



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Estudi de les aplicacions i avantatges que ofereix la impressió 3D en l'àmbit de la construcció

AUTOR: JOEL ADALID RODRÍGUEZ

GRAU: ENGINYERIA MECÀNICA

TUTOR: MONTSERRAT SÁNCHEZ ROMERO

COTUTOR: RAFAEL WEYLER PEREZ

DATA: 10/01/2021



ABSTRACTE

The 3D printing technology is expanding due to its large number of applications. These applications go from the domestic to the industrial level including medical applications. This great capacity is due to its versatility when using materials.

The project focuses on the applications of this technology at the level of building safe housing to be inhabited by people. The project presents the problem of homelessness, which is exacerbated in countries with lower economic development. In this case, it is proposed to solve this problem through innovation and the application of printing technology. This technology poses a number of advantages that are unique. The following work will take the first steps of this project to determine the feasibility of the proposed solution.



RESUMEN

La tecnología de impresión 3D esta en expansión debido a su gran cantidad de aplicaciones que presenta. Estas aplicaciones pasan desde a nivel domestico a nivel industrial incluyendo aplicaciones medicas. Esta gran capacidad es debido a su versatilidad a la hora de utilizar materiales.

El proyecto se centra en las aplicaciones de esta tecnología a nivel de construcción de viviendas seguras para ser habitadas por personas. Durante el proyecto se presenta el problema de la falta de hogares que se ve agudizado en países cuyo desarrollo económico es inferior. En esta caso se plantea solucionar este problema mediante la innovación y la aplicación de la tecnología de impresión. Esta tecnología pose una serie de ventajas que son únicas. Mediante el siguiente trabajo se realizaran los primeros pasos de este proyecto para determinar la viabilidad de la solución propuesta.



AGRAIMENTS

Primer de tot, m'agradaria agrair tot el suport rebut per part de la meva família i amics durant aquest treball, on en els moments de més difícils han estat presents. Gràcies a ells aquest llarg recorregut que ha sigut estudiar enginyeria mecànica a l'ESEIAAT (UPC), ha sigut una experiència única la qual no he viscut sol.

També m'agradaria agrair a l'Enric Portell i al Pere Font, dos arquitectes que durant aquest treball m'han proporcionat informació de gran qualitat. Aquesta informació ha sigut de gran utilitat a l'hora de realitzar el projecte.

Per últim, però no menys important, agraeixo molt l'ajuda rebuda per part de la meva tutora i el cotutor d'aquest projecte Dr. Montserrat Sánchez Romero i Dr. Rafael Weyler Perez, que en els moments més difícils on no era capaç de trobar el camí, m'han pogut guiar i aconsellar.

Per tot això i més, moltes gràcies a totes les persones que han estat al meu costat durant aquest llarg recorregut.



DECLARACIÓ D'HONOR

I declare that,

the work in this Degree Thesis is completely my own work, no part of this Degree Thesis is taken from other people's work without giving them credit, all references have been clearly cited,

I'm authorised to make use of research group related information I'm providing in this document.

I understand that an infringement of this declaration leaves me subject to the foreseen disciplinary actions by The Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH.

Joel Adalid Rodriguez

Student Name

Signature

10/01/2021

Date

Title of the Thesis : Estudi de les aplicacions i avantatges que ofereix la impressió 3D en l'àmbit de la construcció



ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	9
1.1. Objectiu del projecte	9
1.2. Abast del projecte	10
1.3. Motivació personal	11
2. MARC TEÒRIC	12
2.1. Anàlisi de la indústria de la construcció	12
2.1.1. Parts involucrades a la indústria de la construcció	13
2.1.2. El treball en la indústria de la construcció és una activitat d'alt risc físic 14	
2.2. Anàlisi de les impressores 3D	15
2.2.1. Tecnologies d'impressió 3D	16
2.3. Necessitats constructives dels països subdesenvolupats	22
2.3.1. Bases de la transformació:	24
2.4. Impressió 3D a la construcció	26
2.4.1. Tecnologies de la impressió 3D a la construcció	27
2.5. Antecedents necessaris dels materials per poder ser impresos per extrusió	29
3. PART EXPERIMENTAL	31
3.1. Anàlisi de materials per a la impressora 3D per a construir un habitatge	31
3.2. Antecedents realització de les provetes	34
3.2.1. Provena de formigó (100% formigó)	36
3.2.2. Provena de formigó (90% formigó i 10% fibra de vidre)	38
3.2.3. Provena de morter (90% morter i 10% fibra de vidre)	40
3.2.4. Provena de Tova variant 1 (50% argila, 30% sorra i 20% palla)	42
3.2.5. Tova variant 2 (60% argila, 25% sorra i 15% palla)	45
3.2.6. Resum de les provetes	48
3.3. Laboratori assaig de compressió	50
3.3.1. Resultats laboratori F-1	51
3.3.2. Resultats laboratori F-2	52
3.3.3. Resultats laboratori T-1 v 1	53
3.3.4. Resultats laboratori T-2 v 1	54
3.3.5. Resultats laboratori MF-1	55
3.3.6. Resultats laboratori MF-2	56
3.3.7. Resultats laboratori HF-1	57
3.3.9. Resultats laboratori T-1 v 2	59



3.3.10. Resultats laboratori T-2 v 2	60
3.3.12. Anàlisi dels resultats obtinguts	62
3.4. Càlculs.....	64
3.4.1. Càlculs tova	65
3.4.2. Càlculs morter i fibra.....	69
3.4.2. Càlculs formigó i fibra	73
3.5. Disseny conceptual	77
4. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	81
5. PRESSUPOST	82
6. CONCLUSIÓ.....	83
7. LÍNIES DE FUTUR	84
8. BIBLIOGRAFIA	85

ÍNDIX DE GRAFICAS

Gràfica 1. Carga suportada de la proveta F-1 en funció de l'extensió	51
Gràfica 2. Carga compressió de la proveta F-2 en funció de l'extensió	52
Gràfica 3. Carga compressió de la proveta T-1 v 1 en funció de l'extensió.....	53
Gràfica 4. Carga compressió de la proveta T-2 v 1 en funció de l'extensió.....	54
Gràfica 5. Carga compressió de la proveta MF-1 en funció de l'extensió	55
Gràfica 6. Carga compressió de la proveta MF-2 en funció de l'extensió	56
Gràfica 7. Carga compressió de la proveta HF-1 en funció de l'extensió.....	57
Gràfica 8. Carga compressió de la proveta HF-2 en funció de l'extensió.....	58
Gràfica 9. Carga compressió de la proveta T-1 v 2 en funció de l'extensió.....	59
Gràfica 10. Carga compressió de la proveta T-2 v 2 en funció de l'extensió.....	60

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Resum de les característiques físiques de les provetes	48
Taula 2. Continuació del resum de les característiques físiques de les provetes.....	49
Taula 3. Valors característics de la proveta F-1.....	51
Taula 4. Valors característics de la proveta F-2.....	52
Taula 5. Valors característics de la proveta T-1 v 1	53
Taula 6. Valors característics de la proveta T-2 v 1	54
Taula 7. Valors característics de la proveta MF-1	55
Taula 8. Valors característics de la proveta MF-2.....	56
Taula 9. Valors característics de la proveta HF-1	57
Taula 10. Valors característics de la proveta HF-2.....	58
Taula 11. Valors característics de la proveta T-1 v 2	59
Taula 12. Valors característics de la proveta T-2 v 2	60
Taula 13. Resum de les càrregues suportades per les provetes	61
Taula 14. Continuació del resum de les càrregues suportades per les provetes	61
Taula 15. Taula dels valors de la càrrega de la coberta	64

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. PGB de la construcció en relació al PGB total del país [1]	13
Figura 2. Anàlisi de la mortalitat dins la indústria de la construcció [1].....	14
Figura 3. Il·lustració d'una impressora FDM amb les seves parts [12].....	16
Figura 4. Il·lustració d'una impressora SLA amb les seves parts [12].....	17
Figura 5. Il·lustració d'una impressora SLS amb les seves parts [12]	19
Figura 6. Il·lustració d'una impressora EBM amb les seves parts [12]	19
Figura 7. Il·lustració d'una impressora 3DP amb les seves parts [12]	20
Figura 8. Il·lustració d'una impressora LOM amb les seves parts [12]	21
Figura 9. Il·lustració d'una impressora MJF amb les seves parts [12]	21
Figura 10. El repartiment de pobresa a l'Amèrica Llatina [13].....	23
Figura 11. Diferències i semblances amb les tecnologies d'impressió [8]	27
Figura 12. Il·lustració d'una impressora amb el sistema Contour Crafting [14].....	28

<i>Figura 13. Il·lustració d'una peça realitzada amb el sistema Concrete Printing [15]</i>	28
<i>Figura 14. Il·lustració d'una impressora amb la tecnologia D-Shape [16]</i>	29
<i>Figura 15. Il·lustració d'un habitatge realitzat amb tova [20]</i>	32
<i>Figura 16. Mapa de la península ibèrica amb les regions on es pot trobar argila [21]</i>	33
<i>Figura 17. Fotografia del procés de barreja</i>	36
<i>Figura 18. Fotografia del procés d'omplir les provetes</i>	37
<i>Figura 19. Fotografia del procés d'abocar el material</i>	38
<i>Figura 20. Fotografia de la fibra de vidre utilitzada</i>	39
<i>Figura 21. Fotografia del procés d'afegir la fibra de vidre a la gaveta amb morter</i>	40
<i>Figura 22. Fotografia del procés de curat de les provetes</i>	41
<i>Figura 23. Fotografia del resultat de la barreja de la palla amb la sorra</i>	43
<i>Figura 24. Fotografia del procés de barreja manual de la tova</i>	44
<i>Figura 25. Fotografia del procés d'abocar la sorra al cubell</i>	46
<i>Figura 26. Fotografia de la proveta de tova finalitzada</i>	47
<i>Figura 27. Fotografia de la proveta sotmesa al assaig de compressió simple</i>	50
<i>Figura 28. Fotografia de totes les provetes un cop realitzat l'assaig de laboratori</i>	63
<i>Figura 29. Representació 2D proveta</i>	65
<i>Figura 30. Dibuix 3D esquemàtic del problema</i>	66
<i>Figura 31. Reaccions a la part superior on contacta la coberta amb el mur</i>	67
<i>Figura 32. Reaccions a la part més sol·licitada de l'estructura</i>	67
<i>Figura 33. Representació 2D probeta amb les dimensions</i>	69
<i>Figura 34. Dibuix 3D esquemàtic del problema amb les dimensions i carrega de la coberta</i>	70
<i>Figura 35. Reaccions a la part superior on contacta la coberta amb el mur</i>	71
<i>Figura 36. Reaccions a la part més sol·licitada de l'estructura</i>	71
<i>Figura 37. Representació 2D probeta</i>	73
<i>Figura 38. Dibuix 3D esquemàtic del problema amb les dimensions i carrega de la coberta</i>	74
<i>Figura 39. Reaccions a la part superior on contacta la coberta amb el mur</i>	75
<i>Figura 40. Reaccions a la part més sol·licitada de l'estructura</i>	75
<i>Figura 41. Primer disseny realitzat del mecanisme plantejat amb el software Solidworks</i>	77
<i>Figura 42. Disseny en fase avançada on es poden apreciar les diferents parts que el formen</i>	78
<i>Figura 43. Vista 3D on es pot apreciar el mecanisme de moviment vertical (motors elèctrics, "husillo" i columnes guia)</i>	79
<i>Figura 44. Renderització del disseny conceptual</i>	80
<i>Figura 45. Visualització a realista de la impressora</i>	80



1. INTRODUCCIÓ

1.1. Objectiu del projecte

L'objectiu d'aquest projecte es centra en el desenvolupament d'una solució al problema de la manca de l'habitatge. Es buscarà els orígens de la construcció, la qual en els últims anys no ha patit canvis significatius com altres sectors. A continuació un cop estudiats els antecedents de la construcció actual, es procedirà a verificar si aquesta dona servei a les necessitats humanes actuals (en especial als països més necessitats).

En el cas que no satisfaci les necessitats presents es procedirà a buscar una solució enginyeril, la qual aplica les tecnologies més actuals per tal de poder satisfer la manca del habitatge. Aquesta tecnologia actual seria la impressió 3D la qual pot presentar bons resultats i serà analitzada.

A més, serà un intent de millora del sector de la construcció, donant un grau més d'automatització al procés constructiu, reduint el preu de l'habitatge i fent-ho més accessible a més població. Per tant, el temps de producció de l'habitatge es reduirà i es minimitzarà l'impacte ecològic.

La finalitat del projecte es aportar una solució tècnica al problema que hi ha actualment amb l'habitatge. Degut a que, els habitants de qualsevol regió necessiten uns mínims de condicions humanes.



1.2. Abast del projecte

El projecte es divideix en dues seccions, la part teòrica i la part experimental. I finalitza amb una conclusió que recull tots els aprenentatges apresos i futures línies de treball del projecte.

La part teòrica consta de l'anàlisi de la indústria de la construcció i de la indústria de les impressores 3D. També es realitzarà un estudi de les necessitats constructives dels països econòmicament menys desenvolupats. A continuació, s'analitza com es poden introduir aquestes impressores dins del món de la construcció, analitzant tots els tipus d'impressió i quins materials són els més adients per a poder-ho aconseguir.

La part experimental, analitza tots aquests materials prèviament escollits i el disseny conceptual corresponent. Per a poder aconseguir-ho s'analitzen provetes del material i després els corresponents resultats de laboratori. Finalment es realitzaran els càlculs necessaris per determinar una viabilitat orientativa del projecte.



1.3. Motivació personal

L'interès per la realització d'aquest treball és degut a que durant l'any 2020 va haver-hi una pandèmia. La qual va forçar a gran part de la població a realitzar una quarantena al seu domicili. Durant la pandèmia s'han viscut moments molt difícils i han fet que ens adonem d'una sèrie d'errors que hi ha. En el meu cas dins de les dificultats viscudes durant aquell any disposava d'un habitatge que em donava seguretat, però en el món hi ha gent que no ha tingut la mateixa sort.

Aquesta part de la població que és encara superior en països on les seves economies no poden ser comparades a les occidentals. Per tant, des d'un país desenvolupat la manca de l'habitatge seria la punta de l'iceberg i la resta submergida (de la qual no som conscients des de un país desenvolupat) de l'iceberg seria els països no desenvolupats econòmicament. És a dir, el problema amb l'habitatge és més gran del que pensem.

La motivació d'aquest projecte no ha sigut una motivació econòmica sinó una motivació social, on es busca ajudar als més necessitats i els més vulnerables de la societat.



2. MARC TEÒRIC

2.1. Anàlisi de la indústria de la construcció

La indústria de la construcció és un dels motors principals que impulsa el desenvolupament i el progrés a l'àmbit nacional. Els “productes” de la construcció afecten de forma directa el desenvolupament de la societat (mitjançant obres de caire civil, edificacions com per exemple hospitals o obres industrials). La característica més alarmant d'aquest sector és el comportament productiu inestable, és a dir, és una àrea molt sensible als canvis que experimenten els cicles econòmics. Durant un cicle econòmic d'expansió la indústria tindrà una pujada lenta, en canvi, en els períodes de crisi econòmica la indústria és veu afectada d'una forma molt ràpida i en major proporció comparat amb el mitjana d'altres sectors.

A la figura 1 que es mostrarà posteriorment es pot observar el comportament productiu de la indústria de la construcció en relació amb el conjunt de tota l'activitat econòmica de Xilè, entre els anys 1979 i 1989. Durant aquest període es va experimentar una forta crisi l'any 1982, també anomenada com “dècada perduda de Amèrica Latina”. A la taula es poden observar oscil·lacions durant el període d'expansió econòmica i durant el període de crisi. No obstant, en el gràfic es pot observar que la indústria aporta un percentatge relativament petit degut a que no es té en compte la part indirecta com poden ser els proveïdors (materials de construcció, maquinària, etc.) i les empreses encarregades de la matèria prima [1].

Tabla 1 P.G.B. de la construcción en relación al P.G.B. total del país

ANO	* P.G.B. Construcción	» P.G.B. Total país	(P.G.B.CONST./P.G.B. PAIS)% -C-
1979	15669	337207	4.64%
1980	19420	363446	5.34%
1981	23518	383551	6.13%
1982	17920	329155	5.44%
1983	17022	327426	5.19%
1984	17737	347926	5.09%
1985	20593	356447	5.77%
1986	20852	376627	5.53%
1987	23056	398230	5.78%
1988	24454	427530	5.71%
1989	27559	470243	5.86%

NOTA:
* En millones de pesos de 1977.
-C- Porcentaje calculado por los autores.

FUENTE: BANCO CENTRAL DE CHILE
COMPENDIOS ESTADÍSTICOS (I.N.E.)

Figura 1. PGB de la construcció en relació al PGB total del país [1]

2.1.1. Parts involucrades a la indústria de la construcció

A continuació s'esmenten les parts més importants de la indústria de la construcció:

-Propietaris: estableixen els requeriments de disseny, seleccionen el terreny i aporten el finançament.

-Dissenyadors (la part més qualificada de la obra: arquitectes i enginyers). Encarregats de fer els càlculs i els plànols necessaris per poder realitzar el projecte amb els requeriments exigits.

-Constructor (contractista y subcontratista)

-Força de treball: tot els obrers i capatassos que realitzen els treballs indicats en els plànols.

El treball de la indústria de la construcció està assegurat en els períodes d'expansió econòmica en els quals les inversions augmenten i es poden desenvolupar projectes de més envergadura, aquests projectes requereixen d'una força de treball molt abundant i d'una gran quantitat. En canvi, en els períodes de crisi econòmica les inversions disminueixen i no és necessària una gran quantitat de força de treball fet que causa que molts d'aquests treballadors es vegin obligats a buscar feina en altres sectors o fins i tot caure a l'atur [1].

2.1.2. El treball en la indústria de la construcció és una activitat d'alt risc físic

En la indústria de la construcció totes les feines o operacions corresponents a cada una de les fases de l'execució d'un projecte, involucren un treball manual que requereix d'un gran desgast físic y muscular de part dels obrers (força de treball). Les quals exposen als treballadors a certs perills o inhalacions de productes tòxics. Actualment està bastant regulat mitjançant normatives de seguretat, però el perill segueix existint.

Una de les característiques més importants del procés de treball en la indústria de la construcció és que aquesta activitat econòmica és una de les branques econòmiques amb perill elevat de patir un accident, algun any fins i tot superant la mineria [1].

Tabla N°2. Análisis de mortalidad en la industria de la construcción

Año	Población Afiliada Construcción	Muertes Acetes. Trab. Total País	Muertes Trab. Construcción	Acetes. Total	% Muertes Construcción	Tasa mortalidad Construcción	de
1988	158506	106	37		35%	0.233	
1989	160381	105	50		48%	0.312	
1990	162141	74	32		43%	0.197	

Figura 2. Anàlisi de la mortalitat dins la indústria de la construcció [1]



2.2. Anàlisi de les impressores 3D

La primera impressora 3D va ser patentada l'any 1980, tot i que abans es van poder realitzar aproximacions a una màquina d'impressió 3D. Es va patentar un dispositiu que enduria els polímers fotoreactius mitjançant la llum ultravioleta, aquest dispositiu va ser inventat i patentat per el Dr. Hideo Kodama de l'Institut d'Investigació Industrial Municipal de Nagoya (Japó).

Anys més tard, 3D Systems Corporation, va patentar un dispositiu de estereolitografia (SLA), una de les tècniques més comunes a l'actualitat (la majoria de les impressores 3D domèstiques utilitzen aquest mètode degut a l'alta precisió i baix cost en el mercat anomenat comunment “resina líquida”).

Durant el mateix període, es van desenvolupar diferents tècniques de com unir i soldar materials en diferents estats. Una d'aquestes tècniques és a través de l'ús del làser (sinterització selectiva per làser, SLS) creat l'any 1987. També va ser patentada la impressió per deposició fundida (FDM) l'any 1992 per Stratasys Inc. Aquesta tècnica es basa en la deposició fosa de filaments de polímers dipositats, capa per capa, en un substrat.

A la mateixa època també van sorgir altres tecnologies i processos d'impressió 3D com “Ballistic Particle Manufacturing” (BPM), “Laminated Object Manufacturing” (LOM), “Solid Ground Curing” (SGC) i “Three-dimensional Printing” (3DP).

