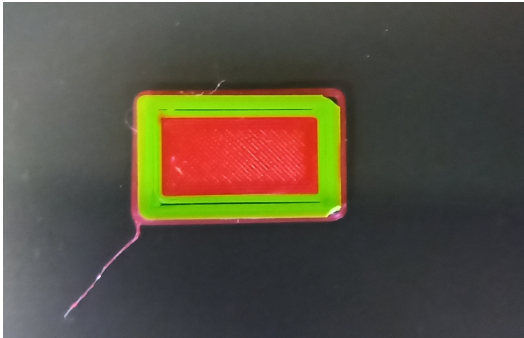
La proveta marca amb V1 equival a la versió 2 del *brick and mortar* i la V2 a la versió 3. Aquestes dues es van imprimir sense cap mena de dificultat a més de no visualitzar cap diferència real entre les dues versions, motiu pel qual es va decidir continuar amb la versió 2 que era més simple.

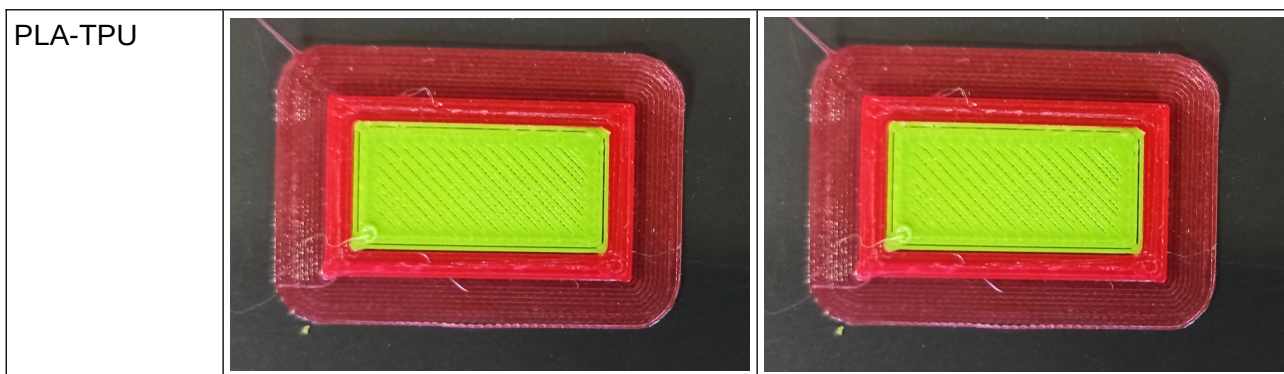
Posteriorment, quan es va procedir a imprimir les provetes finals per assajar-les, va tornar a aparèixer el problema de l'adherència. Es va comprovar que aquest inconvenient era molt més comú amb el PLA verd que amb el PLA negre, tot i que ambdós materials eren de la marca Ultimaker i l'única diferència era el color. Probablement la causa fos l'additiu de color.

5. Cel·la única:

Per a l'apartat de modificació del *gcode* amb Python, es va fer servir per a les proves una estructura de cel·la única, en altres paraules, un únic bloc o plaqueta envoltat de morter.

Aquestes impressions no van tenir cap altre objectiu que el de comprovar com haurien de quedar aquestes cel·les. En total es van imprimir-ne tres: dues de TPU-PLA de diferent mida i una de PLA-TPU.

	Cara superior	Cara inferior
TPU-PLA		
TPU-PLA		



Annex 2: Proves preliminars del *infill* amb multiestructura *brick and mortar*:

Per tal de determinar els millors paràmetres d'impressió per les provetes *Brick and Mortar* que s'assajaran, s'ha decidit imprimir 4 provetes de dimensions 40x40x5 mm. Tres d'elles amb un valor d'*infill density* diferent en cada una i una quarta amb un *infill* del 105% però sense murs en els brics de PLA.

Amb aquestes proves preliminars es pretén mesurar l'alçada total de les provetes i el gruix del morter de TPU i així trobar quines són les que s'ajusten més a les dimensions desitjades.

Dimensions de les provetes:

- **Sample width:** 40 mm
- **Sample depth:** 40 mm
- **Brick depth:** 5 mm
- **Brick width:** 10 mm
- **Brick height:** 1,4 mm
- **Brick gap:** 0,8 mm
- **Interlevel height:** 0,4 mm
- **Levels:** 3
- **Offset:** 50%

Paràmetres d'impressió:

Taula 1: Paràmetres d'impressió de les provetes de prova.

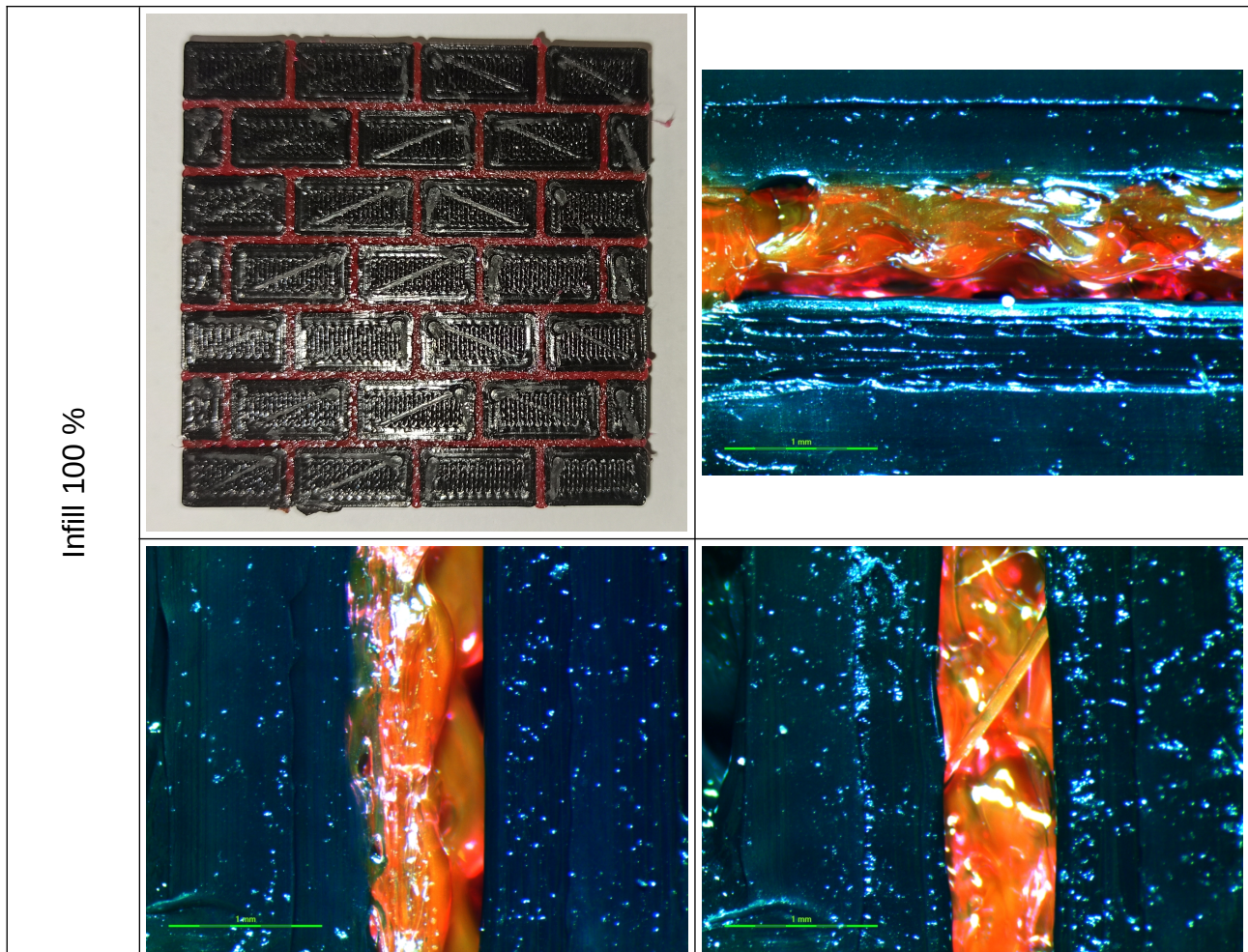
Grup	Proves preliminars – infill							
Model	BM_40x40_B5mm		BM_40x40_B5mm		BM_40x40_B5mm		BM_40x40_B5mm	
Date	02/05/24		03/05/24		07/05/24		15/05/24	
Material	PLA	TPU	PLA	TPU	PLA	TPU	PLA	TPU
Printing temperature	210	225	210	225	210	225	210	225
Printing speed	30	10	30	10	30	10	30	10
Layer height	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Flow rate	106%	106%	106%	106%	106%	106%	106%	106%
Bed temperature	60	60	60	60	60	60	60	60
Infill %	110%	110%	105%	105%	100%	100%	105%	105%
Infill pattern	0,45,90,-45	0,45,90,-45	0,45,90,-45	0,45,90,-45	0,45,90,-45	0,45,90,-45	0,45,90,-45	0,45,90,-45
Raster angle	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable
Top layer	0	0	0	0	0	0	0	0
Bottom layer	0	0	0	0	0	0	0	0
Wall line count	2	0	2	0	2	0	0	0
Line width	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Starting material	PLA		PLA		PLA		PLA	
Notes							Sense murs	

Resultats de les impressions:

Per realitzar les mesures, s'ha utilitzat un micròmetre per a avaluar l'alçada de les provetes i un microscopi pel gruix del morter de TPU. En tots els casos, s'han dut a terme diverses mesures per a cada proveta en punts seleccionats de forma aleatòria.

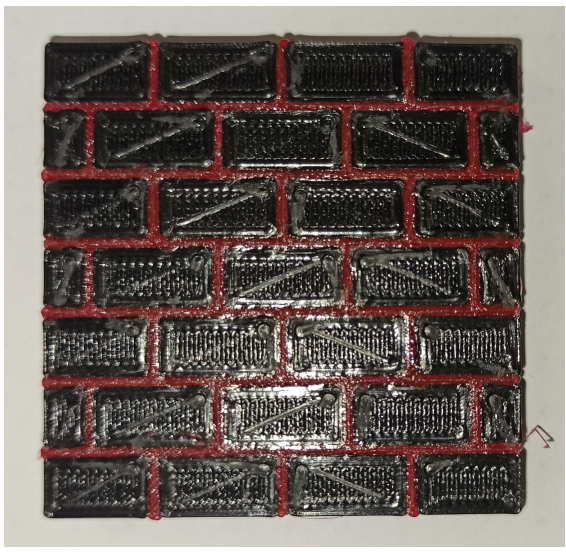
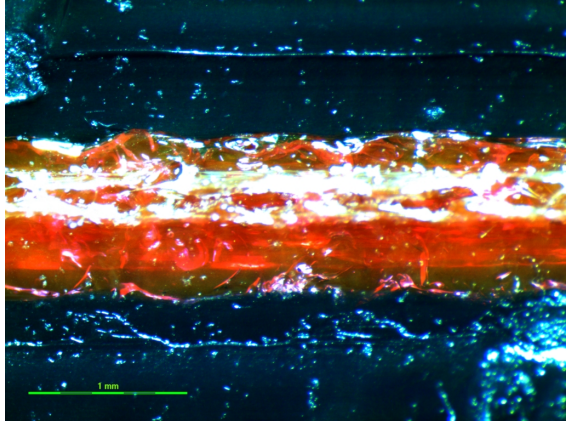
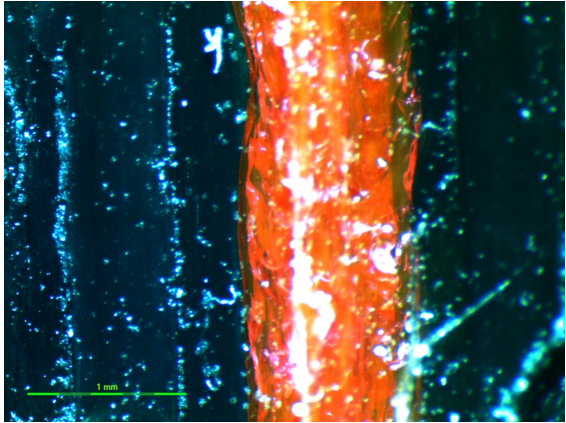
A continuació, es mostren una fotografia de cada proveta i algunes imatges obtingudes amb el microscopi.

Taula 2: Imatges de la proveta de prova amb un infill del 100%

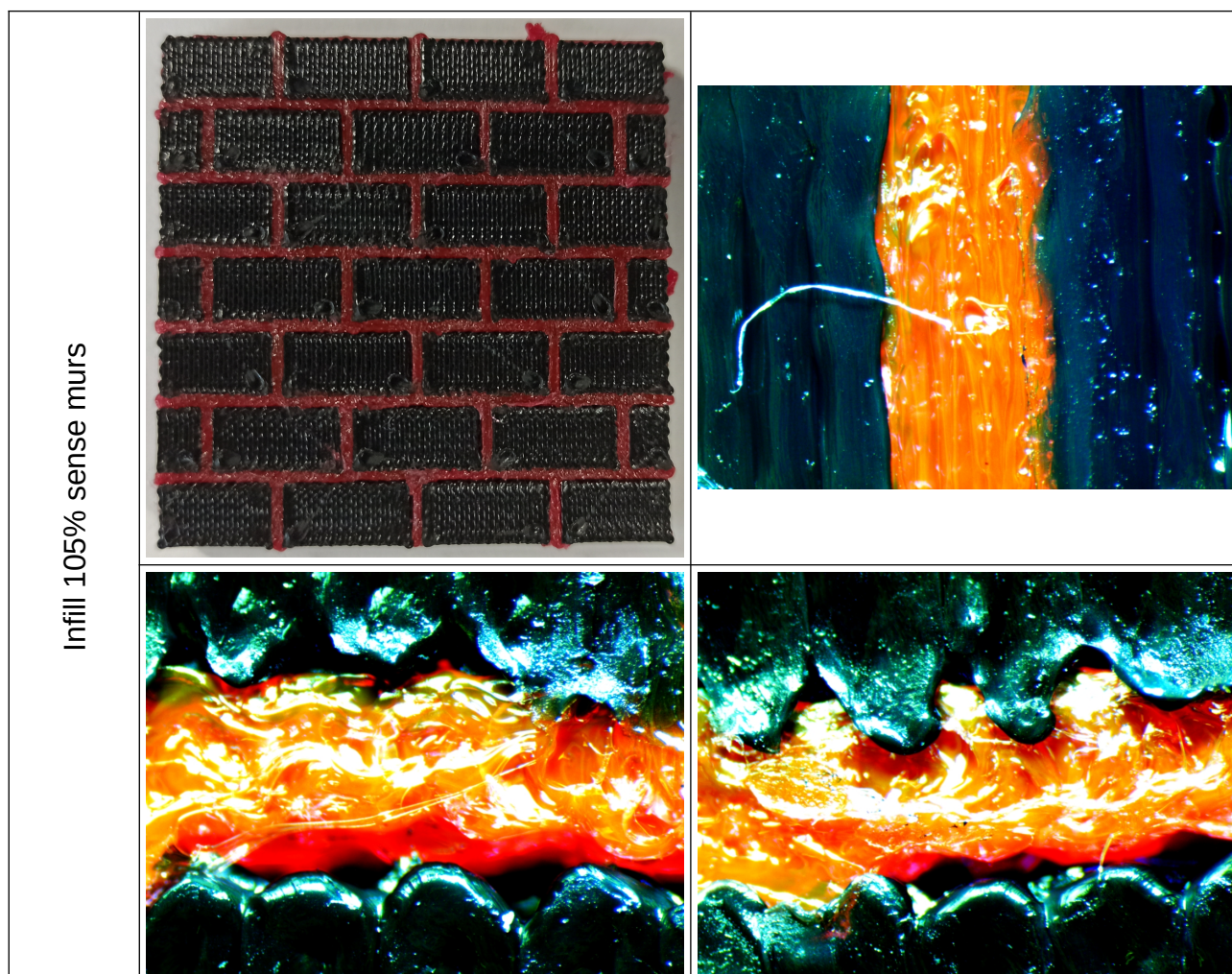


En aquest primer cas, es veu com en algunes zones hi ha una manca d'adherència entre el PLA i el TPU.

Taula 3: Imatges de la proveta de prova amb un infill del 105%

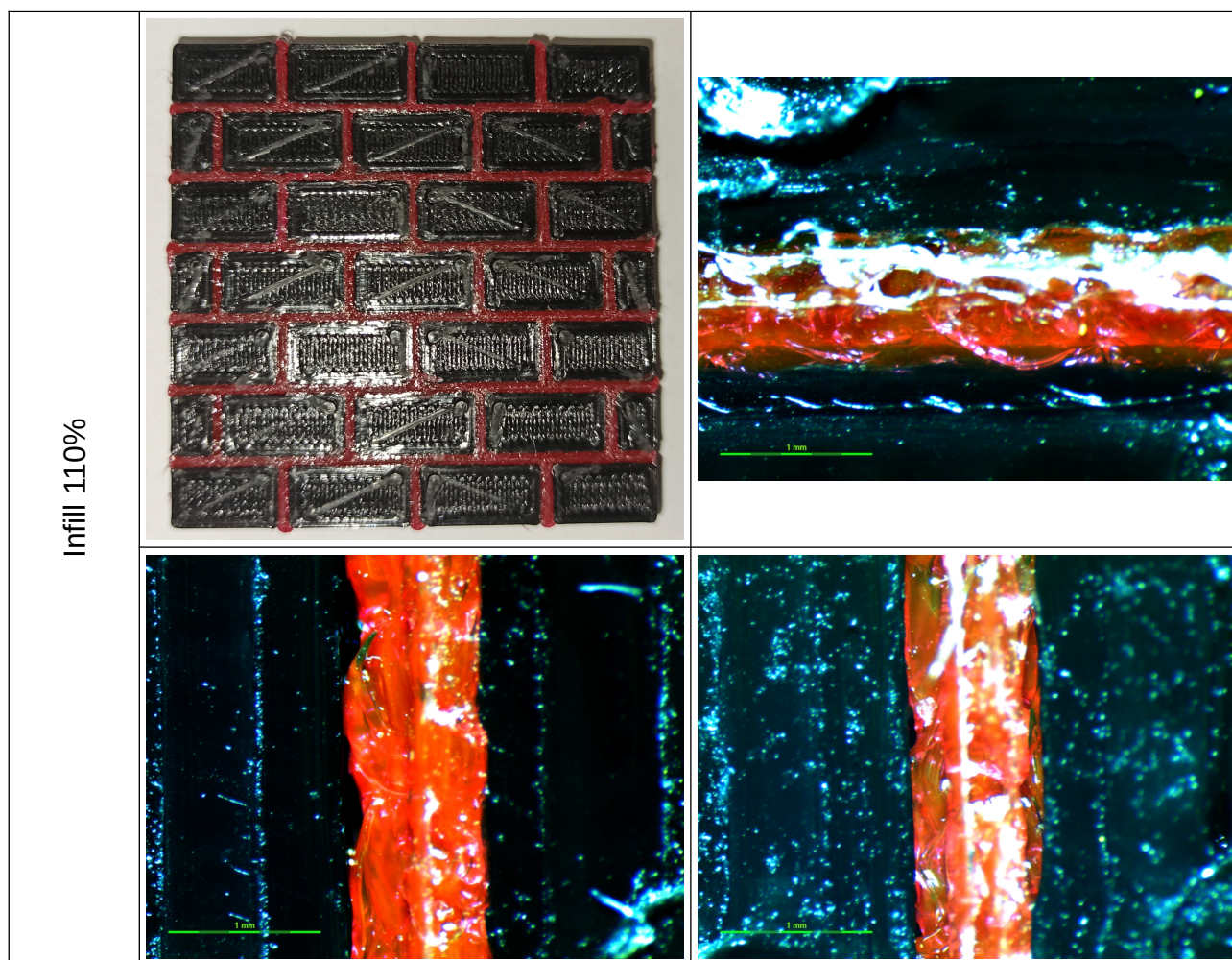
Infill 105%		
		

Taula 4: Imatges de la proveta de prova amb un infill del 105% sense murs de PLA



El primer que s'observa en les fotografies són els efectes de l'absència de murs de PLA. En aquest cas concret, a causa de l'orientació dels filaments en l'última capa, les conseqüències es presenten en els morters horitzontals.

Taula 5: Imatges de la proveta de prova amb un infill del 110%



A partir de les mides, s'ha calculat la mitjana i la desviació estàndard d'aquestes. Aquestes dades han estat recollides en un full de càlcul i han servit per a decidir quin dels diferents valors d'*infill* és el més idoni.

Taula 6: Mesures del brick gap del morter de TPU de la capa superior.

Gruix	Infill 100%				Infill 105%				Infill 110%				Infill 105% no wall			
	Tot	H	V		Tot	H	V		Tot	H	V		Tot	H	V	
Mitjana	0,6910	0,6966	0,6855		0,8551	0,8090	0,9012		0,7825	0,8321	0,7506		0,9244	0,9565	0,8924	
Error mitjana	0,1090	0,1034	0,1145		0,0551	0,0090	0,1012		0,0175	0,0321	0,0494		0,1244	0,1565	0,0924	
Desviació estàndard	0,0730	0,0751	0,0749		0,0651	0,0405	0,0508		0,0929	0,0517	0,1008		0,1684	0,1750	0,1625	
Dades		0,7323	0,6287			0,8428	0,8048			0,8394	0,7772			0,9361	0,8117	
		0,7185	0,7219			0,8497	0,9085			0,8359	0,8566			0,9361	0,7392	
		0,5976	0,7807			0,8359	0,8636			0,7289	0,8048			0,7530	0,7876	
		0,7288	0,7116			0,7737	0,9361			0,8463	0,9085			0,9603	0,7634	
		0,7254	0,7565			0,7876	0,9085			0,8739	0,6839			1,1470	0,7254	
		0,7599	0,6528			0,8221	0,9361			0,7634	0,6909			0,7496	0,7496	
		0,5458	0,7219			0,7254	0,9361			0,8808	0,7565			0,8359	0,8705	
		0,7668	0,5355			0,8359	0,9637			0,8670	0,8982			1,1810	0,9257	
		0,6943	0,6598			0,8083	0,8532			0,8532	0,8256			0,8566	0,9223	
											0,7392			1,0020	1,1050	
											0,6701			1,3020	1,1610	
											0,6045			0,8187	1,1470	
											0,7047					
											0,5872					

Taula 7: Mesures de l'alçada total de les provetes de prova.

	Infill 100%			Infill 105%			Infill 110%			Infill 105% no wall		
	Tot	TPU	PLA	Tot	TPU	PLA	Tot	TPU	PLA	Tot	TPU	PLA
Mitjana	5,119	5,174	5,065	5,068	5,123	5,014	5,188	5,229	5,148	5,069	5,081	5,056
Error mitjana	0,119	0,174	0,064	0,068	0,123	0,014	0,188	0,229	0,148	0,069	0,081	0,056
Desviació estàndard	0,063	0,033	0,017	0,070	0,030	0,052	0,053	0,047	0,010	0,053	0,057	0,051
Dades		5,175	5,075		5,091	5,102		5,224	5,150		5,069	5,080
		5,156	5,060		5,144	4,973		5,275	5,161		5,153	4,995
		5,174	5,050		5,127	5,019		5,257	5,144		5,033	5,007
		5,211	5,094		5,081	5,039		5,184	5,141		5,004	5,114
		5,207	5,060		5,149	4,959		5,270	5,156		5,094	5,105
		5,123	5,048		5,145	4,990		5,161	5,135		5,132	5,036

En estudiar les dades, s'observa que les provetes que millors resultats donen són les que tenen un *infill* del 105% i 110%. Amb aquests resultats, originalment s'havia proposat utilitzar un *infill* del 105% amb murs, s'ha decidit realitzar les impressions amb el mateix *infill* però sense murs de PLA. Aquesta decisió s'ha pres basant-se en el treball dut a terme per Daniela Rico, qui va fabricar les seves provetes sense murs en el PLA.

