
This is the **published version** of the bachelor thesis:

Falcó Ortega, Víctor. *La impressió 3D a la construcció : anàlisi de la seva viabilitat davant els mètodes tradicionals*. Treball de Final de Grau (Universitat Autònoma de Barcelona), 2026 (Gestió de Ciutats Intel·ligents i Sostenibles). 13 pàgines.

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/335243>

under the terms of the  license.

La impressió 3D a la construcció: anàlisi de la seva viabilitat davant els mètodes tradicionals

Víctor Falcó Ortega

Resum—

La necessitat de millorar la sostenibilitat és un dels principals reptes en el desenvolupament de les ciutats modernes. Aquest treball explora el potencial de la tecnologia d'impressió 3D aplicada al sector de la construcció com a possible alternativa als mètodes constructius tradicionals. A partir de l'anàlisi del funcionament d'aquesta tecnologia, dels materials utilitzats i de diversos exemples reals d'edificis impresos en 3D, s'estudia l'estat actual d'aquesta tècnica. Posteriorment, es realitza una comparació amb el model de construcció tradicional tenint en compte factors com el cost econòmic, el temps d'execució i l'impacte mediambiental. Finalment, es valora la viabilitat de la impressió 3D i el seu potencial en el desenvolupament de les ciutats del futur.

Paraules clau—

Impressió 3D, Construcció, Sostenibilitat, Ciutats del Futur, Innovació

Abstract—

The need to improve sustainability is one of the main challenges in the development of modern cities. This work explores the potential of 3D printing technology applied to the construction sector as a possible alternative to traditional construction methods. Based on the analysis of how this technology works, the materials used, and several real examples of 3D-printed buildings, the current state of this technique is examined. Subsequently, a comparison is made with the traditional construction model, considering factors such as economic cost, execution time, and environmental impact. Finally, the viability of 3D printing and its potential role in the development of future cities is evaluated.

Index Terms—

3D Printing, Construction, Sustainability, Future Cities, Innovation



1 INTRODUCCIÓ - CONTEXT DEL TREBALL

La construcció ha estat sempre una activitat inherent a la condició humana. Des de les primeres estructures rudimentàries de pedra fins als gratacels d'alta complexitat, l'ésser humà ha desenvolupat tècniques amb l'objectiu de satisfer les seves necessitats i afavorir el seu progrés. Segons Bill Addis (2007), aquesta evolució ha estat estretament vinculada al desenvolupament dels materials i les eines disponibles en cada època, essent la revolució Industrial un punt d'inflexió que va introduir la mecanització i la producció en sèrie per augmentar la velocitat i reduir costos.

En l'actualitat, aquesta evolució continua cap a la denominada "Construcció 4.0", un model més automatitzat i eficient gràcies a les tecnologies digitals. Dins d'aquest context, la impressió 3D es pot entendre com una nova etapa evolutiva basada en l'automatització dels processos i l'optimització dels recursos.[2][3] Tot i que aquesta tecnologia es va originar en la dècada de 1980 per a prototips ràpids, els avenços tècnics recents n'han permès l'aplicació en el sector de la construcció mitjançant la deposició de materials capa a capa. Tal com indiquen Wu et al. (2016), aquest

progrés és fruit de la transformació tecnològica que busca respondre als reptes actuals de la indústria.

Aquesta transició tecnològica és especialment rellevant davant l'emergència climàtica i la crisi d'habitatge actual. La millora de la sostenibilitat és un dels reptes principals de les ciutats modernes, ja que la construcció tradicional genera prop del 38-39% de les emissions globals de CO₂ i un 15% de residus.[5][11] Així mateix, la manca d'habitatge assequible i la necessitat de solucions ràpides en situacions d'emergència —com catàstrofes naturals o crisis socials— fan necessari l'estudi d'alternatives més àgils.

Aquests factors, units al meu interès personal per les ciutats intel·ligents, m'han motivat a analitzar la funcionalitat futura d'aquesta tecnologia.

L'objectiu principal d'aquest treball és, per tant, analitzar la viabilitat de la construcció mitjançant impressió 3D davant els mètodes tradicionals, avaluant el seu potencial en el sector de la construcció. Per assolir-ho, s'ha seguit una metodologia mixta que combina la revisió bibliogràfica de literatura científica actualitzada amb un estudi pràctic

basat en entrevistes a arquitectes de Barcelona per obtenir una visió real de la indústria.

En definitiva, aquest estudi pretén determinar si la impressió 3D pot consolidar-se com una alternativa real o un suport híbrid indispensable per assolir un model de construcció que respongui amb eficàcia, sostenibilitat i justícia social als reptes urbans actuals.

2 OBJECTIU

L'objectiu principal d'aquest treball és analitzar la viabilitat de la construcció d'edificis i elements urbans mitjançant la tecnologia d'impressió 3D i comparar-la amb els mètodes de construcció tradicionals per valorar el seu potencial en el desenvolupament de les ciutats del futur.