A principis de l'any 2004, a Anglaterra es va iniciar el projecte RepRap, "Replicated Rapid Prototyper", amb l'objectiu de fabricar una impressora que fos capaç de replicar-se a si mateixa, és a dir, imprimint els seus propis components. La tècnica FDM es caracteritza per ser econòmica, efectiva i de consum domèstic. Es van dissenyar diferents impressores 3D RepRap, les quals es van anomenar amb noms de famosos biòlegs evolutius al tractar-se d'un projecte basat en l'evolució i la rèplica [2,3].

No va ser fins al segle XXI, més concretament a partir de la segona dècada, que el cost de les impressores va decaure considerablement, la demanda d'aquesta tecnologia es va disparar i es va tornar més accessible a nivell domèstic i empresarial. D'aquí sorgiren dues tendències: una enfocada a la indústria i al mercat especialitzat, en la qual s'introduïren millores a les màquines

dels sectors de l'automobilisme (que prèviament tenien un cost elevat), la medicina, l'aeroespacial, la construcció; i una altra enfocada a nivell domèstic, el qual avarca un públic més ampli pel qual es van desenvolupar màquines fàcils d'utilitzar i a un preu molt més baix [4].

2.2.1. Tecnologies d'impressió 3D

"Deposición por hilo fundido" (FDM): Aquesta tecnologia va ser creada i patentada per *Stratasys, Inc.* Degut a la protecció de la patent, es va establir un terme equivalent que es pogués utilitzar legalment sense limitacions, anomenat "Fused Filament Fabrication" (FFF). Es tracta d'una tècnica molt estesa a nivell domèstic que es basa en l'extrusió de material termoplàstic. A través de les resistències s'escalfa el material per dins fins que arriba a l'estat semi-líquid, això és degut a la pressió que exerceix el material traccionat. Aquest és dipositat sobre una plataforma que el solidifica, segons els paràmetres subministrats de la impressora des d'un arxiu en format .STL del model creat digitalment en CAD. Donada la temperatura del material, 1°C per sota del seu punt de fusió, la capa de filament extruïda recau sobre la capa anterior ja solidificada. Els materials més comuns utilitzats per aquest tipus d'impressora son: "Acrilonitrilo Butadieno Estireno" (ABS) y "Poliácido láctico" (PLA), encara que és possible utilitzar uns altres termoplàstics. Depenent de la geometria a imprimir, serà possiblement necessària la utilització d'un material de suport amb un segon material soluble en aigua o alcohol com podria ser l'alcohol de polivinil (PVA). D'aquesta manera es facilitarà l'extracció de la peça un cop finalitzada la impressió. La falta d'adhesió entre les capes, la geometria i la precisió limitada per la boquilla extrusora provoca acabats rugosos els quals poden ser solucionats mitjançant un paper de vidre [12].

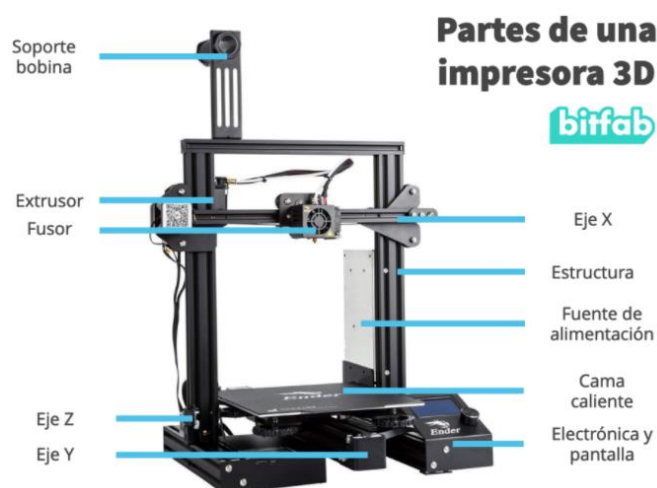


Figura 3. Il·lustració d'una impressora FDM amb les seves parts [12]

Estereolitografia (SLA): va ser la primera tecnologia comercialitzada, la qual va ser desenvolupada per *3D Systems Corporation*. Aquesta tècnica més comunament coneguda com a “impressora de resina líquida”. Funciona amb resines líquides de fotopolímer que es solidifiquen al reaccionar amb la projecció d'un fas de làser UV, generalment, donant pas a la fotopolimerització¹. En un acumulador s'emmagatzema la resina i la plataforma mòbil just a sobre de la resina, situada a una altura igual al gruix de la primera capa, sobre la qual es va solidificant el material. El làser realitza els moviments en els eixos X - Y, d'acord amb les dades subministrades per la màquina a partir d'un arxiu en format .STL del model creat digitalment en CAD². Aquesta superfície que es vol solidificar es il·luminada amb el làser, mentre tant, la zona que està a “l'ombra” segueix en estat líquid i exerceix la funció de suport. L'elevador de la plataforma baixa per l'eix Z, deixant el gruix necessari per recobrir la capa solidificada amb resina líquida per la següent capa. Aquest cicle es repeteix fins a finalitzar l'objecte. En el moment en que el procés finalitza, la plataforma puja per netejar i curar la peça en cas necessari, sotmetent-la a una llum intensa perquè s'endureixi el material. A vegades és necessari que la peça tingui estructures de suport per poder realitzar la peça, un cop finalitzada la peça s'hauran de retirar aquestes estructures de suport de forma manual. [12]

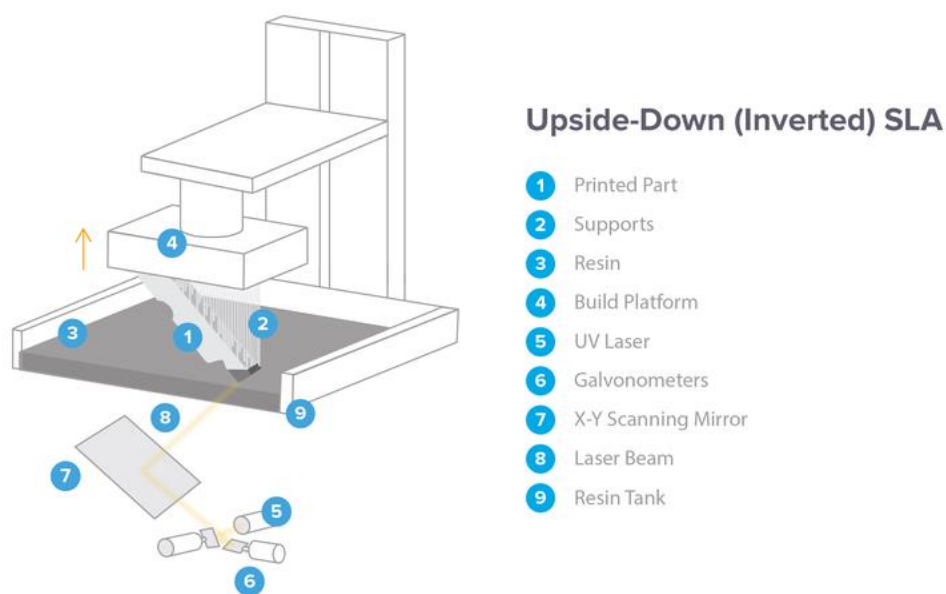


Figura 4. Il·lustració d'una impressora SLA amb les seves parts [12]

¹ **Fotopolimerització:** procés químic en el qual les petites molècules (monomers) s'ajunten formant polímers gràcies a un catalitzador de fas d'energia lluminós.

² **CAD:** Disseny assistit per ordinador.



Fotopolimerització ultravioleta (SGC): es un procés bastant similar a l'anterior, donat que també utilitza la mateixa tècnica a l'hora de solidificar un fotopolímer líquid o resina fotosensible mitjançant una llum ultravioleta. La diferència entre el SLA i el SGC és que en el SGC el material emmagatzemat al acumulador que se li aplica, a través d'una màscara, una llum ultraviolada d'alta energia s'aplica sobre tots els punts de la secció a la vegada. També proporciona uns bons acabats superficials i una bona precisió. És possible generar varies peces a la vegada [5].

Sinterització selectiva per làser (SLS): tecnologia inventada l'any 1987, un inventor americà especialitzat en la sinterització o fusió de partícules de pols, a través d'un procés similar al de SLA. Un làser generador de calor de CO₂ defineix i sinteritza materials polimèrics sobre una plataforma que es situa a una altura igual a l'espessor de la capa, de manera que sobre cada capa solidificada es diposita pols addicional per la següent. La pols de l'acumulador es manté a temperatura elevada per facilitar la fusió al reaccionar amb el làser. És imprescindible que el làser defineixi la geometria amb precisió, ja que l'excés de pols no solidificat fa la funció de suport. Aquesta és una de les principals diferències entre la SLS i la SLA. El ventall de possibles materials que es poden utilitzar en aquest procés és molt ampli, com podria ser el nylon, gomes i compostos de metalls. Aquests materials esmentats anteriorment necessiten d'un làser d'una potència superior i que pugui arribar a temperatures més altes de treball.

L'ús de la pols metàl·lica com a material implica la utilització de la tecnologia de la sinterització directa de metall per làser (DMLS), la qual permet obtenir peces més denses, de fins al 90%, en comparació a la SLS que són d'aproximadament 70% de densitat. Al mateix temps, s'obté una major resolució de detall per l'ús de capes més primes, gràcies al reduït diàmetre de les partícules de pols [5].

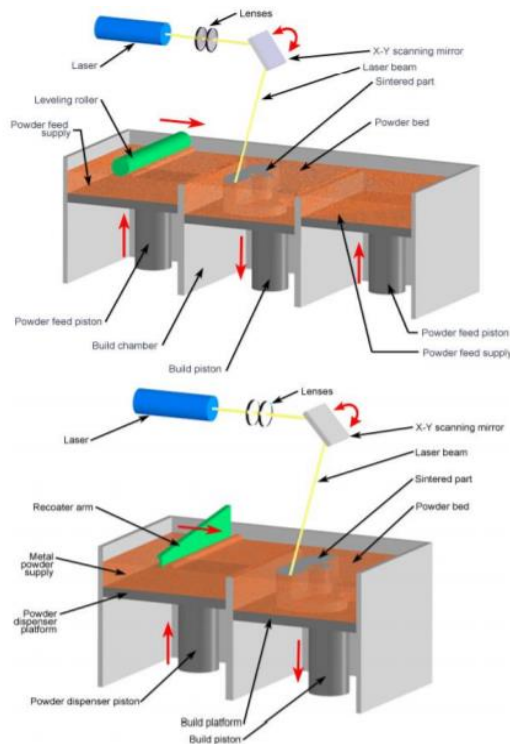


Figura 5 .Il·lustració d'una impressora SLS amb les seves parts [12]

Fusió per fes d'electrons (EBM): procés patentat desenvolupat per la companyia sueca *Arcam*. És similar al DMLS referent a la formació de peces de pols de metall. La diferència es troba amb la font de calor utilitzada, que com el nom de la tecnologia indica, és un feix d'electrons i no un làser. Per a la construcció de les capes es necessita una cambra al buit, a través de la qual els electrons circulen, sent redirigits cap a la plataforma amb metall en pols i fonent la primera capa del material. El procés es repeteix successivament, superposant capes de metall, fins a obtenir la peça desitjada [5].



Figura 6 .Il·lustració d'una impressora EBM amb les seves parts [12]

Tecnologia d'impressió tridimensional (3DP): tecnologia desenvolupada a l'Institut de Tecnologia de Massachusetts (MIT). És similar al procés de SLS, però no empra el làser per a sinteritzar el material, sinó que disposa d'un capçal d'impressió, el qual diposita un adhesiu líquid que s'encarrega d'unir el material: pols metàl·liques o ceràmiques. No genera material de rebuig, atès que la pols adherida al model es pot reutilitzar per a posteriors impressions. Les peces que s'adquireixen se solen filtrar amb un segellador amb la finalitat de millorar la seva resistència i acabat superficial [12].

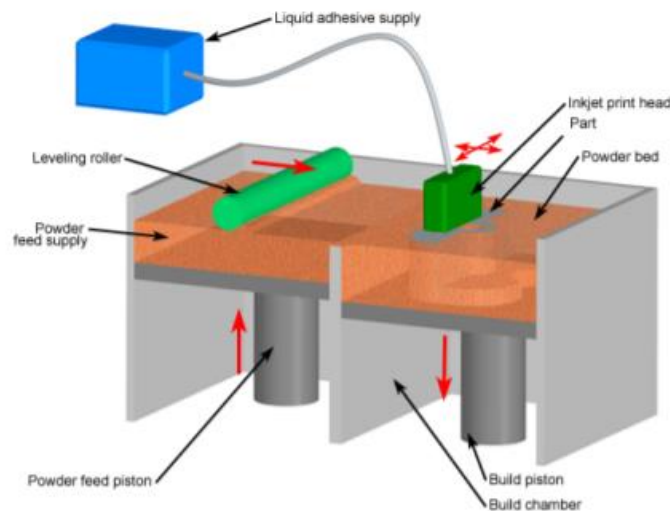


Figura 7. Il·lustració d'una impressora 3DP amb les seves parts [12]

Fabricació per tall i laminat (LOM): sistema comercial de fabricació d'objectes laminats desenvolupat per *Helisys of Torrance, C.A.* Consisteix en apilar làmines de material recobertes d'adhesiu per la part de baix, premsades amb un corró escalfat per a unir la fulla superior amb la capa immediatament inferior. Un làser s'encarrega de tallar la forma desitjada de la peça en cada capa i després de cada nou tall, la plataforma de treball baixa la profunditat corresponent al gruix de la fulla, deixant pas a la següent làmina. Quan aquesta se situa en el lloc desitjat, la plataforma puja lleugerament per a fer la pressió amb el corró i es realitza el tall del contorn amb el làser. Llavors, el procés es repeteix fins a completar la peça. Alguns dels avantatges d'aquesta tecnologia són que el material extra s'empra de suport i que ofereix una gran precisió, però per a això últim s'ha d'ajustar de manera molt precisa la potència del làser amb anterioritat [5].

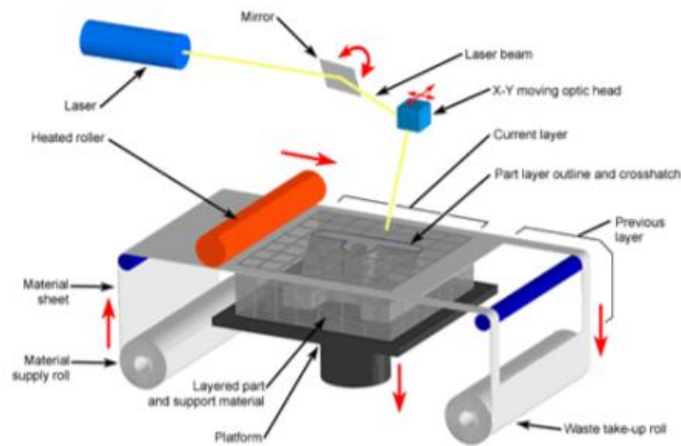


Figura 8. Il·lustració d'una impressora LOM amb les seves parts [12]

"**Multi Jet Fusion**" (MJF): el procés consisteix en injectar un agent de fusió per a fondre selectivament les partícules de pols que es troben sobre el llit d'impressió i un agent de detall per a millorar la resolució dels contorns. Sense ús de feix làser, uns llums passen sobre la superfície de la pols de manera constant perquè el material projectat capturi la calor. Aquest procés es repeteix per a cada capa de material per a construir l'objecte i no és fins al final, que s'elimina el material sobrant. Permet obtenir capes molt fines, que augmenten considerablement la densitat, però disminueixen la porositat en les peces respecte a les elaborades mitjançant sinterització per làser. A més, ofereix superfícies llises i peces funcionals sense pràcticament necessitat de processos d'acabat [12].

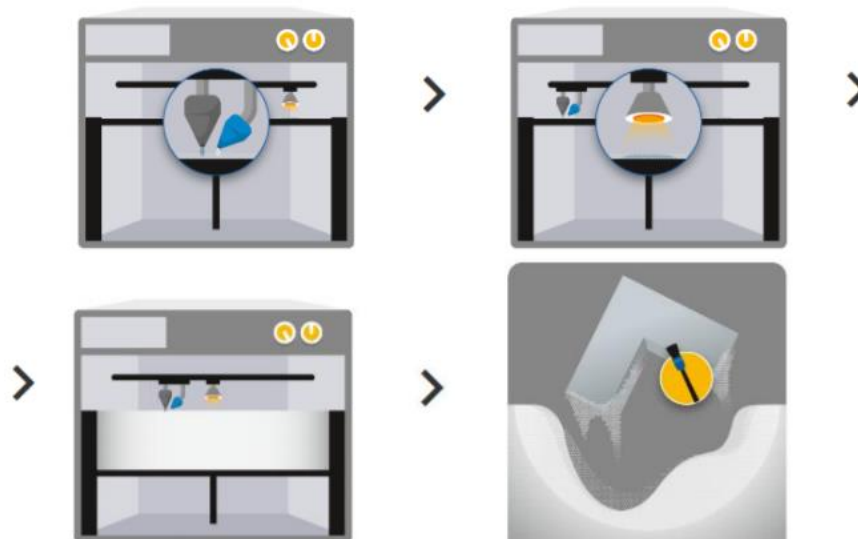


Figura 9. Il·lustració d'una impressora MJF amb les seves parts [12]



2.3. Necessitats constructives dels països subdesenvolupats

L'any 2020 la població mundial va sobrepassar els 7700 milions d'habitants, amb una previsió de 9700 milions d'habitants per l'any 2050. Ha augmentat més del doble a nivell mundial des de l'any 1970 que era de 3692 milions de persones.

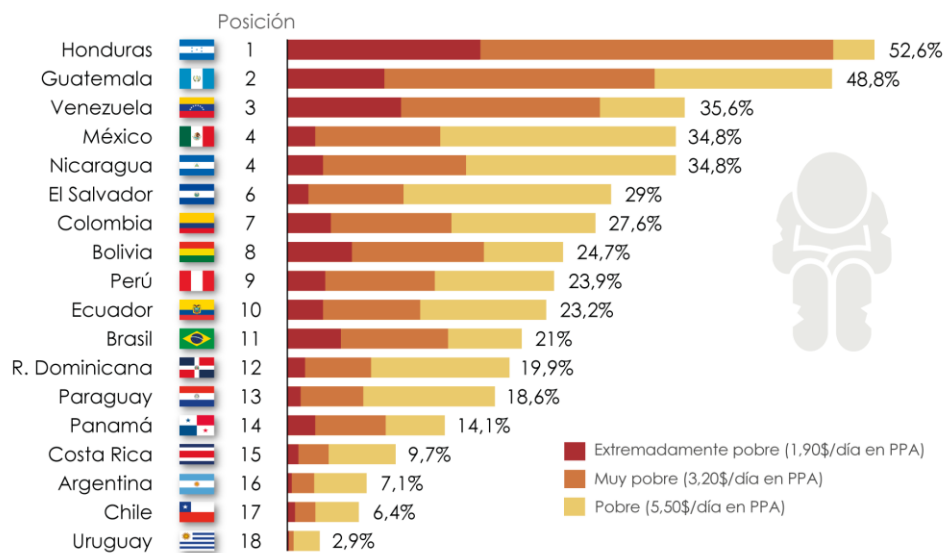
L'any 1950 el 80% de la població vivia en àrees rurals, les grans ciutats creixien a un ritme d'un 4% actual. En aquest mateix any en el món només existien 30 ciutats de més d'un milió d'habitants, en el 1960 eren 60 ciutats que superaven el milió, als setanta va ascendir fins a 80 ciutats.

A l'any 1967, el 75% de la població global vivia en àrees anomenades subdesenvolupades, aproximadament 2341 milions d'habitants. Als setanta, la població dels països subdesenvolupats va augmentar en 300 milions de persones, com per exemple a l'Amèrica Llatina (els quals la meitat vivia al camp) i a Àsia.

Actualment, només a l'Amèrica del Sud, les necessitats de construcció previstes per als pròxims anys són monumentals. L'any 1951, hi havia 158 milions d'habitants i 31 milions d'habitatges, els quals el 80% haurien de ser destruïts o reparats degut a les condicions que es trobaven. Durant el següent període entre l'any 1957 i l'any 1961, es construïren 310.000 habitatges de mitjana anualment. Això va crear la necessitat de duplicar la producció d'habitatges durant els pròxims trenta anys per poder resoldre el problema, només amb el continent d'Amèrica del Sud.

El reparto de la pobreza en América Latina

% de población que es pobre, muy pobre y extremadamente pobre*



*Último año disponible
Gráfico:
Álvaro Merino (2019)
Fuente:
Banco Mundial (2018)

Figura 10. El repartiment de pobresa a l'Amèrica Llatina [13]

Amb aquestes xifres tant aclaparadores si les afegim a nivell global és desconsolador. Des del 1967 fins al 1990 va ser necessari construir 800 milions d'habitatges. Les xifres actuals tampoc són millors, tot el contrari, empitjoren degut a l'augment tan ràpid de la població i a l'actual pandèmia que estem patint.