Annex 3: Estudi de les versions del programa de la multiestructura *brick and mortar*

1. Introducció:

Durant la realització del projecte i el disseny de la geometria *brick and mortar*, el modelatge de l'estructura esmentada ha experimentat diverses modificacions, en total, s'han creat sis versions diferents cadascuna amb les seves pròpies característiques.

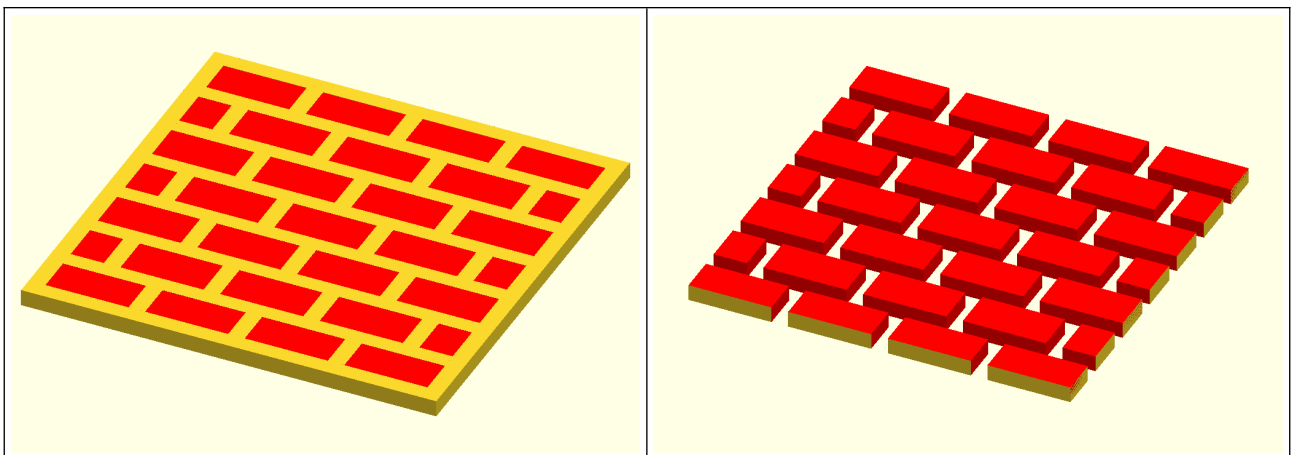
En alguns casos, les diferències entre versions són clarament visibles i evidents, mentre que en altres, les diferències es troben en el com s'ha creat la geometria i no en l'estructura en si mateixa.

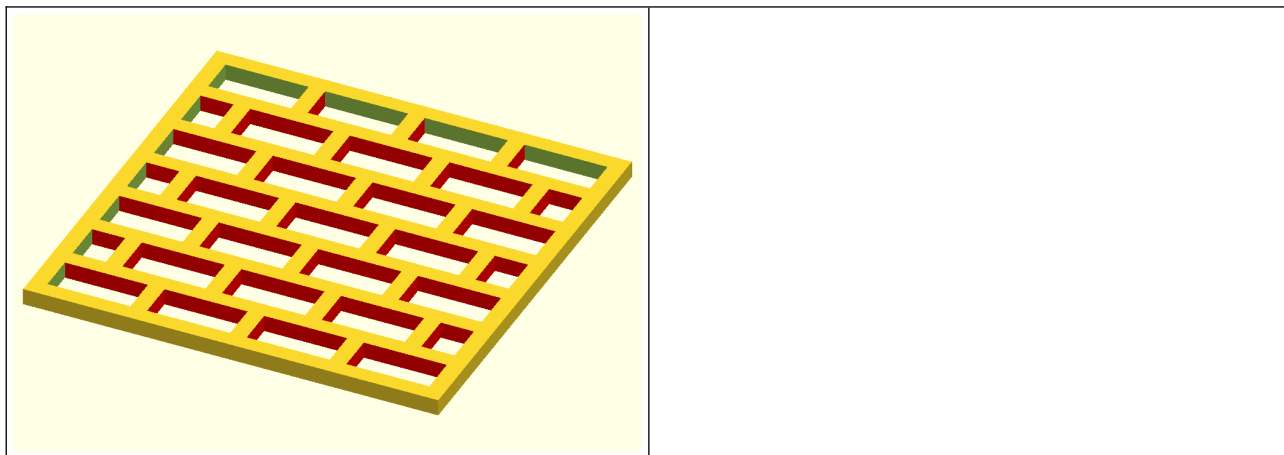
2. Versió 1:

El model està compost per dues estructures, l'estructura de brics i el morter. Els brics es col·loquen per files i la separació entre ells és la mateixa en totes les direccions del pla.

Per crear el morter, es genera una làmina de la mateixa alçada dels brics i posteriorment, se li resta l'espai que ocuparien els brics.

Mitjançant un bucle, és possible crear una estructura multinivell, però no generarà una capa de morter entre els diferents nivells de blocs.

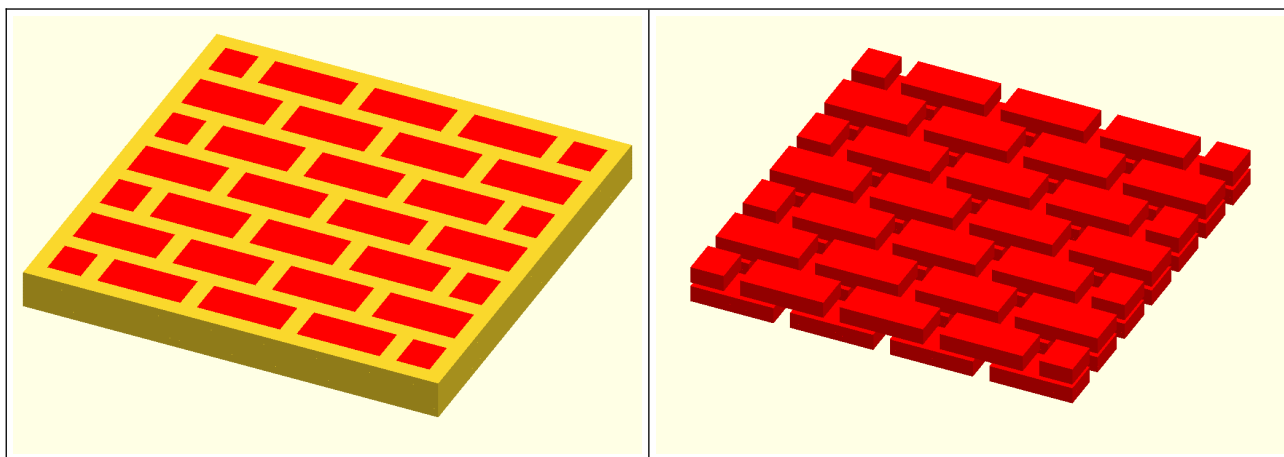


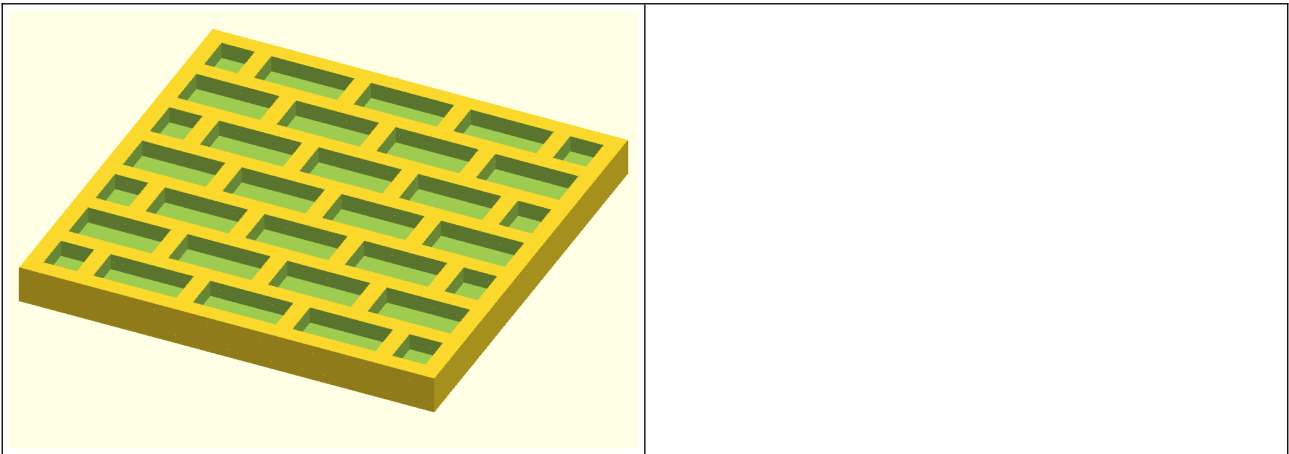


3. Versió 2:

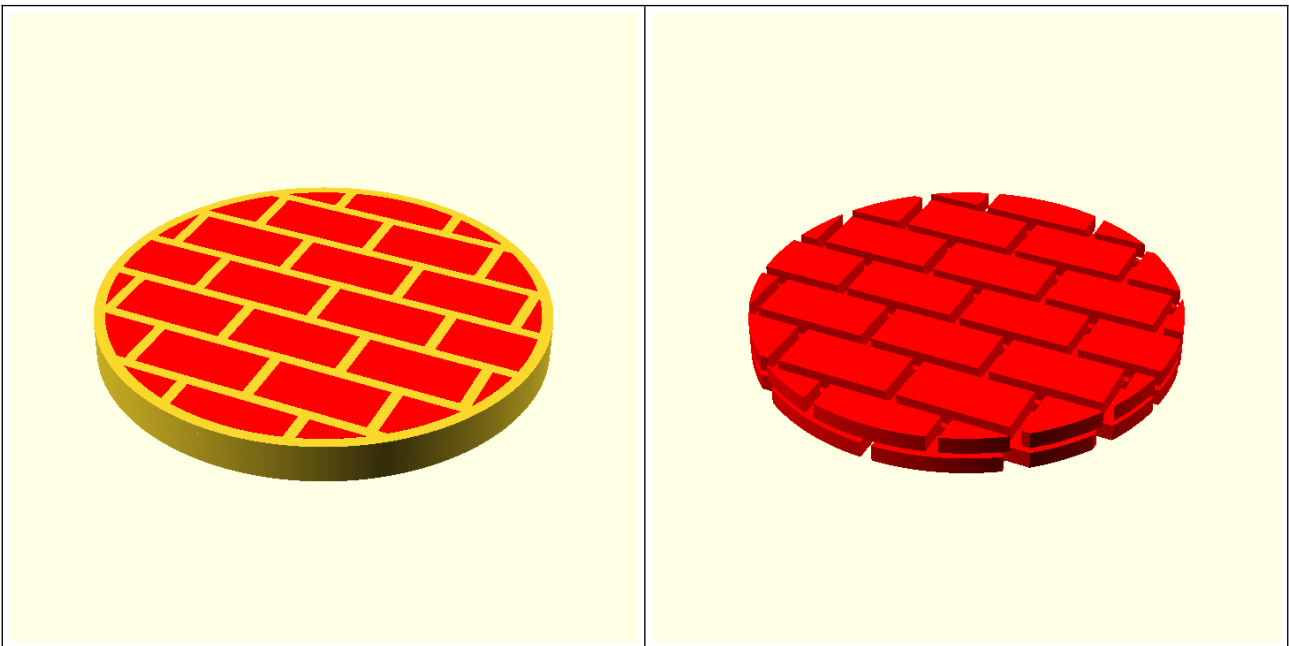
Es tracta d'una evolució de la versió 1, la generació dels brics és la mateixa, però es modifica el com es crea el morter, permetent l'existència de capes de morter entre diferents nivells de brics.

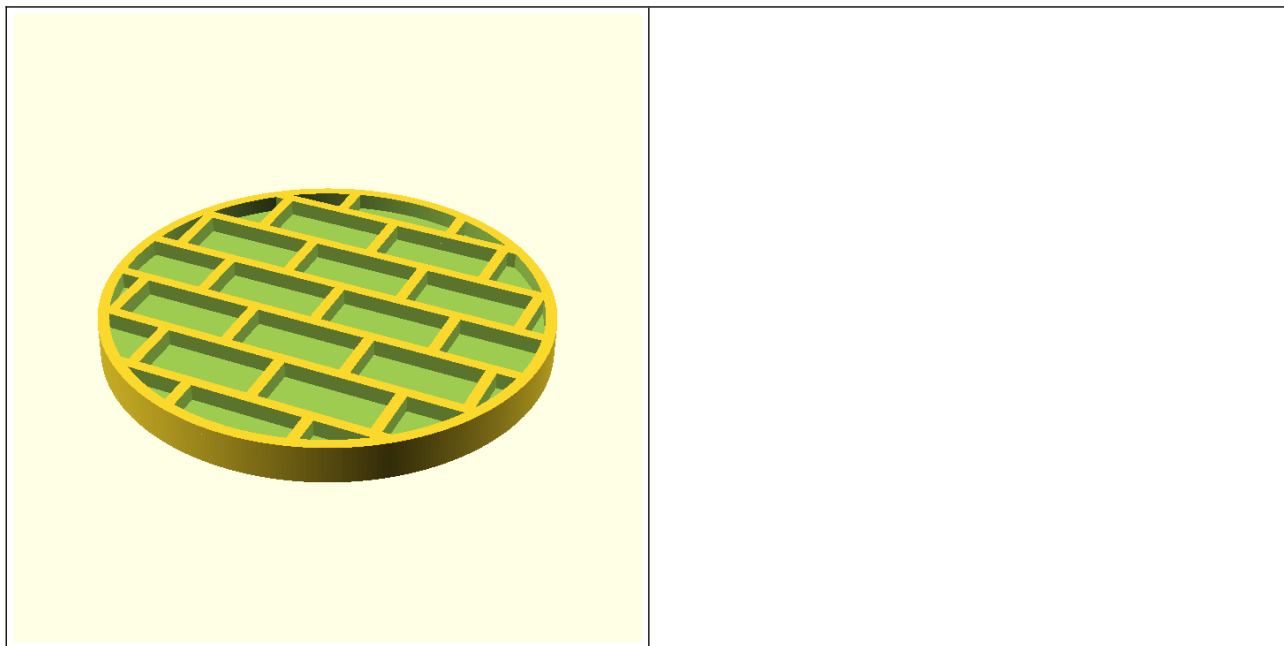
El morter és gènera com un cuboide amb una alçada equivalent a la suma de les alçades dels nivells de brics més la separació entre ells.





A més, es va crear una versió modificada de planta circular.



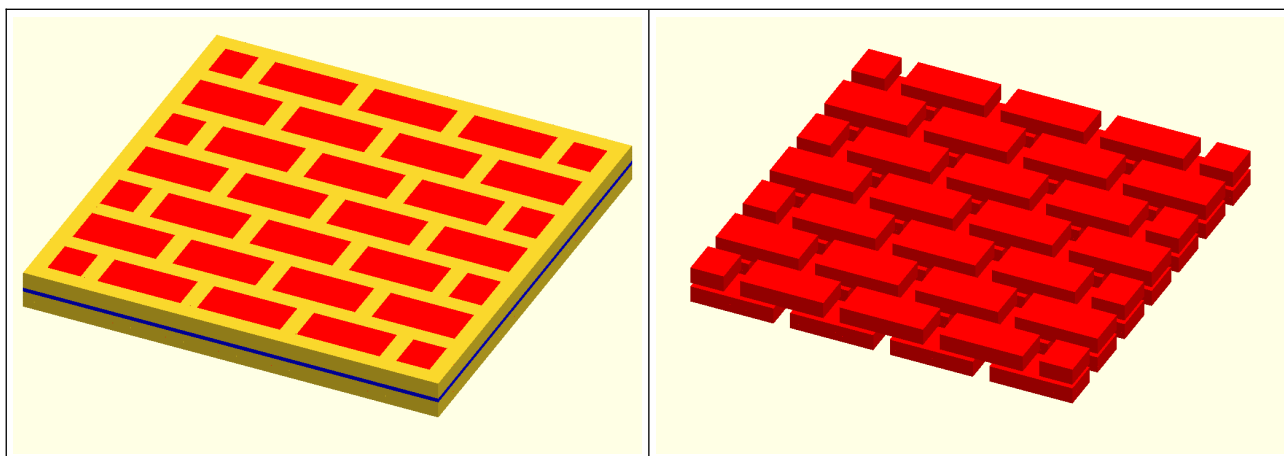


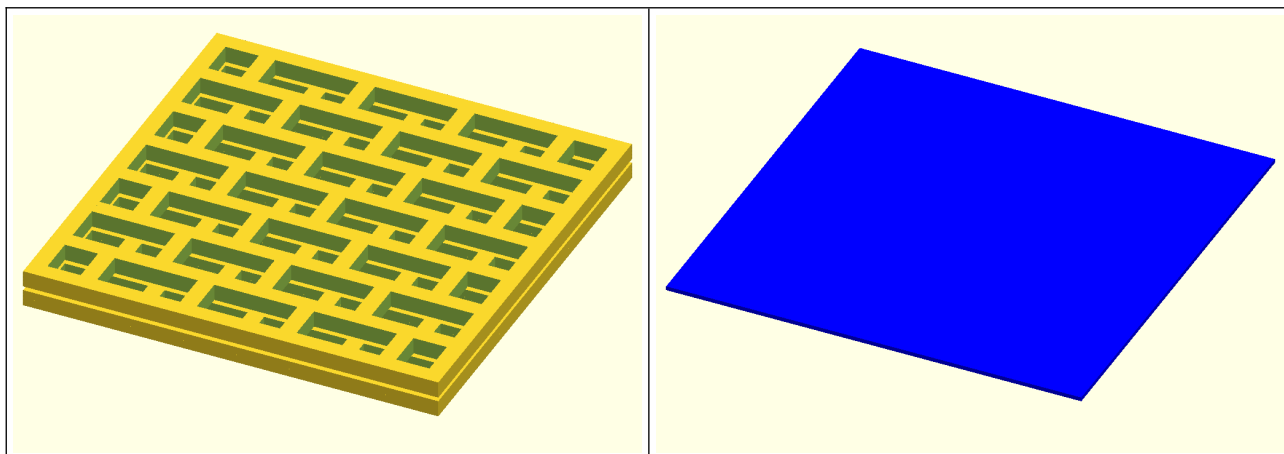
4. Versió 3:

És una modificació de la versió 1. Ara es permet generar una làmina de morter que ocuparà l'espai de separació entre dos nivells contigus.

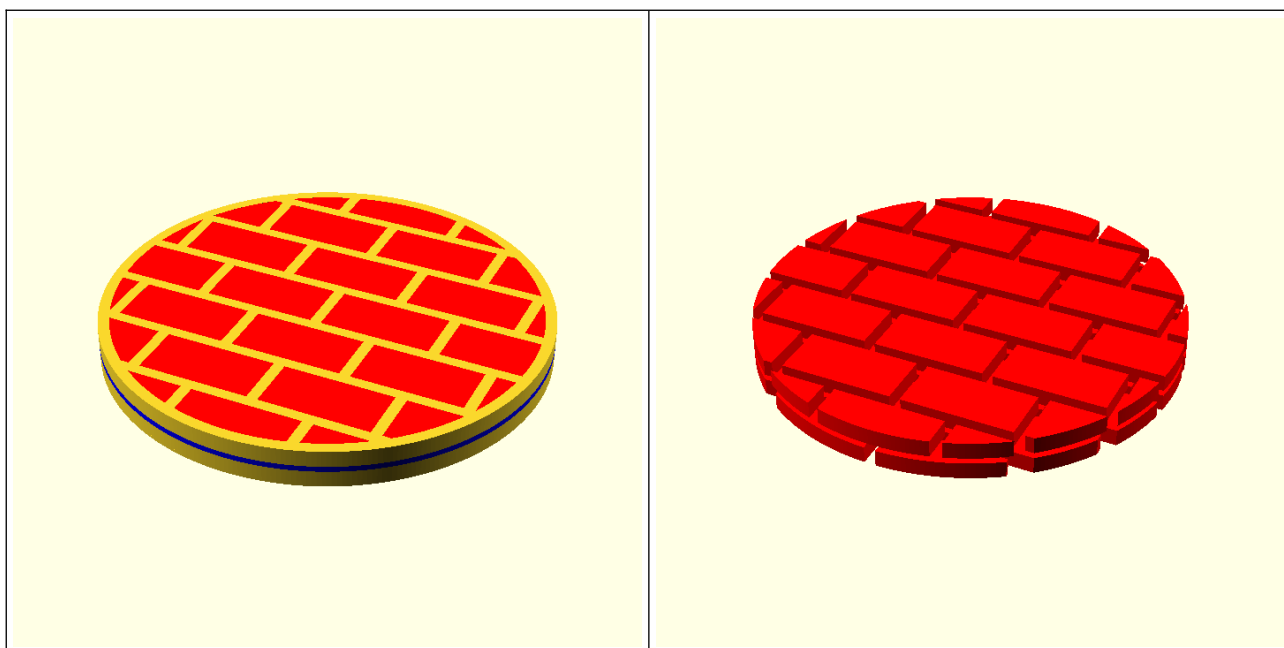
Tot i que es tracta d'una capa de morter, aquesta es modela com un cos independent.

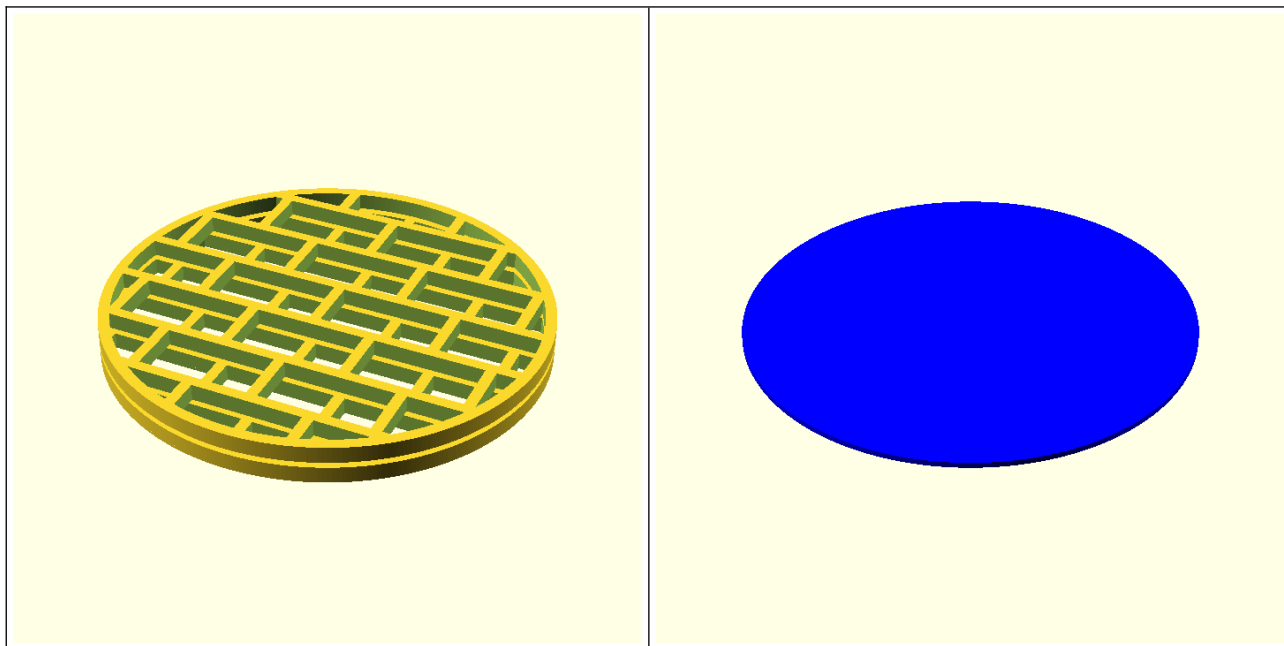
Aquesta versió ha estat descartada en favor de la 2.