Objectius específics:

Estudiar el funcionament de la impressió 3D en l'àmbit de la construcció:

Estudiar el tipus d'impressores que existeixen, els materials utilitzats per imprimir, el procediment d'impressió i les aplicacions que s'han fet fins a dia de avui.

Comparar el model de construcció tradicional amb el model de construcció mitjançant impressió 3D:

Comparar els dos models en els aspectes econòmics, temporals, consum de materials i energia, impacte mediambiental i l'eficiència del procés constructiu.

Valorar el potencial futur de la impressió 3D en la construcció de ciutats:

Fer una valoració dels resultats de la comparació entre els dos models per donar una resposta sobre si el model de construcció amb impressió 3D és viable per a les ciutats del futur.

3 METODOLOGIA

La metodologia d'aquest treball es basa en un enfocament mixt que combina la revisió bibliogràfica i documental amb un estudi pràctic qualitatiu. L'objectiu d'aquest disseny és contrastar les dades teòriques i científiques amb la realitat professional del sector a la ciutat de Barcelona.

3.1. Motivació i plantejament inicial

L'interès per aquest treball neix d'una inquietud personal vers la tecnologia d'impressió 3D, utilitzada inicialment en l'àmbit domèstic. Aquesta experiència prèvia va derivar en la voluntat d'explorar aplicacions de major escala i funcionalitat, especialment dins el marc de les ciutats intel·ligents i sostenibles.

La pregunta de recerca consisteix a determinar si la impressió 3D representa una innovació amb futur real o si és una tendència passatgera sense viabilitat en el mercat actual.

3.2. Fase de recerca documental i anàlisi de la comparació

Per assolir els objectius teòrics, es va realitzar una cerca sistemàtica d'informació estructurada en les següents etapes:

Contextualització: Tot i que inicialment es va plantejar un

capítol històric independent, es va decidir integrar l'evolució de la construcció a la introducció per centrar el gruix del treball en la tecnologia 3D.

Base teòrica: Es va investigar el funcionament de les impressores (pòrtic i braços robòtics) i els materials (lligants, àrids i additius), ja que la selecció del material és determinant per als resultats estructurals.

Recerca científica: S'ha consultat bases de dades científiques i documents tècnics recents per realitzar la comparació de models. Un punt clau de la metodologia va ser la identificació de desviacions en les dades publicades. Per exemple, es va constatar que a moltes comparacions dels temps només computen l'execució pura d'impressió i no les fases logístiques i de preparació, aspecte que s'ha fet menció en l'anàlisi d'aquest TFG.

Recerca normativa específica: En detectar durant la comparació que la manca de regulació és una barrera crítica, es va decidir obrir una línia de recerca específica per identificar el marc normatiu actual. Aquesta part ens ha permès analitzar quina és la normativa actual i quines són les seves problemàtiques.

3.3. Estudi pràctic - Entrevistes amb professionals

L'apartat pràctic s'ha configurat com una eina per validar les dades teòriques i aportar la visió d'un dels actors clau del sector. Es van dur a terme entrevistes amb arquitectes de diverses generacions del departament de Visat i Informes d'Idoneïtat Tècnica (IIT) del col·legi d'arquitectes de Catalunya (COAC):

Begoña Rull, Gerard Miquel Olivé, Anna Andrés, Mar Lopez, Marta Usón, Laura Baró, Carolina Plana.

Aquestes entrevistes es van realitzar en grups de 3 i 4 arquitectes, de diferents edats, per tal de fomentar el debat i facilitar l'emergència de temes o punts de vista que no havien estat previstos inicialment en el guió estructurat.

L'objectiu fonamental d'aquesta fase era recollir opinions i coneixements dels experts sobre la viabilitat real de la tecnologia, les seves limitacions estructurals i les perspectives de futur des d'una òptica professional i aplicada. Fruit d'aquest intercanvi d'idees, la recerca va permetre descobrir noves línies d'estudi, com ara l'aplicació de la impressió 3D en la fabricació d'elements de mobiliari urbà, com bancs o ponts, unes possibilitats que no s'havien considerat en el plantejament inicial del projecte i que enriqueixen l'anàlisi de la funcionalitat d'aquesta tecnologia a les ciutats.

Podem trobar el guió de les entrevistes i els resultats obtinguts en l'apèndix.

3.4. Estructuració del treball

Finalment, el treball s'ha organitzat seguint una seqüència lògica per facilitar la seva comprensió:

Context i fonamentació teòrica: Explicació de la tecnologia 3D.

Anàlisi comparativa: Resultats sobre costos, temps i sostenibilitat dels dos models.

Problemàtica de la normativa: Anàlisi de la normativa actual.

Discussió de resultats pràctics: Conclusions derivades de

les entrevistes amb arquitectes.