Però l'ús de les tècniques avançades actuals està limitat per l'alt volum de producció estable que requereixen, un alt percentatge de les ciutats del tercer món³ són de menys de 15 mil habitants, i més del 60% de les vivendes es construiran en zones rurals aïllades, les quals és difícil que arribin els materials com per exemple el formigó. Es pot arribar a una productivitat anual de 1,7 habitatges per obrer, un rendiment bastant baix comparat amb les vivendes que s'han de construir.

³Tercer món: Conjunt de països subdesenvolupats.



2.3.1. Bases de la transformació:

Els països subdesenvolupats que encara no han iniciat la seva transformació econòmica i social, es poden caracteritzar pels següents aspectes:

1- El contrast entre el luxe de les construccions per una minoria i la pobresa de les construccions de la gran majoria treballadora del poble (àrea per persona, nivell d'habitatge i serveis).

2- L'acumulació progressiva del dèficit de l'habitatge amb el qual aguditza el problema de la vivenda.

3- L'especulació de terrenys i la construcció amb l'objectiu de beneficiar-se el qual obliga a la majoria del poble treballador a resoldre el problema de manera immediata, construint cases disperses en el camp i barraques, donant pas a les més conegudes faveles de l'Amèrica Llatina.

4- La mínima contribució de l'Estat a la solució del problema amb l'habitatge.

5- L'ús generalitzat de materials importats com a conseqüència del subdesenvolupament industrial.

6- La dedicació, esforç i talent d'arquitectes i tècnics a la solució dels problemes aïllats de la classe més rica, amb el consegüent abandonament de la majoria humil i treballadora.

7- L'anarquia del sector de la construcció, amb el següent malbaratament dels recursos materials i humans.

8- L'existència d'un grup reduït d'arquitectes i tècnics d'acord amb el problema existent del volum d'obra i programes de construcció per a la classe treballadora i més humil.

L'arquitectura d'un país subdesenvolupat no pot transformar-se sense un canvi radical de l'estructura econòmica, política i social que ha provocat el subdesenvolupament, i que és l'arrel de les seves característiques. Al posar en mans del poble els mitjans fonamentals de la producció agrícola i industrial, la banca permetrà la utilització racional de tots els recursos i forces disponibles a través d'un pla de desenvolupament. Orientat per institucions creades al respecte, portat a la realitat amb la participació conscient i activa d'un poble organitzat.

El problema dels habitatges com a conseqüència del subdesenvolupament és de tal magnitud que no pot ser resolt si no es produeix en aquests països un canvi radical en la seva estructura que permet desenvolupar-se i poder satisfer les necessitats dels habitatges i serveis socials pel conjunt de la població.



La solució de les necessitats de les vivendes s'ha de fonamentar en la inversió seria i planificada en construccions per part de l'Estat, en l'ús racional dels recursos humans i materials, la industrialització i el desenvolupament de noves tecnologies per a la construcció, com a condició obligada per poder resoldre a temps la demanda d'habitatges, utilitzant amb aquest propòsit, totes les solucions constructives que sorgeixin. La construcció seguirà els passos de desenvolupament general del país, amb una especial prioritat en les obres agrícoles i industrials de tipus productius, mentre es completa la satisfacció de les necessitats més urgents per a la salut i educació de tota la població.

Es poden destacar diferents principis que defineixen la solució:

-El principi central de l'economia: Es basa en produir el màxim de possibilitats amb mínim recursos i esforços. Utilitzar el mínim de material en les seves millors condicions estructurals i constructives. Produir al màxim amb el mínim esforç a través de la millora de l'organització del procés de producció.

-El principi del canvi i del creixement: Ha de poder transformar-se amb el temps, és a dir, ha de poder ser una estructura que pugui créixer, augmentar els espais dedicats a certes funcions, canviar de forma i fins i tot poder-se ampliar.

-El principi de transformació: S'ha de construir les edificacions de tal forma que sigui complicat que entri en abandonament; amb l'objectiu de que rendeixi al màxim durant tot el temps de vida. Per això, ha de ser flexible per poder transformar-se i adaptar-se a les noves condicions.

-Manteniment econòmic: Ha de ser una edificació en la qual el manteniment sigui el mínim possible garantint totes les seguretats i la integritat del que s'ha construït. Amb la finalitat de que es derivin el mínim de recursos humans i materials.



2.4. Impressió 3D a la construcció

Des de fa poc, hi ha hagut diversos intents d'implementar la impressió 3D en la indústria de la construcció.

Al 1998, Hinczewski va utilitzar la SLA per a crear peces ceràmiques en 3D. Posteriorment, Khoshnevis, al 2001, va utilitzar el mètode “Contour Crafting”, amb el qual va demostrar que es podia produir una peça de guix, sempre que s'adoptés l'assecat forçat per escalfament. Però no és fins al 2012 que Lim mostra que és possible la impressió de components de formigó prefabricat, amb la seva impressora de 5,4 m x 4,4 m x 5,4 m d'impressió.

En quant a models arquitectònics, Gibson i altres al 2002, van emprar les tecnologies FDM i SLS per a fabricar alguns models en un temps significativament baix. Aquell mateix any, es va utilitzar la tecnologia de Concept Modelling (Modelatge de Conceptes) de l'estudi de Ryder per a produir models arquitectònics de baixa precisió. Més endavant, es va millorar la precisió de tecnologies com la de FDM, SLS i SLA, dins del camp de la construcció, respecte al “Concept Modelling”.

Era difícil pensar, en aquells dies, que amb les dimensions de les impressores 3D que s'estaven comercialitzant es podia arribar a construir un edifici, tenint en compte les seves magnituds. No obstant això, s'ha anat cobrint aquesta necessitat en els últims anys amb alguns projectes. DUS Architects, empresa holandesa, desenvolupa al 2013 la impressora KamerMaker de 6 m d'altura, la qual treballa amb polipropilè.

Al 2014, l'empresa arquitectònica xinesa Winsun va imprimir a Shangai diverses cases completes en menys de 24 hores. La seva impressora li va permetre aixecar edificis sencers utilitzant com a material ciment i fibra de vidre d'alta qualitat. Gràcies a aquest últim component, els edificis eren dotats de major resistència que els de formigó reforçat.

La tecnologia Qindao Unique, al mateix any, també va crear una impressora basada en FDM de dimensions 12 m x 12 m x 12 m, però en el seu cas utilitzava plàstic reforçat amb vidre.

Al 2015, Winsun va imprimir una vila i un edifici d'apartaments de cinc pisos amb la tecnologia 3DP. Es va imprimir per parts, és a dir, cada component era imprès i es traslladava al lloc de

construcció per a instal·lar-lo. Encara que no fos una impressió directa de les estructures senceres, va quedar demostrada l'aplicabilitat de la impressió 3D en els projectes d'edificis complets [7].

Actualment, la impressió 3D avança en tots els fronts i sorgeixen més sistemes, materials, aplicacions, serveis i accessoris.

2.4.1. Tecnologies de la impressió 3D a la construcció

L'estudi i coneixement de les tecnologies existents ha permès, a la indústria de la construcció i de l'arquitectura, desenvolupar nous mètodes de fabricació additiva que admeti obtenir elements a gran escala, de formigó o altres materials per a la construcció, a partir de la impressió en 3D. Encara que la implementació d'aquests nous mètodes es troba en fase preliminar, destaquen 3 tecnologies diferents, denominades Contour Crafting, D-Shape i Concrete Printing, que han permès passar a la macro escala.

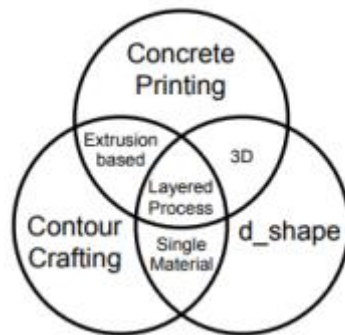


Figura 11. Diferències i semblances amb les tecnologies d'impressió [8]

Contour Crafting: tecnologia desenvolupada per Dr. Behrokh Khoshnevis de la Universitat del Sud de Califòrnia. Aquesta tecnologia fabrica per capes, expulsant el material mitjançant filtres d'extrusió, les quals disposen de dues paletes planes, verticals i sòlides, per a crear superfícies exteriors suaus i precises, a mesura que el material es diposita. El conjunt del filtre ha de disposar de tres components de control de moviment: extrusió, rotació i desviació de la paleta. Les màquines que utilitza són pòrtics XYZ que es mouen en dues pistes paral·leles, instal·lades en el lloc de la construcció. Aquestes necessiten d'un sistema de control de moviment de sis eixos per a coordinar les posicions [8].

Durant el procés existeixen dues fases diferenciades: la d'extrusió de les vores exteriors de la construcció i la d'ompliment del nucli. Com són dues etapes diferents és possible emprar materials diferents, segons les necessitats. L'addició de reforç com a malles d'acer o fibres de plàstics reforçats, és possible de manera automatitzada, durant la fase d'ompliment [8].



Figura 12. Il·lustració d'una impressora amb el sistema Contour Crafting [14]

Concrete Printing: mètode basat en l'extrusió, desenvolupat per l'equip d'impressió de formigó de la Universitat de Loughborough. La seva resolució de deposició és menor que el de Contour Crafting, la qual cosa es dedueix en un major control de geometries complicades [10]. És a dir, té més versatilitat en quant a formes i dimensions, però els seus acabats són menys precisos. Per les grandàries d'impressió que permet, la seva capacitat es redueix en la fabricació de components de formigó prefabricat, com ara columnes i murs [9].



Figura 13. Il·lustració d'una peça realitzada amb el sistema Concrete Printing [15]

D-Shape: Enrico Dini és el fundador i inventor d'aquest mètode basat en la deposició selectiva de pols, afegint aglutinant perquè les capes d'impressió s'endureixin. Cada capa de material de construcció (sorra, grava o qualsevol altra mescla), del gruix uniforme desitjat, es col·loca i es compacta. Després els múltiples filtres, situats en sèrie sobre un pòrtic, injecten l'aglomerant en aquelles zones en que la peça hagi de ser sòlida, capa per capa. Una vegada acabada la peça, la pols que no ha estat endurida i ha fet la funció de suport es retira i es recicla per a la posterior impressió.

També, durant el procés d'estratificació, es pot parar i agregar reforços horitzontals, com a barres i xarxes, per a donar força als sostres. El valor de curat d'una nit serà suficient per a començar la fase d'acabat en l'estructura recentment impresa [10].



Figura 14. Il·lustració d'una impressora amb la tecnologia D-Shape [16]

2.5. Antecedents necessaris dels materials per poder ser impresos per extrusió

En el cas de la impressió per extrusió son necessaris una seria d'objectius, els quals poden arribar a ser contradictoris entre ells. Això pot suposar una dificultat, degut a que s'haurà de trobar un equilibri entre ells. Per exemple, en el cas del formigó, sempre s'aconsella maximitzar la resistència a la compressió; per aconseguir-ho s'ha de minimitzar la relació aigua-ciment, però mantenint sempre un contingut d'aigua mínim per a garantir la seva treballabilitat. Aquesta treballabilitat significa la capacitat adequada del formigó per ser bombejat. A més, és necessari que sigui una barreja fluida per tenir la capacitat de ser impresa. No obstant, és imprescindible que després d'abocar es pugui sostenir a si mateixa i a les capes superiors sense ser deformada (constructibilitat del material). Per últim, durant l'abocament, la barreja s'ha de fixar ràpidament, però no en excés per assegurar la unió apropiada amb la capa superior.



Per tant és molt important controlar els següents aspectes:

- La capacitat de ser bombejat.
- La capacitat de ser imprès
- La constructibilitat del material.
- Controlar els temps d'enduriment de les mescles.
- La resistència inicial.
- La consistència.
- La viscositat.

En el cas ideal del formigó i el morter si es va imprimint el material de forma continuada respectat els paràmetres esmentats abans, es crearà una sola capa i tota l'estructura serà una sola capa. En aquest cas, al no haver-hi fissures ni distincions entre capes l'estructura adquireix una capacitat d'impermeabilitat [11].



3. PART EXPERIMENTAL

3.1. Anàlisi de materials per a la impressora 3D per a construir un habitatge

La investigació de nous materials és una tendència a nivell mundial, en la qual s'investiguen diferents materials per a oferir noves solucions a problemes d'enginyeria. Aquesta varietat de materials que tenim actualment ha sigut degut a la investigació d'empreses i centres d'investigació. El problema que ofereixen aquests materials que s'han creat mitjançant la investigació és que el seu cost és molt més elevat que els tradicionals i és més difícil de manufacturar ja que pocs centres i indústries disposen de la seva fórmula.

Per tant, s'hauria d'analitzar diferents materials els quals tinguin una gran presència a nivell mundial per a no tenir problemes amb el subministrament. Degut a que s'ha de tenir en compte de que s'estarà treballant en parts del món on molts materials són inaccessibles degut a que la impressora podria estar treballant en àrees llunyanes a nuclis urbans i indústries.

El material més utilitzat per la construcció es el formigó, el qual ofereix unes propietats mecàniques molt interessants. La conseqüència de que sigui el material més utilitzat per la construcció és que tindrà una gran presència a nivell mundial. Per tant, no haurien d'haver-hi problemes de subministrament.

El formigó està format per un agent aglomerant que en la majoria dels casos és ciment. Després està format per un altre agent el qual es un agent àrid el qual es compona per grava, 'gravilla' i sorra. Per últim és necessari aplicar-hi aigua per crear una reacció d'hidratació [17].

En el cas de que el morter comparteixi la gran majoria dels materials que componen el formigó, estaria format per ciment, sorra i aigua. Per tant, en el cas que no es pugui obtenir formigó gràcies a la seva influència a nivell mundial podríem obtenir els altres materials que el formen i obtenir el morter [18].

En el cas del formigó i del morter, l'únic problema que tenen en comú és que la resistència als esforços de tracció és baixa i també resistència menor als estats tensionals no axials els esforços de tracció i a la reacció a forces desviades de l'eix. El comportament que presenten es que poden col·lapsar de forma més ràpida i d'una forma bastant ràpida. Això vol dir que, en el cas

que una estructura pateixi esforços de tracció o una força perpendicular al material podria col·lapsar de forma molt ràpida i sense presentar unes fissures o un estat previ de col·lapse. Aquesta situació no és la més ideal per construir un habitatge el qual pugui col·lapsar sense previ avís o amb una presència escassa de fissures. Per evitar aquest perill s'ha optat per afegir al formigó i al morter unes fibres de vidre com a reforç. Aquestes fibres augmentaran la resistència a la tracció i provocaran que en un cas de col·lapse l'estructura no entri en un estat crític tan ràpid i donant senyals de col·lapse.

Aquests dos materials al tenir una gran presència mundial no hauria d'haver problemes de subministrament, però es pot donar el cas que degut a la situació geogràfica d'on es vulgui construir no es pugui obtenir aquests materials amb facilitat. Per aquest motiu, és necessari poder oferir una solució alternativa la qual es pugui realitzar in situ. Per tant, aquest tercer material no ha de ser manufacturat i s'ha de poder crear en el mateix indret on es vulgui construir.

Aquest nou material es un material tradicional que la humanitat l'ha utilitzat de forma continuada al llarg de la història. El material de construcció tova ha fet possible la construcció de diverses ciutats al llarg de la història, com podria ser el cas de la ciutat de Çatalhöyük, Anatolia (Turquia), aquesta ciutat creada amb tova data del VII abans de Crist. Actualment també es poden trobar construccions de tova en el món, com pot ser el cas de Mendoza (Argentina), especialment a la "Valle de Uco". Per tant, no és un material que està en desús, degut a que el cost és molt més baix i ecològic. Aquest fenomen va ser degut a la impossibilitat de poder pagar els costos dels materials de construcció actuals durant la crisi econòmica del 2008; a més de poder construir una casa amigable amb el medi ambient. Tot això ha donat pas al fenomen de la bioconstrucció. [20]



Figura 15. Il·lustració d'un habitatge realitzat amb tova [20]

Per aquest motiu, la tova presenta unes característiques que el formigó i el morter no tenen. La tova està formada per quatre elements: argila, sorra, palla i aigua. Aquests elements són fàcils de trobar a la natura ja que l'argila té una gran presència a l'escorça de la Terra. Per les regions occidentals pot ser una mica estrany la presència d'aquest material però fora dels països desenvolupats encara continua sent present.



Figura 16. Mapa de la península Ibèrica amb les regions on es pot trobar argila [21]

En el següent mapa es pot observar la gran presència que té l'argila a Espanya, les àrees del mapa de color groc indiquen la terra on l'argila té una gran presència.

Gràcies a la gran presència de l'argila a l'escorça terrestre i la gran presència del formigó amb la consegüent presència del morter. Podem garantir el subministrament d'aquests materials en qualsevol regió del món. Perquè la impressora haurà de poder funcionar amb aquests 3 tipus de materials. En el cas que en una regió hi hagués problemes amb el subministrament o el cost per la construcció hagués de ser més ajustat es podria prescindir del formigó i del morter i utilitzar la tova. Per tant podem garantir la impressió d'una casa a qualsevol indret del món mitjançant una impressora 3D per a la construcció d'habitatges.



3.2. Antecedents realització de les provetes

Un cop presentats els diferents materials és necessari fer un anàlisi més precís, en el qual ha sigut necessari realitzar unes provetes per poder realitzar un assaig de compressió per poder saber si els materials són adients. Aquesta prova de compressió és bastant comuna ja que s'utilitza bastant en la construcció. En aquest apartat s'explicarà com es van fer les provetes i la composició exacte d'aquestes. Cada una tindrà una fitxa tècnica única encara que per les proves es van realitzar 2 provetes del mateix material variant el temps de curat per observar la diferència de la resistència a la compressió en funció dels dies.

En el següent apartat es busca saber si els materials proposats compleixen les propietats necessàries, es farà un anàlisi més específic de les seves propietats de compressió igual que la seva relació compressió-pes. També es validarà si són materials vàlids per a la impressió d'habitatges o s'han de descartar.

Per a la realització de les provetes es va especificar que les dimensions havien de ser de 10 centímetres de diàmetre constant en tota la proveta i de 20 cm de llargada. Per tant, havia de ser un cilindre amb una superfície constant i un volum de material de $1570,80 \text{ cm}^2$. Les provetes tindran un pes diferent degut a la densitat del material però el volum serà sempre el mateix.

Per a realitzar les provetes es va comprar un tub de diàmetre constant de 10 centímetres amb una llargada de 2 metres al Ferrolan de Rubí. Per fer les provetes es van tallar el tub amb una serra per obtenir les provetes de 10 centímetres de diàmetre i de 20 centímetres de llargada.

Un cop tallades les provetes amb les mesures especificades es va procedir a buscar tots els materials necessaris. El morter i el formigó van ser comprats al Ferrolan de Rubí. La marca del formigó es Fiasa (formigó sec HS-25). La marca del morter es Fiasa (morter sec M-7,5). Un cop comprat el formigó i el morter, també a la mateixa tenda es van comprar les fibres de reforç per aconseguir una millor resistència a la tracció. Les fibres comprades van ser fibres de vidre amb de la marca SikaCim (Fibras-6).



A les botigues on es va trobar l'argila, va ser en al Bureau Vallès i a l'Abacus. En aquest cas es va haver d'utilitzar dos proveïdors diferents per falta d'estoc degut a que es va comprar els últims paquets d'argila que tenien i es va haver de canviar de tenda per que el següent subministrament d'argila a la tenda era molt tard. En el cas de la sorra va ser obtinguda en el Ferrolan i la marca es la mateixa (Ferrolan).

Un cop obtinguts tots els materials es va procedir a fer les barreges pertinents per cada un dels materials. Els materials de les provetes van ser els següents:

- Formigó (100% formigó)
- Formigó (90% formigó i 10% fibra de vidre)
- Morter (90% morter i 10% fibra de vidre)
- Tova variant 1 (50% argila, 30% sorra i 20% palla)
- Tova variant 2 (60% argila, 25% sorra i 15% palla)

3.2.1. Proveta de formigó (100% formigó)

Aquesta proveta consta només de formigó, en aquest cas es vol demostrar que és un material el qual pot col·lapsar de forma ràpida encara que aguanti grans forces de compressió. En una estructura on sigui habitada per humans sempre s'ha de garantir un mínim de seguretat.