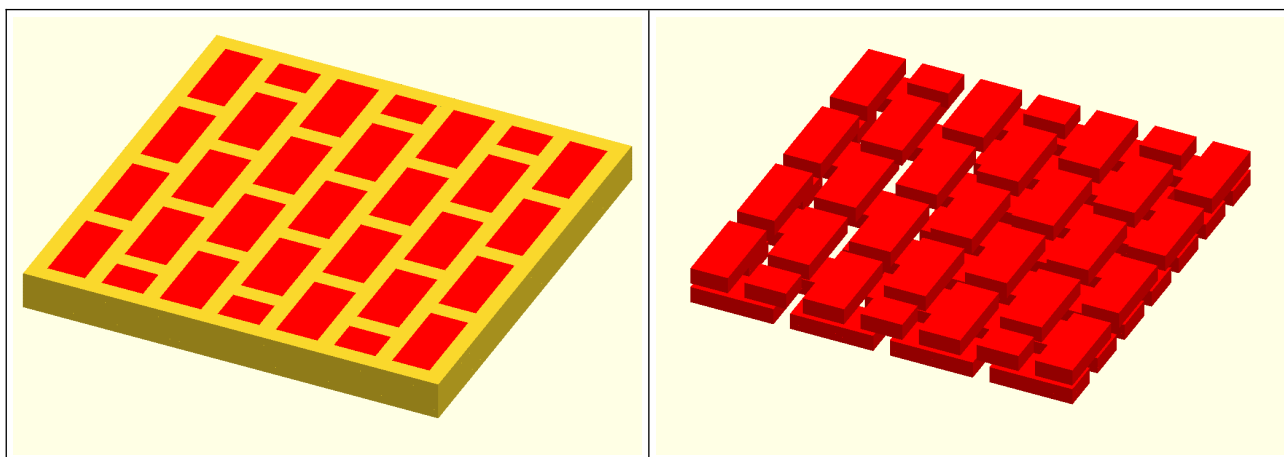
Igual que amb la versió anterior, d'aquesta versió també es va crear una modificació de planta circular.

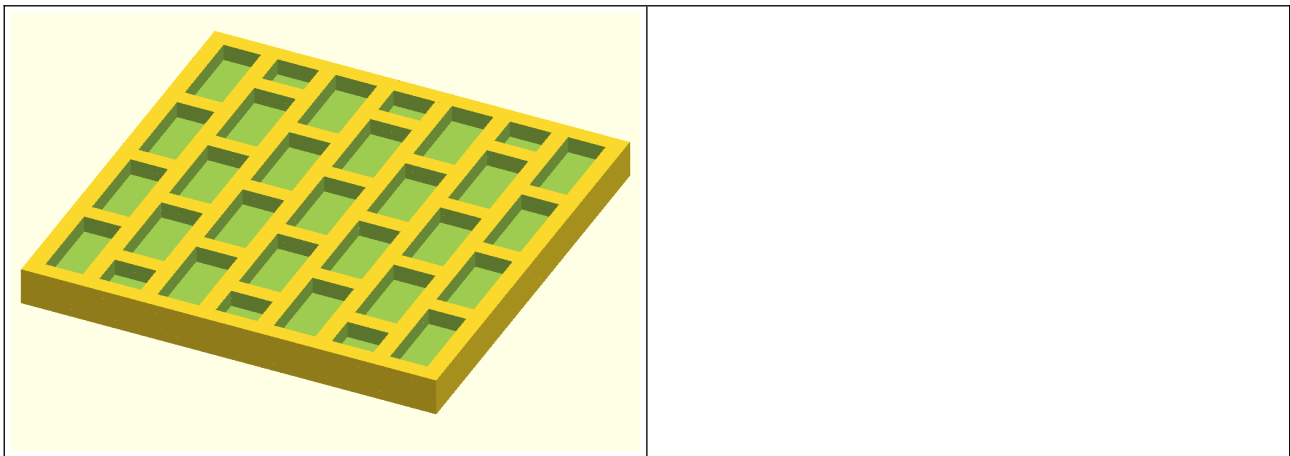




5. Versió 4:

Modificació de la versió 2. En aquesta versió, els brics de diferents nivells és col·loques rotant les seves direccions 0 i 90°.

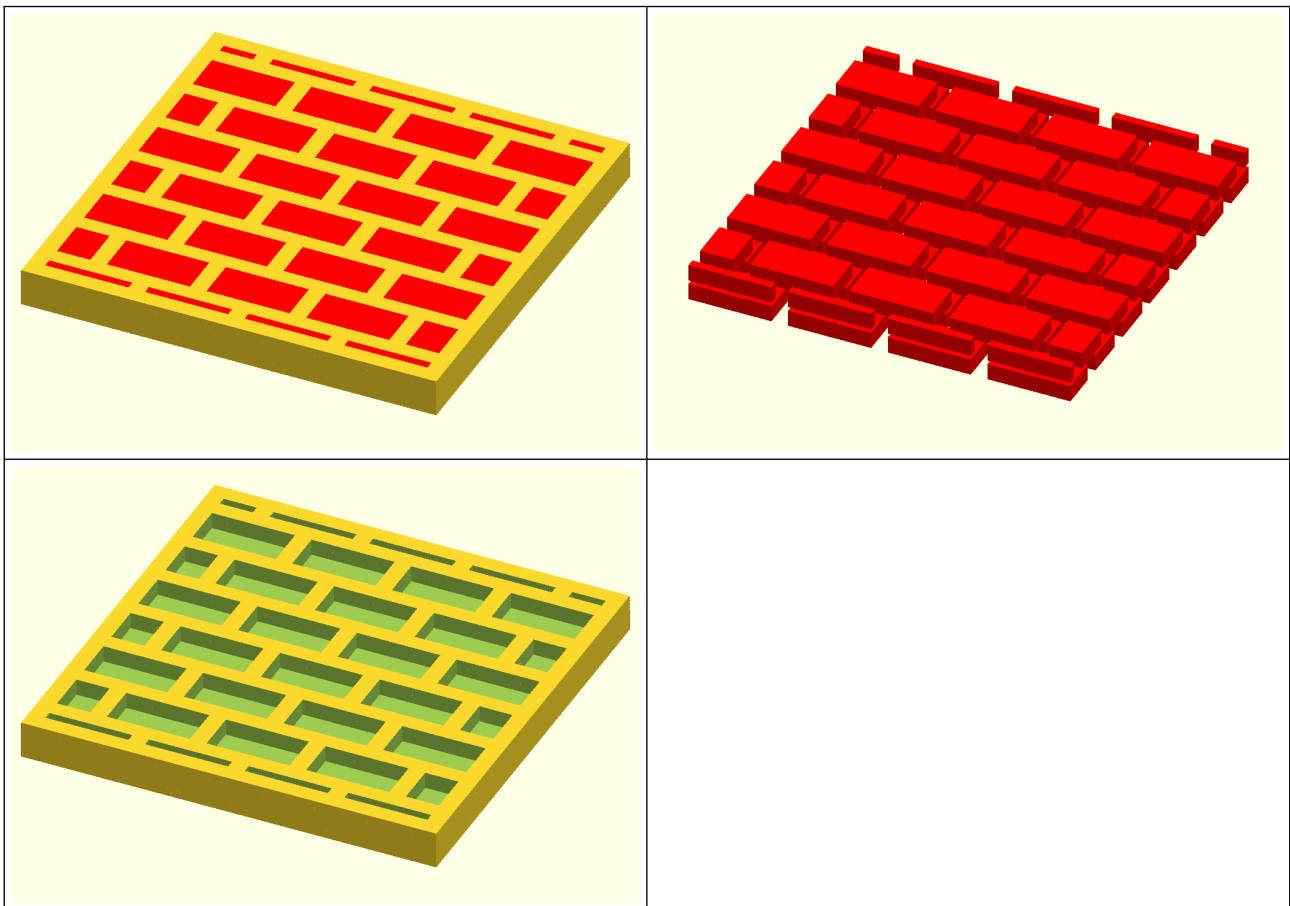




6. Versió 5:

Millora de la versió 2.

S'ha afegit el paràmetre de disseny *offset*, que permet a l'usuari desplaçar els brics de nivells alterns en direcció Y, d'aquesta forma no es generen columnes de brics.

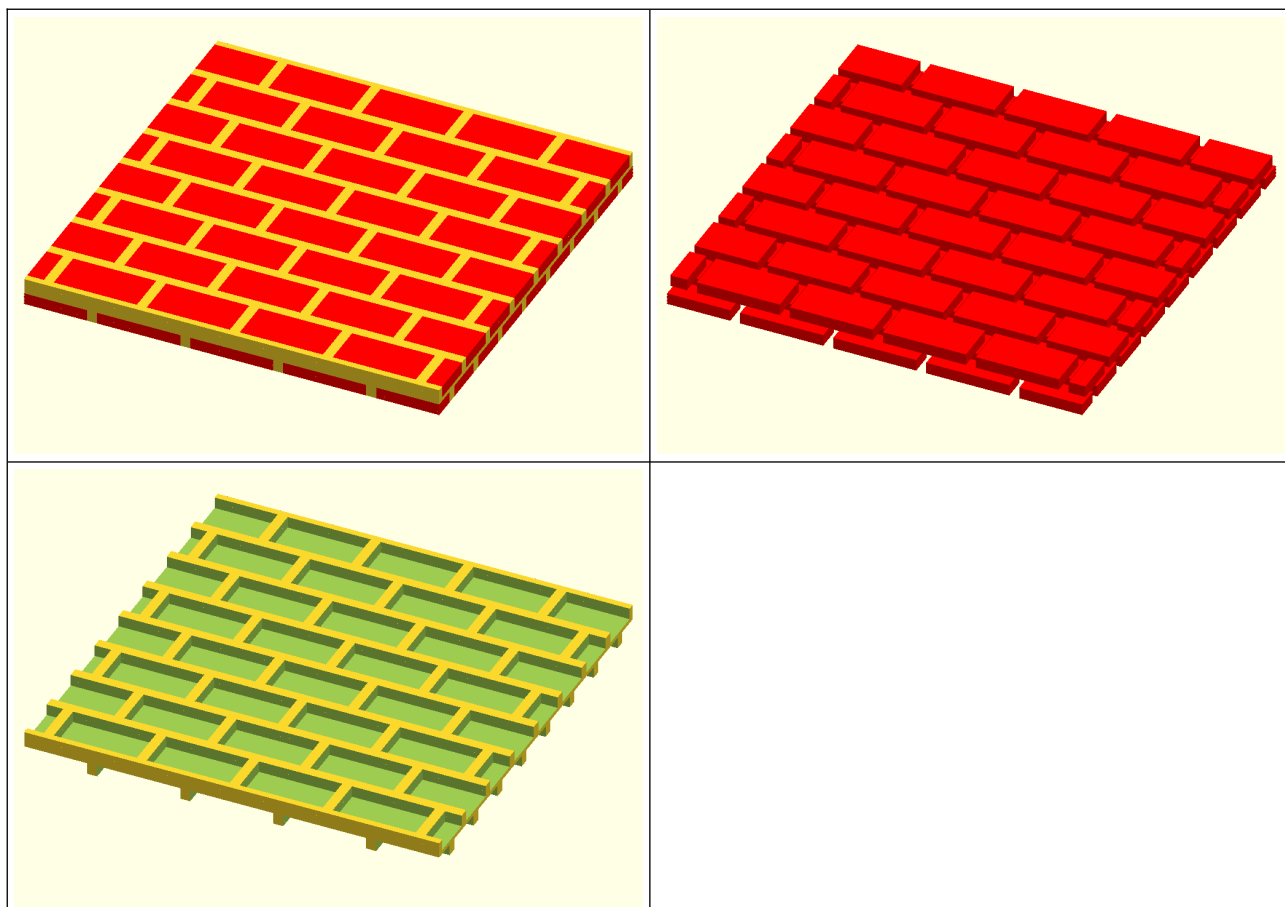


7. Versió 6:

Es tracta d'una modificació de la versió 5.

S'ha eliminat el perímetre de morter que es generava en les versions anteriors.

Aquesta ha estat la versió definitiva.



Annex 4: Estudi de les versions del programa de la multiestructura *honeycomb*

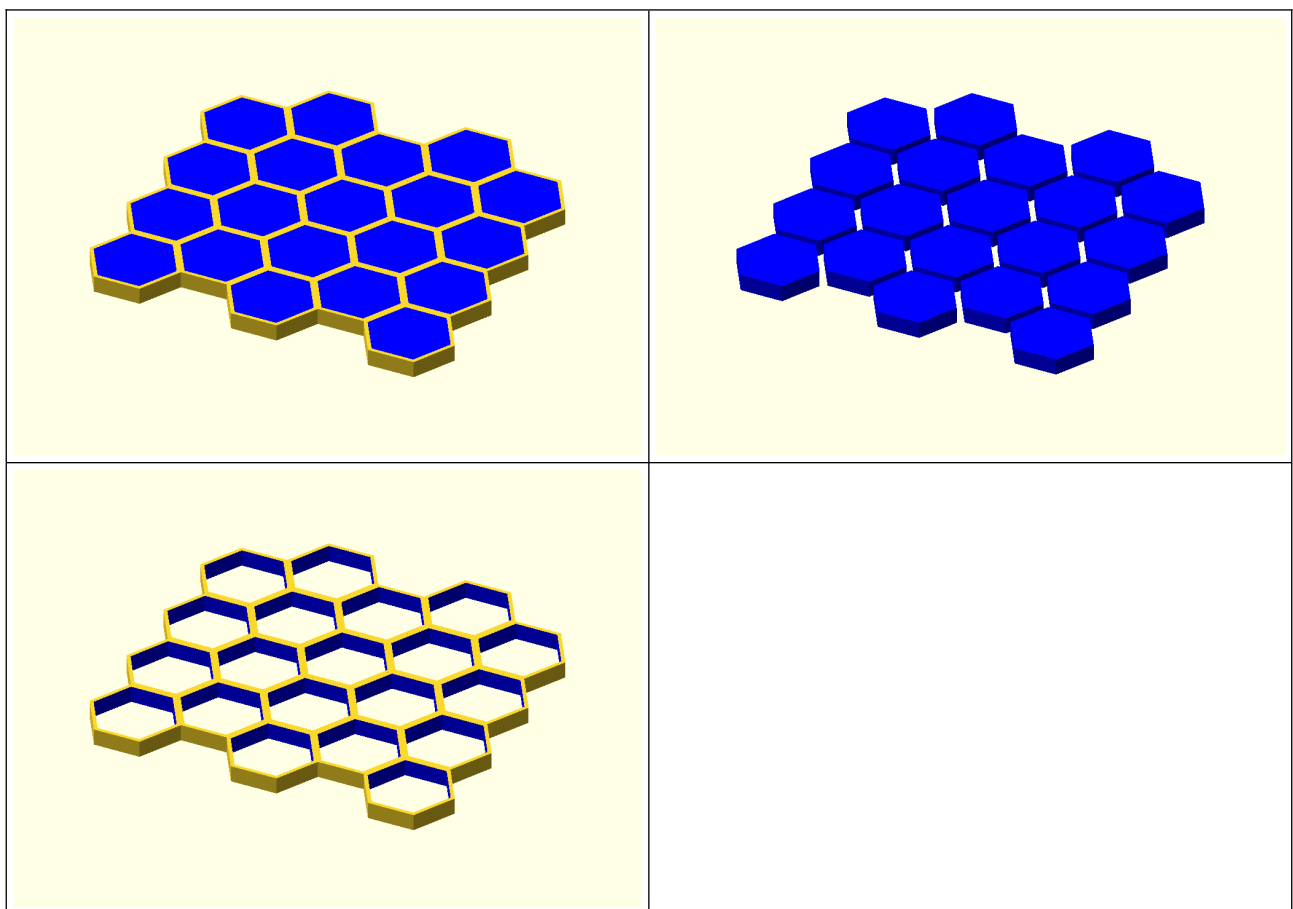
1. Introducció:

Igual que la geometria *brick and mortar*, el modelatge de les estructures *honeycomb* amb plaquetes hexagonals massisses ha experimentat diverses modificacions, donant lloc a un total de tres versions diferents.

2. Versió 1:

Aquesta primera versió és realment una versió experimental que es va fer per comprovar el com s'haurien de col·locar els hexàgons en pla.

En aquesta versió, primer es crea una plaqueta hexagonal que serà un bric i després es crea un altre hexàgon un poc més gran que serà el morter que l'envolta. Un cop s'han creat aquestes dues parts que formen una cel·la, es van col·locant al llarg del pla mitjançant un bucle. És per aquest motiu que la planta de l'estructura no és quadrada. Dit això, no es adequada per fer múltiples nivells.



3. Versions 2 i 3:

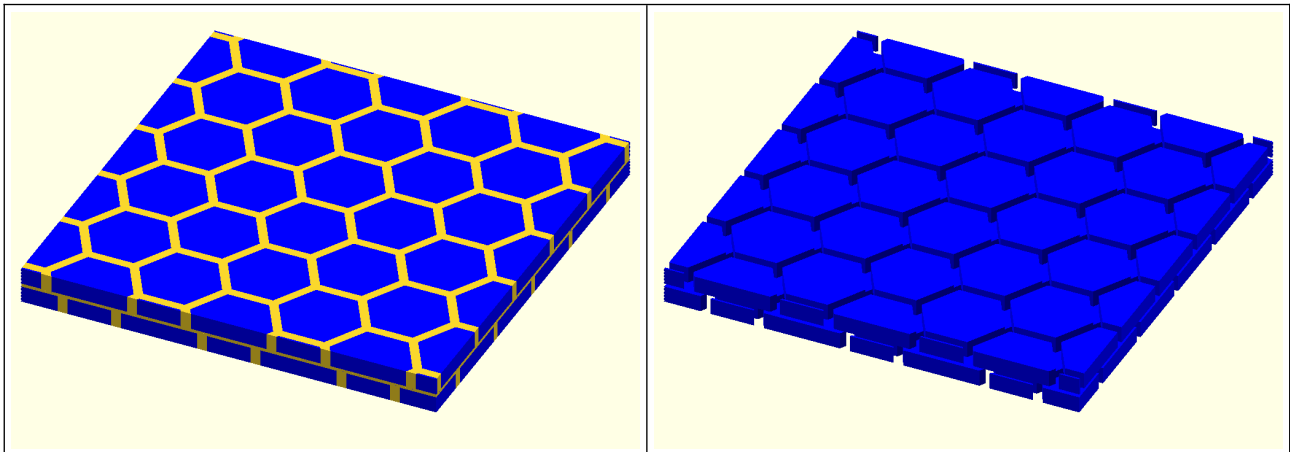
Les versions 2 i 3 són bàsicament la versió 6 de *brick and mortar* però adaptada a les plaquetes hexagonals. Aquestes versions posseeixen una capa de morter entre els nivells, són de planta quadrada i no tenen perímetre de morter.

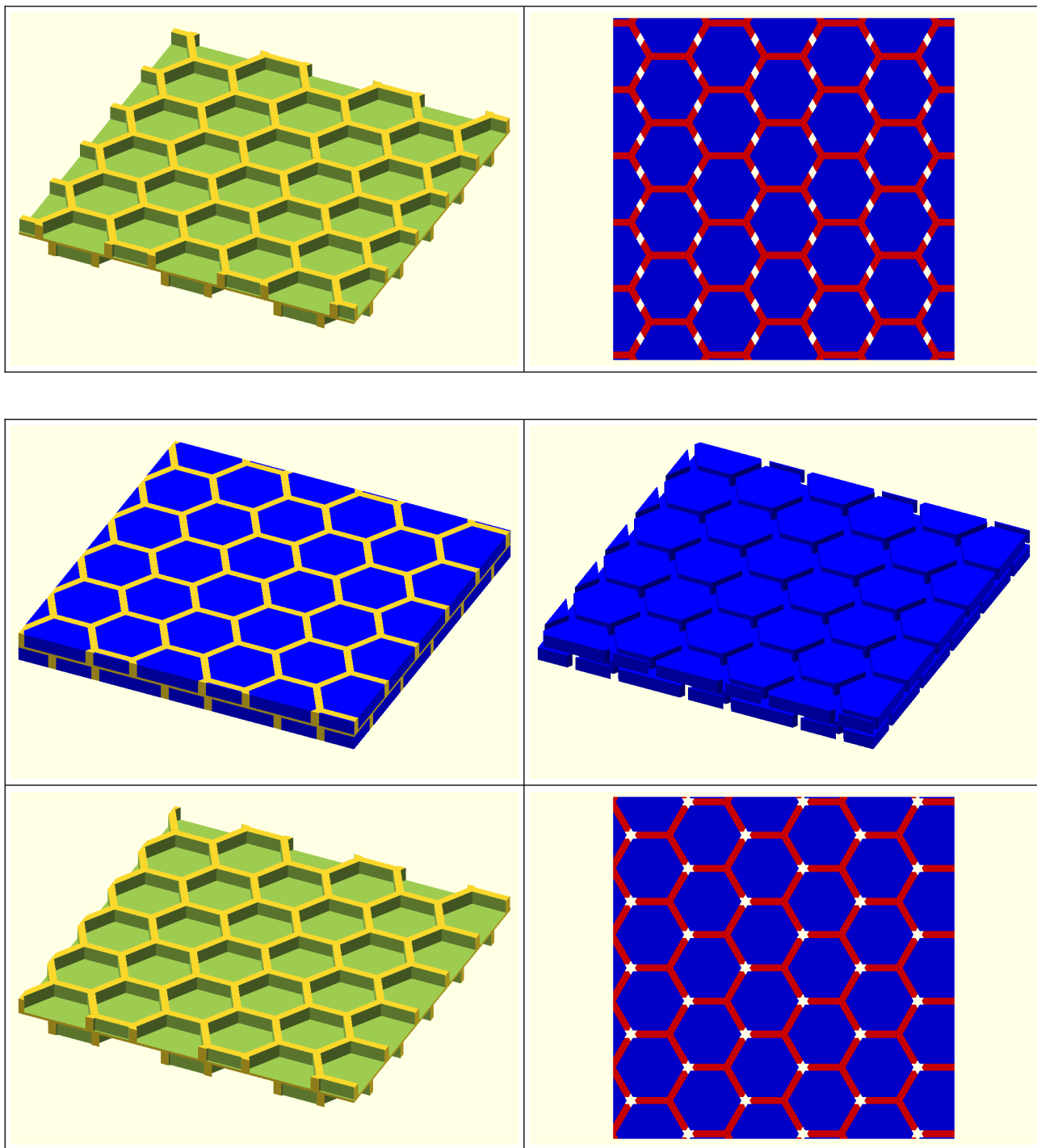
Aquestes dues versions són realment la mateixa amb una única diferència, que és el desfasament de les capes alternes. Mentre que en el *brick and mortar* aquest desplaçament en direcció Y es pot definir per l'usuari amb el paràmetre *off_set*, però que és preferible que sigui un valor equivalent a la meitat de la suma del *brick_depth* més el *brick_gap*, això no és possible en el *honeycomb*.

En la versió 2, el centre de l'hexàgon de sobre, coincideix amb el centre del costat superior de l'hexàgon de sota. En altres paraules, el centre de l'hexàgon superior està desplaçat una distància equivalent al radi inscrit de l'hexàgon de sota.

En canvi, en la versió 3, el centre de l'hexàgon de sobre coincideix amb un dels vèrtexs de l'hexàgon de sota, és a dir, està desplaçat una distància que equival al radi circumscrit de l'hexàgon de sota.