Conclusió final: Valoració de la viabilitat i línies de futur.

4 QUÈ ÉS LA IMPRESSIÓ 3D APLICADA A LA CONSTRUCCIÓ?

La impressió 3D al sector de la construcció és un mètode de fabricació additiva dins l'àmbit de la fabricació digital que automatitza la producció d'estructures de ciment. A diferència dels mètodes convencionals, aquesta tecnologia crea estructures físiques mitjançant la superposició successiva de capes de material, unint-les per formar un volum tridimensional.

El funcionament de la impressió 3D es basa en un flux de treball digital integrat que consta de diverses etapes:

El disseny digital: Creació d'un model de disseny assistit per ordinador o modelatge d'informació de construcció que defineix les dimensions i propietats de l'estructura.

El processament i laminat: Transformació del disseny creat en una sèrie de capes bidimensionals que representen el camí de la impressora en la impressió.

L'execució: Un sistema robòtic, generalment un sistema de pòrtic o un braç articulad, interpreta les instruccions i extreu el formigó capa a capa de forma automatitzada.

Aquesta tecnologia permet fabricar habitatges, infraestructures i elements complexos amb una elevada precisió i llibertat arquitectònica, facilitant la creació de geometries optimitzades i formes orgàniques sense la necessitat d'encofrats, que tradicionalment encareixen el procés. A més, la impressió 3D destaca per la seva capacitat de reduir la necessitat de mà d'obra directa en tasques perilloses o repetitives, millorant la seguretat a l'obra i la productivitat global del projecte.

Actualment, la impressió 3D aplicada a la construcció es troba al centre de la denominada "Construcció 4.0", evolucionant ràpidament des de l'experimentació en laboratoris cap a la seva implementació en projectes reals a gran escala. El seu ús s'està expandint globalment a mesura que la tecnologia madura, impulsat per la necessitat urgent de trobar solucions constructives que siguin més sostenibles, redueixin el malbaratament de materials i responguin amb rapidesa als reptes d'urbanització actuals.

4.1 Tipus d'impressores 3D utilitzades en la construcció

Actualment, existeixen diferents tipus d'impressores 3D aplicades al sector de la construcció, cadascuna adaptada a necessitats i dimensions específiques.

4.1.1 Impressores de pòrtic

Les impressores 3D de tipus pòrtic són actualment les més utilitzades dins del sector de la construcció.[6][7] Aquestes màquines es caracteritzen per disposar d'una estructura fixa, que guia el capçal d'impressió al llarg dels diferents eixos de moviment, proporcionant una elevada estabilitat i una gran precisió durant el procés constructiu.

El principal avantatge d'aquest tipus d'impressora és la seva capacitat per fabricar elements de grans dimensions,

ja que disposa d'una àmplia àrea de treball que permet la construcció d'habitatges unifamiliars, mòduls prefabricats i edificacions de petita o mitjana alçada. A més, la seva estabilitat estructural permet assolir velocitats d'impressió elevades mantenint una bona qualitat d'execució.

Tanmateix, aquest tipus d'impressores també presenta diverses limitacions. La més destacada és la seva reduïda mobilitat, ja que requereix el muntatge i desmuntatge de tota l'estructura a cada nou emplaçament. Addicionalment, les dimensions de la impressora han de ser superiors a les de l'element que es vol fabricar, atès que la impressió es realitza dins de l'espai delimitat pel pòrtic. Aquest fet obliga a dur a terme una planificació prèvia acurada que inclou la preparació del terreny, el muntatge de l'equip, el seu calibratge i les corresponents comprovacions de funcionament.

A causa dels costos econòmics i temporals associats a aquestes operacions, en determinats projectes s'opta per la fabricació de components de manera independent en entorns controlats, per posteriorment transportar-los i assemblar-los a l'obra. Tot i que aquesta solució pot simplificar el procés d'impressió i millorar el control de qualitat, també implica un increment dels costos derivats del transport i del muntatge dels diferents elements construïts.

A continuació, en la il·lustració 1, podem observar el model d'una impressora de tipus pòrtic.



Il·lustració 1 Impressora tipus pòrtic BOD2 [7]

4.1.2 Braços robòtics

Les impressores 3D basades en braç robòtic constitueixen una alternativa als sistemes de tipus pòrtic dins del sector de la construcció. Aquestes màquines utilitzen un braç robòtic multi-eix que actua com a suport del capçal d'impressió, proporcionant una elevada flexibilitat de moviment i una gran adaptabilitat a diferents configuracions de treball.[6][7]

A diferència dels sistemes de tipus pòrtic, que es basen en una estructura fixa i estable, els braços robòtics destaquen per la seva mobilitat i versatilitat, ja que poden operar en entorns més diversos i, en alguns casos, integrar-se sobre plataformes mòbils. Aquesta característica els permet fabricar elements amb geometries més complexes i formes més lliures, augmentant considerablement les possibilitats de disseny arquitectònic. A més, la seva capacitat per

orientar el capçal d'impressió en diferents direccions facilita la construcció de superfícies corbes, elements orgànics i components amb una elevada complexitat geomètrica.