Per a la realització d'aquesta proveta es van necessitar els següents materials:

- Formigó
- Paleta
- Gaveta
- Aigua
- Barra de ferro

Aquesta proveta va ser la més fàcil de realitzar degut a que només consistia de dos materials, aigua i formigó.

El primer pas va ser abocar el formigó dins de la gaveta, un cop abocada la quantitat necessària de formigó es va procedir a afegir poc a poc l'aigua. Cada cop que es va afegint l'aigua es va barrejant els materials amb la paleta per aconseguir una barreja uniforme. Com es pot observar en la següent imatge.



Figura 17. Fotografia del procés de barreja

Un cop aconseguida una barreja homogènia es procedeix a omplir la proveta mitjançant la paleta. El mètode per omplir la proveta consisteix en anar omplint poc a poc la proveta i mitjançant una barra de ferro assegurar l'absència de bombolles d'aire a l'interior. Aquest mètode consisteix en un moviment oscil·latori el qual provoca que les bombolles que hagin pogut quedar atrapades a l'abocament del material desapareixin o es minimitzin. Aquest pas es realitza perquè l'aparició de bombolles d'aire a la proveta crearia seccions més fràgils de la proveta i provocaria una fissura a través de les bombolles de manera que la proveta col·lapsaria amb una càrrega de compressió menor.



Figura 18. Fotografia del procés d'omplir les provetes

3.2.2. Proveta de formigó (90% formigó i 10% fibra de vidre)

En aquesta proveta a diferència de l'anterior se l'hi afegeixen unes fibres de reforç les quals fan que el material tingui més resistència a la tracció i resistència estats tensionals⁴ no axials⁵. Com a conseqüència, en el moment on la proveta entra en el seu estat crític gràcies a les fibres de reforç manté més la forma i no s'esmicola. Per tant, abans de col·lapsar la proveta presentarà unes fractures més clares que en el cas anterior.

Per a la realització d'aquesta proveta es van necessitar els següents materials:

- Formigó
- Fibra de vidre
- Paleta
- Gaveta
- Aigua
- Barra de ferro

El primer pas va ser abocar el formigó dins de la gaveta, un cop abocada la quantitat necessària de formigó es procedeix a afegir poc a poc l'aigua. Cada cop que es va afegint l'aigua es va barrejant els materials amb la paleta per aconseguir una barreja uniforme.



Figura 19. Fotografia del procés d'abocar el material

⁴**Estats tensionals:** distribució de tensions fora del existents en un punt d'una peça carregada

⁵ **Axials:** Pertanyent a un eix (X,Y i Z)

A diferència del cas anterior, un cop aconseguida la barreja homogènia dels materials es procedirà a afegir la fibra de reforç, en aquest cas la fibra de vidre. En aquest cas un cop abocada la quantitat necessària de fibra de vidre, es procedirà a barrejar els materials mitjançant la paleta per aconseguir una barreja homogènia i una anisotropia⁶ de les fibres de vidre. Aquesta anisotropia un cop creada la proveta farà que la resistència a estats tensionals no axials augmenti. Degut a que la anisotropia de les fibres de reforç podrà garantir que la direcció d'algunes de les fibres serà la idònia per a qualsevol estat tensional.

A la següent imatge es pot observar la fibra de vidre abans de ser abocada a la gaveta.



Figura 20. Fotografia de la fibra de vidre utilitzada

Un cop obtinguda una barreja homogènia del formigó amb la fibra de vidre es procedirà a omplir les provetes amb el material. Com en el cas anterior, s'introduirà la barra de ferro i es realitzarà un moviment oscil·latori per eliminar les bombolles d'aire.

⁶ Les fibres es situen en diferents direccions dintre del espai

3.2.3. Proveta de morter (90% morter i 10% fibra de vidre)

En aquest cas la proveta consta de dos materials: el morter i la fibra de vidre. El morter és un material bastant comú però és necessari afegir un material de reforç. Com en el cas anterior la barreja del morter amb la fibra de vidre li aporta unes característiques mecàniques com seria més resistència a esforços de tracció i resistència d'estats tensionals no axials. Degut a que la anisotropia de les fibres de reforç podrà garantir que la direcció d'algunes de les fibres serà la idònia per qualsevol estat tensional.

Per a la realització d'aquesta proveta es van necessitar els següents materials:

- Morter
- Fibra de vidre
- Paleta
- Gaveta
- Barra de ferro
- Aigua

El primer pas va ser abocar el morter dins de la gaveta, un cop abocada la quantitat necessària de morter es procedeix a afegir poc a poc l'aigua. Cada cop que es va afegint l'aigua es va barrejant els materials amb la paleta per aconseguir una barreja uniforme i homogènia.

El següent pas un cop aconseguida la barreja homogènia dels materials es procedirà a afegir la fibra de reforç, en aquest cas la fibra de vidre. En aquest cas un cop abocada la quantitat necessària de fibra de vidre, es procedirà a barrejar els materials mitjançant la paleta per aconseguir una barreja homogènia.



Figura 21. Fotografia del procés d'afegir la fibra de vidre a la gaveta amb morter

Un cop aconseguida una barreja homogènia es procedeix a omplir la proveta mitjançant la paleta. El mètode per omplir la proveta consisteix en anar omplint poc a poc la proveta i mitjançant una barra de ferro assegurar la absència de bombolles d'aire en el interior. Aquest mètode consisteix en un moviment oscil·latori el qual provoca que les bombolles que hagin pogut quedar atrapades a l'abocament del material desapareixen o es minimitza. Aquest pas es realitza perquè l'aparició de bombolles d'aire a la proveta crearia seccions més fràgils de la proveta i provocaria una fissura a través de les bombolles de manera que la proveta col·lapsaria amb una càrrega de compressió menor.



Figura 22. Fotografia del procés de curat de les provetes

Com es pot observar a la següent imatge un cop finalitzades les tres provetes es van deixar al sol perquè s'assequessin. Aquest procés es va repetir amb les altres provetes però la diferència va ser el temps que van estar curades al sol. Degut a que no totes les provetes van ser fetes el mateix dia i degut a que per les següents proves també es volia analitzar com influïa el temps de curat en la resistència a la compressió.



3.2.4. Proвета de Tova variant 1 (50% argila, 30% sorra i 20% palla)

En aquest cas es van crear dos provetes de tova i es va variar la proporció dels materials que els componen. Aquesta variació era perquè es volia trobar la proporció ideal dels materials que componen la tova. Per tant, es va optar per fer dues variants on la prova de laboratori es veurà quin dels dos materials té la proporció més encertada.

Per realitzar aquesta proveta es va realitzar sense eines especialitzades com en els casos anteriors. Perquè amb aquest material es vol evitar qualsevol material manufacturat i eines especialitzades, degut a que serà utilitzat en les àrees més aïllades i per tant s'ha de poder fer amb els recursos disponibles de la regió on es vol construir.

Per a la realització d'aquesta proveta es van necessitar els següents materials:

- Cubell
- Aigua
- Argila
- Sorra
- Palla

El primer pas per a la realització d'aquesta proveta és tallar la palla necessària amb una longitud de 10 mil·límetres aproximadament. Es talla la palla a una longitud de 10 mil·límetres per a garantir la anisotropia de la palla. Aquesta anisotropia un cop creada la proveta farà que la resistència a estats tensionals no axials augmenti. Degut a que la anisotropia de les fibres de reforç podrà garantir que la direcció d'algunes de les fibres serà la idònia per qualsevol estat tensional.

Un cop tallada la palla es procedirà a afegir la sorra. És important seguir aquests passos degut a que si primer aboquem l'argila seria més difícil a l'hora de barrejar i per tant la barreja no seria homogènia. Un cop abocada la quantitat necessària de sorra es procedirà a barrejar la palla i la sorra amb la mà. Com es pot observar en la següent fotografia obtindrem una barreja com aquesta.



Figura 23. Fotografia del resultat de la barreja de la palla amb la sorra

El següent pas serà afegir a la barreja l'argila, s'anirà afegint l'argila poc a poc per garantir l'homogeneïtat de la barreja. Conforme es va afegint l'argila s'anirà barrejant la mescla i s'anirà afegint una mica d'aigua en els moments que sigui més difícil de barrejar amb la mà. També es fa per garantir la capacitat de ser bombejat i imprès, per tant s'ha de tenir en compte la quantitat d'aigua que podria afectar a les capacitats esmentades anteriorment. Com es pot observar a la següent fotografia es realitza tot el procediment a mà.



Figura 24. Fotografia del procés de barreja manual de la tova

L'últim pas serà omplir les provetes amb la tova. Com en els casos anteriors s'anirà afegint el material poc a poc a la proveta evitant en tot moment la presència de bombolles d'aire. En aquest cas no es disposava d'una barra de ferro com en el cas anterior per tant es va realitzar tot el procés a mà.



3.2.5. Tova variant 2 (60% argila, 25% sorra i 15% palla)

En aquest cas es va optar per variar la proporció dels elements que formen la tova degut a que es vol trobar la proporció dels elements més ideal. En aquest cas es va augmentar la presència de la argila en un 10 %, per tant la proporció de sorra i palla es va reduir en un 5% en cada una d'elles.

En aquest cas no es va utilitzar cap material manufacturat i es va fer tot el procés a mà sense cap eina especialitzada. Per els mateixos motius que en el cas de la tova variant 1.

Per a la realització d'aquesta proveta es van necessitar els següents materials:

- Cubell
- Aigua
- Argila
- Sorra
- Palla

El primer pas per a la realització d'aquesta proveta es tallar la palla necessària amb una longitud de 10 mil·límetres aproximadament. Es talla la palla a una longitud de 10 mil·límetres per garantir la anisotropia de la palla. Aquesta anisotropia un cop creada la proveta farà que la resistència a estats tensionals no axials augmenti. Degut a que la anisotropia de les fibres de reforç podrà garantir que la direcció d'algunes de les fibres serà la idònia per qualsevol estat tensional.

El següent pas serà abocar la quantitat necessària de sorra. Un cop abocada la quantitat necessària de sorra es procedirà a barrejar la palla i la sorra amb la mà.



Figura 25. Fotografia del procés d'abocar la sorra al cubell

El següent pas serà afegir a la barreja l'argila, s'anirà afegint l'argila poc a poc per garantir l'homogeneïtat de la barreja. Conforme es va afegint l'argila s'anirà barrejant la mescla i s'anirà afegint una mica d'aigua en els moments que sigui més difícil de barrejar amb la mà. També es fa per garantir la capacitat de ser bombejat i imprès, per tant s'ha de tenir en compte la quantitat d'aigua que podria afectar a les capacitats esmentades anteriorment.

L'últim pas serà omplir les provetes amb la tova. Com en els casos anteriors s'anirà afegint el material poc a poc a la proveta evitant en tot moment la presència de bombolles d'aire. Aquest pas és molt important perquè l'aparició de bombolles d'aire a la proveta crearia seccions més fràgils de la proveta i provocaria una fissura a través de les bombolles de manera que la proveta col·lapsaria amb una càrrega de compressió menor. A la següent imatge es pot observar la proveta de tova de la variant 2 finalitzada i amb el seu procés de curat realitzat.



Figura 26. Fotografia de la proveta de tova finalitzada

3.2.6. Resum de les provetes

Un cop finalitzades totes les provetes es va treure el encofrat de plàstic, el qual li donava la forma cilíndrica. Per treure el encofrat es va utilitzar una serra radial. Es un procés molt delicat ja que qualsevol error amb la serra radial faria malbé la proveta i s'hauria de repetir. La primera opció per treure el encofrat va ser un cúter, però degut a la duresa del encofrat es va haver de fer amb la serra radial.

Un cop obtinguda la proveta sense l'encofrat es va procedir a fer un anàlisi de cada una de les provetes. En aquesta taula es pot observar que se li ha afegit unes nomenclatures a cada una de les provetes, ja que en els següents apartats seran mencionades per la seva nomenclatura. A la següent taula es pot observar un error màxim de 5 mil·límetres, això només suposa en alguns dels casos un error del 2,5%. Per tant, totes les provetes van ser vàlides.

	Formigó	Formigó	Tova variant 1	Tova variant 1	Morter i fibra
Pes (g)	3020	3104	2215	2611	2890
Altura (mm)	200	205	197	205	200
Amplada (mm)	100	100	100	100	100
Curat	19	13	14	8	19
Composició	Formigó	Formigó	Argila	Argila	Morter
	100%	100%	50%	50%	90%
	-	-	Sorra	Sorra	Fibra de vidre
	-	-	30%	30%	10%
	-	-	Palla	Palla	-
	-	-	10%	10%	-
Nomenclatura	F-1	F-2	T-1 v 1	T-2 v 1	MF-1

Taula 1. Resum de les característiques físiques de les provetes

	Morter i fibra	Formigó i fibra	Formigó i fibra	Tova variant 2	Tova variant 2
Pes (g)	2804	2901	2963	2515	2294
Altura (mm)	196	200	198	205	200
Amplada (mm)	100	100	100	100	100
Curat	13	19	13	14	8
Composició	Morter	Formigó	Formigó	Argila	Argila
	90%	90%	90%	60%	60%
	Fibra de vidre	Fibra de vidre	Fibra de vidre	Sorra	Sorra
	10%	10%	10%	25%	25%
				Palla	Palla
				15%	15%
Nomenclatura	MF-2	FH-1	FH-2	T-1 v 2	T-2 v 2

Taula 2. Continuació del resum de les característiques físiques de les provetes

3.3. Laboratori assaig de compressió

L'assaig a compressió simple de provetes de formigó o altres materials és un assaig destructiu que ens proporciona el valor de la resistència a compressió del formigó o altres materials amb una gran fiabilitat ja que és una mesura directa sobre el formigó que s'està investigant.

Aquest assaig va ser realitzat al laboratori de resistència de materials de la UPC de Terrassa (ESEIAAT) amb l'ajuda del cotutor d'aquest treball (Rafael Weyler). L'assaig de compressió simple va ser realitzat l'11 de Desembre de l'any 2020 a les 16:00 hores.

Al laboratori de resistència es disposava d'un sistema d'assajos universal de compressió (MTS serie 40).

Com es pot observar en la següent fotografia, es posaven dues peces de fusta per distribuir millor la compressió en tota la proveta. Un cop situada la proveta centrada a la taula cilíndrica fixa de la màquina d'assajos de compressions simples. S'ajusta la taula mòbil fins tocar la proveta que es vol mesurar. Finalment es procedeix a realitzar l'assaig de compressió simple.

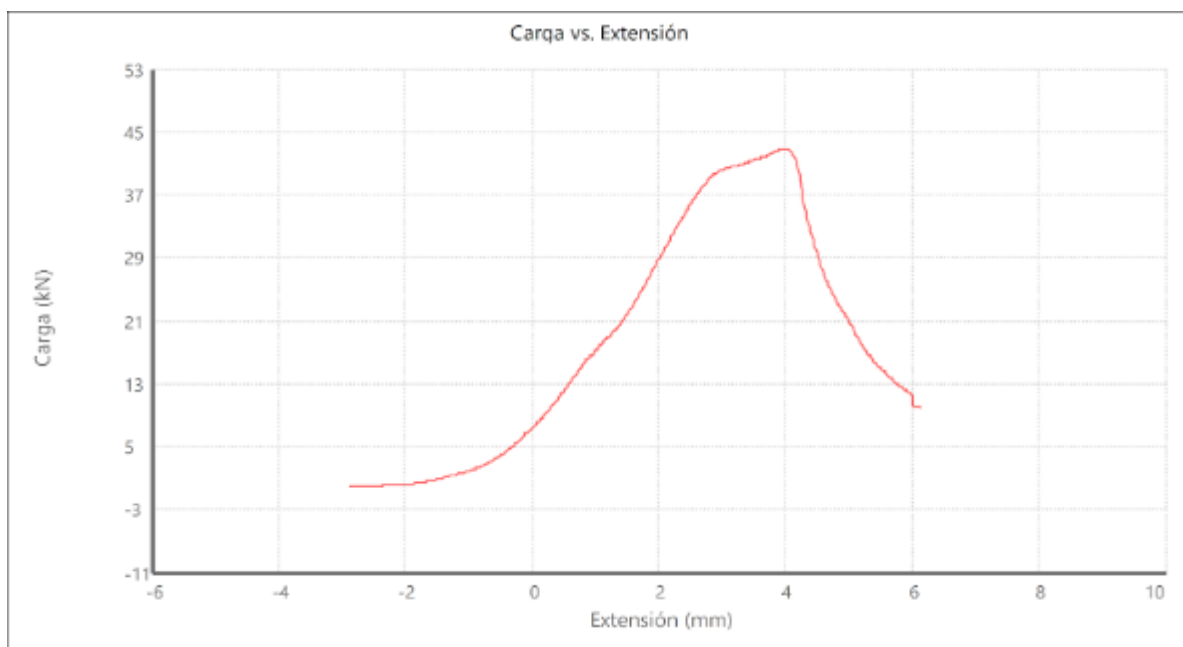


Figura 27. Fotografia de la proveta sotmesa al assaig de compressió simple

Un cop finalitzat l'assaig es van obtenir els valors necessaris per realitzar un anàlisi més precís dels materials. Gràcies a aquesta prova de laboratori es pot garantir que els resultats seran resultats pràctics i més fiables que si haguessin sigut resultats obtinguts teòricament. En els següents apartats s'analitzarà cada un dels resultats obtinguts per tal de poder verificar si els materials esmentats anteriorment son els més ideals per l'aplicació plantejada en el projecte.

3.3.1. Resultats laboratori F-1

Com es pot observar a la següent gràfica de la proveta F-1, és la proveta que ha assolit una càrrega més alta abans de col·lapsar. Això és degut a que aquesta proveta ha estat curada durant un període de 19 dies i no té cap fibra de reforç. Aquesta absència de la fibra de reforç fa que un cop assolida la càrrega pic la resistència a la compressió es redueix dràsticament. Per tant, en el moment que assoleix la càrrega crítica el material es trenca molt ràpid.



Gràfica 1. Carga suportada de la proveta F-1 en funció de l'extensió

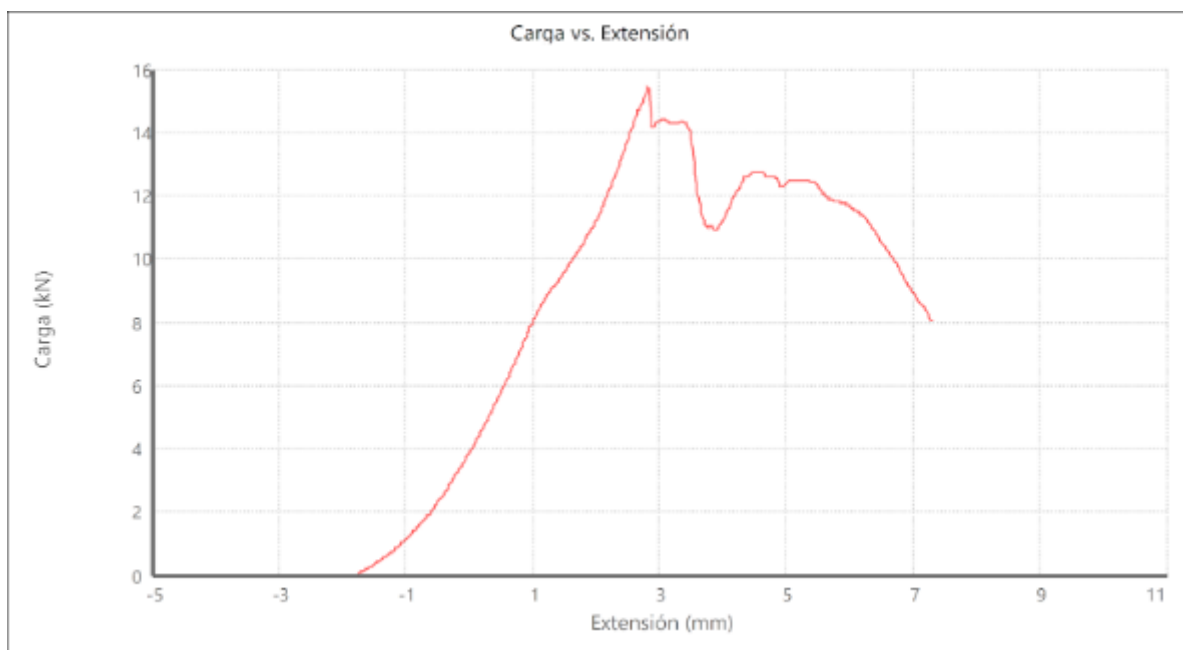
A la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Carga en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
F-1	42,811	4,3	8,4

Taula 3. Valors característics de la proveta F-1

3.3.2. Resultats laboratori F-2

A la següent gràfica de la proveta F-2 es pot observar que encara sent el mateix material que en el cas de la proveta F-1, la càrrega màxima que ha suportat la proveta és inferior. Això és degut a que el temps de curat de la proveta ha sigut inferior per tant el nucli de la proveta no havia solidificat tant com en la proveta anterior. El procés de curat de la proveta F-2 va ser de 13 dies, per tant és inferior a la proveta F-1. Però el comportament de la proveta va ser molt similar a la F1 degut a l'absència de les fibres de reforç. La diferència és que en aquest cas la caiguda de la resistència a la compressió no va ser tan agressiva degut a que el nucli de la proveta no estava tant solidificat. En el moment d'extensió 3,5 es van poder reestructurar i poder aguantar un esforç extra de 3 kN abans de col·lapsar de forma definitiva.