Aquesta diferència es pot observar quan s'observa l'estructura de brics des de sobre sense morter, essent de color blau els del segon nivell i de color vermell els del primer nivell.





Vistes les dues versions des de sobre, es pot comprovar que hi ha espais que no tenen cap color, aquests són espais on únicament hi haurà morter, en altres paraules són zones a on es crearan columnes contínues de morter.

Aquest fet ha estat el motiu de què al final s'hagi escollit la versió 2 en lloc de la 3, ja que s'ha considerat que és millor tenir les columnes de morter en els costats dels hexàgons que en els vèrtexs.

Annex 5. Estudi dels paràmetres de G-Code de l'Ultimaker 3:

Aquesta annex és un recopilatori de les diferents funcions dels fitxers *gcode* analitzats per estudiar el seu funcionament.

Paràmetres universals:

- **T:** Indica l'extrusor actiu.
 - T0: Extrusor 1.
 - T1: Extrusor 2.

Funcions G:

Moviment lineal - G0 i G1:

Les comandes G0 i G1 ordenen a la impressora que traslladi l'extrusor en una línia recta fins a una posició determinada.

La diferència entre ambdues comandes resideix en què la G0 no extrudeix material pel capçal.

Arguments:

El valor F indica la velocitat en mm/min.

Els valors X, Y o Z indiquen a la impressora a quina posició s'ha de moure.

El valor E correspon a la posició del filament, no a l'alçada de capa ni a la quantitat de material que extreu.

No és necessari especificar tots els arguments.

Exemples:

G1 F1800 X50 Y50

G1 F600 Z0.3

G1 F2100 E5

G1 Y60 E10

G0 F18000 X20 Y20

G0 X30 Y30

G0 Z10

G92 - Set Current Position.

Estableix la posició actual dels eixos. Aquesta comanda serveix per canviar la posició o l'offset de la localització d'un dels eixos. Es pot utilitzar per modificar la posició del zero màquina.

Aquesta comanda es pot fer servir amb els arguments X, Y, Z i E. Sí no s'inclou algun d'aquests, la posició d'aquest no canviarà.

Exemples d'ús:

G0 F3000 X50; mou a la posició X=50 del plat.

G92 X0; estableix la posició actual com X=0

G0 X10 Y10; mou a la posició X=10 del nou sistema de coordenades, posició X=60 del sistema anterior.

G90 - Posicions Absolutes.

La comanda G90 indica a la impressora que utilitza posicions absolutes.

Exemple d'ús:

G90 ; utilitza posicions absolutes

G1 F1000 X10 ; mou a la posició X=10mm del llit

G1 X20 ; mou a la posició X=20 del llit

G1 E2 ; mou el filament a la posició 2

G91 - Coordenades Relatives

La comanda G91 serveix per utilitzar posicions relatives.

Exemples d'ús:

G91

G1 F1000 X10 ; mou 10 mm cap a la dreta des de la posició actual.

G1 E-2 ; Retrocedeix el filament 2 mm.

G280 - Prime blob

Aquesta comanda prepara l'extrusor. Si es fa servir sense arguments, farà una purga inicial de material; en canvi, si s'empra l'argument S1, no ho farà.

Funcions M:

M82 - *Absolute extrusion mode.*

Estableix els codis E absoluts. Per defecte.

M104 i M109 - Comandes de temperatura de l'extrusor:

Les comandes M104 i M109 estableixen la temperatura objectiu de l'extrusor.

En utilitzar la comanda M104, es començarà a escalfar l'extrusor, però permet l'execució d'altres comandes immediatament després. Aquesta comanda és pot emprar per escalfar l'extrusor en espera mentre s'està utilitzant l'altre.

Per altra banda, la comanda M109 farà que la impressora esperi fins que l'extrusor assoleixi la temperatura indicada abans de permetre l'execució d'altres comandes.

Arguments:

El valor S especifica la temperatura de l'extrusor en graus centígrads.

El valor T indica quin extrusor escalfar, si no es fa servir, utilitzar l'extrusor que estigui actiu en aquell moment.

Exemples:

M109 S200 ; Espera que l'extrusor actualment actiu assoleixi la temperatura de 200 °C.

M104 T0 S200 ; Comença a escalfar l'extrusor T0 fins a 200 °C.

G0 F1000 X50 ; Mou a la posició X=50mm mentre calenta l'extrusor.

M106 i M107 - Ventilador:

La comanda M106 encén el ventilador de l'extrusor mentre que la comanda M107 l'apaga.

Arguments:

El valor S especifica la velocitat del ventilador, aquest valor va de 0 a 255.

És important tenir en compte que en el programa Cura la velocitat del ventilador s'introdueix com un percentatge de 0 fins al 100%. Per tant, el valor S255 implica que aquesta funcioni a màxima velocitat.

Exemples:

M106 S255

M107

M204 - *Set default acceleration:*

El valor S és l'acceleració en mm/s².

Estableix l'acceleració per defecte: S moviment normal, T només mou el filament, (M204 S3000 T7000) en mm/s² també estableix el temps mínim del segment en ms (B20000) per prevenir el desbordament del *buffer* i la velocitat d'avanç mínim M20.

Annex 6. Resultats

1. Introducció:

Representació gràfica de les dades obtingudes dels assajos QSI.

Numeració dels assajos:

Codi GREP - Tipus de Proveta	Codi AMADE	Observacions
BM-05-04	24-1004 24-1005	
BM-05-12	24-1006 24-1007	
BM-08-04	24-1008 24-1009	
BM-08-12	24-1010 24-1011	
BM-10-04	24-1000 24-1001	
BM-10-12	24-1002 24-1003	
HC-16-04	24-1012 24-1013	
HC-16-12	24-1014 24-1015	

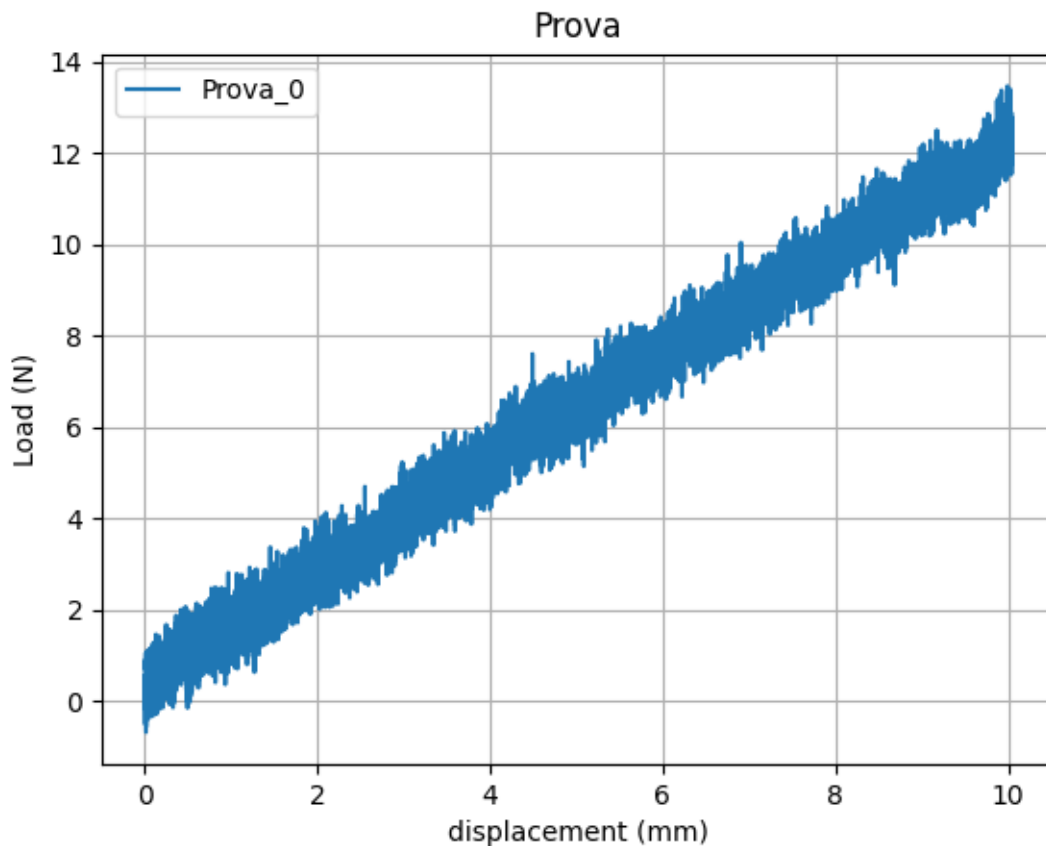
La codificació utilitzada en el GREP funciona de la següent forma:

- Les dues primeres lletres indiquen el tipus de geometria, BM es refereix a *Brick and mortar* i HC es refereix a *Honeycomb*.
- El primer nombre és una de les dimensions de les plaquetes en mm. En el cas del BM és el *brick depth*, tenint en compte que el *brick width* és el doble. Per al HC es refereix al *brick diameter*.
- El segon nombre indica el *brick gap*, però amb una consideració, el nombre implica la mida del *brick gap* en mm multiplicada per 10. O sigui, el 04 signifiquen 0,4 mm i el 12 són 1,2 mm. El motiu d'això està en el fet que en el moment de crear el codi es va considerar que l'ús de signes de puntuació podria ser malinterpretat.

En aquest apartat, el que s'ha considerat interessant d'estudiar ha estat el comportament de les provetes fins al moment en què el PLA deixa de treballar, fent que sigui el TPU el material que faci el treball. Per aquest motiu, els punts marcats dels gràfics indiquen canvis de tendència en l'evolució de les corbes o punts d'interès previs a aquests canvis.

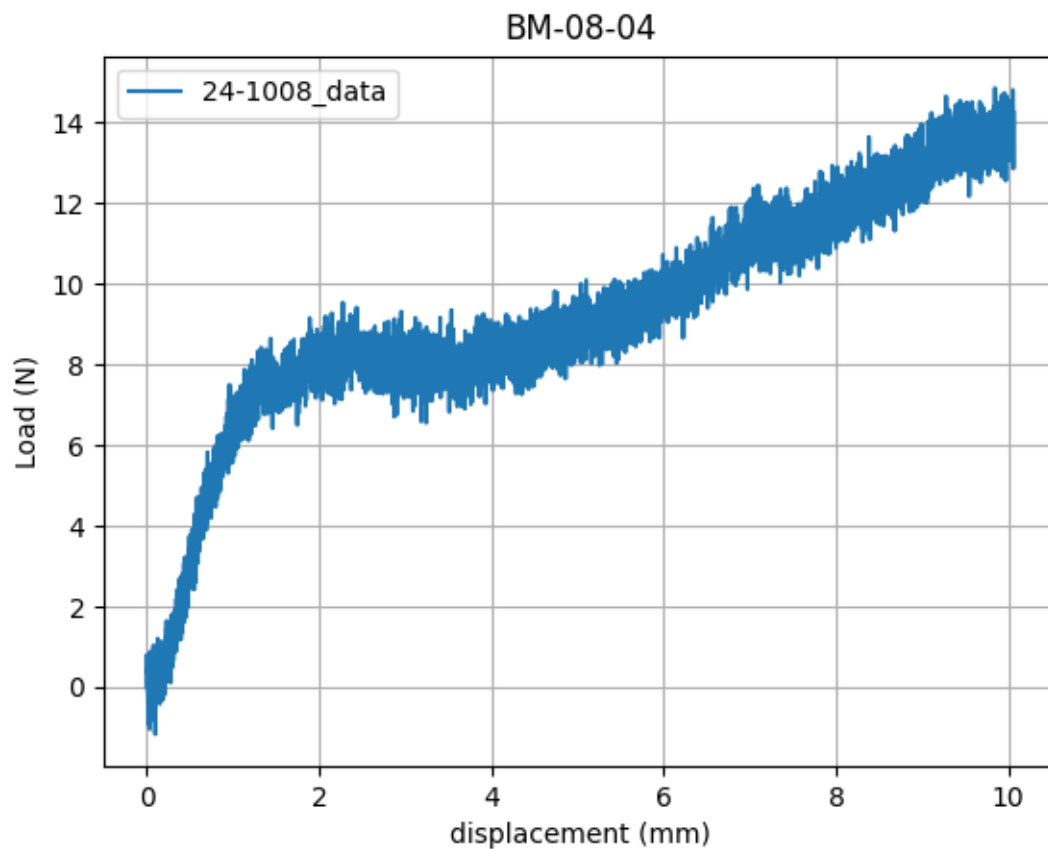
També s'ha calculat l'energia de la deformació en aquests punts mitjançant el mètode trapezoidal.

2. Prova i assaig descartat:



Abans de començar amb els assajos, es va realitzar una prova amb una proveta que s'havia imprès inicialment, però que va ser finalment descartada pels experiments. Aquesta prova tenia com a objectiu comprovar el funcionament de la màquina utilitzada, una *MTS Insight Electromechanical* amb una cel·la de càrrega de 50 kN.

Posteriorment a aquesta prova de comprovació, la qual semblava correcta, es va dur a terme el primer assaig amb l'espècimen 24-1008. La corba de força - desplaçament obtinguda es mostra a continuació.

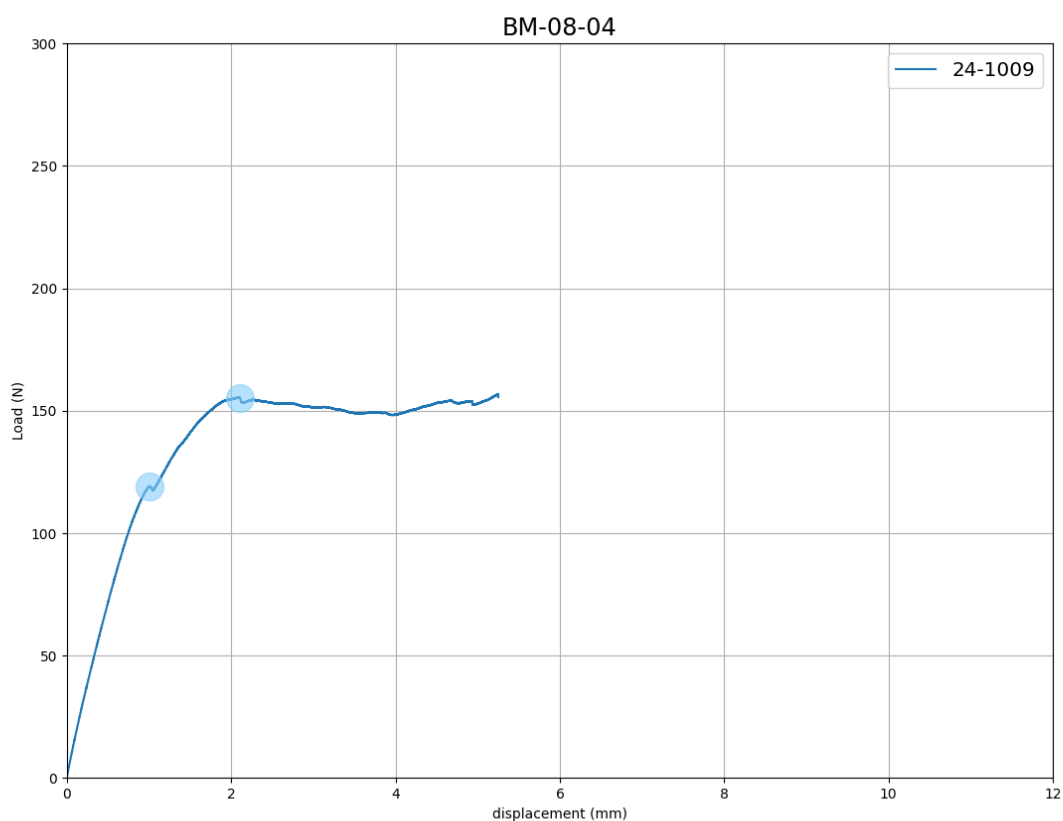


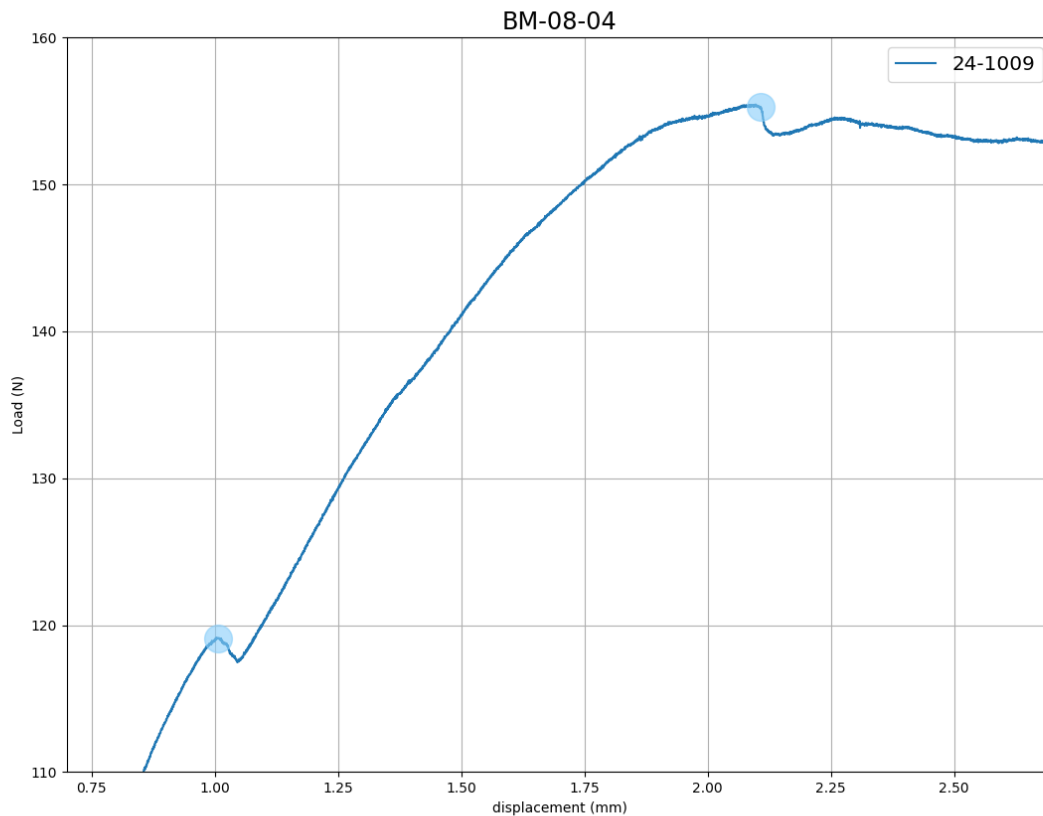
Tot i que a primera vista semblaria que les dades són correctes, realment no ho són. Segons les dades, la força que podria resistir la proveta sense deformar-se seria inferior a 1 kg, cosa que no és possible, perquè si fos així, una persona podria deformar-la fàcilment i vam comprovar que no. El problema va resultar ser un mal funcionament de la cel·la de càrrega. Per aquest motiu, es va acabar usant una altra màquina, una MTS *Insight Electromechanical* amb una cel·la de 5 kN.

D'aquesta forma, les dades recollides de l'espècimen 24-1008 han estat descartats.

3. Comparativa per parells:

3.1. BM-08-04:





La corba del gràfic es podria separar en tres seccions: la primera secció aniria fins al primer punt marcat, on hi ha un pic, que presenta un comportament més rígid i que podria ser la deformació elàstica del PLA. El segon tram, es troba entre aquest punt i el segon marcat, aquí la corba continua creixent, però de forma menys pronunciada, suavitzant-se lentament, és possible que en aquest moment, els brics de PLA comencessin a fallar. L'última secció és molt més plana i s'apropa més a una deformació plàstica, el més probable sigui que en aquest punt sigui el TPU el material que fa tota la feina.

S'hipotetitzava que aquest fenomen es deu al fet que els brics de PLA són els que treballen a l'inici de l'assaig i que a partir de cert punt, és el TPU el que fa tota la feina. El TPU començaria a treballar quan els brics de PLA o bé s'han desenganxat del TPU o bé s'han trencat.

Els dos punts marcats el gràfic, són punts que s'han considerat d'interès, ja sigui perquè podrien indicar que els brics s'han trencat o desenganxat, com seria el primer punt, o perquè s'observa un clar canvi de tendència de la corba, com és el cas del segon, a més d'una altra possible ruptura.

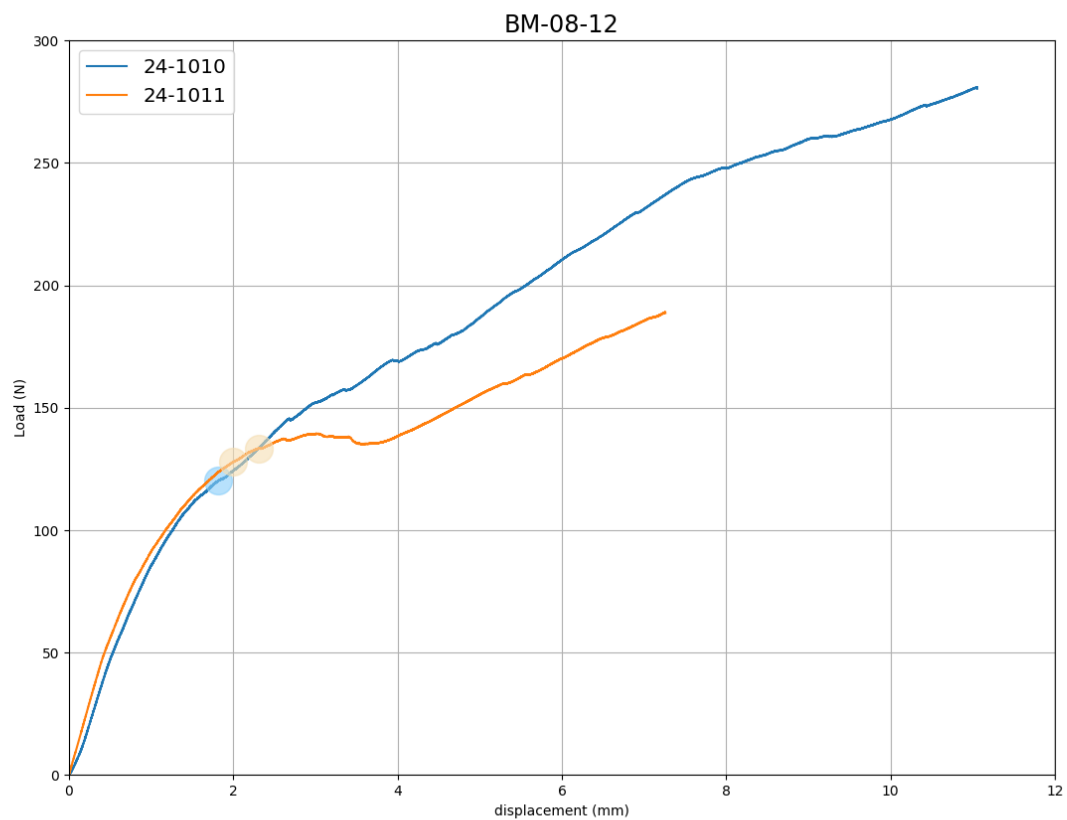
Tot i això, aquests resultats no són concloents per culpa que únicament s'ha pogut assajar correctament una proveta del tipus BM-08-04, ja que l'assaig de l'espècimen 24-1008 es va realitzar i ha estat descartat.