Una altra característica destacable és que aquests sistemes poden utilitzar-se tant en processos de fabricació fora de l'obra com directament sobre el terreny de construcció, depenent de les dimensions de l'element a fabricar i de les condicions de l'entorn. Aquesta flexibilitat els converteix en una opció especialment interessant per a projectes singulars o personalitzats, on les limitacions geomètriques dels sistemes convencionals poden representar un obstacle.

Tanmateix, en comparació amb els sistemes pòrtic, presenten una àrea d'impressió més limitada, condicionada principalment per l'abast del braç robòtic, fet que restringeix la seva aplicació en la construcció d'estructures de gran escala. Així mateix, la seva velocitat de producció pot variar en funció de la complexitat de les trajectòries d'impressió i dels moviments requerits durant el procés.

Per aquestes característiques, les impressores basades en braç robòtic són especialment adequades per a projectes que requereixen una elevada llibertat de disseny i geometries complexes, tot i que ofereixen una capacitat productiva inferior a la dels sistemes de tipus pòrtic.

A continuació, en la il·lustració 2, podem veure un exemple visual d'un braç robòtic.



Il·lustració 2 Braç Robòtic APIS COR [7]

4.2 Materials utilitzats en la impressió 3D

Els materials en la impressió 3D són un dels elements clau en la construcció de l'estructura, ja que depenent del material que utilitzem podem optar a diferents models d'estructures.[13][15]

Aquests materials es poden estructurar en cinc categories principals segons la seva funció i composició.

4.2.1 Lligants

Els lligants són el component principal de les mescles utilitzades en la impressió 3D de formigó, pel fet que són els responsables del procés d'enduriment i del desenvolupament de les propietats mecàniques del material. La selecció del lligant influeix directament en la resistència, la durabilitat, el temps de fraguat i la sostenibilitat de l'element construït.

Els principals tipus de lligants utilitzats són els següents [13][14][15]:

Ciment Portland Ordinari (OPC): És el lligant més utilitzat en la construcció amb impressió 3D gràcies a la seva àmplia disponibilitat, el seu cost relativament baix i el seu comportament mecànic ben conegut. Proporciona una elevada resistència a compressió i facilita el control de les propietats de la mescla. No obstant això, la seva fabricació comporta una elevada petjada de carboni, ja que la producció de ciment és una de les principals fonts d'emissions de CO₂ de la indústria de la construcció.

Ciment de Sulfoaluminat de Calci (CSA): Aquest tipus de ciment es caracteritza per un enduriment molt ràpid i per desenvolupar elevades resistències en les primeres hores després de la seva aplicació. Aquestes propietats resulten especialment útils en la impressió 3D, on és necessari que les capes dipositades mantinguin la seva forma i suportin el pes de les capes superiors. Sovint s'utilitza combinat amb ciment Portland per ajustar el temps de fraguat de la mescla.

Geopolímers: Són una alternativa més sostenible als lligants tradicionals basats en ciment. Es produeixen a partir de materials rics en aluminosilicats, com ara cendres volants o escòries d'alt forn. Els geopolímers ofereixen una elevada resistència mecànica, una bona durabilitat i una reducció significativa de les emissions de CO₂ associades a la seva producció.

Ciment de Fosfat de Magnesi i Potassi (MPC): Aquest lligant destaca per la seva elevada velocitat d'enduriment, la seva baixa contracció durant el fraguat i la seva bona adherència. Aquestes característiques el fan especialment adequat per a aplicacions que requereixen una posada en servei ràpida o reparacions estructurals.

4.2.2 Àrids

Els àrids constitueixen la major part del volum de les mescles utilitzades en la impressió 3D de formigó i tenen una influència directa sobre les propietats reològiques, la bombabilitat, l'extrudibilitat i l'estabilitat dimensional del material. Són imprescindibles per evitar obstruccions durant el procés d'impressió.

Els principals tipus d'àrids emprats són els següents [14][15]:

Sorra fina natural: És l'àrid més utilitzat en les mescles imprimibles. Generalment, es fan servir sorres amb una mida màxima de partícula inferior a 2 mm per garantir el pas del material a través de les mànegues i del broquet de la impressora sense produir obstruccions. A més, contribueixen a obtenir una superfície més uniforme i una millor cohesió entre capes.

Àrids reciclats: Amb l'objectiu de reduir l'impacte ambiental de la construcció, cada vegada s'incorporen més materials reciclats a les mescles de formigó imprimible. Entre els més habituals destaquen el vidre reciclat triturat, la pols de maó ceràmic i els residus de formigó reciclat. Aquests materials permeten avançar cap a models d'economia circular, tot i que la seva incorporació pot modificar les propietats mecàniques i reològiques de la mescla.