Gràfica 2. Carga compressió de la proveta F-2 en funció de l'extensió

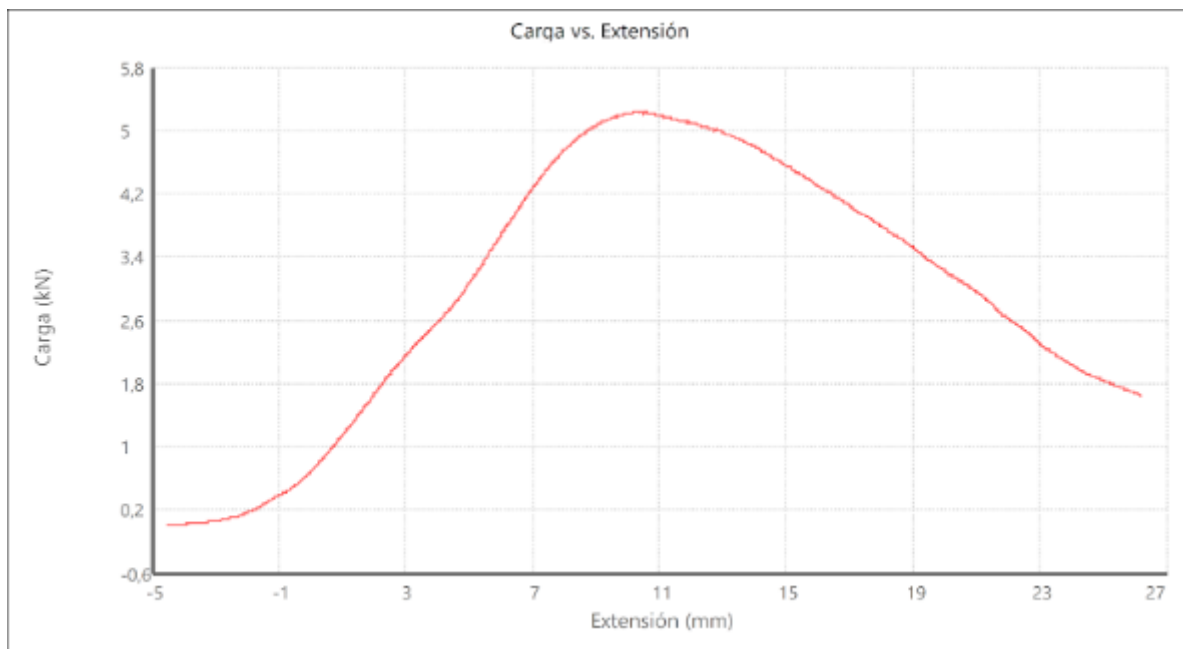
En la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Càrrega en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
F-2	15,400	1,54	8,2

Taula 4. Valors característics de la proveta F-2

3.3.3. Resultats laboratori T-1 v 1

A diferència de les provetes F-1 i F-2, la proveta T-1 v 1 aquesta proveta sí que consta d'un material de reforç en el qual es pot observar en la gràfica que l'extensió és superior a les dues gràfiques anteriors. Això és degut a la presència de la fibra de reforç, per tant un cop quan la proveta arriba a la seva càrrega màxima la caiguda de la resistència a la compressió és inferior. Per tant, és més segur perquè no col·lapsarà de forma instantània sinó que ho farà d'una forma més gradual.



Gràfica 3. Carga compressió de la proveta T-1 v 1 en funció de l'extensió

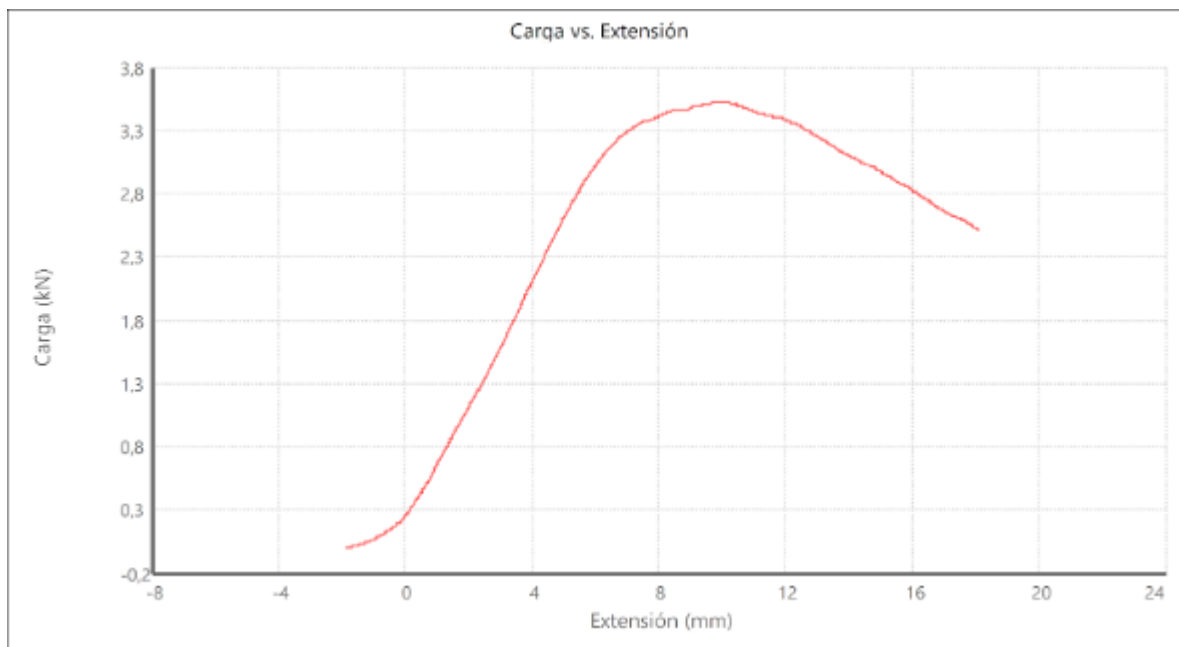
En la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Carga en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
T-1 v 1	5,231	0,52	31

Taula 5. Valors característics de la proveta T-1 v 1

3.3.4. Resultats laboratori T-2 v 1

En la següent gràfica de la proveta T-2 v 1 es pot observar que encara sent el mateix material que en el cas de la proveta T-1 v 1, la càrrega màxima que ha suportat la proveta és inferior. Això és degut a que el temps de curat de la proveta ha sigut inferior per tant el nucli de la proveta no havia solidificat tant com en la proveta anterior. El procés de curat de la proveta T-2 v 1 va ser de 8 dies, per tant es inferior a la proveta T-1 v 1 que va ser un procés de curat de 14 dies.



Gràfica 4. Carga compressió de la proveta T-2 v 1 en funció de l'extensió

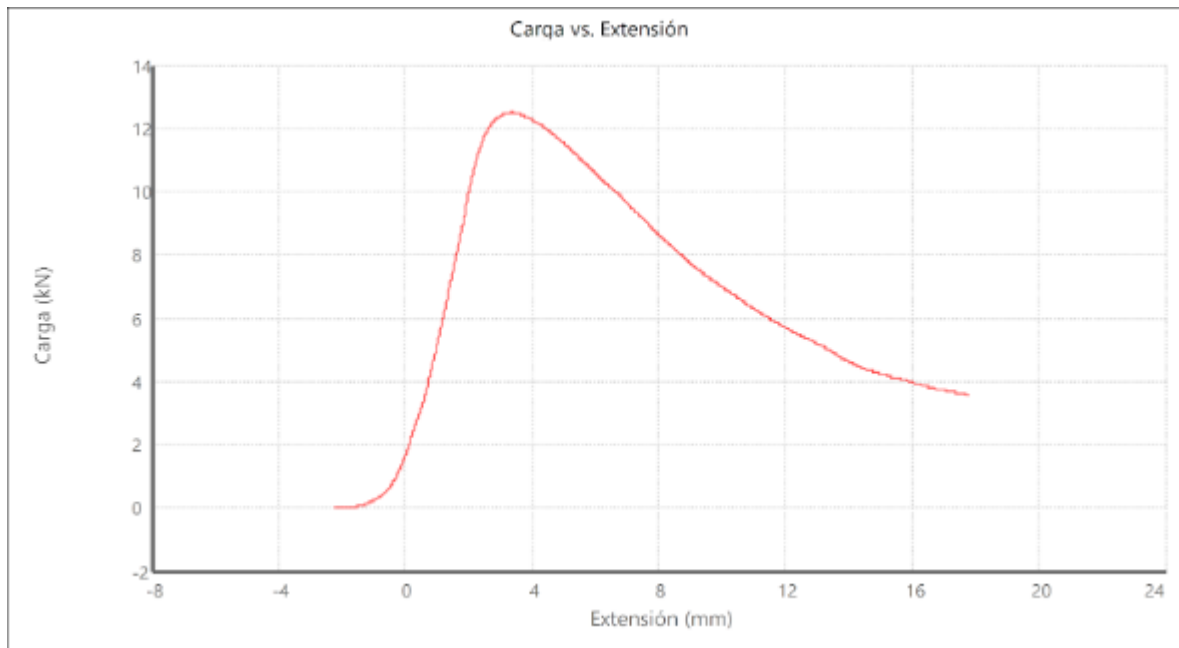
En la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Carga en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
T-2 v 1	3,527	0,4	19

Taula 6. Valors característics de la proveta T-2 v 1

3.3.5. Resultats laboratori MF-1

Com es pot observar a la següent gràfica de la proveta MF-1, la proveta ha assolit una càrrega pic de 12,5 kN. Això és degut a que aquesta proveta ha estat curada durant un període de 19 dies. Aquesta proveta consta d'una fibra de reforç, un cop assolida la carga pic la resistència a la compressió es redueixi progressivament. Per tant, té més extensió que en el cas de la proveta F-1 i F-2.



Gràfica 5. Carga compressió de la proveta MF-1 en funció de l'extensió

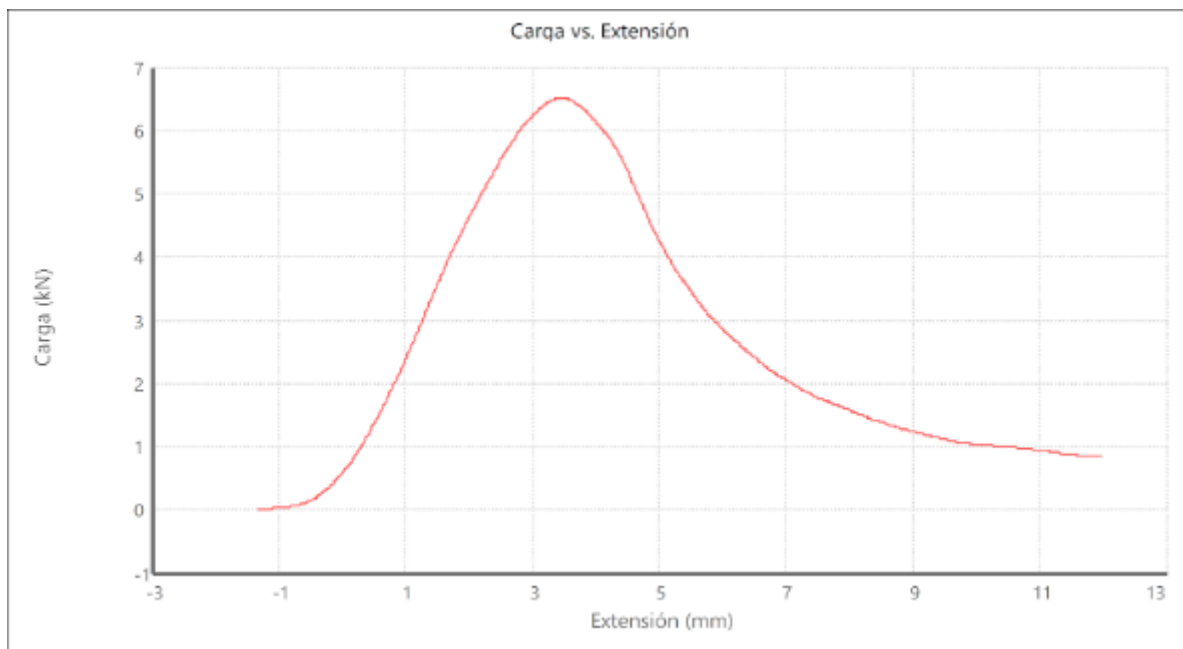
En la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Carga en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
MF-1	12,506	1,3	18

Taula 7. Valors característics de la proveta MF-1

3.3.6. Resultats laboratori MF-2

En la següent gràfica de la proveta MF-2 es pot observar que encara sent el mateix material que en el cas de la proveta MF-1, la carga màxima que ha suportat la proveta és inferior. Això és degut a que el temps de curat de la proveta ha sigut inferior per tant el nucli de la proveta no havia solidificat tant com en la proveta anterior. El procés de curat de la proveta HF-2 va ser de 13 dies, per tant es inferior a la proveta HF-1. Aquesta proveta consta de una fibra de reforç, un cop assolida la carga pic la resistència a la compressió es redueixi progressivament.



Gràfica 6. Carga compressió de la proveta MF-2 en funció de l'extensió

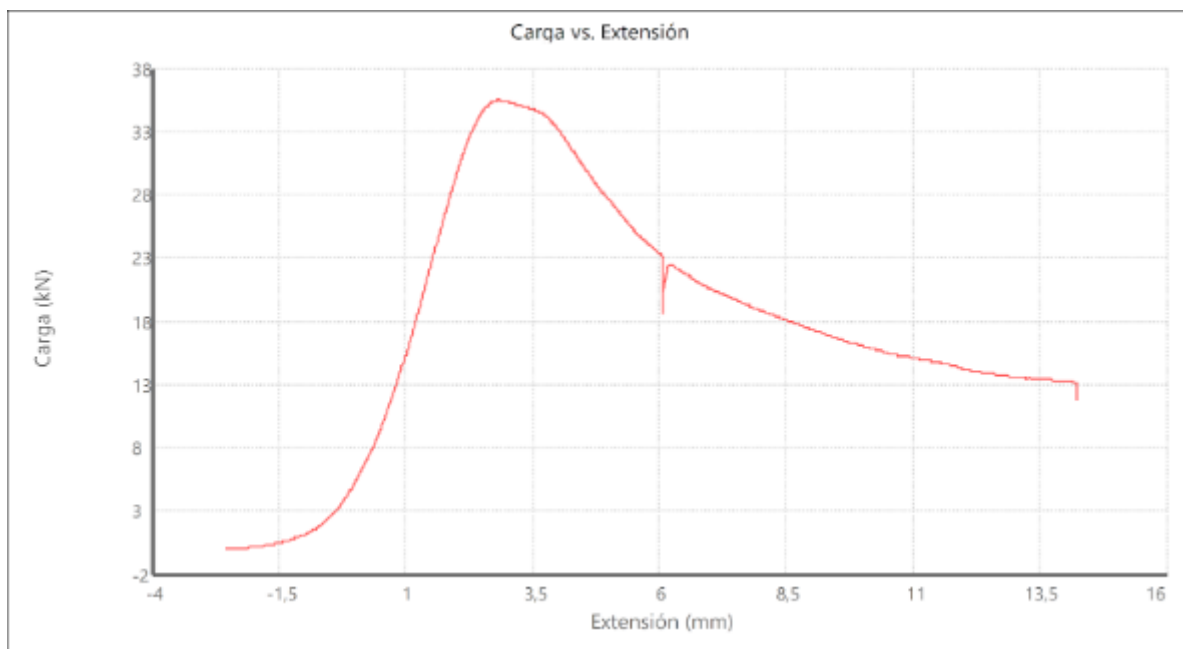
En la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Carga en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
MF-2	6,509	0,7	12

Taula 8. Valors característics de la proveta MF-2

3.3.7. Resultats laboratori HF-1

Com es pot observar a la següent gràfica de la proveta HF-1, la proveta ha assolit una càrrega pic de 35,5 kN aproximadament. Això és degut a que aquesta proveta ha estat curada durant un període de 19 dies. Aquesta proveta consta de una fibra de reforç, un cop assolida la càrrega pic la resistència a la compressió es redueixi progressivament. Per tant, té més extensió que en el cas de la proveta F-1 i F-2. En el moment de extensió 6 hi ha una baixada de la carga de compressió degut a que es va parar el assaig per realitzar una fotografia.



Gràfica 7. Carga compressió de la proveta HF-1 en funció de l'extensió

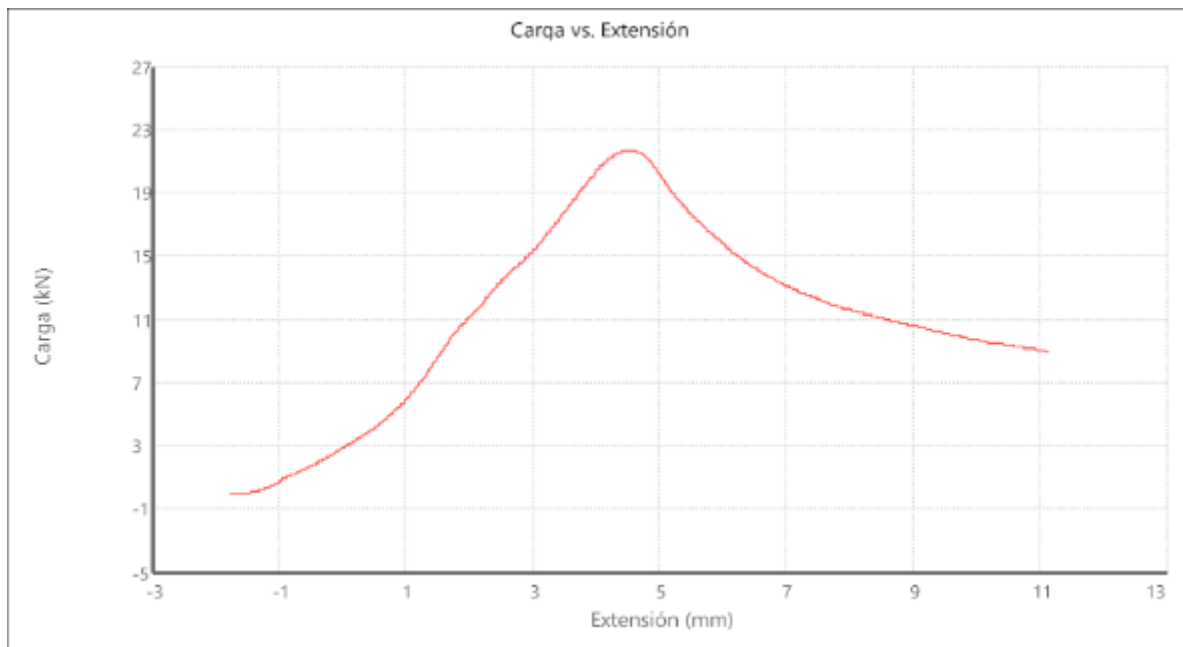
En la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Carga en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
HF-1	35,492	3,5	15

Taula 9. Valors característics de la proveta HF-1

3.3.8. Resultats laboratori HF-2

En la següent gràfica de la proveta MF-2 es pot observar que encara sent el mateix material que en el cas de la proveta MF-1, la carga màxima que ha suportat la proveta es inferior. Això és degut a que el temps de curat de la proveta ha sigut inferior per tant el nucli de la proveta no havia solidificat tant com en la proveta anterior. El procés de curat de la proveta HF-2 va ser de 13 dies, per tant es inferior a la proveta HF-1. Aquesta proveta consta de una fibra de reforç, un cop assolida la carga pic la resistència a la compressió es redueixi progressivament.