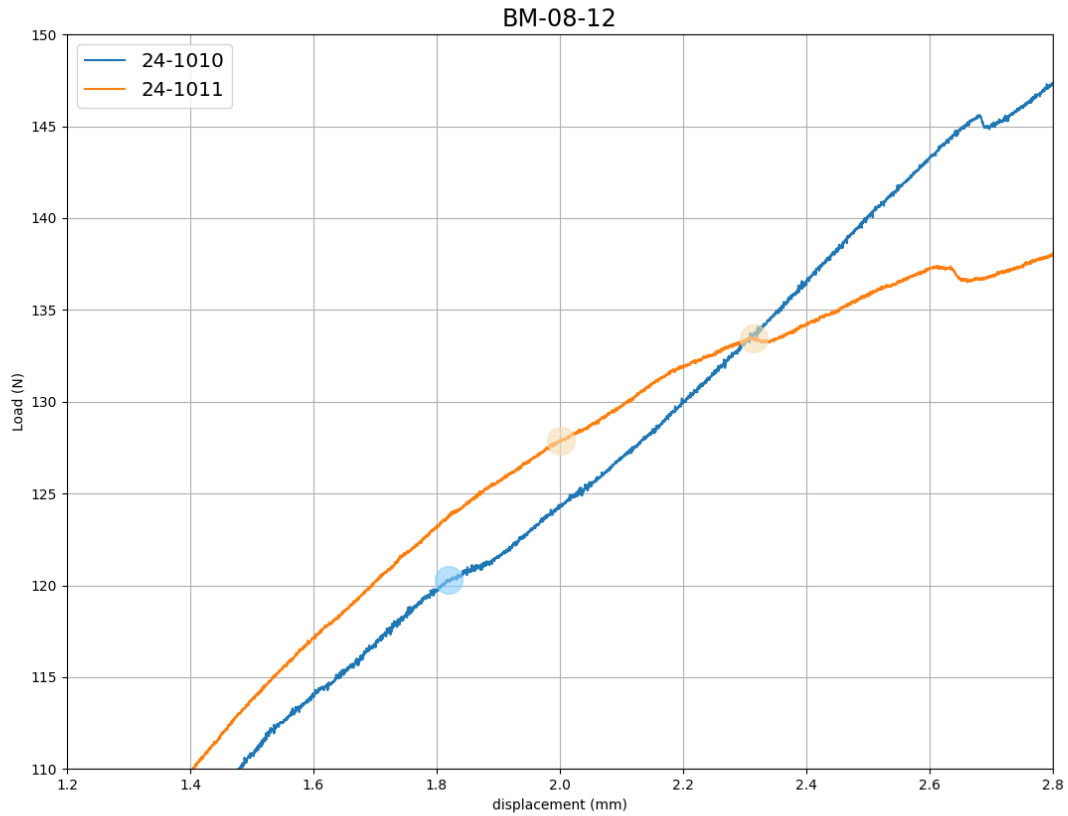
La primera imatge de la taula de sota, mostra la proveta durant l'assaig, en algunes ocasions es mostra la part de sota i en d'altres la de sobra; les altres dues imatges mostren la part de sota de la proveta al final de l'assaig i després de treure-la de la màquina.

Proveta	Durant	Final amb força aplicada	Final sense força aplicada	Energia
24-1009				69,062 mJ 224,130 mJ

Com es pot veure, la proveta acaba recuperant-se considerablement en finalitzar l'assaig gràcies a la recuperació del TPU. No obstant això, és únicament visual, ja que l'adhesió entre els materials sí que s'ha vist afectada. Aquesta recuperació s'ha donat en totes les provetes assajades.

3.2. BM-08-12:

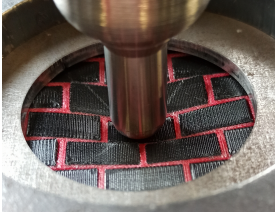


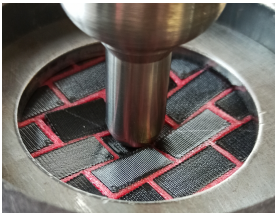


Si s'observa amb deteniment la corba blava, es pot veure que en el punt blau hi ha un canvi de tendència doncs la corba passa de tenir un forma lleugerament convexa a una còncava, a partir d'aquí, augmenta de forma més accelerada fins a arribar a un pic.

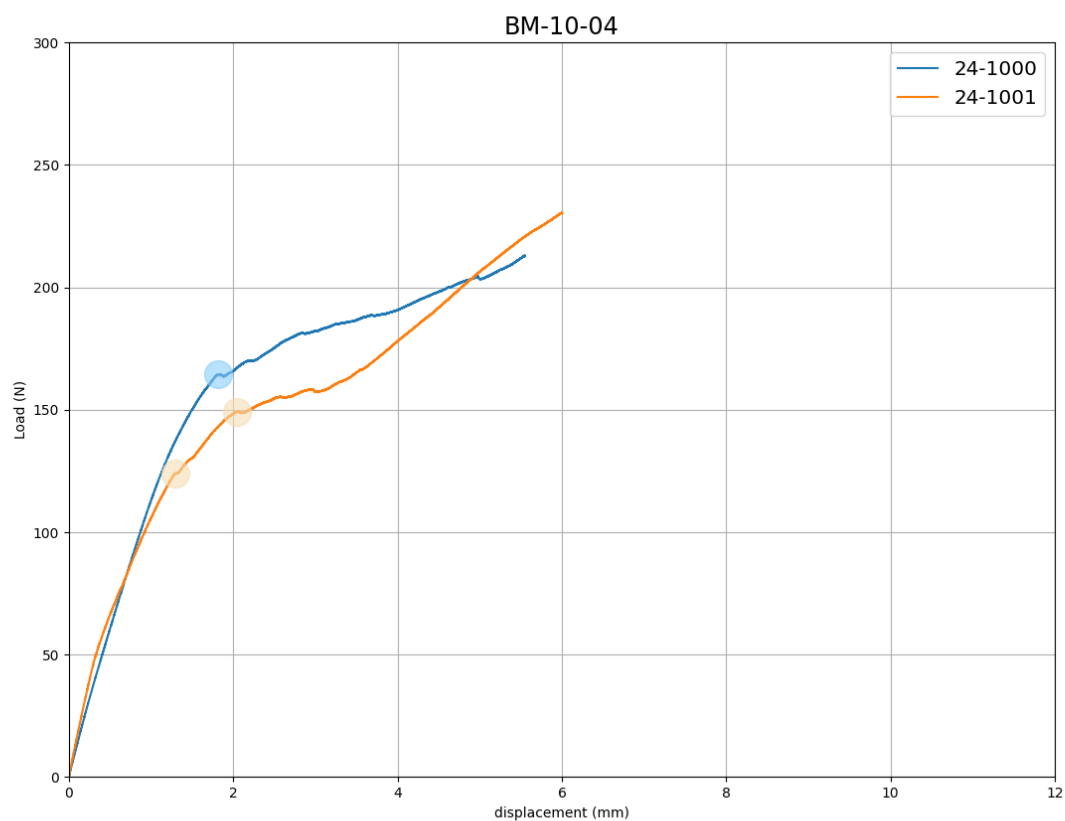
La segona corba, és una mica diferent.

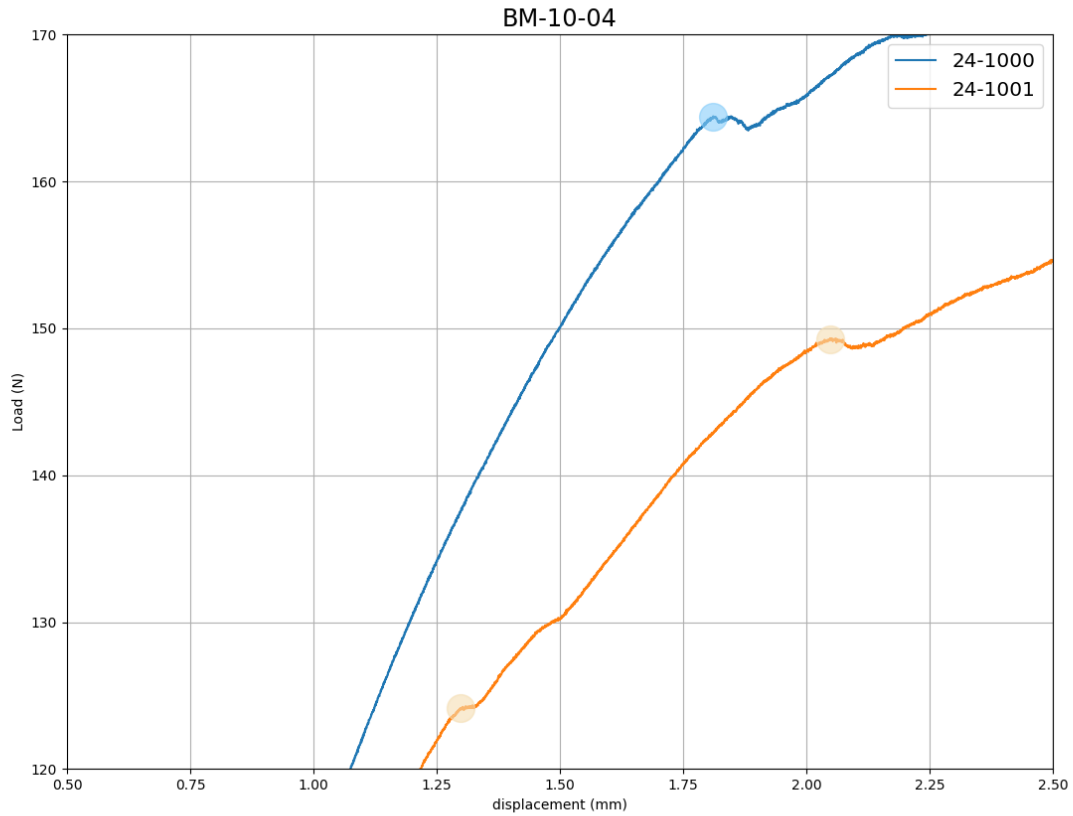
Amb tot, l'evolució de les dues corbes és bastant semblant.

Proveta	Durant	Final amb força aplicada	Final sense força aplicada	Energia
24-1010				130,724 mJ

24-1011				164,513 mJ 205,350 mJ
---------	---	---	--	--------------------------

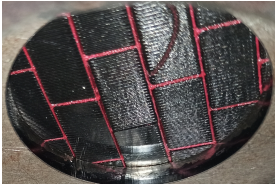
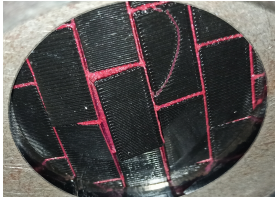
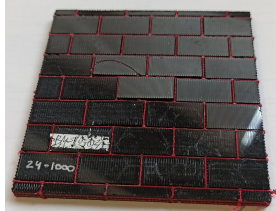
3.3. BM-10-04:

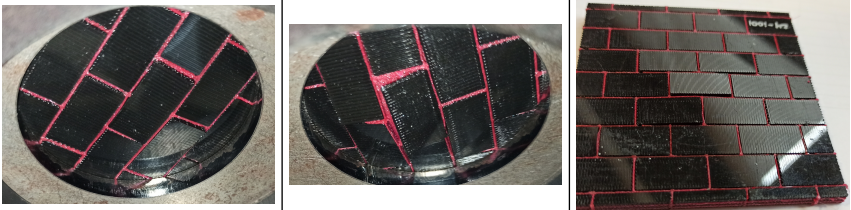




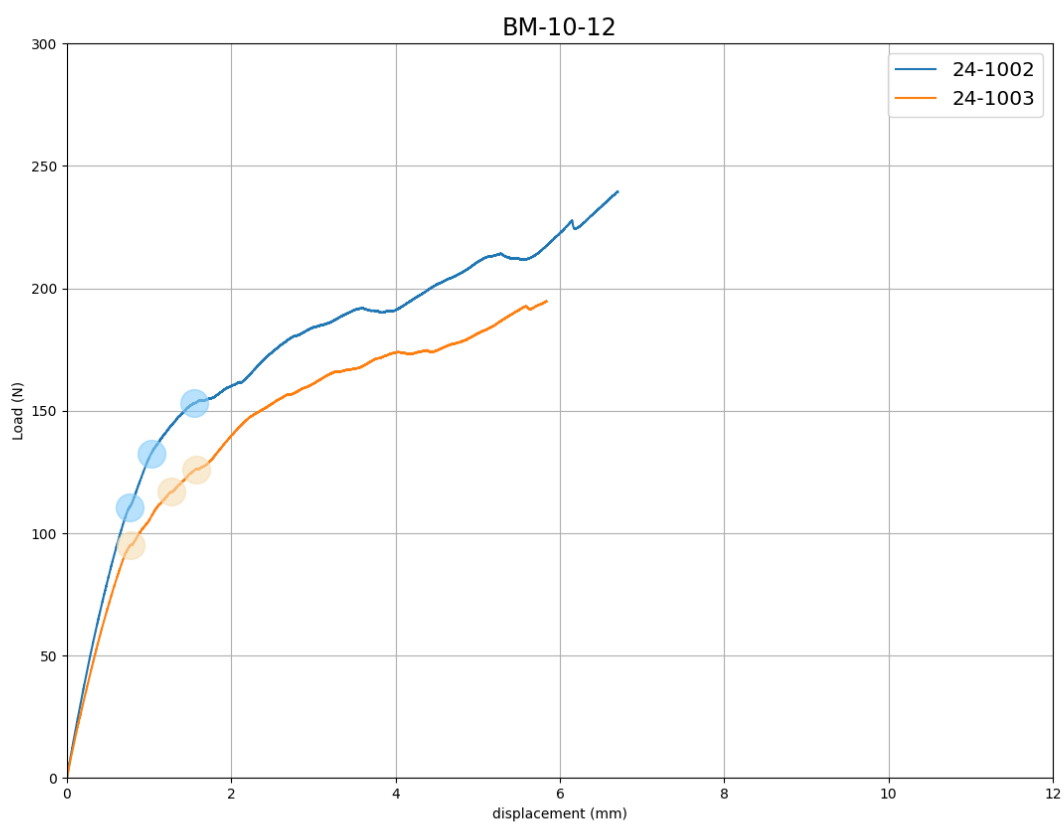
Es pot veure clarament que ambdues corbes tenen un comportament similar, especialment a l'inici. En el cas de la corba blava, aquesta presenta un creixement constant fins a arribar a un pic a on la tendència canvia completament.

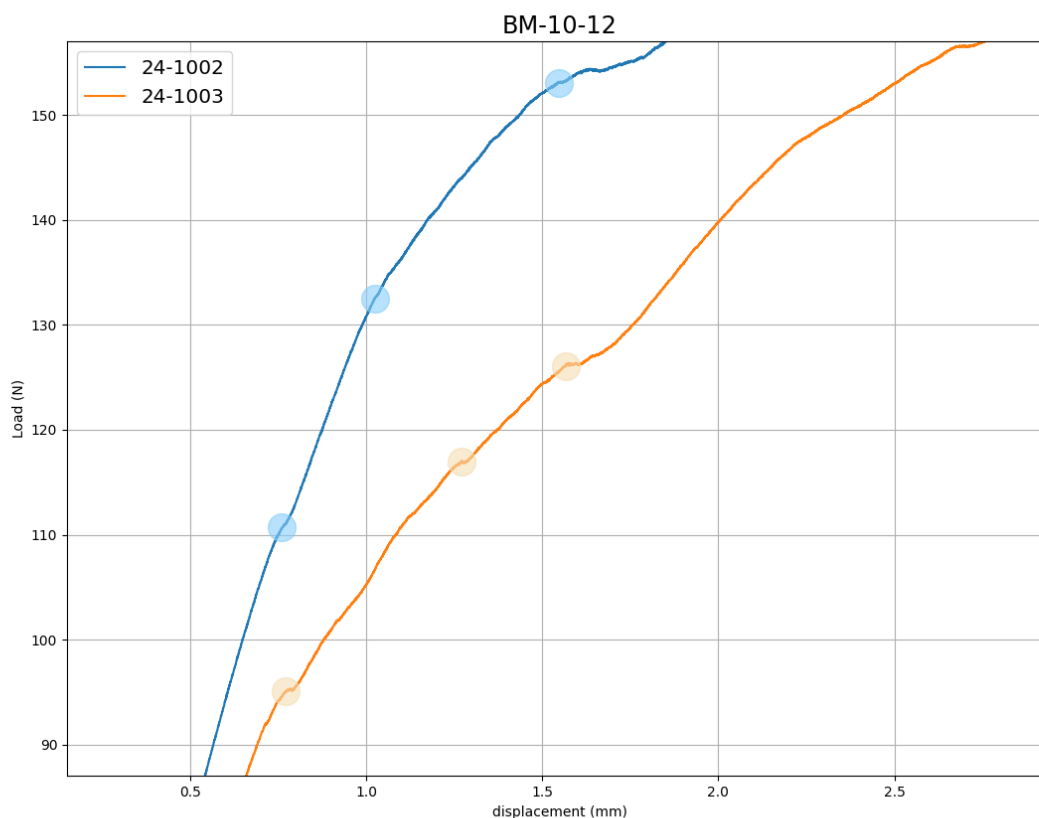
Per altra banda, la corba taronja, també presenta un creixement continu fins al primer punt marcat. A partir d'aquest punt, el qual podria indicar una ruptura o desadhesió, continua amb un creixement més suau i menys regular, fins a arribar al segon punt, on la tendència de canvi significativament.

Proveta	Durant	Final amb força aplicada	Final sense força aplicada	Energia
24-1000				175,097 mJ

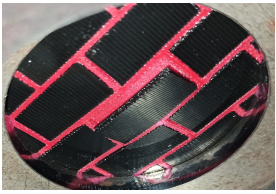
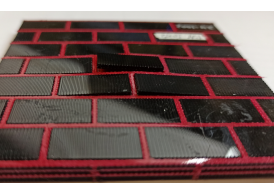
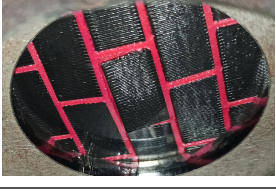
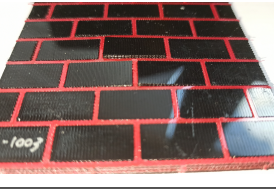
24-1001		96,446 mJ 199,356 mJ
---------	--	-------------------------

3.4. BM-10-12:

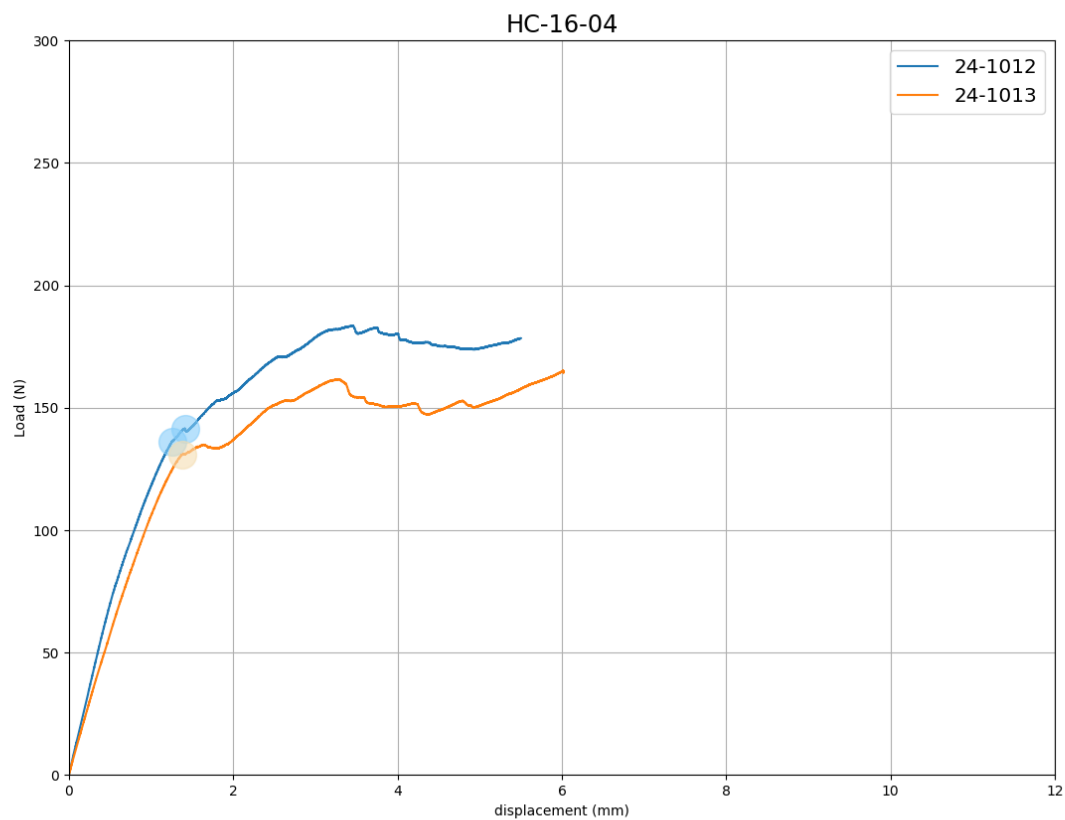


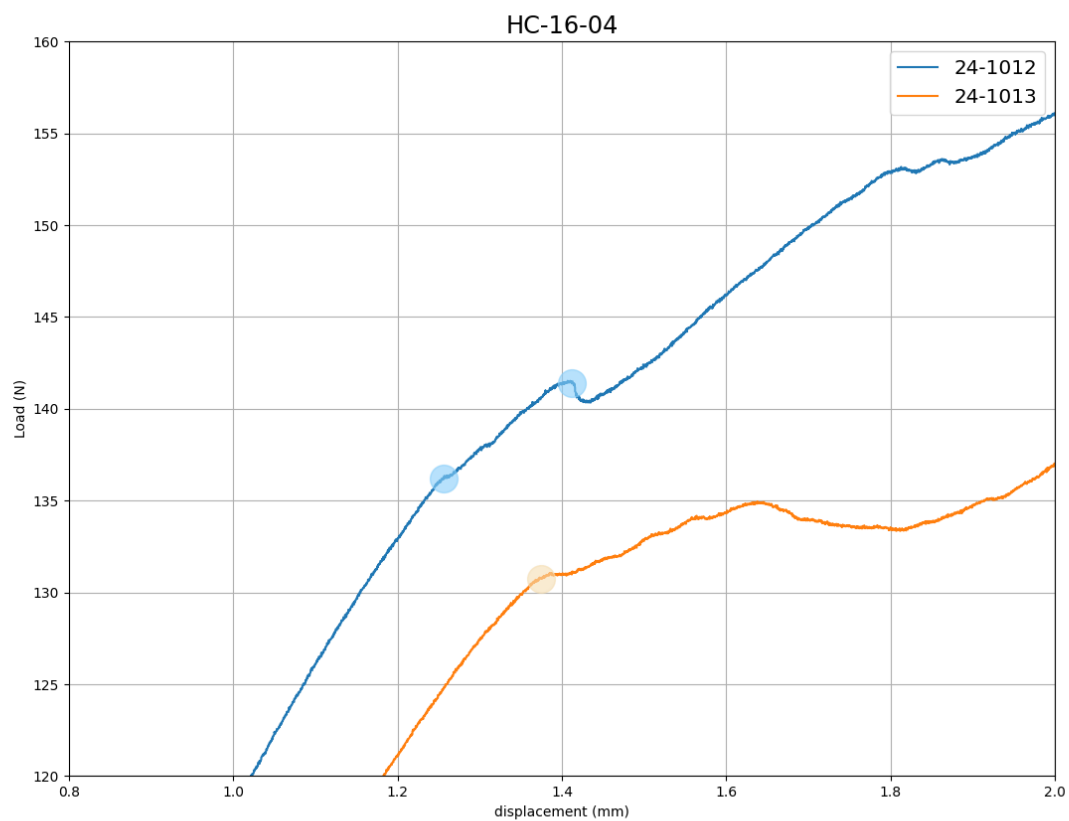


En aquest cas, com en l'anterior, el creixement de les corbes és constant fins a arribar al primer punt marcat, a partir d'aquest fins a l'últim, l'evolució és més irregular.