Àrids lleugers: S'utilitzen quan es vol reduir el pes propi de l'estructura o millorar-ne les propietats d'aïllament tèrmic. Entre els materials més emprats destaquen l'argila

expandida. La seva utilització permet obtenir elements constructius més lleugers, encara que normalment comporta una reducció de la resistència mecànica respecte a les mescles convencionals.

4.2.3 Additius químics

Els additius químics són components incorporats en petites quantitats a les mescles de formigó imprimible amb l'objectiu de modificar-ne les propietats en estat fresc i optimitzar-ne el comportament durant el procés d'impressió. Aquests productes permeten controlar aspectes com la fluïdesa, la viscositat, el temps de fraguat i l'estabilitat de la mescla, factors essencials per garantir una impressió contínua i una correcta adhesió entre capes.

Els principals tipus d'additius químics utilitzats en la impressió 3D són els següents [14][15]:

Superplastificants: Milloren la fluïdesa i la bombabilitat de la mescla sense necessitat d'augmentar la quantitat d'aigua. Això permet obtenir una bona extrudibilitat mantenint alhora unes elevades prestacions mecàniques una vegada el material ha endurit.

Modificadors de viscositat: S'utilitzen per augmentar la cohesió interna de la mescla i reduir el risc de segregació dels seus components. A més, contribueixen a mantenir la forma de les capes dipositades després de l'extrusió, millorant l'estabilitat geomètrica de l'element imprès.

Acceleradors i retardadors: Aquests additius permeten regular la velocitat d'enduriment de la mescla segons les necessitats del procés constructiu. Els acceleradors afavoreixen un desenvolupament més ràpid de la resistència inicial, mentre que els retardadors prolonguen el temps de treballabilitat. D'aquesta manera, és possible controlar el temps obert d'impressió i garantir que les capes inferiors siguin capaces de suportar el pes de les noves capes dipositades.

4.2.4 Materials més utilitzats

La combinació de materials més utilitzada en la construcció mitjançant impressió 3D està composta principalment per ciment Portland ordinari (OPC), tot i que en alguns casos s'hi incorpora ciment de sulfoaluminat de calci (CSA) per optimitzar el procés d'impressió i ajustar el temps de fraguat. S'utilitza sorra fina amb una fracció granulomètrica de fins a 2 mm.[15]

A aquesta mescla s'hi afegeixen habitualment superplastificants, que permeten obtenir una mescla bombable amb un contingut reduït d'aigua, i modificadors de viscositat, que asseguren l'estabilitat de la forma del material immediatament després de l'extrusió.

Pel que fa a les addicions minerals, és habitual la incorporació de fum de sílice i cendres volants, amb l'objectiu de millorar la microestructura i les propietats mecàniques del material. Finalment, com a elements de reforç, s'incorporen microfibras de polipropilè o de vidre dins la mescla, amb la finalitat de reduir la fissuració per retracció i millorar la ductilitat del material un cop endurit.

En la Taula 1, podem veure un breu resum de les característiques d'aquests materials.

	OPC	CSA	CSA-OPC	Geopolymer	MPC
Characteristics suitable for 3D printing	High strength, high stability	High early strength, short setting time, less impact on the environment	Short setting time, high early strength	High durability, high chemical resistance, eco-friendly	Rapid setting time, high early strength, low shrinkage
Limitations	Long setting time, weak early strength	Low printing open time, high pumping pressure	Reduction in later strength and cracking due to high CSA content	High drying shrinkage, harsh curing conditions	Low printing open time

Taula 1 Característiques dels diferents materials [15]

4.3 Procés de construcció

En aquest apartat, l'anàlisi se centra en les impressores 3D de tipus pòrtic, ja que són les més utilitzades en el sector de la construcció amb impressió 3D.

Tal com s'ha esmentat anteriorment, aquest tipus d'impressores requereixen una fase prèvia de planificació i preparació abans d'iniciar la impressió de l'estructura. Per aquest motiu, el procés constructiu d'un habitatge mitjançant impressió 3D es pot dividir en diverses etapes successives.

De manera general, el procés s'estructura en quatre fases principals: la preparació del disseny, la preparació de la construcció i logística, la fase d'impressió de l'estructura i, finalment, la fase de finalització i acabats.[3][4]

4.3.1 Preparació del disseny

Per a qualsevol projecte de construcció mitjançant impressió 3D és necessari disposar d'un model digital previ que defineixi amb precisió la geometria de l'element que es vol fabricar. Aquesta fase permet traduir el disseny arquitectònic a un conjunt d'instruccions que la impressora pugui interpretar i executar.

En primer lloc, es realitza la fase de modelatge, en la qual es crea un model tridimensional mitjançant programari especialitzat de disseny assistit per ordinador (CAD). Aquest model conté tota la informació geomètrica necessària per a la construcció de l'estructura.