Gràfica 8. Carga compressió de la proveta HF-2 en funció de l'extensió

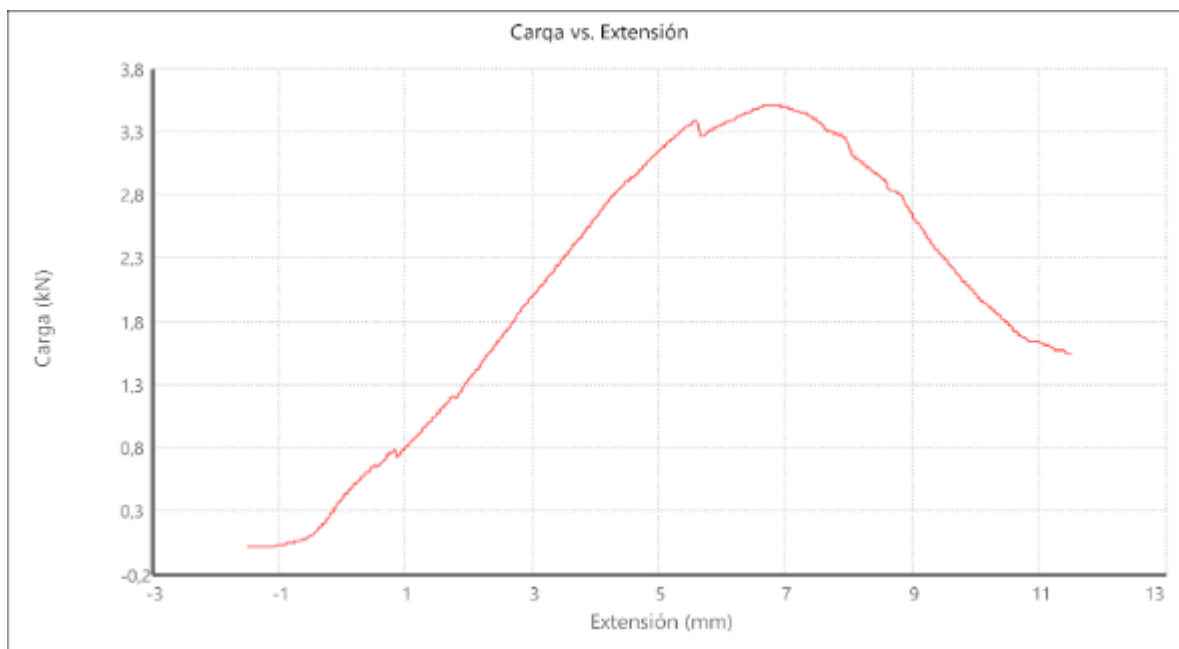
En la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Carga en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
HF-2	21,670	2,2	12,1

Taula 10. Valors característics de la proveta HF-2

3.3.9. Resultats laboratori T-1 v 2

Com es pot observar a la següent gràfica de la proveta T-1 v 2, al tenir una composició diferent a la T-1 v 1 els resultats han variat. La proveta T-1 v 2 no ha assolit una carga pic tant alt (3,5 kN) com en el cas de la T-1 v 1 (5,2 kN). Per tant es pot confirmar que la composició i les proporcions dels materials que formen la proveta T-1 v 2 no son tant encertades com en el cas de la proveta T-1 v 1. Degut a que les provetes T-1 v 1 i la T-1 v 2 van tenir el mateix temps de curat d'14 dies.



Gràfica 9. Carga compressió de la proveta T-1 v 2 en funció de l'extensió

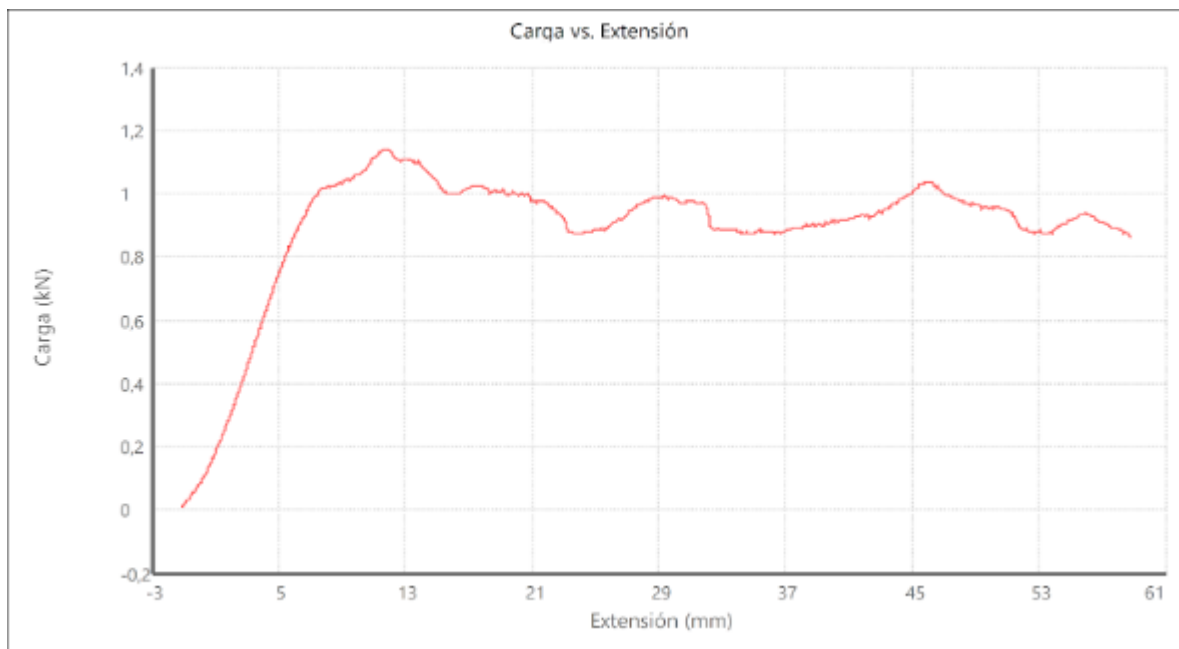
En la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Carga en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
T-1 v 2	3,512	0,4	12

Taula 11. Valors característics de la proveta T-1 v 2

3.3.10. Resultats laboratori T-2 v 2

Com es pot observar a la següent gràfica de la proveta T-2 v 2 els resultats no van ser bons. Això és degut que un cop feta la proveta, en la qual es van seguir tots els passos esmentats anteriorment, la proveta va presentar una sèrie de fissures. Aquestes fissures van ser descobertes un cop es va treure el encofrat per tant no es va poder solucionar. Les fissures han provocat que la carga pic de la proveta sigui de només 1,1 kN. La proveta T-2 v 2 constava de fibres de reforç però les fissures van debilitar la proveta.



Gràfica 10. Carga compressió de la proveta T-2 v 2 en funció de l'extensió

En la següent taula es poden apreciar els valors més característics de la gràfica.

Nomenclatura	Carga en el pic (kN)	Tensió en el pic (Mpa)	Extensió (mm)
T-2 v 2	1,139	0,1	58

Taula 12. Valors característics de la proveta T-2 v 2

3.3.11. Resum resultats laboratori

En les següents dues taules resum es poden observar els resultats obtinguts en les proves de laboratori.

	F-1	F-2	T-1 v 1	T-2 v 1	MF-1
Carga en el pic (kN)	42,811	15,400	5,231	3,527	12,506
Tensió en el pic (MPa)	4,3	1,5	0,5	0,4	1,3

Taula 13. Resum de les càrregues suportades per les provetes

	MF-2	FH-1	FH-2	T-1 v 2	T-2 v 2
Carga en el pic (kN)	6,509	35,492	21,670	3,512	1,139
Tensió en el pic (MPa)	0,7	3,5	2,2	0,4	0,1

Taula 14. Continuació del resum de les càrregues suportades per les provetes



3.3.12. Anàlisi dels resultats obtinguts

A través dels resultats obtinguts i observant les reaccions de les provetes sotmeses a compressió fins al seu màxim. Es pot fer un anàlisi previ dels materials que formen cada una de les provetes.

Durant l'assaig de compressió simple es van obtenir una sèrie de valors i també com es el comportament amb les càrregues. Degut a que un material que presenti una major adaptabilitat i pugui reordenar les seves capes per tal de continuar suportant l'esforç serà més ideal per l'aplicació plantejada en aquest projecte.

Com s'ha pogut observar en els resultats, presenten una tendència a l'alça de la seva resistència a forces externes respecte el temps de curat. És a dir, les provetes que han estat menys temps curades presenten un valors de pic menys elevats que les provetes del mateix material quan han sigut curades durant més temps.

En el cas de les provetes F-1 i F-2, van tenir un molt bon comportament a compressió simple degut a que per el temps de curat que tenien cada una d'elles van presentar els valors més alts, però van tenir una extensió mínima abans de col·lapsar. En el cas de la proveta F-1 es va deformar només 8 mil·límetres. El gran problema que tenen les provetes F-1 i F-2 és que es deformen molt poc i en el cas d'arribar a la càrrega màxima es trencarien de forma sobtada, creant problemes de seguretat per els habitants de l'estructura. Per tant, queda descartada com a material degut a que no suportaria esforços de tracció i genera un problema de seguretat per els futurs inquilins que visquin a l'habitatge proporcionat amb aquesta tecnologia.

En el cas de les provetes T-1 v 2 i T-2 v 2, queden descartades degut a que la variant de la composició dels materials no ha presentat uns resultats tant bons com en el cas de las provetes T-1 v 1 i T-2 v1. Gràcies a les proves realitzades s'ha pogut apreciar quina era la proporció ideal dels materials que formen la tova.

Les provetes no descartades continuaran sent estudiades en el següent apartat on es procedirà a realitzar els càlculs per saber si els materials poden ser utilitzats en la aplicació que se'ls hi demana. Les provetes que seran estudiades en el següent apartat de càlculs seran el morter més fibra de vidre, el formigó mes fibra de vidre i la tova amb la variant de les proporcions de materials 1.

Per el següent apartat de càlculs va ser necessari posar-se en contacte amb dos arquitectes per tenir un millor enteniment alhora de realitzar els càlculs pertinents.



Figura 28. Fotografia de totes les provetes un cop realitzat l'assaig de laboratori

3.4. Càlculs

En aquest apartat es busca trobar de forma numèrica si els materials poden suportar de forma numèrica l'esforç exigint per la estructura. En aquest cas es parteix d'un estat ideal en el qual la estructura hagi de suportar tot el pes a compressió axial simple. Aquest cas ideal pot arribar a diferir de la realitat però com els materials han estat sotmesos a un assaig de laboratori el resultat serà bastant proper al real.

L'ajuda dels arquitectes va ser de gran utilitat degut a que van proporcionar valors tabulats de les cobertes. Aquests valors de les cobertes tabulats es poden dividir en 3 seccions: cobertes lleugeres, cobertes mitjanament pesades i cobertes pesades. Aquests valors són elevats degut a que es contemplin les càrregues de neu i en el cas de realitzar un manteniment de la coberta el personal haurà de poder caminar per sobre de la coberta. La coberta lleugera serà suportada per la tova, la coberta mitjanament pesada serà per el morter amb fibra de vidre i la coberta pesada serà suportada per el formigó amb fibra de reforç. En el cas que es vulgui utilitzar una coberta pesada amb un material amb una resistència menor al formigó amb fibra (tova i morter amb fibra), no es podrà garantir la integritat de la estructura. Per tant, no serà una estructura segura. En el cas contrari, es poden utilitzar cobertes més lleugeres amb materials amb una bona resistència a la compressió.

	Coberta lleugera	Coberta mitjanament pesada	Coberta pesada
Càrrega de la coberta (Tn/m ²)	10	25	50

Taula 15. Taula dels valors de la càrrega de la coberta

Perquè els materials no siguin descartats hauran de suportar las cobertes amb un mínim factor de seguretat de 4. En el cas contrari el material que no presenti el coeficient de seguretat serà descartat. Aquest valor de coeficient de seguretat es elevat degut a que al ser càlculs orientatius per demostrar la viabilitat del material es deprecien algunes forces (vinclament).

3.4.1. Càlculs tova

Per els següents càlculs s'han utilitzat les dades de les provetes assajades en el laboratori, en aquest cas s'utilitzen els valors de la proveta T-1 v 1. A continuació estaran les dades de la proveta que es vol analitzar numèricament per comprovar la viabilitat orientativa del material. En aquest cas al ser una casa impresa en 3D la llargada de la casa pot variar en funció de les especificacions del client, per tant la llargada estarà en funció d'una variable "X" i les unitats de la variable seran metres.

Dades proveta

Força pes = 2,215 kgf

Carga màxima compressió = 5,231 kN

$$\frac{\text{Carga compressio}}{\text{Volum}} = \frac{5,231 \text{ (kN)}}{0,2 * \pi * 0,05^2 \text{ (m)}} = 3330,158 \text{ kN/m}^3$$

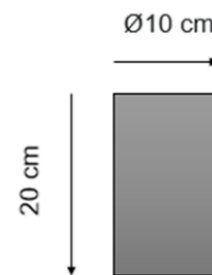


Figura 29.
Representació 2D
proveta

Dades mur 250 cm i 40 cm espessor

$$\text{Densitat Tova} = \frac{2,215}{0,2 * \pi * 0,05^2} = 1410,11 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\text{Força pes mur} = 1410,11 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * 2,5 \text{ (m)} * 0,4 \text{ (m)} * x = 1410,11 * x \text{ (kgf)}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga maxima suportada mur} &= 3330,158 \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) * 2,5 \text{ (m)} * 0,4 \text{ (m)} * x \\ &= 3330,158 * x \text{ (kN)} \end{aligned}$$

Dibuix del problema i plantejament

El plantejament dels càlculs es basen en el tipus de estructura que es realitzarà, al ser una estructura d'una sola planta on no hi han pilars i tot el pes es recolza sobre el mur imprès en 3D per la tecnologia estudiada en el treball, serà una estructura tipus birecolzada. Per tant, es tracta d'un problema isostàtic en comptes d'un problema hiperestàtic, degut a la absència dels ancoratges.

Com a conseqüència de l'absència dels ancoratges:

- La coberta pot girar lliurement en els extrems això comporta que no hi hagin moments.
- Es deprecien el esforços axials que puguin haver-hi (de fet, al ser una coberta recolzada no poden haurien d'haver forces axials degut a que si s'expandeix o es contrau longitudinalment ho pot fer degut a no hi ha ningun ancoratge que ho impedeixi per tant no es generen reaccions.

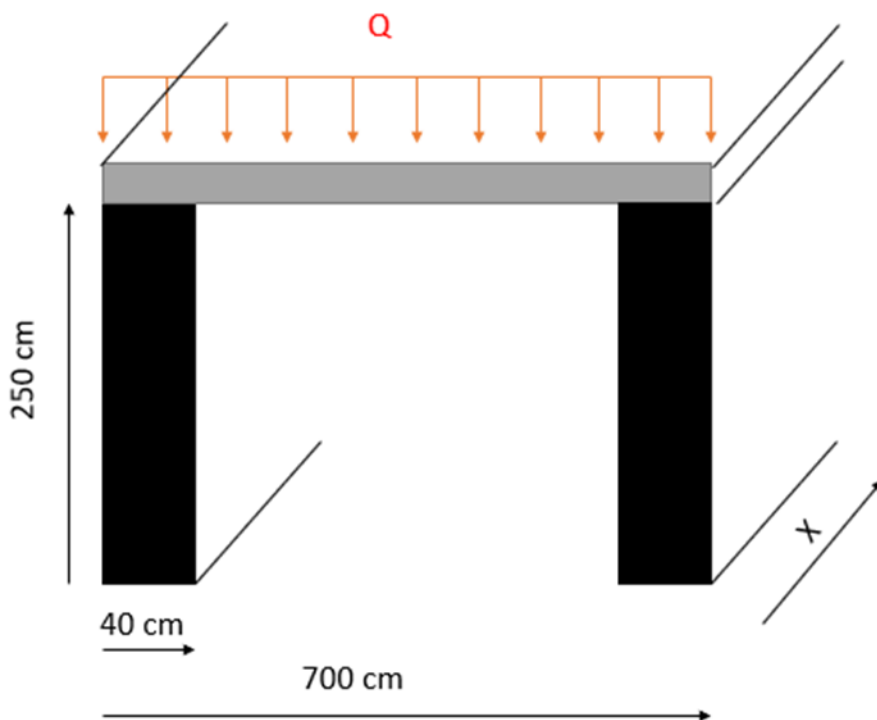


Figura 30. Dibuix 3D esquemàtic del problema

Un cop plantejat el problema procedirem a calcular les reaccions degudes a la carrega de la coberta Q que en aquest cas té un valor de 10 tones de força per metre quadrat. En aquest cas ho deixarem en funció de la llargada (x) i obtindrem el valor de “ q ” que serà una carrega repartida lineal.

$$q = 10 * x \left(\frac{Tn}{m} \right) = 98066,5 * x \left(\frac{N}{m} \right)$$

A continuació es plantejarà les reaccions en la part superior del mur i un cop plantejada es precedirà a realitzar els càlculs pertinents.

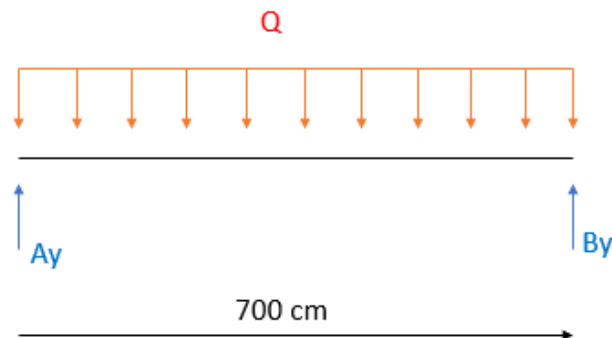


Figura 31. Reaccions a la part superior on contacta la coberta amb el mur

Aquestes son les reaccions en la part superior dels murs, al ser una estructura simètrica el valor de A_y serà igual al valor de B_y . Degut a la absència de moments i de axials només es calcularan les reaccions en el eix Y. A continuació es realitzaran el càlculs de les reaccions:

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - q * 0,5 * x * 7 (m) + B_y = 0$$

$$A_y = B_y = q * 0,5 * x * 7 (N)$$

El càlcul anterior es reacció en el punt superior del mur on la càrrega repartida es multiplicada per la distància entre els murs i per el braç de palanca. Però, aquesta no es la secció més sol·licitada de la estructura. La força pes (P) seria una càrrega repartida verticalment que valdria 0 a dalt i P a baix, per tant la secció de baix la més sol·licitada, degut a que ha de suportar la pròpia força pes del mur.

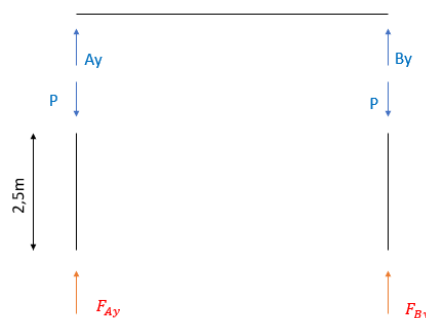


Figura 32. Reaccions a la part més sol·licitada de l'estructura

A continuació realitzarem el càlculs de les reaccions a la secció més sol·licitada de la estructura. Com s'ha explicat anteriorment al ser una estructura simètrica el valor de F_{Ay} serà igual al valor de F_{By} . Al ser dos murs hi hauran dos força pes que es tindran en consideració en l'equació.

$$F_{Ay} = F_{By} = B_y + 2 * 1410,11 * 9,81 * x \text{ (N)}$$

Un cop obtinguda el valor de la reacció en la secció més sol·licitada de l'estructura es procedirà a verificar si pot resistir les forces que se li apliquen. Per tant, calcularem el coeficient de seguretat (SF) el qual verificarà si la viabilitat. Si el valor es inferior a 1 significa que l'estructura no pot resistir els esforços exigits, amb la conseqüència que el material T-1 v 1 serà descartat. Degut a ser un càlcul orientatiu ha de donar un valor mínim de 4 per poder ser vàlid com s'ha explicat anteriorment.

$$SF = \frac{\text{Carrega maxima compressio}}{\text{Carrega aplicada a la secció mes sol \cdot licitada}}$$
$$SF = \frac{3330,158 * x * 10^3 \text{ (N)}}{2 * x * 1410,11 * 9,81 + 98066,5 * x * 7 * 0,5 \text{ (N)}}$$

Al estar tot en funció de la variable “x” es pot eliminar la variable per realitzar el càlcul final.

$$SF = 8,98$$

El valor obtingut es un valor adimensional (no te unitats), el mur suportarà el pes propi i el de la coberta amb un coeficient de seguretat de 8,98. Això vol dir, que el mur pot resistir el esforç al qual esta sotmès 8,98 vegades mes abans de col·lapsar.