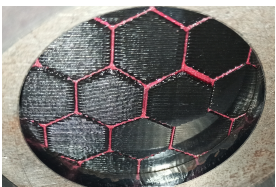
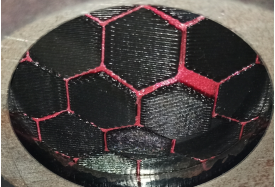
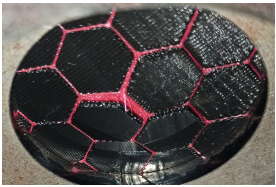
Proveta	Durant	Final amb força aplicada	Final sense força aplicada	Energia
24-1002				46,996 mJ 78,939 mJ 154,122 mJ
24-1003				41,396 mJ 94,359 mJ 130,566 mJ

3.5. HC-16-04:

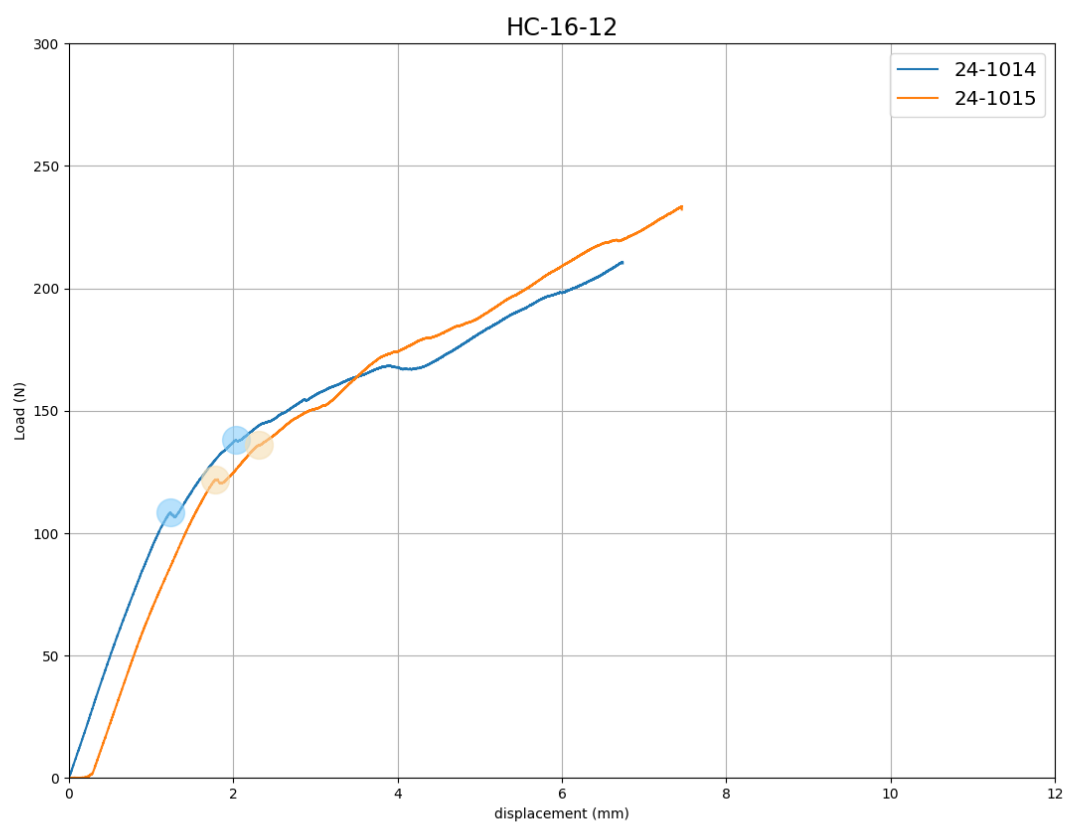


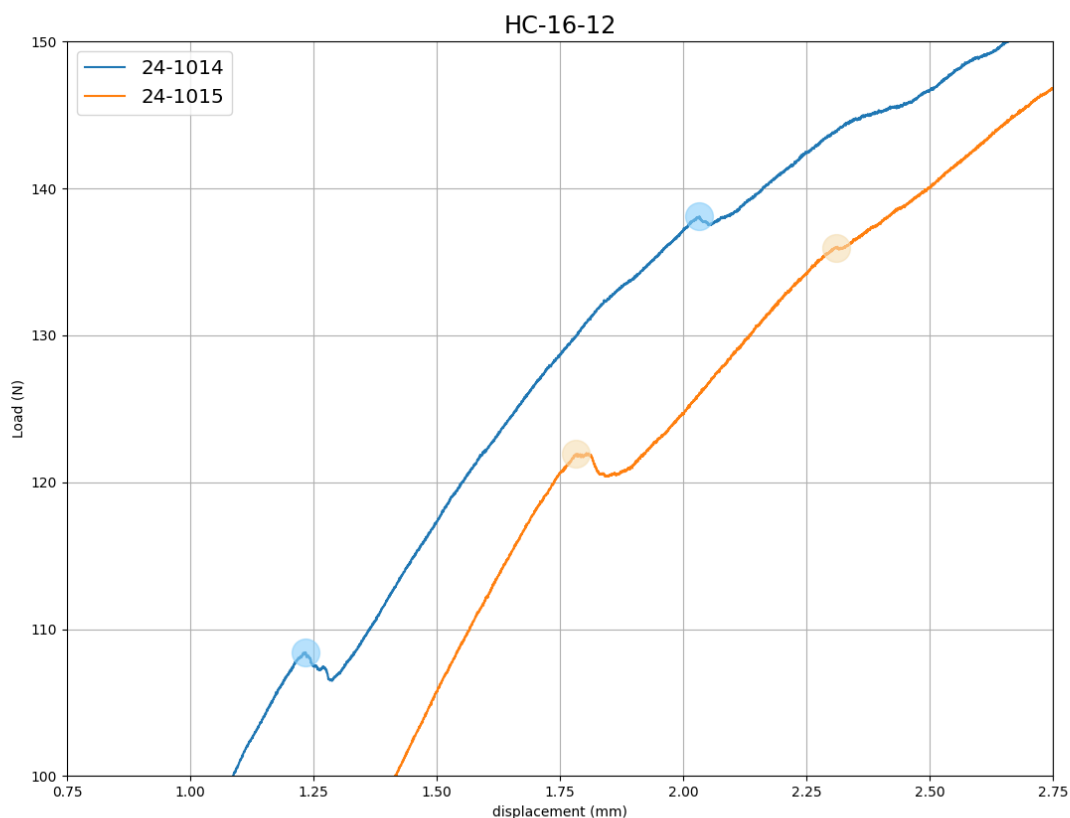


El creixement de les dues corbes és constant a l'inici, fins a arribar al primer punt d'interès.

Proveta	Durant	Final amb força aplicada	Final sense força aplicada	Energia
24-1012				98,132 mJ 119,813 mJ
24-1013				101,034 mJ

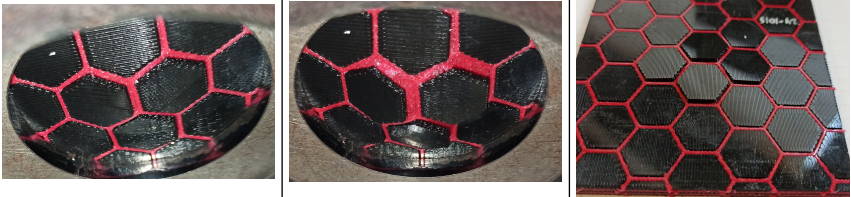
3.6. HC-16-12:



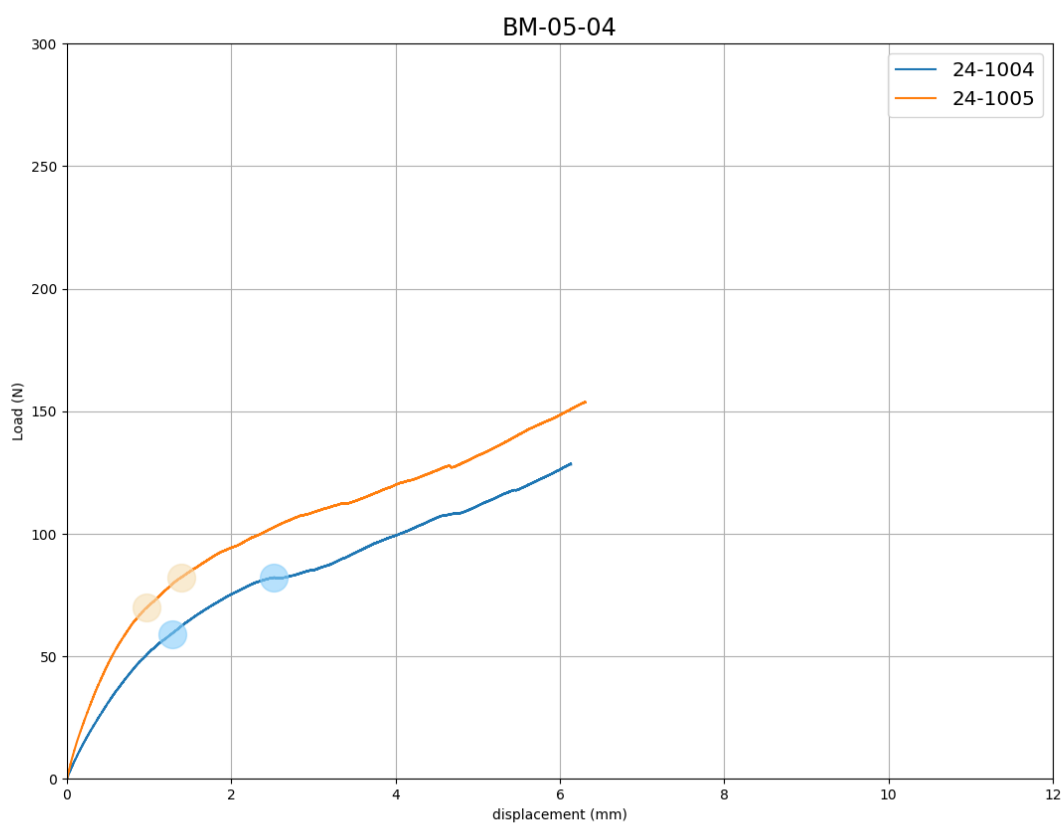


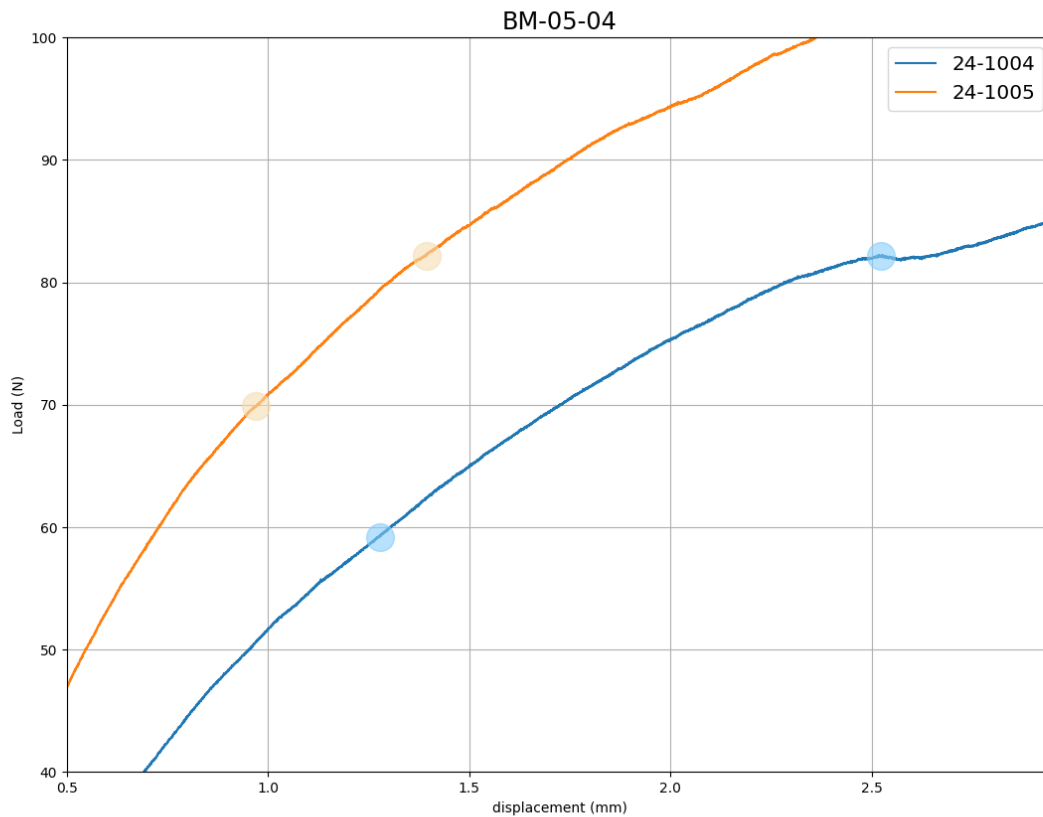
Els dos primers punts indiquen clarament una ruptura o desadhesió, però la tendència de creixement segueix sent bastat regular fins als següents punts, a partir d'on la corba passa a ser més irregular.

Proveta	Durant	Final amb força aplicada	Final sense força aplicada	Energia
24-1014				72,241 mJ 170,332 mJ

24-1015		101,64 mJ 168,585 mJ
---------	--	-------------------------

3.7. BM-05-04:

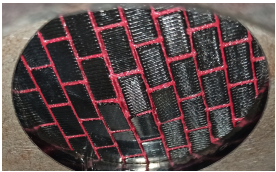
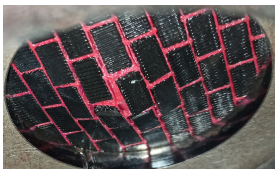


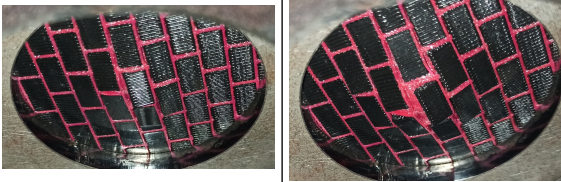


Tot i que les corbes no són coincidents, sí que segueixen la mateixa tendència, simplement un sembla que té més resistència que l'altre, possiblement és a causa de possibles defectes de la impressió.

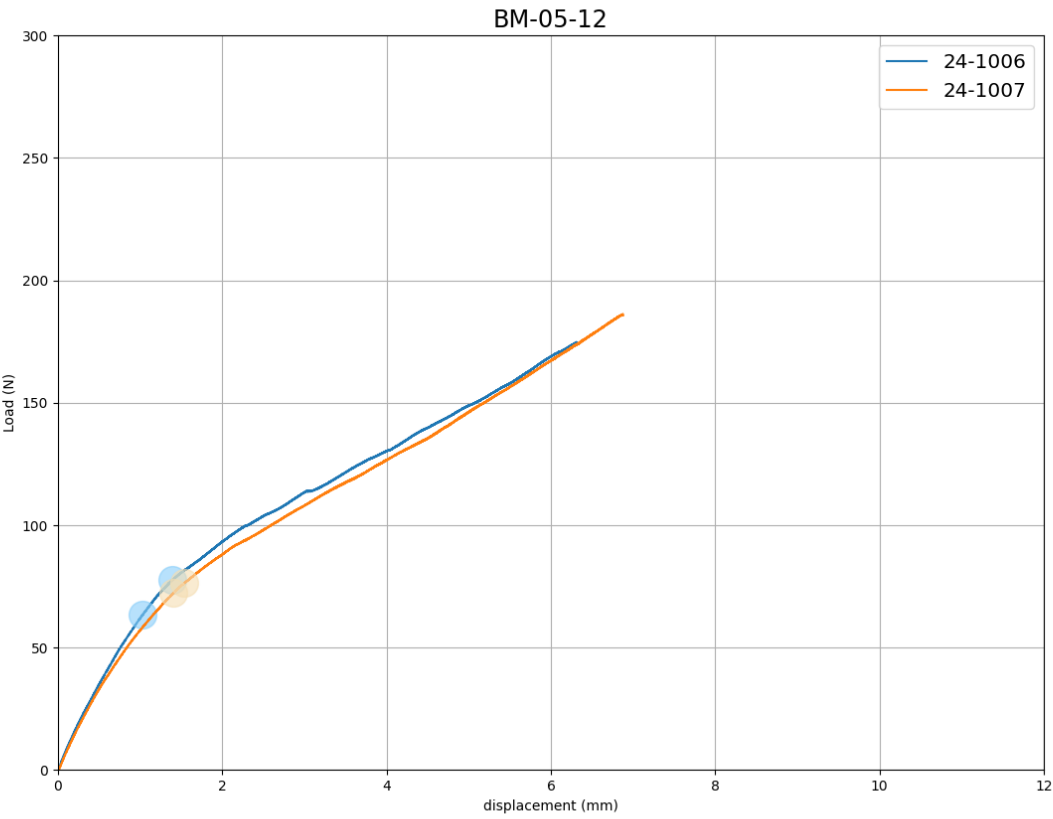
Per altra banda, es pot veure com aquestes provetes tenen una resistència menor que la resta.

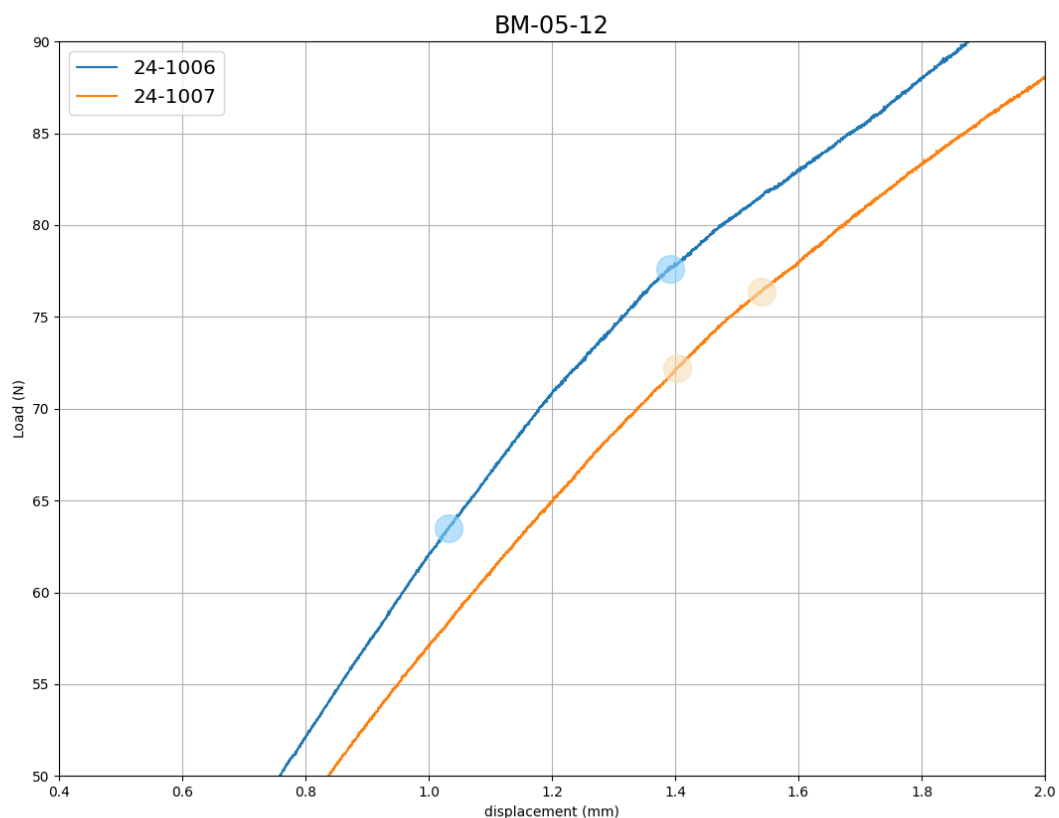
En aquest cas, a causa de la suau evolució de les corbes no és fàcilment perceptible, però es trobaria entre els punts marcats d'aquests.

Proveta	Durant	Final amb força aplicada	Final sense força aplicada	Energia
24-1004				44,865 mJ 135,284 mJ

24-1005			41,088 mJ 73,441 mJ
---------	---	--	------------------------

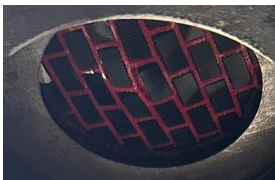
3.8. BM-05-12:





Igual que en les BM-05-04, punt exacte del canvi de tendència no és senzill de localitzar, però es creu que es trobaria entre els punts marcats.

És important remarca, que en aquest cas, les dues corbes són considerablement similars.

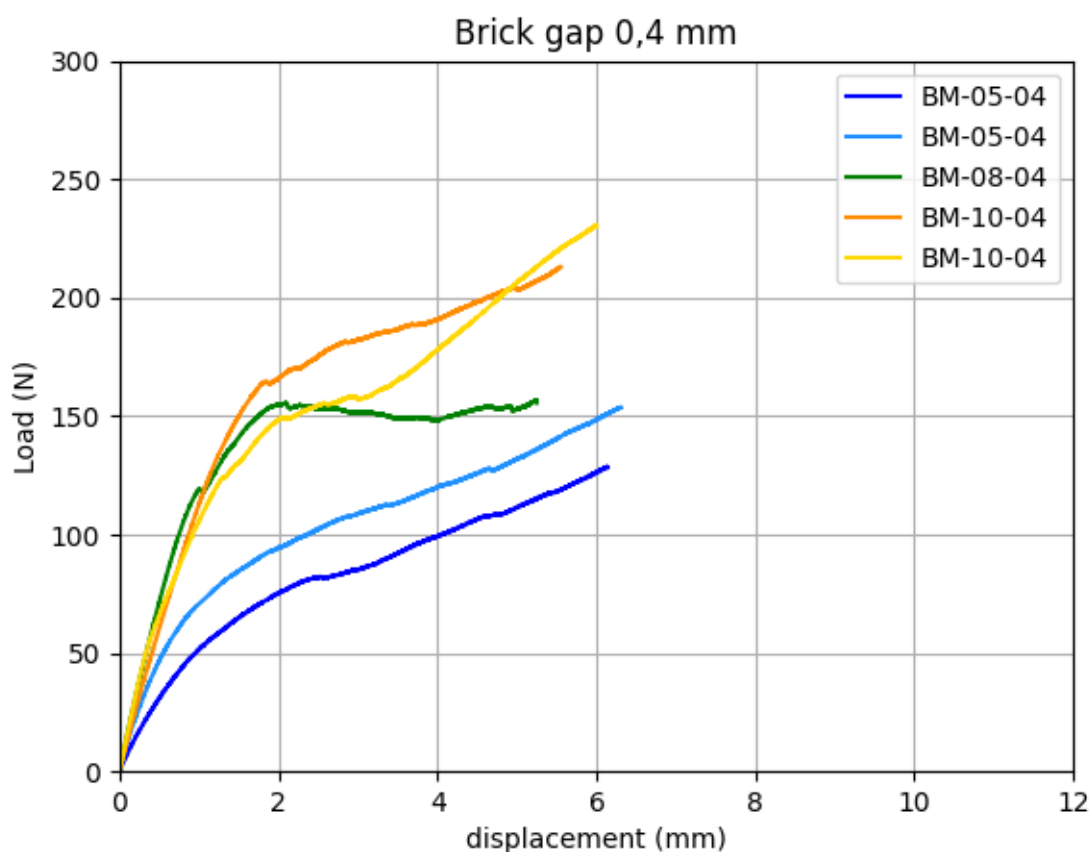
Proveta	Durant	Final amb força aplicada	Final sense força aplicada	Energia
24-1006				35,847 mJ 61,327 mJ

24-1007			57,536 mJ 67,653 mJ
---------	--	--	------------------------

4. Comparació de dades per *brick gap*:

En aquest apartat, s'han agrupat els gràfics pels valors de *brick gap* i així poder observar els com afecta la mida dels brics a la deformació de les provetes.