Un cop definit el model 3D, s'inicia la fase de laminació o slicing. En aquesta etapa, el model es divideix en una successió de capes horitzontals que defineixen la trajectòria que haurà de seguir el capçal d'impressió durant el procés constructiu. Així mateix, es determinen diversos paràmetres d'impressió, com ara l'alçada de capa, l'amplada d'extrusió i la velocitat de deposició del material.

Posteriorment, es duu a terme la planificació de trajectòries (path planning), on s'optimitza el recorregut del capçal per garantir la continuïtat del material dipositat i minimitzar possibles discontinuïtats o defectes que puguin afectar la resistència de l'estructura final.

Finalment, tota aquesta informació es converteix en un codi de control, habitualment en format G-code, que conté les instruccions de moviment, velocitat i extrusió necessàries perquè la impressora executi la construcció de manera automàtica i precisa. [3][4]

4.3.2 Preparació de la construcció i logística

La fase de preparació de la construcció i logística comprèn totes les operacions necessàries per garantir el correcte funcionament del sistema d'impressió abans d'iniciar la construcció de l'estructura.

En primer lloc, es realitza el transport de la maquinària fins a l'emplaçament de l'obra i es realitza el muntatge de

l'estructura d'impressió. En el cas de les impressores de tipus pòrtic, les dimensions de l'estructura han de ser superiors a les de l'element que es pretén construir.

Paral·lelament, es prepara el material d'impressió mitjançant la dosificació i barreja dels seus components principals, generalment ciment, àrids fins, aigua i additius. La formulació de la mescla és un aspecte crític, ja que ha de proporcionar una adequada bombabilitat i extrudibilitat durant el procés d'impressió, alhora que ha de garantir una suficient capacitat de manteniment de la forma un cop dipositada cada capa.

Finalment, s'instal·la el sistema de mescla i bombeig, normalment situat fora de l'àrea d'impressió, que s'encarrega de transportar el material fins al capçal a través d'un conjunt de mànegues. Aquest sistema ha de garantir un subministrament continu i homogeni del material per evitar interrupcions durant el procés constructiu.[3][15]

4.3.3 Impressió

La impressió és l'etapa d'execució del procés, en la qual el material es diposita seguint les instruccions programades prèviament, capa a capa.

Aquesta fase es pot dividir en diversos aspectes principals. En primer lloc, el moviment d'impressió, basat en el desplaçament del capçal en els eixos X, Y i Z dins de l'àrea delimitada per l'estructura del pòrtic.

En segon lloc, el procés de deposició del material, en el qual el formigó és extruït a través d'un broquet de manera contínua, amb diàmetres habitualment compresos entre 6 mm i 50 mm.

Durant el procés d'impressió es realitza un control continu de l'estat del material dipositat. Aquest control és necessari, ja que una consistència massa baixa pot provocar deformacions o col·lapse de les capes inferiors, mentre que una consistència excessivament elevada pot reduir l'adherència entre capes successives.

Finalment, la impressió es duu a terme de manera seqüencial per capes completes a cada nivell d'alçada. És a dir, es completa tota una secció horitzontal abans de passar a la següent. Aquesta estratègia permet garantir que el temps transcorregut entre la deposició de capes successives sigui adequat per assegurar una correcta adherència entre capes i evitar problemes derivats de l'enduriment prematur del material. [3][4]



Il·lustració 3 Procés d'impressió [15]

4.3.4 Finalització i acabats

Un cop completada l'estructura, s'inicien les tasques posteriors a la impressió.

En primer lloc, es procedeix al desmuntatge de la maquinària instal·lada, incloent-hi l'estructura de pòrtic i el sistema de bombeig, amb l'objectiu de traslladar-los a una nova obra per a la seva reutilització.

Paral·lelament, es duu a terme la gestió dels residus generats durant el procés constructiu, així com la revisió dels materials utilitzats i de les possibles pèrdues produïdes durant la impressió.

Un cop finalitzada la impressió de l'estructura, es realitzen ajustaments puntuals en les superfícies impreses i s'executa la instal·lació dels sistemes de serveis (electricitat, lampisteria, telecomunicacions i altres instal·lacions), que no s'han pogut integrar durant la fase d'impressió.