3.4.2. Càlculs morter i fibra

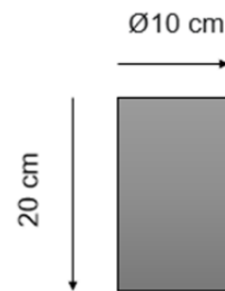
Per els següents càlculs s'han utilitzat les dades de les provetes assajades en el laboratori, en aquest cas s'utilitzen els valors de la proveta MF-1. A continuació estaran les dades de la proveta que es vol analitzar numèricament per comprovar la viabilitat orientativa del material. En aquest cas al ser una casa impresa en 3D la llargada de la casa pot variar en funció de les especificacions del client, per tant la llargada estarà en funció d'una variable "X" i les unitats de la variable seran metres.

Dades proveta

Força pes = 2,890 kgf

Carga màxima compressió = 12,506 kN

$$\frac{\text{Carga compressio}}{\text{Volum}} = \frac{12,506 \text{ (kN)}}{0,2 * \pi * 0,05^2 \text{ (m)}} = 7961,57 \text{ kN/m}^3$$



Dades mur 250 cm i 40 cm espessor

$$\text{Densitat Tova} = \frac{2,890}{0,2 * \pi * 0,05^2} = 1839,83 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Força pes mur} &= 1839,83 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * 2,5 \text{ (m)} * 0,4 \text{ (m)} * x \\ &= 1839,83 * x \text{ (kgf)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga maxima suportada mur} &= 7961,57 \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) * 2,5 \text{ (m)} * 0,4 \text{ (m)} * x \\ &= 7961,57 * x \text{ (kN)} \end{aligned}$$

Dibuix del problema i plantejament

El plantejament dels càlculs es basen en el tipus de estructura que es realitzarà, al ser una estructura d'una sola planta on no hi han pilars i tot el pes es recolza sobre el mur imprès en 3D per la tecnologia estudiada en el treball, serà una estructura tipus birecolzada. Per tant, es tracta d'un problema isostàtic en comptes d'un problema hiperestàtic, degut a la absència dels ancoratges.

Figura 33.
Representació
2D proveta amb
les dimensions

Com a conseqüència de l'absència dels ancoratges:

- La coberta pot girar lliurement en els extrems això comporta que no hi hagin moments.
- Es deprecien el esforços axials que puguin haver-hi (de fet, al ser una coberta recolzada no poden haurien d'haver forces axials degut a que si s'expandeix o es contrau longitudinalment ho pot fer degut a no hi ha ningun ancoratge que ho impedeixi per tant no es generen reaccions.

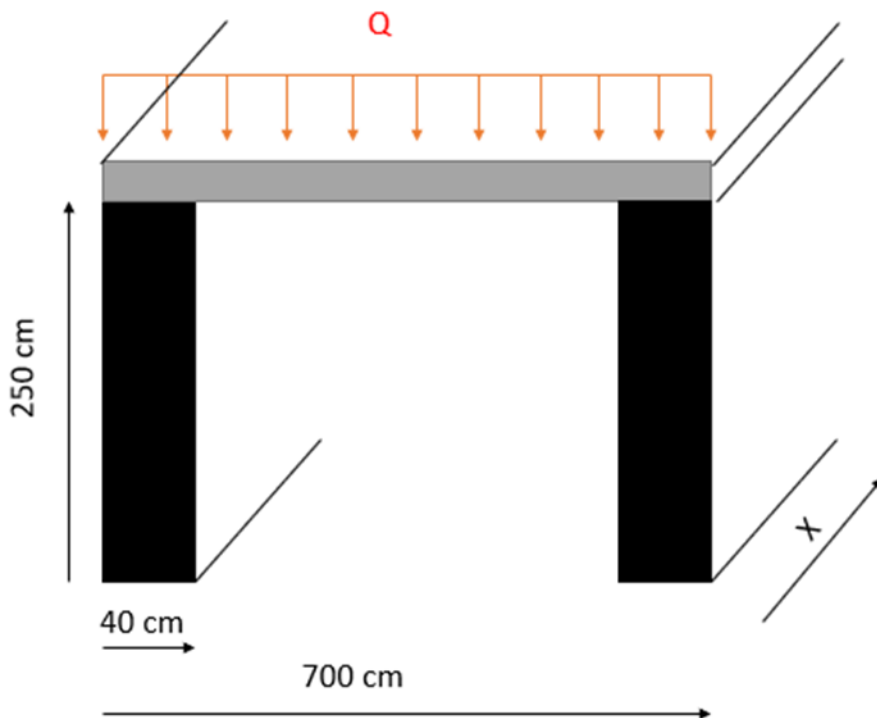


Figura 34. Dibuix 3D esquemàtic del problema amb les dimensions i carrega de la coberta

Un cop plantejat el problema procedirem a calcular les reaccions degudes a la carrega de la coberta Q que en aquest cas té un valor de 25 tones de força per metre quadrat. En aquest cas ho deixarem en funció de la llargada (x) i obtindrem el valor de “ q ” que serà una carrega repartida lineal.

$$q = 25 * x \left(\frac{Tn}{m} \right) = 245166,25 * x \left(\frac{N}{m} \right)$$

A continuació es plantejarà les reaccions en la part superior del mur i un cop plantejada es precedirà a realitzar els càlculs pertinents.

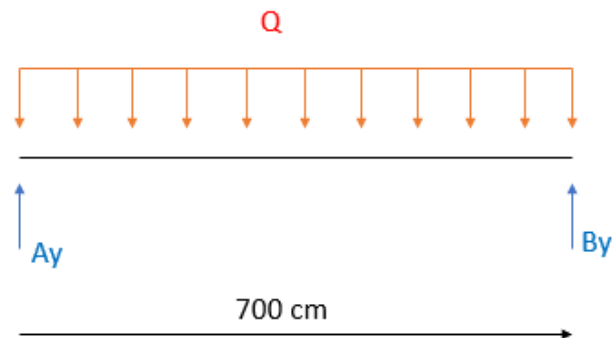


Figura 35. Reaccions a la part superior on contacta la coberta amb el mur

Aquestes son les reaccions en la part superior dels murs, al ser una estructura simètrica el valor de A_y serà igual al valor de B_y . Degut a la absència de moments i de axials només es calcularan les reaccions en el eix Y. A continuació es realitzaran el càlculs de les reaccions:

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - q * 0,5 * x * 7 (m) + B_y = 0$$

$$A_y = B_y = 245166,25 * 0,5 * x * 7 (N)$$

El càlcul anterior es reacció en el punt superior del mur on la càrrega repartida es multiplicada per la distància entre els murs i per el braç de palanca. Però, aquesta no es la secció més sol·licitada de la estructura. La força pes (P) seria una càrrega repartida verticalment que valdria 0 a dalt i P a baix, per tant la secció de baix la més sol·licitada, degut a que ha de suportar la pròpia força pes del mur.

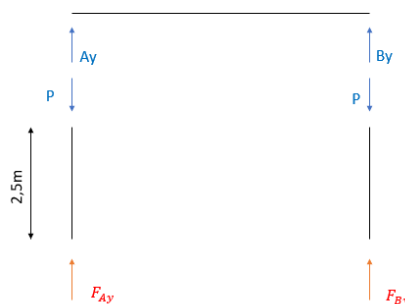


Figura 36. Reaccions a la part més sol·licitada de l'estructura

A continuació realitzarem el càlculs de les reaccions a la secció més sol·licitada de la estructura. Com s'ha explicat anteriorment al ser una estructura simètrica el valor de F_{Ay} serà igual al valor de F_{By} . Al ser dos murs hi hauran dos força pes que es tindran en consideració en l'equació.

$$F_{Ay} = F_{By} = B_y + 2 * 1893,83 * 9,81 * x \text{ (N)}$$

Un cop obtinguda el valor de la reacció en la secció més sol·licitada de l'estructura es procedirà a verificar si pot resistir les forces que se li apliquen. Per tant, calcularem el factor de seguretat (SF) el qual verificarà si la viabilitat.

$$SF = \frac{\text{Carrega maxima compressio}}{\text{Carrega aplicada a la secció mes sol \cdot licitada}}$$

$$SF = \frac{7961,57 * x * 10^3 \text{ (N)}}{2 * x * 1893,83 * 9,81 + 245166,25 * x * 7 * 0,5 \text{ (N)}}$$

Al estar tot en funció de la variable "x" es pot eliminar la variable per realitzar el càlcul final.

$$SF = 8,89$$

Un cop realitzat els càlculs es pot concloure que per el material morter mes fibra de vidre, el mur suportarà el pes propi i el de la coberta amb un coeficient de seguretat de 8,89. Per tan, al ser superior a 4 es pot validar degut als bons resultats obtinguts.

3.4.2. Càlculs formigó i fibra

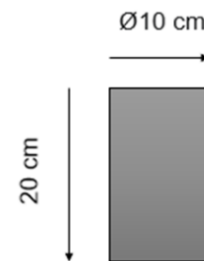
Per els següents càlculs s'han utilitzat les dades de les provetes assajades en el laboratori, en aquest cas s'utilitzen els valors de la proveta HF-1. A continuació estaran les dades de la proveta que es vol analitzar numèricament per comprovar la viabilitat orientativa del material. En aquest cas al ser una casa impresa en 3D la llargada de la casa pot variar en funció de les especificacions del client, per tant la llargada estarà en funció d'una variable "x" i les unitats de la variable seran metres. En aquest cas degut als bons resultats obtinguts al laboratori s'optarà per utilitzar un mur de 20 cm d'espessor i verificar si es viable utilitzar un mur menys ample que en el casos anteriors.

Dades proveta

Força pes = 2,901 kgf

Carga màxima compressió = 35,492 kN

$$\frac{\text{Carga compressio}}{\text{Volum}} = \frac{35,492 \text{ (kN)}}{0,2 * \pi * 0,05^2 \text{ (m)}} = 22594,90 \text{ kN/m}^3$$



Dades mur 250 cm i 20 cm espessor

$$\text{Densitat Tova} = \frac{2,901}{0,2 * \pi * 0,05^2} = 1846,83 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Força pes mur} &= 1846,83 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * 2,5 \text{ (m)} * 0,2 \text{ (m)} * x \\ &= 923,415 * x \text{ (kgf)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga maxima soportada mur} &= 22594,90 \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) * 2,5 \text{ (m)} * 0,2 \text{ (m)} * x \\ &= 11297,45 * x \text{ (kN)} \end{aligned}$$

Figura 37.
Representació 2D
proveta

Dibuix del problema i plantejament

El plantejament dels càlculs es molt semblant a les dues anteriors on només varia el espessor del mur que es de 20 cm, continuarà sent estructura d'una sola planta on no hi han pilars i tot el pes es recolza sobre el mur, serà una estructura tipus birecolzada. Per tant, es tracta d'un problema isostàtic en comptes d'un problema hiperestàtic, degut a la absència dels ancoratges.

Com a conseqüència de l'absència dels ancoratges:

- La coberta pot girar lliurement en els extrems això comporta que no hi hagin moments.
- Es deprecien el esforços axials que puguin haver-hi (de fet, al ser una coberta recolzada no poden haurien d'haver forces axials degut a que si s'expandeix o es contrau longitudinalment ho pot fer degut a no hi ha ningun ancoratge que ho impedeixi per tant no es generen reaccions.

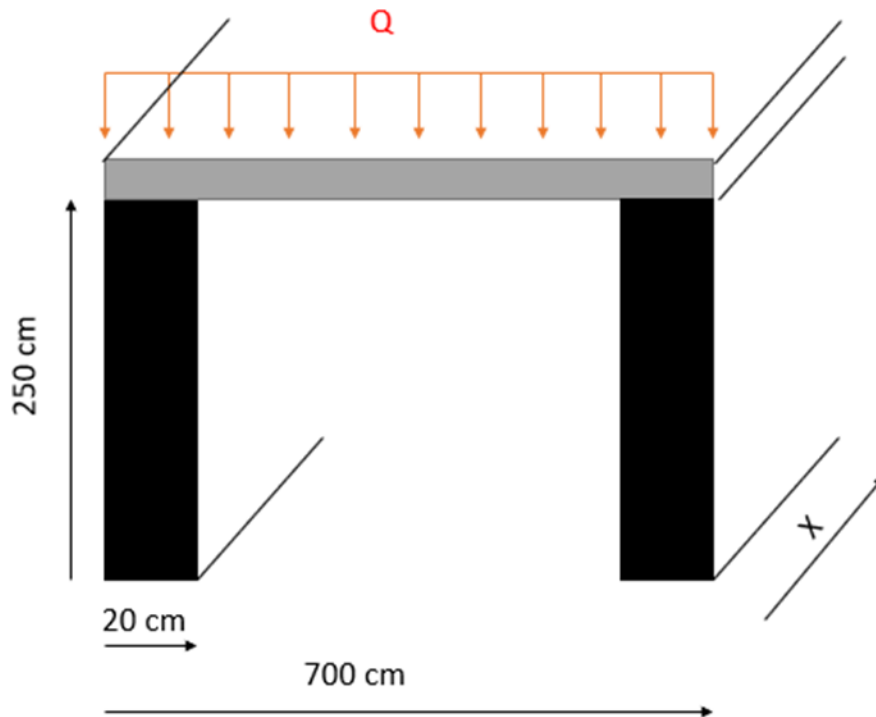


Figura 38. Dibuix 3D esquemàtic del problema amb les dimensions i carrega de la coberta

Un cop plantejat el problema procedirem a calcular les reaccions degudes a la carrega de la coberta Q que en aquest cas té un valor de 50 tones de força per metre quadrat. En aquest cas ho deixarem en funció de la llargada (x) i obtindrem el valor de “ q ” que serà una carrega repartida lineal.

$$q = 50 * x \left(\frac{Tn}{m} \right) = 490332,5 * x \left(\frac{N}{m} \right)$$

A continuació es plantejarà les reaccions en la part superior del mur i un cop plantejada es precedirà a realitzar els càlculs pertinents.

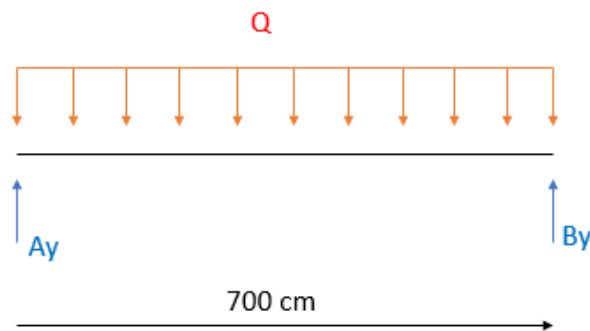


Figura 39. Reaccions a la part superior on contacta la coberta amb el mur

Aquestes son les reaccions en la part superior dels murs, al ser una estructura simètrica el valor de A_y serà igual al valor de B_y . Degut a la absència de moments i de axials només es calcularan les reaccions en el eix Y. A continuació es realitzaran el càlculs de les reaccions:

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - q * 0,5 * x * 7 (m) + B_y = 0$$

$$A_y = B_y = q * 0,5 * x * 7 (N)$$

El càlcul anterior es reacció en el punt superior del mur on la càrrega repartida es multiplicada per la distància entre els murs i per el braç de palanca. Però, aquesta no es la secció més sol·licitada de la estructura com s'ha pogut observar anteriorment. La força pes (P) seria una càrrega repartida verticalment que valdria 0 a dalt i P a baix, per tant la secció de baix la més sol·licitada, degut a que ha de suportar la pròpia força pes del mur.

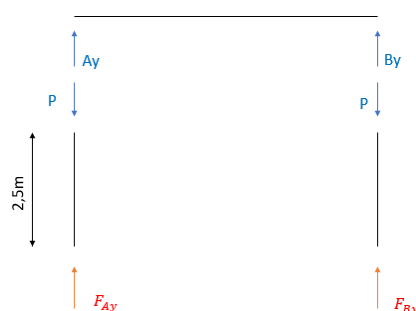


Figura 40. Reaccions a la part més sol·licitada de l'estructura

A continuació realitzarem el càlculs de les reaccions a la secció més sol·licitada de la estructura. Com s'ha explicat anteriorment al ser una estructura simètrica el valor de F_{Ay} serà igual al valor de F_{By} . Al ser dos murs hi hauran dos força pes que es tindran en consideració en l'equació.

$$F_{Ay} = F_{By} = B_y + 2 * 923,415 * 9,81 * x \text{ (N)}$$

Un cop obtinguda el valor de la reacció en la secció més sol·licitada de l'estructura es procedirà a verificar si pot resistir les forces que se li apliquen. Per tant, calcularem el factor de seguretat (SF) el qual verificarà si la viabilitat.

$$SF = \frac{\text{Carrega maxima compressio}}{\text{Carrega aplicada a la secció mes sol \cdot licitada}}$$
$$SF = \frac{11297,45 * x * 10^3 \text{ (N)}}{2 * x * 923,415 * 9,81 + 490332,5 * x * 7 * 0,5 \text{ (N)}}$$

Al estar tot en funció de la variable “x” es pot eliminar la variable per realitzar el càlcul final.

$$SF = 6,51$$

Un cop realitzat els càlculs es pot concloure que per el material formigó i fibra de vidre, el mur suportarà el pes propi i el de la coberta amb un coeficient de seguretat de 6,51. Per tan, al ser superior a 4 es pot validar degut als bons resultats obtinguts.

3.5. Disseny conceptual

L'objectiu d'aquest apartat es realitzar un esquema visual de com ha de ser la impressora 3D en l'àmbit estudiat en aquest treball. Per la realització d'aquest apartat es van tenir en consideració les dimensions d'un habitatge d'una sola planta, en aquest cas les parets de l'edifici haurien de tenir una altura de 2,5 metres i una llum de 7 metres (amplada màxima de l'habitatge). Tenint en compte aquestes mesures es va procedir a fer un dibuix 3D amb el software *Solidworks*, aquest disseny és un disseny de tipus pòrtic el qual va ser escollit degut que té una limitació mínima a l'hora d'extruir la llargada de l'edifici. Aquesta restricció mínima es deguda a que es pot desplaçar horitzontalment sobre el terreny degut al seu sistema motoritzat. Per tant, el sistema d'impressió 3D d'habitatges del tipus pòrtic presenta un avantatge significatiu gràcies al desplaçament horitzontal. A les següents figures es poden veure les diferents parts que conformen la impressora.

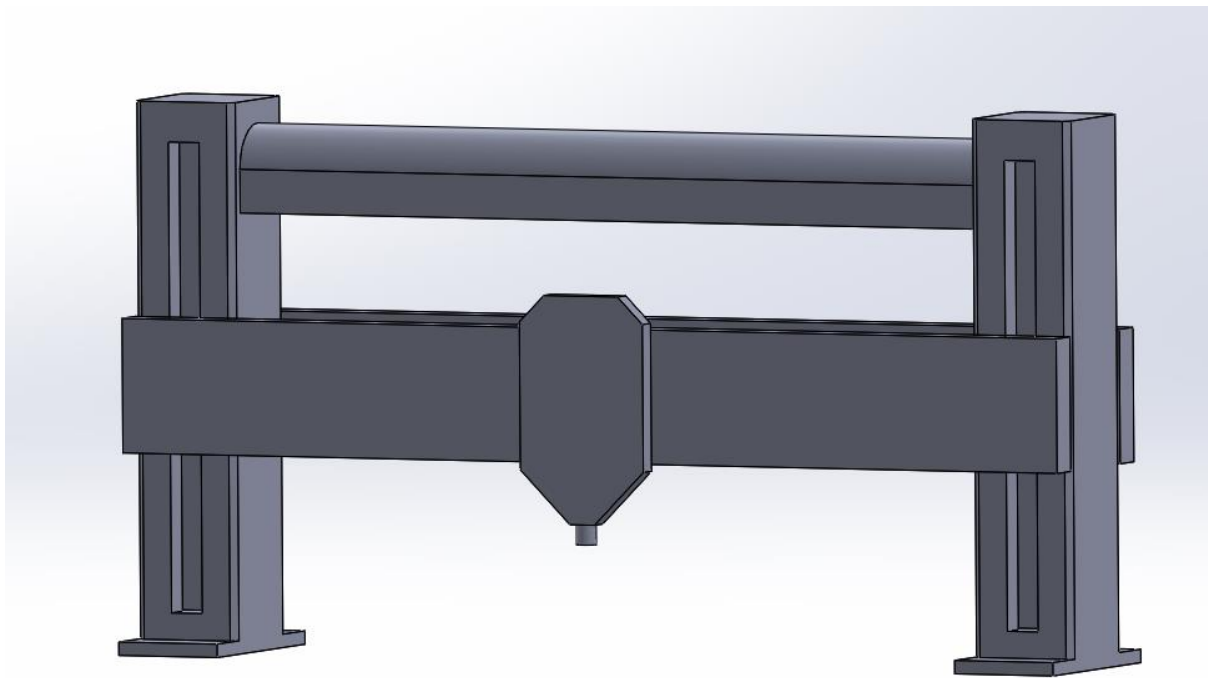


Figura 41. Primer disseny realitzat del mecanisme plantejat amb el software Solidworks

Com s'ha pogut observar a la següent figura, es pot observar la impressora 3D de tipus pòrtic i les parts que la caracteritzen com l'extrusor i el braç. El braç de la impressora es un sistema en el qual l'extrusor s'ha de desplaçar per sobre. Aquest, va ser un disseny preliminar on el disseny va evolucionar com es pot observar a continuació.