4.1. *Brick gap* de 0,4 mm:



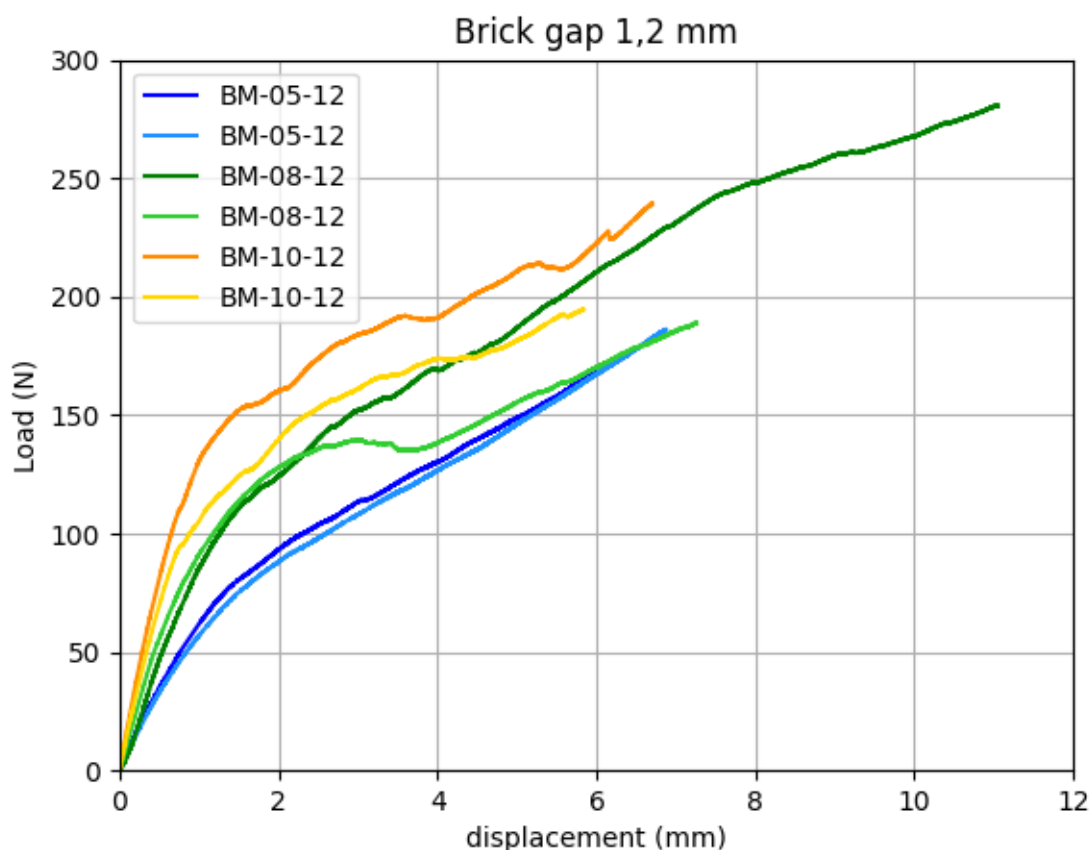
En aquest gràfic s'observa que les provetes de 5 mm tenen un comportament diferent de la resta. Per una banda, el seu pendent inicial és menys pronunciada i el TPU comença a treballar en solitari amb una càrrega menor que la resta. També presenten una evolució més constant i sense gaires pics.

Respecte a les altres provetes, es veu que el primer tram és molt semblant en les tres i es comencen a diferenciar en el moment en el qual és el TPU el que comença a suportar la càrrega.

Una hipòtesi per aquest fenomen recau en el fet que aquest efecte és degut principalment a la mida dels brics, quan els brics són petits, augmenta la quantitat d'aquests i la proporció de TPU de l'espècimen, això podria ser la causa que la transició entre etapes sigui més suau que en la resta. També és possible, que una menor mida dels brics provoqui que també els TPU suporti part de la càrrega des de l'inici, fent que les plaquetes, en lloc de trencar-se o desenganxar-se de cop, o facin progressivament, explicant així la falta de pics en la corba.

S'ha de tenir en compte que les proporcions de TPU en volum són del 25,21 % pels brics de 5 mm, 21,95 % pels de 8 mm i del 20,81 % pels de 10 mm.

4.2. *Brick gap* de 1,2 mm:



En aquest cas, sí que s'observa una diferència per a cada mida de brics. Es veu com en augmentar els *brick depth*, també augmenta el pendent de la corba.

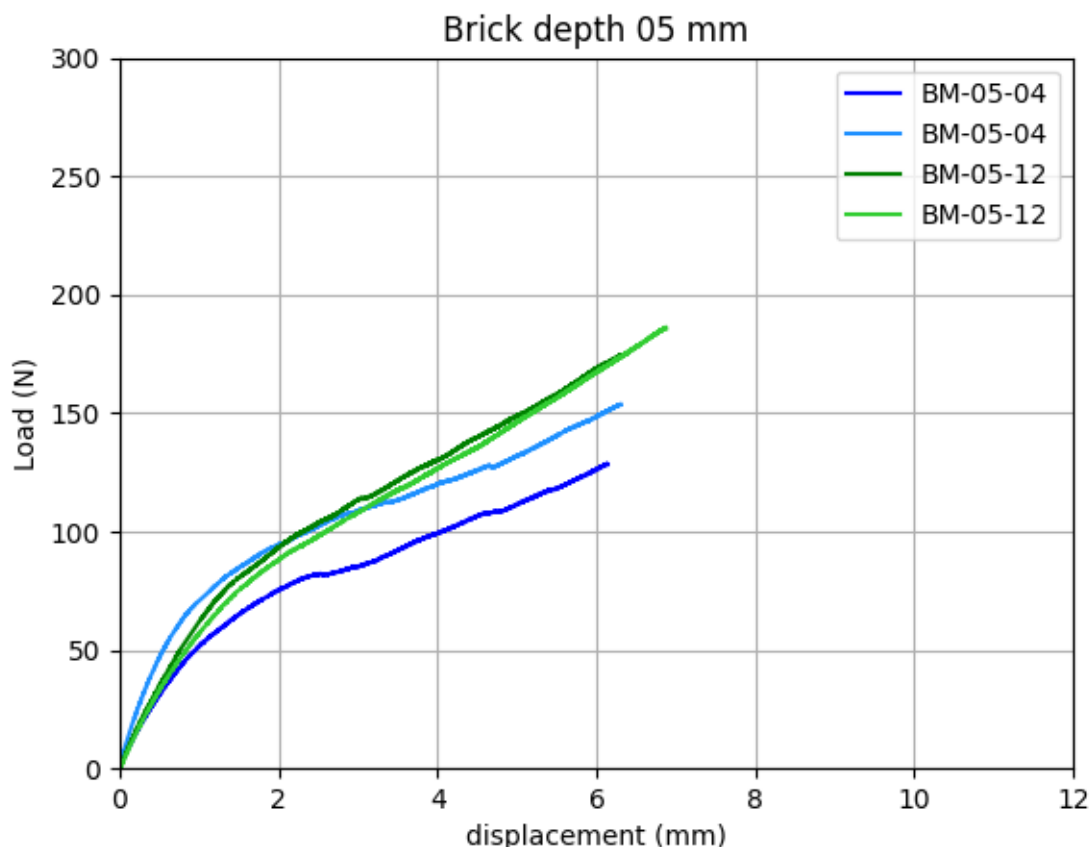
Alhora, es pot veure que en el cas dels blocs de 5 mm, l'evolució és molt semblant en els dos casos, mentre que en la resta, les corbes només són semblants a l'inici i acaben divergint.

Les proporcions en volum de TPU són del 39,52 % pels brics de 5 mm, 32,05 % pels de 8 mm i 29,25 % pels de 10 mm.

En comparar aquestes proporcions amb les de les provetes amb *brick gap* de 0,4 mm, es veu clarament que les provetes de BM-08-12 i BM-10-12 tenen un percentatge de TPU superior a les provetes BM-05-04, no obstant el seu comportament és més semblant al dels seus equivalents de 0,4 mm amb una quantitat de TPU bastant menor. Això podria indicar que, com s'ha comentat anteriorment, la mida dels brics té un efecte major que no la quantitat proporcional de TPU dels espècimens.

5. Comparació de dades per mida dels brics, *brick depth* i *brick diameter*:

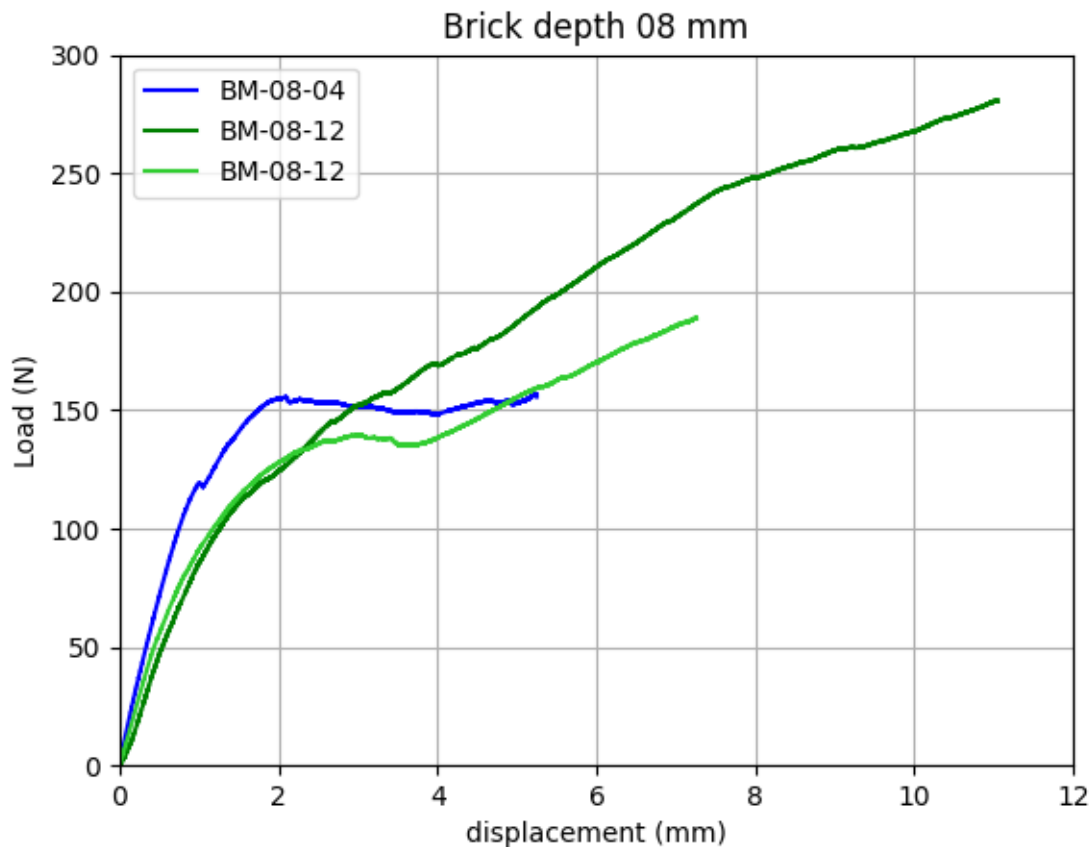
5.1. *Brick depth* de 5 mm:



Observant el gràfic, es pot comprovar com el comportament de les quatre provetes ha estat bastant semblant, tot i que la diferència de TPU és de 14 punts, (25,21 % i 39,52 %), major que la que hi ha entre provetes amb el mateix *brick gap*, com per exemple entre el BM-05-04 i el BM-08-

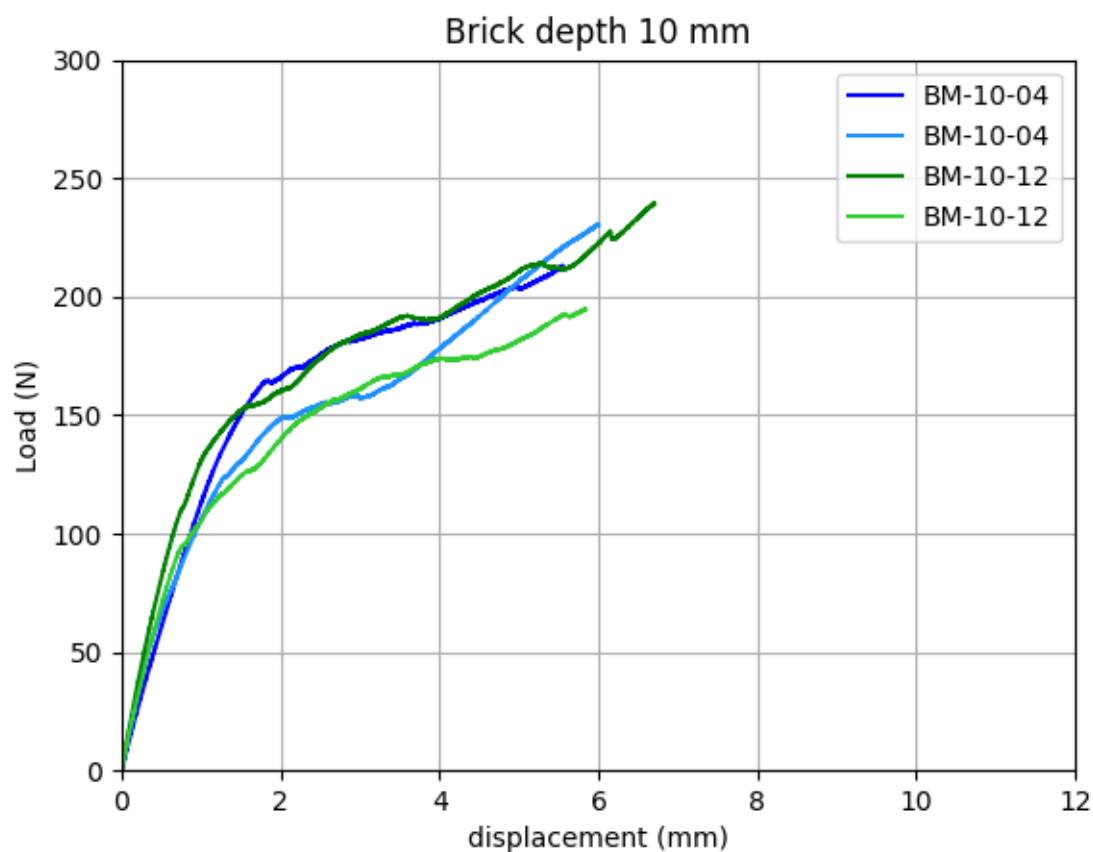
04 on la diferència de TPU és de només del 3,26 punts percentuals. Això semblaria indicar que la proporció de materials no és tan determinant com es podria pensar en un principi.

5.2. *Brick depth* de 8 mm:



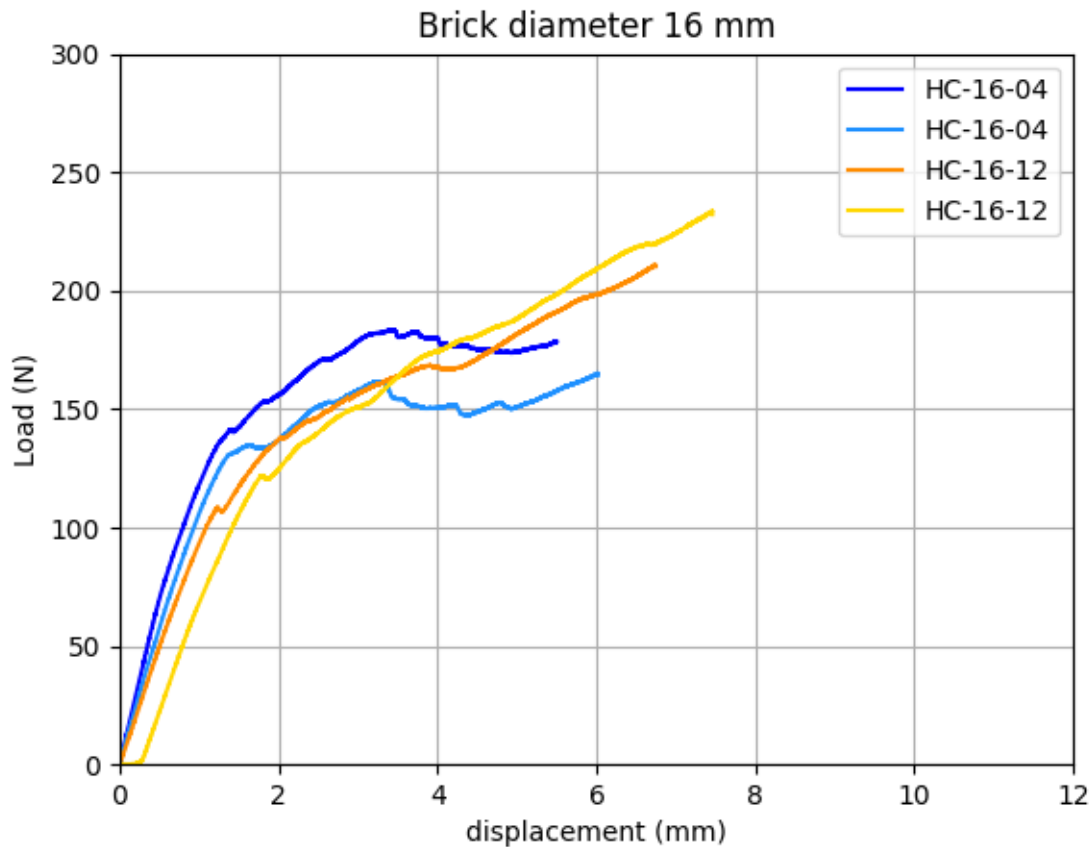
En aquest cas, sembla que el valor del *brick gap* sí que té un afectes major que en les provetes BM-05. Dit això, aparentment, la BM-08-04 té major resistència que les altres, no obstant això, el fet que només s'hagi pogut assajar una proveta d'aquest tipus correctament, fa que no sigui possible obtenir conclusions adequades.

5.3. *Brick depth* de 10 mm:



En aquestes cas, torna a semblar que no hi ha diferències considerables entre ambdós tipus d'espècimens, tot i que les proporcions de TPU són del 20,81 % per les de 0,4 mm i del 29,25 % per les de 1,2 mm.

5.4. Brick diameter of 16 mm:

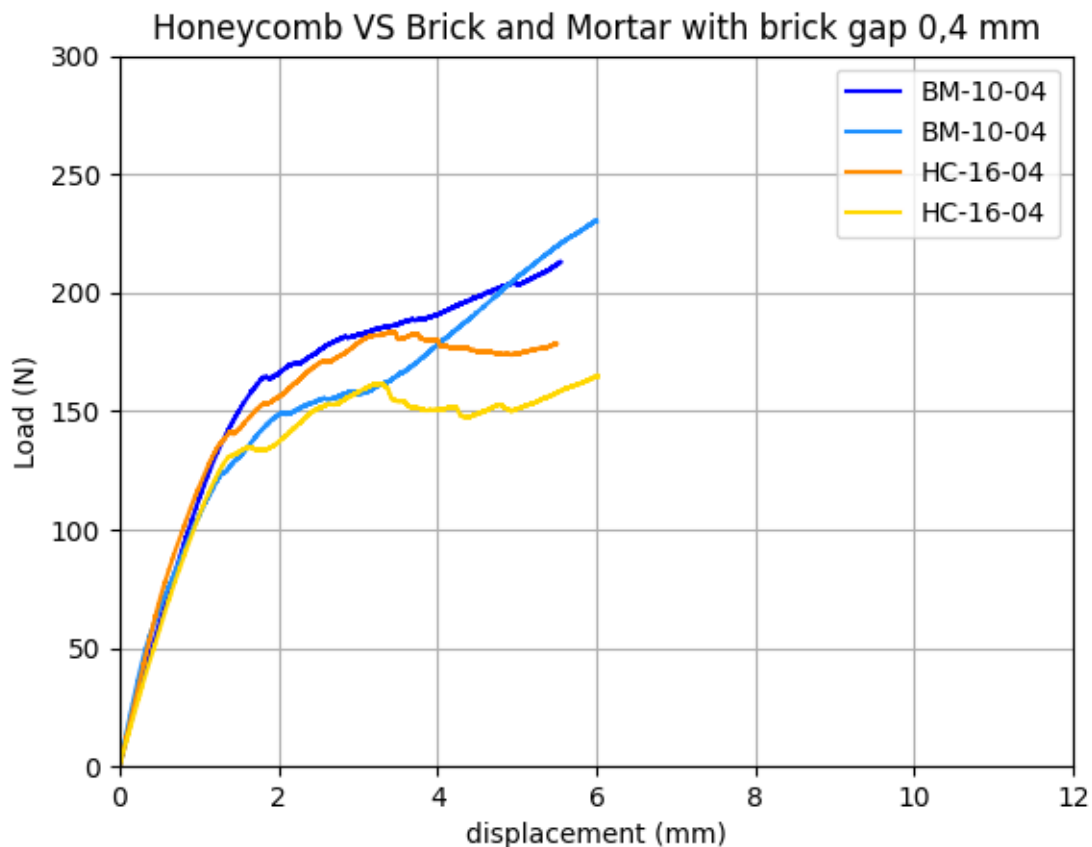


L'evolució de les provetes *honeycomb* és bastant semblant en totes elles, la principal diferència visible es troba ja en el moment en el qual el TPU treballa. En les de 0,4 mm, sembla que el creixement després del punt d'inflexió és més suau i fins que arriba a un punt on la força necessària per deformar les provetes disminueix lleugerament per tornar a augmentar.

En canvi, en les de 1,2 mm, sembla que la força per deformar les provetes continua augmentant en tot moment.

6. Comparativa *Honeycomb* i *Brick and Mortar*:

6.1. Comparació amb *brick gap* de 0,4 mm:

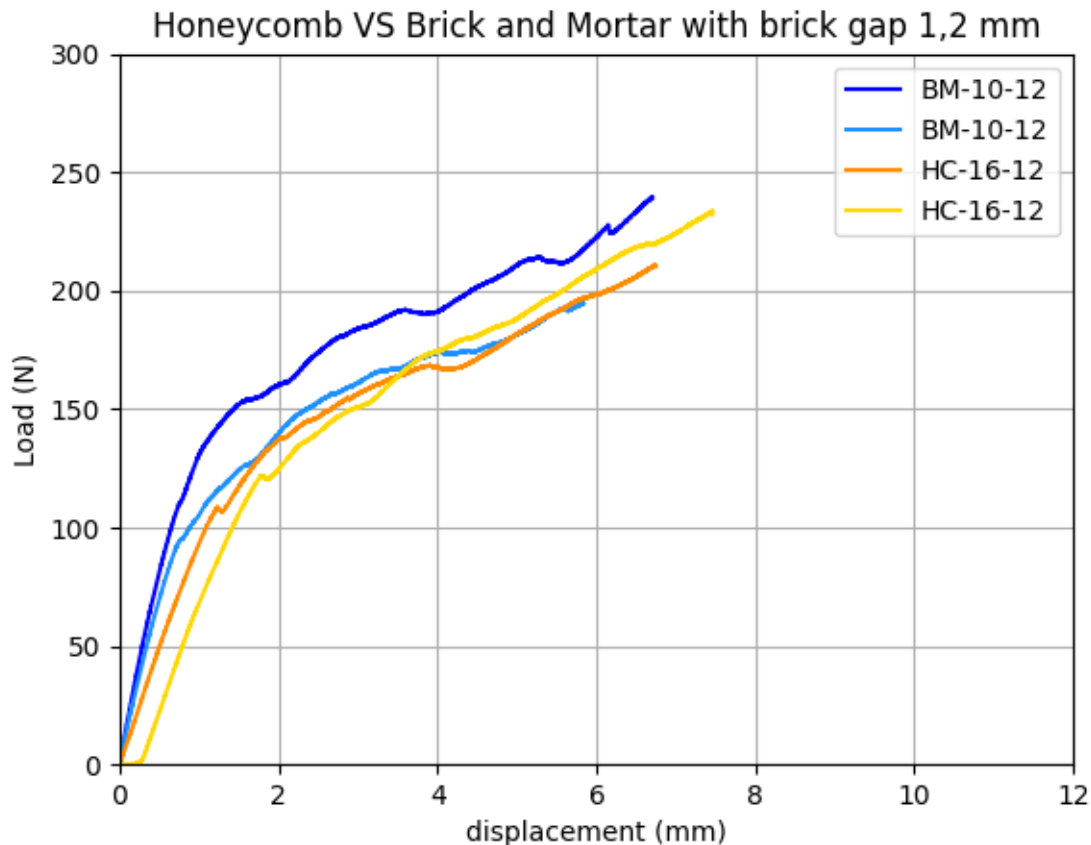


Curiosament, en aquest cas, no es nota cap desviació notable entre les corbes, almenys no en la primera part d'aquestes. La divergència es produeix a partir del moment en el qual el TPU comença a suportar la major part de la càrrega.