En conclusió, la impressió 3D en construcció destaca principalment per la reducció dels temps d'execució i la disminució de la dependència de mà d'obra intensiva. No obstant això, continua requerint processos complementaris posteriors a la impressió, especialment pel que fa a les instal·lacions i als acabats, fet que indica que es tracta d'un sistema constructiu parcialment integrat dins del procés global d'edificació. [3][4]

4.4 Limitacions de la impressió 3D aplicada a la construcció

Tot i que la impressió 3D de formigó es presenta com una alternativa innovadora dins del sector de la construcció, actualment es considera una tecnologia en fase de creixement que encara no pot competir plenament amb els mètodes convencionals. Les seves limitacions actuals obliguen sovint a utilitzar-la de manera híbrida, servint de suport a l'obra tradicional més que no pas substituint-la totalment. [9][12] Les barreres principals es classifiquen en els següents àmbits:

4.4.1 Limitacions tècniques i d'escalabilitat

L'abast de la tecnologia està condicionat per les dimensions físiques del sistema d'impressió. Tant els sistemes de pòrtic com els braços robòtics tenen un radi d'acció limitat, cosa que dificulta la construcció d'edificis de gran alçada sense segmentar el procés o desplaçar continuament la maquinària, perdent així eficiència logística. A més, l'àrea d'impressió efectiva es veu restringida pel volum total que la màquina pot cobrir de manera autònoma.[7][12]

4.4.2 Control del procés i integritat estructural

L'èxit de la impressió depèn d'un equilibri crític entre la capacitat d'extrusió i l'estabilitat de l'element imprès. Una velocitat d'extrusió excessiva pot provocar el col·lapse de les capes inferiors, mentre que una massa lenta genera "juntures fredes" que debiliten la cohesió entre capes i redueixen l'homogeneïtat de l'estructura. Aquesta dificultat s'accentua per la manca d'integració de serveis (electricitat i fontaneria) en el moment de la impressió, obligant a perforacions manuals posteriors que comprometen la integritat de l'estructura.

4.4.3 Comportament dels materials i anisotropia

A diferència del formigó tradicional, que és isòtrop, el material imprès presenta un clar comportament anisòtrop. Això implica que les propietats mecàniques varien segons la direcció de la càrrega, sent la unió entre capes el punt crític de debilitat davant esforços de tracció i cisallament.[4][12]

4.4.4 Barreres econòmiques i normatives

La inversió inicial en equipament robòtic, programari especialitzat i infraestructura, és considerablement més alta que en la construcció convencional.[10][12] Tot i que es redueixen els costos de mà d'obra i d'encofrat, el preu dels materials especialitzats sol ser superior. D'altra banda, existeix un buit regulador significatiu; la manca de codis d'edificació i estàndards internacionals madurs dificulta enormement l'obtenció de permisos d'obra i la certificació estructural per a ús residencial a gran escala.

4.4.5 Factor humà i formació

Finalment, la implementació d'aquest model requereix una transició cap a una mà d'obra altament qualificada. El sector pateix una mancança de perfils formats en robòtica, disseny computacional i ciència de materials, competències que no es troben habitualment en el personal de la construcció tradicional, limitant així l'adopció massiva d'aquestes tecnologies.[7][12]

5 COMPARACIÓ ENTRE LA CONSTRUCCIÓ TRADICIONAL I LA IMPRESSIÓ 3D

La impressió 3D de formigó es reconeix com una tecnologia innovadora dins la "Construcció 4.0", amb el potencial de racionalitzar els mètodes convencionals que sovint presenten ineficiències econòmiques i elevats impactes ambientals. Tot i que aquest model additiu aporta avantatges competitius clars, la seva transició des de l'escala de laboratori a l'aplicació massiva en l'edificació encara s'enfronta a reptes tècnics i normatius significatius que el condicionen per a poder competir en el mercat de la construcció.

Amb l'objectiu de determinar si la impressió 3D de formigó és una alternativa real o un complement viable al model de construcció tradicional, a continuació es fa una anàlisi comparativa exhaustiva basada en les evidències de la literatura científica recent. Aquesta comparació s'estructura en quatre eixos fonamentals: economia, temps, sostenibilitat i capacitat de disseny.

5.1 Eficiència Econòmica i costos

La construcció tradicional és un mètode madur però sovint ineficient econòmicament a causa de la dependència de treball manual i l'ús massiu d'encofrats, que són dos elements dels quals la impressió 3D pot reduir dràsticament.

La tecnologia de la impressió 3D de formigó té el potencial d'estalviar fins a un 78% dels costos totals de construcció i un 60% dels costos de mà d'obra.[5][10] Aquests percentatges s'expliquen, en gran mesura, per l'eliminació de l'encofrat, que en la construcció convencional representa entre un 35% i un 60% del pressupost de l'estructura.[4][10] En canvi, com que la impressió 3D pot prescindir d'aquest

element, es pot permetre estalvis econòmics en aquest sector. Pel que fa a la mà d'obra s'observa una reducció molt gran de contractacions del personal, no obstant això, aquest nou personal, que es requereix, haurà d'estar molt més qualificat que el personal actual que hi trobem en el sector de la construcció.