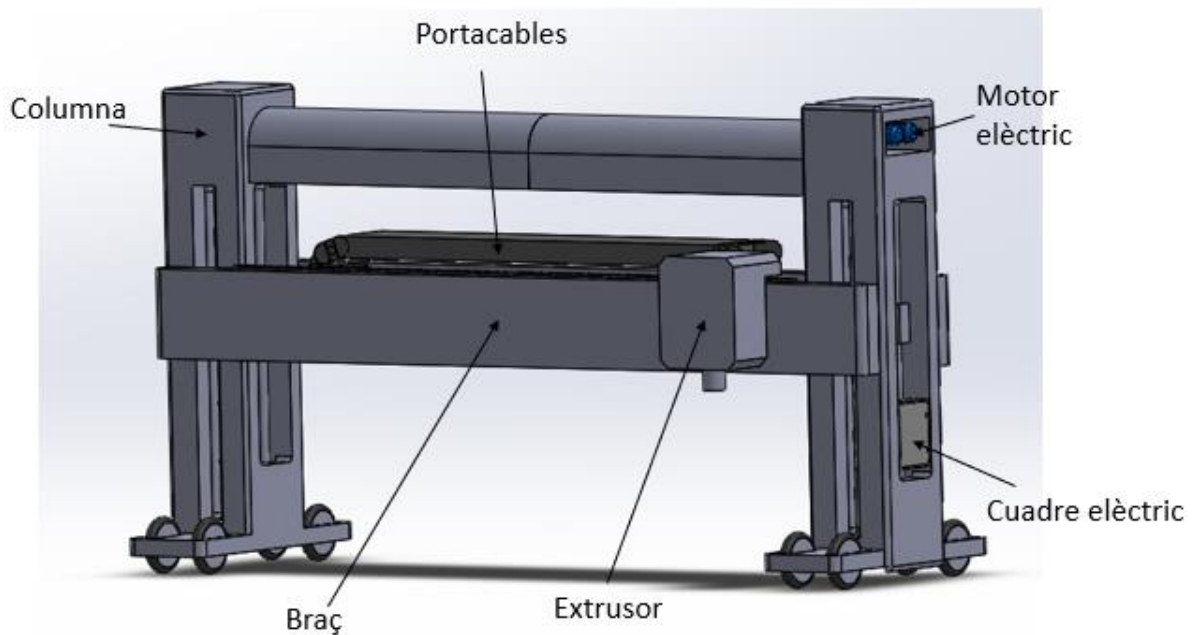


Figura 42. Disseny en fase avançada on es poden apreciar les diferents parts que el formen

En aquesta fase del disseny es pot observar com ha evolucionat el primer disseny respecte l'original. En aquest disseny ja es poden apreciar detalls com el sistema que garanteix el moviment vertical del braç. Aquest sistema consta de 4 columnes guia a cada costat i al mig un "husillo" el qual realitza el desplaçament vertical. També es poden apreciar el sistema de desplaçament horitzontal en el qual en el disseny original no estava present. Finalment, com es pot observar van sorgir molts canvis; però el més significatiu degut a la importància d'aquest sistema seria en el d'extrusió del material. El qual disposa d'un sistema porta cables lineal el qual subministra al extrusor la potència necessària pel funcionament i el material que s'ha d'imprimir. Aquest material es bombejat des de un sistema exterior a la impressora el qual arriba a través d'una sèrie de tubs passant per el porta cables fins al extrusor. També es pot observar que en el lateral esta situat el quadre de potència elèctrica, on es troben la part elèctrica i electrònica que garanteix el funcionament del sistema d'impressió. A continuació es poden observar amb més detall el sistema de desplaçament vertical esmentat anteriorment.

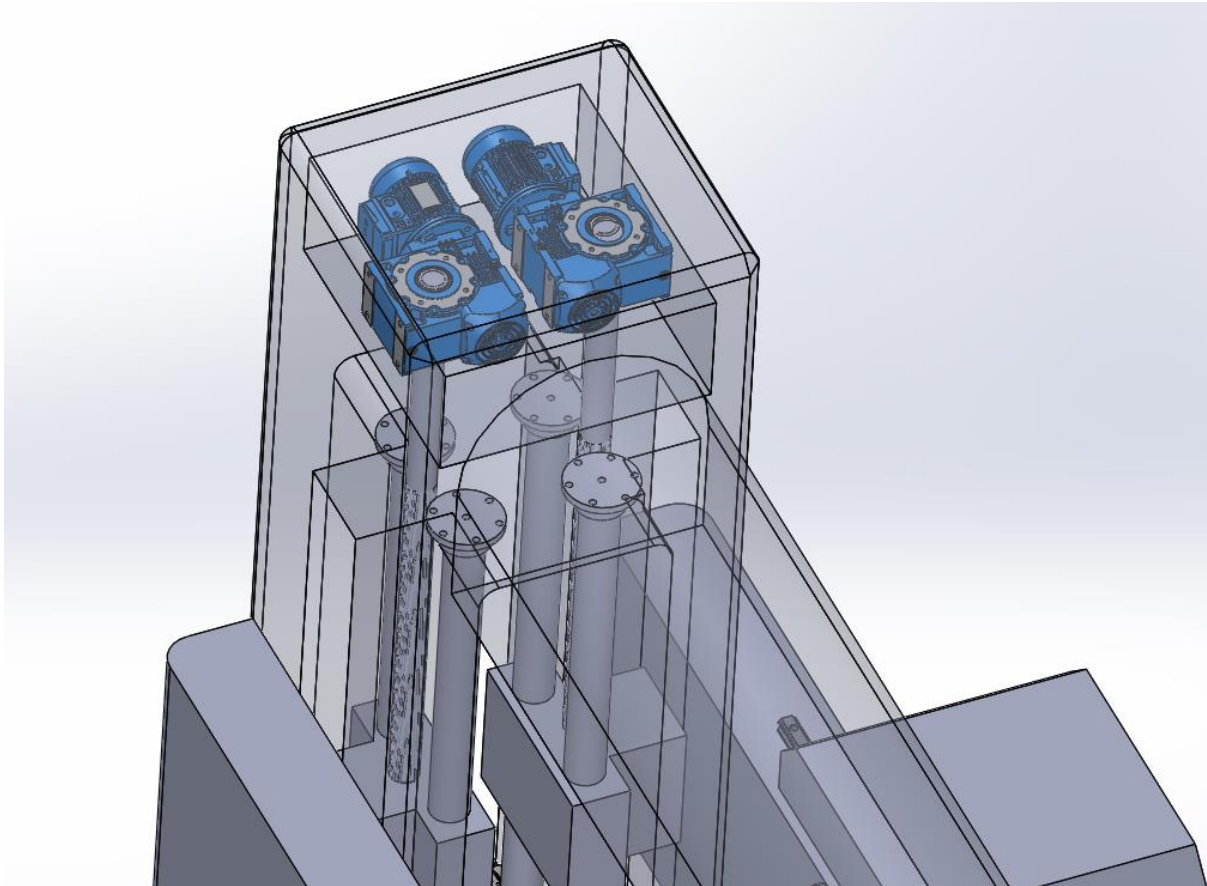


Figura 43. Vista 3D on es pot apreciar el mecanisme de moviment vertical (motors elèctrics, “husillo” i columnes guia)

Aquest sistema es accionat per dos motors elèctrics sincronitzats entre ells, els quals giren a la mateixa velocitat per transmetre el gir al “husillo”. Gràcies al gir transmès al “husillo” el sistema es podrà desplaçar verticalment on aquest ha de realitzar l’esforç necessari per poder pujar el pes dels braços. La potència dels motors ha de ser la necessària per garantir que es pugui desplaçar verticalment. Les columnes guia situades als dos costats del “husillo” garanteix que el desplaçament vertical estarà guiat, per tant no podran haver-hi desviacions. Per això, es realitza un moviment vertical precís i guiat. Aquest sistema està situat de forma simètrica en l’altre columna de la impressora. A continuació es va realitzar un render⁷ (el software utilitzat va ser Keyshot 19) amb l’objectiu d’obtenir un disseny més proper a realitat.

⁷ **Render:** Imatge digital creada a partir d’un CAD.



Figura 44. Renderització del disseny conceptual

Finalment les dimensions de tot el mecanisme són 4,5 metres d'alçada, una llargada de 7,7 metres i una amplada de 2,4 metres. Amb aquestes dimensions es garanteix poder imprimir en 3D un edifici de 2,5 metres d'alçada, 7 metres de llums (amplada màxima de l'edifici) i una llargada variable degut a que es pot desplaçar per el terreny.

L'última il·lustració realitzada en 3D del mecanisme es proporciona una visualització més realista de la impressora 3D per a la construcció on es poden observar les dimensions a una escala real. Les proporcions de les dimensions esmentades anteriorment es poden visualitzar sobre el terreny on l'altura del mecanisme és molt semblant a la nau industrial de l'esquerra.



Figura 45. Visualització a realista de la impressora



4. IMPACTE MEDIAMBIENTAL

L'impacte mediambiental de les tecnologies d'impressió 3D per la construcció que s'argumenta a continuació, ha de ser comparat amb l'impacte que tenen els processos de construcció actuals per poder entendre les avantatges que presenta.

Comparant amb els processos de construcció actuals, la tecnologia de la impressió 3D aconsegueix reduir significativament els residus generats per la construcció. Això vol dir que, el material a extruir (matèria primera) es subministra directament a la impressora i aquest es converteix de forma directa en el producte final. D'aquesta manera es suprimeixen una sèrie de processos de la construcció actual on es generen residus o es malbarata el material. A més, no és necessari el desplaçament per al transport massiu de personal no qualificat i de motlles per realitzar les parets, per tant es redueix el consum de combustibles i recursos naturals.

Encara que continuarà sent necessària la mà d'obra per realitzar algunes tasques com incloure finestres, portes i el sostre. Per tant, és reduirà la mà necessària per la construcció d'un habitatge i una reducció de costos en el procés de fabricació. També es reduirà el temps necessari per construir un habitatge i el cost final de l'edifici imprès amb la tecnologia estudia.



5. PRESSUPOST

El pressupost de la impressora 3D que construeix edificis serà un pressupost força elevat. Aquest pressupost es un pressupost orientatiu degut a que no s'ha dut a terme el mecanisme tant complex que es planteja. Al ser un projecte de magnituds monumentals, el pressupost pot variar en funció dels contratemps esdevinguts durant el procés de realització de la maquina, els quals generarien sobre costos. Degut a que no s'ha realitzat el projecte de construcció i muntatge de la impressora el pressupost serà orientatiu.

Per a la realització del pressupost va ser necessari buscar un projecte similar on la font de finançament fos públic i desenvolupat per una universitat, com es vol plantejar a la UPC. Aquest projecte va ser realitzat a Alemanya, mes concretament al nord de Westfàlia, va ser desenvolupat per la Universitat Tècnica de Munic (TUM). Es va disposar d'un pressupost de 200.000 € per a la construcció de la impressora 3D. Aquesta impressora de construcció anomenada BOD2 només utilitza el formigó com a material d'impressió. Per tant, al pressupost de 200.000 € s'hauria d'afegir un petit sobre cost degut a la complicació d'utilitzar diferents materials. En el cas de la impressora 3D per la construcció d'habitatges que s'ha plantejat en aquest treball el preu oscil·laria entre els 200.000 € i els 220.000 €, degut als possibles sobre costos. Aquets sobre costos poden semblar elevats però son deguts al nivell d'innovació que es planteja en aquest projecte (no hi ha ninguna impressora al mercat que presenti les mateixes característiques). [22]



6. CONCLUSIÓ

Després d'haver realitzat tot l'estudi, es pot concloure que la tecnologia de fabricació additiva té moltes aplicacions tant a nivell domèstic com a nivell industrial. Aquesta tecnologia disposa d'un potencial molt elevat degut a la seva varietat d'aplicacions possibles gràcies a la varietat de materials amb els quals es pot treballar.

En aquest estudi s'ha centrat en les aplicacions de les tecnologies d'impressió 3D en l'àmbit de la construcció, amb el qual es pot concloure que presenta avantatges molt significatius davant el procés de construcció actual. Durant aquest estudi s'ha plantejat el problema de la manca de l'habitatge que es veu agreujat en regions poc desenvolupades econòmicament amb la finalitat de trobar una solució enginyeril.

La solució va ser fer els primers passos per encarrilar un prototip d'una impressora 3D per la construcció d'edificis degut a les avantatges que presenta aquesta tecnologia. Aquestes avantatges comporten un cost menor de l'habitatge i un estalvi econòmic per el client final, amb la conseqüència que un grup més elevat de la població en risc d'exclusió social⁸ tindrà accessibilitat a un habitatge digne. A més, de reduir el número d'accidents laborals que malauradament poden acabar següent accidents mortals degut al alt risc del sector de la construcció.

L'estudi degut a ser part d'un projecte de l' ESEIAAT continuarà i es realitzaran els següents passos esmentats en el següent apartat per poder arribar a proporcionar una solució a la població més vulnerable de la societat.

Per últim aquest estudi ha servit per poder determinar la millor solució a la manca de l'habitatge i demostrar que es una solució possible gràcies als càlculs dels diferents materials.

⁸ **Població en risc d'exclusió social:** amplis sectors de la població que es troben en una situació de vulnerabilitat que els situa en una situació de risc de caure en una carència dels drets, recursos i capacitats bàsiques humanes.



7. LÍNIES DE FUTUR

En aquest projecte s'ha realitzat un estudi teòric amb el suport d'una base pràctica amb l'assaig de laboratori de les diferents provetes que estan constituïdes de diferents materials. Gràcies al fonament pràctic d'aquest estudi s'ha pogut demostrar la viabilitat d'aquest projecte. El següent pas per arribar al producte final desitjat seria realitzar un prototip real. Per la realització d'aquest prototip serà necessari passar d'un disseny conceptual (on es buscava fer un esquema visual) a un disseny del prototip. Per el disseny d'aquest prototip es necessari un equip multidisciplinari degut a la complexitat del projecte. Aquest equip multidisciplinari es pot dividir en 3 grups:

- Mecànica
- Electrònica
- Programació

L'objectiu de la part mecànica serà dissenyar de forma precisa les peces necessàries tenint en compte les càrregues que hauran de suportar i seleccionar els materials més ideals per cada una de les funcions. S'haurà de fer una recerca del sistema de desplaçament de cada un dels sistemes per tal de garantir el seu funcionament en un ambient agressiu i brut, el qual pot dificultar els moviments fins hi tot crear una averia. La maquina ha de ser modular, això vol dir que, s'ha de dividir en diferents seccions per poder ser transportada i ha de ser fàcil de muntar i desmuntar. S'ha de calcular la potencia necessària que necessita la impressora per el funcionament.

A continuació la part electrònica ha de automatitzar tot el mecanisme per tal de garantir el funcionament amb el mínim número de treballadors. Aquesta automatització ha de garantir un funcionament autònom. La incorporació de sensors els quals aportaran un grau de precisió i control del moviment. Degut a que també hi haurà presència humana s'ha de aplicar una sèrie de sistemes de seguretat els qual evitin possibles accidents laborals.

Finalment, es necessari una part de programació la qual dissenya un software encarregat de poder controlar els moviments i poder fer un seguiment del procés. Aquest software també ha de ser encarregat de passar un arxiu .STL creat prèviament d'un model CAD a una sèrie d'instruccions a la impressora 3D. Aquestes instruccions han de poder ser interpretades per la impressora 3D i realitzar les accions especificades en les instruccions.



8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Peralta A., Serpell A. (1991). *Características de la industria de la construcción*. Research gate. [online] https://www.researchgate.net/profile/Alfredo_Serpell/publication/318682166_Caracteristicas_de_la_Industria_de_la_Construccion/links/5cc36569299bf120978288ca/Caracteristicas-de-la-Industria-de-la-Construccion.pdf
- [2] D. Holland, G. O'Donnell and G. Bennett, Open Design and the Reprap Project.
- [3] reprap.org. (2021). RepRap - RepRap. [online] Available at: <http://reprap.org/wiki/> .
- [4] 3D Printing Industry, History of 3D Printing: The Free Beginner's Guide, 2014.
- [5] [Anas Essop (2020). The Free Beginner's Guide - 3D Printing Industry. [online] 3D Printing Industry. Available at: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>.
- [6] F. Salinas (1967), La arquitectura revolucionaria del tercer mundo. pp.1-13
- [7] Wu, P., Wang, J. and Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, [online] 68, pp.21–31. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0926580516300681?token=42F60B384DB781628B5B5B24847E0805E862B6BBC0CC5B9834C0005C91F71FBC0E309077653784D3011DBC27BB5F2D76>.
- [8] Weinstein, D., & Nawara, P. (2015). Determining the applicability of 3D concrete construction (contour crafting) of low income houses in select countries. *Cornell Real Estate Review*, Vol. 13, Art. 11, p. 94-111
- [9] Seyed Hamidreza ghaffar, Corker, J., Fan, M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, Vol.93, Septiembre 2018, p.1-11



[10] Enrico Dini, C. (n.d.). D-shape. [online] Available at: <https://d-shape.com/>

[11] IJCIET, International Journal of Civil Engineering and Technology, 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. Vol. 6, Art. 6, Junio 2015, p. 14-22

[12] www.custompartnet.com. (n.d.). Manufacturing Cost Estimation. [online] Available at: <http://www.custompartnet.com/>

[13] Merino, Á. (2018). La pobreza en América Latina - Mapas de El Orden Mundial - EOM. [online] El Orden Mundial - EOM. Available at: <https://elordenmundial.com/mapas/pobreza-en-america-latina/>.

[14] <https://3dprint.com/author/brian> (2015). Contour Crafting Inventor Dr. Khoshnevis: Widespread 3D Printed Homes in 5 Years, High-Rises in 10 Years. [online] 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. Available at: <https://3dprint.com/53437/contour-crafting-dr-khoshnevis/>.

[15] 3D Printing Blog: Tutorials, News, Trends and Resources | Sculpteo. (n.d.). XtreeE: 3D printing concrete to push the limits of construction. [online] Available at: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/07/interviewing-xtreee-3d-printing-concrete-to-push-the-limits-of-construction/>

[16] D-Shape Enterprises L.L.C. (n.d.). D-Shape Enterprises L.L.C. [online] Available at: <https://dshape.wordpress.com/>

[17] Colaboradores de los proyectos Wikipedia (2004). material para la construcción. [online] Wikipedia.org. Available at: <https://es.wikipedia.org/wiki/Concreto>.

[18] Colaboradores de los proyectos Wikipedia (2004b). Mortero (construcción). [online] Wikipedia.org. Available at: [https://es.wikipedia.org/wiki/Mortero_\(construcci%C3%B3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Mortero_(construcci%C3%B3n))



[19] Colaboradores de los proyectos Wikipedia. (2020). Adobe. [online] Wikipedia.org. Available at: <https://es.wikipedia.org/wiki/Adobe>

[20] Infouco. (2019). Casas ecológicas y las trabas que tiene en el Valle de Uco. [online] Available at: <https://infouco.com/casas-ecologicas-y-las-trabas-que-tiene-en-el-valle-de-uco/>

[21] Mapa litológico (1978). España mapa regiones aridas [online] Available at: http://atlasnacional.ign.es/wane/Suelos#/media/File:Espana_Mapa-litologico_1978_mapa_15184_spa.jpg

[22] 324cat (2020). Una impressora 3D construeix un edifici de dos pisos en sis setmanes a Alemanya. [online] CCMA. Available at: <https://www.ccma.cat/324/una-impressora-3d-construeix-un-edifici-de-dos-pisos-en-sis-setmanes-a-alemanya/noticia/3062577/>