El motiu de realitzar aquesta comparació parteix del fet que es volia comprovar si la forma de les plaquetes tenia alguna influència en el comportament de l'estructura, per això, es van utilitzar brics rectangulars de 10 mm de *brick_depth* i 20 mm de *brick_width* i hexàgons de 16 mm de *brick_diameter*, doncs ambdós tenen una superfície molt semblant.

També s'ha de considerar que les proporcions de materials són molt similars.

6.2. Comparació amb *brick gap* de 1,2 mm:



Com també ocorre en el gràfic anterior, no es pot dir que hi hagi una diferència notable entre les provetes. S'ha de tenir en compte que les proporcions de materials són molt similars.

7. Conclusions:

A la vista dels resultats obtinguts, es conclou que les proporcions de materials no són tan significatives com es podria pensar en un principi. La mostra més clara és la semblança en l'evolució de les provetes BM-05-04 i BM-05-12 tot i que la diferencia de la proporció de TPU sigui de 14 punts percentuals.

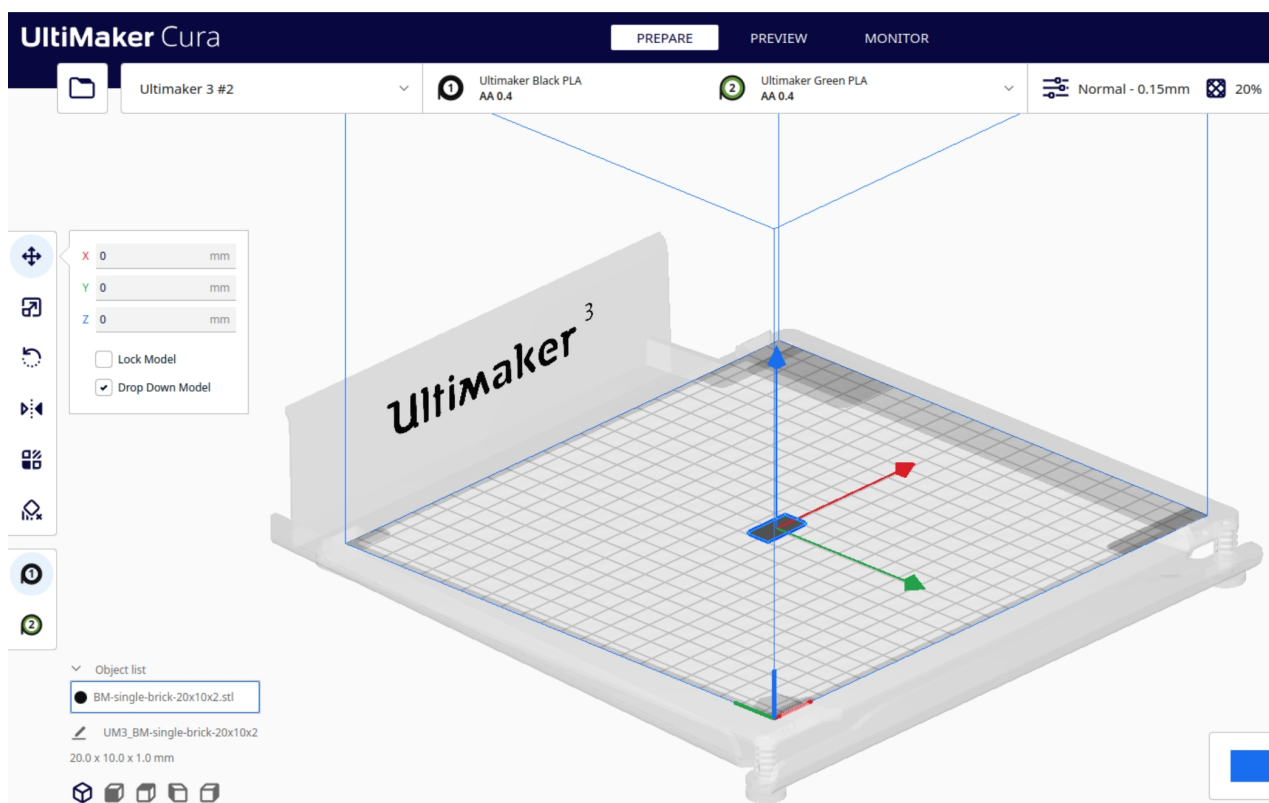
En canvi, sí que sembla que la mida de les plaquetes sí que té efectes més evidents, especialment si són petites. Les provetes BM-05 tenen un comportament clarament diferent del de la resta de provetes i no és a causa del TPU, sobretot tenint en compte que les BM-10-12 i BM-08-12 tenen una proporció de TPU superior a les BM-05-04.

Per altra banda, no sembla que la forma dels brics sigui tan important, ja que no hi ha gaires diferències entre els HC-16 i el BM-10 en cap dels casos.

Annex 7. Configuració de l'Ultimaker Cura:

Quan s'utilitza el programa Ultimaker Cura, es mostra que l'origen de coordenades es troba en el cantó inferior esquerra de la quadrícula. Aquest correspon realment al zero de la màquina però no del programa, ja que el zero del programa es troba exactament al centre de la quadrícula.

Si importem un model STL al Cura, aquest el situarà just al centre de la quadrícula i indicarà que la peça està en les coordenades $X=0$, $Y=0$ (Coincidint amb el centre geomètric de la peça) i $Z=0$ (cara inferior de la peça).



En canvi, en exportar-se al format G-Code, es veurà que la peça està en realitat situada al voltant de les coordenades $X=100$ i $Y=100$. De fet, el centre de la quadrícula equival a les coordenades $X=116,5$ i $Y=107,5$.

A més, existeix un altre dificultat i és que aquest només s'aplicaria al primer extrusor, per al segon extrusor aquest centre es troba en les coordenades $X=98,5$ i $Y=107,5$, pel fet que el segon extrusor està desplaçat 18 mm en direcció X del primer.

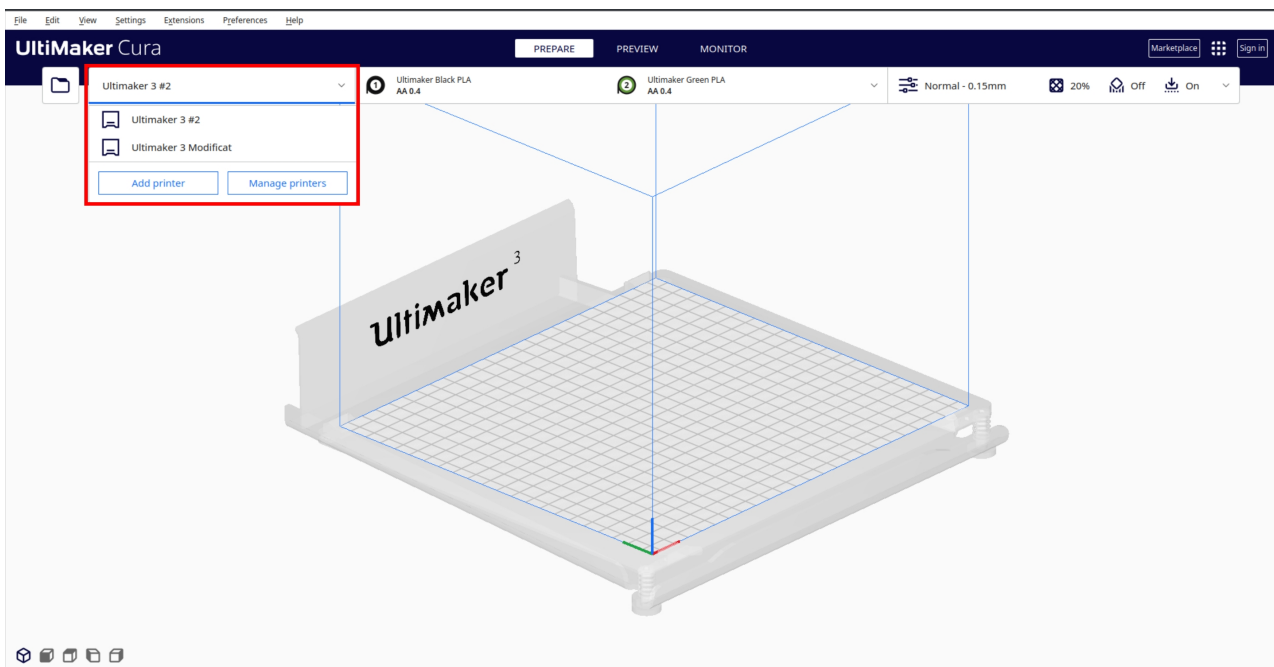
Pel cas d'aquest treball, on es pretenia construir una estructura de *brick and mortar* a partir d'una única cel·la, a força de copiar-la i concatenar-la, això és una complicació, ja que l'ideal és que un dels quatre cantons es trobi en el zero de la màquina per facilitar els càlculs de les coordenades. A més, el programa no deixar processar la peça si aquesta es trasllada als cantons per risc de col·lisió.

Per sort, el mateix programari permet modificar a on es troba aquest zero màquina virtual (el zero màquina real no es modifica, continua trobant-se al cantó inferior esquerra en tot moment).

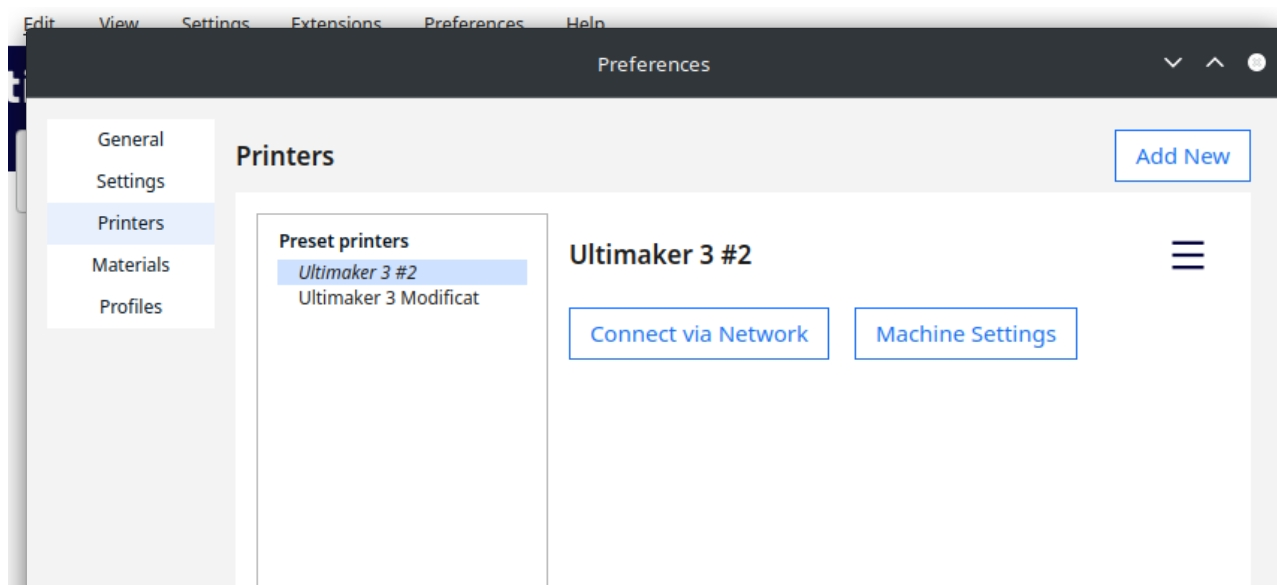
Com configurar la impressora:

Per canviar la configuració de la impressora per fer-la coincidir a la utilitzada per a la modificació del G-Code, s'han seguit les següents passes:

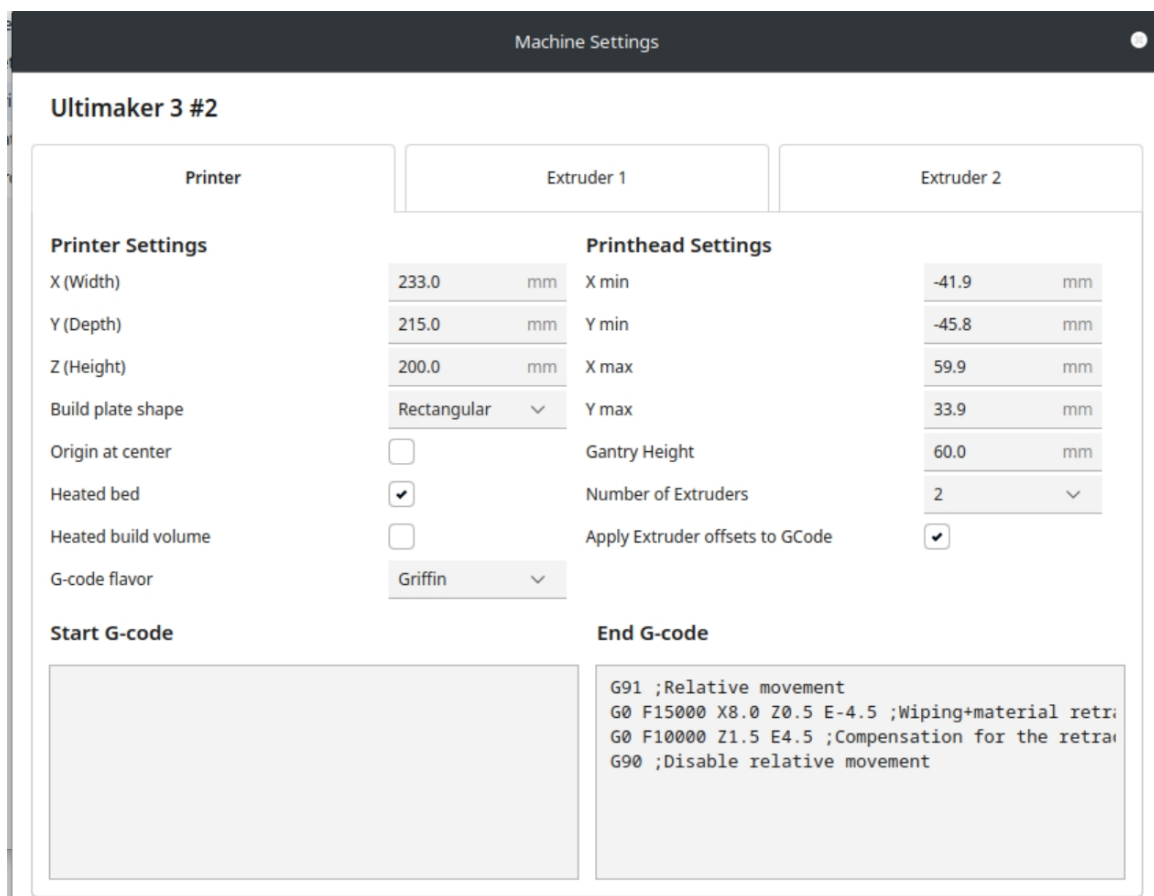
1. A la part superior esquerra del programa, s'ha de clicar a on posa el nom de la impressora, allà apareixerà un desplegable. Seleccionar l'opció *Manage printers*.



2. Al clicar l'opció *Manage printers*, s'obrirà una nova finestra. Aquí s'haurà d'escollir l'opció *Manage Settings*.

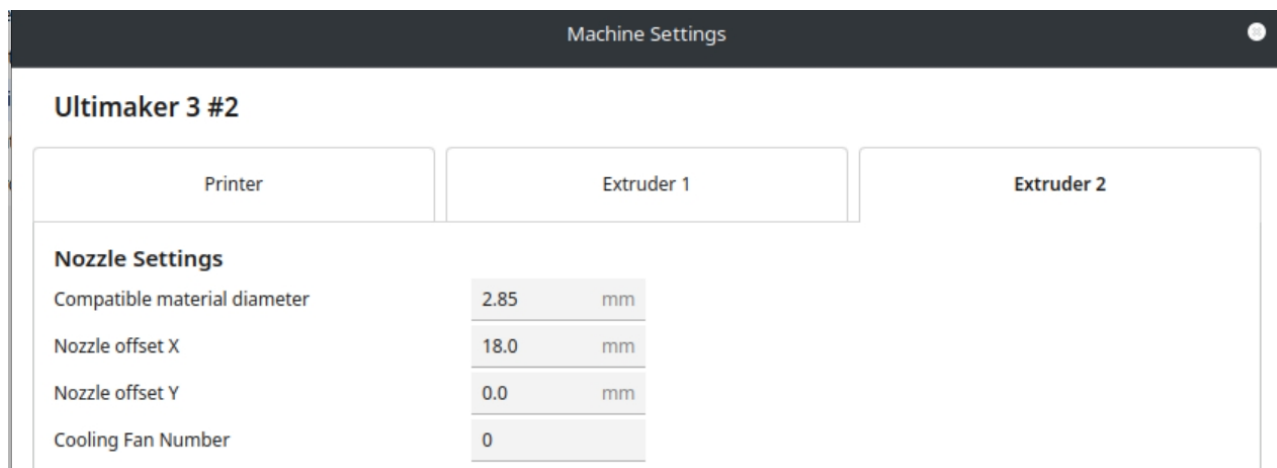


3. S'obrirà una altra finestra amb tres pestanyes, *Printers*, *Extruder 1* i *Extruder 2*. En la primera pestanya apareixen diferents opcions, dimensions i forma del plat, etc. En aquesta, s'haurà d'assegurar que l'opció *Origin at center* estigui seleccionada.





4. Després, s'haurà de clicar sobre la pestanya *Extruder 2*.



5. Aquí, s'haurà de modificar el valor del paràmetre *Nozzle offset X*, el qual es refereix al desfasament en X del segon extrusor respecte el primer, i posar 0 mm.



6. Aquest pas és important, ja que de no fer-ho, si es trasllada la peça de tal forma que un dels seus cantons es troba en l'origen de coordenades, el segon extrusor podria tenir coordenades negatives, fent que la impressora les ignori.
7. Finalment, s'ha de fer un canvi en els paràmetres d'impressió. S'ha d'anar a l'apartat *Build Plate Adhesion*, i desseleccionar l'opció *Enable Prime Blob*.

 **Build Plate Adhesion** 

Enable Prime Blob

☒

Build Plate Adhesion Type



Brim 

Build Plate Adhesion Extruder



Not overridden 

Brim Width

7.0

mm

Brim Line Count

18

Brim Only on Outside

☒

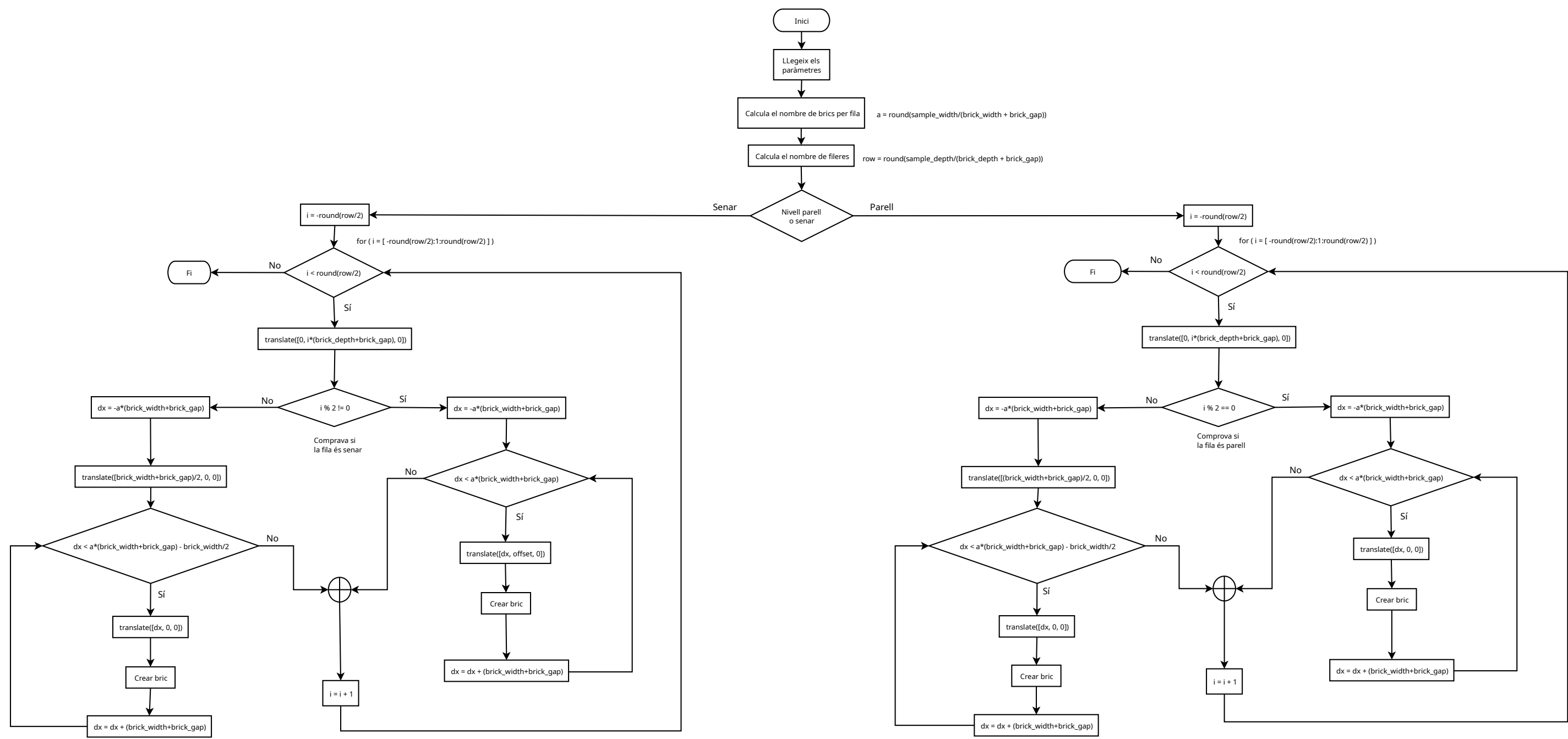
 **Build Plate Adhesion** 

Enable Prime Blob

  ☐

Annex 8. Diagrama del mòdul *BrickLevel*

Diagrama del mòdul BrickLevel



Annex 9. Diagrama del mòdul HexagonLevel

Diagrama del mòdul HexagonLevel