Per una altra banda, pel que fa als costos dels materials, tot i l'estalvi en mà d'obra, els materials per a la impressió 3D, que necessiten mescles especials per a ser extruïdes en la impressió, solen ser més cars que el formigó convencional, donat que utilitzen una quantitat major de ciment. [10][15] En canvi, en la construcció tradicional, amb àrids gruixuts, s'utilitza una quantitat inferior de ciment. Per tant els materials especialitzats per a la impressió 3D són una de les causes principals de l'increment de costos. [10][15]

Així mateix, cal dir que aquestes dades només tenen en compte la fase de construcció i no tenen en compte els altres aspectes com el cost de la maquinària que comporta la impressió 3D. La impressora representa una barrera financera important que requereix una estratègia d'amortització a llarg termini. Estudis recents han calculat el punt d'equilibri (break-even point) d'aquesta tecnologia, conclouent que la inversió comença a ser rendible respecte al model tradicional després d'un període d'ús continuat superior als sis mesos.[10][12]

Tot i que, si bé el cost unitari de la impressió 3D pot ser elevat per a projectes aïllats o prototips, la seva implementació sistemàtica i continuada la posiciona com una alternativa clarament competitiva i rendible davant el model de construcció actual.

Les entrevistes fetes als arquitectes, que podem trobar a l'apèndix, confirmen el que ja indiquen els articles científics, la implementació de la impressió 3D pot reduir significativament els costos, sobretot en la mà d'obra i els encofrats. Tots van estar d'acord que la impressió 3D elimina la necessitat d'utilitzar encofrats, els quals representen una part important dels costos en els processos constructius tradicionals. En aquest sentit, la seva supressió es considera un dels principals factors d'estalvi econòmic.

D'altra banda, també es va assenyalar que aquesta tecnologia permetria reduir la quantitat de personal necessari durant l'execució de l'obra. L'elevat grau d'automatització associat als processos d'impressió 3D faria possible disminuir les necessitats de mà d'obra, fet que es traduiria en una reducció dels costos laborals i en una major eficiència en l'execució dels projectes.

5.2 Gestió de temps i productivitat

L'estalvi de temps d'execució és, sense dubte, un dels factors on la impressió 3D de formigó presenta un avantatge més transformador, sent capaç de convertir tasques que tradicionalment requereixen setmanes en operacions d'unes poques hores o dies. Aquesta millora s'enfoca principalment en l'optimització del procediment constructiu i no tant en la preparació de la maquinària o la preparació dels materials, on els requisits de barreja continuen sent similars als convencionals.

El principal avantatge competitiu resideix en

l'automatització del procés. Els sistemes robòtics de la impressió 3D, apliquen el formigó directament seguint un camí predefinit a velocitats elevades que superen àmpliament la capacitat humana. S'estima que la impressió 3D pot ser un 50% més ràpida en els processos automatitzats. De fet, en anàlisis de comparatives basades en projectes reals, reporten una millora en la reducció del temps de construcció d'entre el 45% i el 88%, depenent, això sí, de l'escala i complexitat de l'estructura.[10]

Aquesta reducció de temps s'explica principalment en l'eliminació de l'encofrat, ja que en el model tradicional, la instal·lació, el manteniment i el posterior desmuntatge d'aquests encofrats, generen retards i temps d'espera considerables.[3][4] La impressió 3D prescindeix d'aquests elements, i això permet, una construcció continua.

Per concloure, cal deixar constància que aquestes dades de temporalitat són basades en el procés d'impressió pur i no en el temps total de projecte, que inclou etapes de calibratge, preparació de material i la neteja de la màquina, factors que també contribueixen temps, però que sovint s'obvien en les dades promocionals.

En aquets aspecte, a partir de les enquestes realitzades, s'observa que els arquitectes també coincideixen que la reducció del temps d'impressió comportaria una disminució significativa del temps total de l'obra. A més, indiquen que el transport de la maquinària necessària només s'hauria de realitzar una única vegada: els equips es traslladen a l'emplaçament de l'obra, s'executa la impressió de l'estructura i, posteriorment, es retiren. En canvi, en els sistemes de construcció tradicionals, és habitual que es requereixin múltiples transports de materials i equips al llarg de les diferents fases d'execució de l'obra, fet que incrementa els costos logístics i el temps de gestió.

5.3 Sostenibilitat i impacte ambiental

Davant la crisi climàtica, la necessitat de trobar mètodes sostenibles que redueixin les emissions actuals ha esdevingut una prioritat absoluta per al sector de l'edificació. La impressió 3D de formigó s'ubica com una aposta estratègica per disminuir les emissions de CO₂ d'una indústria que, segons les fonts, genera prop del 38-39% de les emissions globals.[5][11]

Aquest impacte positiu s'articula en tres eixos principals:

Reducció de residus: La construcció convencional genera aproximadament un 15% de residus de material, a causa de l'encofrat i els sobrants generats durant el tall i l'ajust dels materials. La impressió 3D redueix aquest malbaratament entre un 30% i un 60%.[8][11] Això es deu a la naturalesa del procés additiu, on el material es disposa amb precisió mil·limètrica només on és estructuralment necessari, eliminant la necessitat de motlles temporals que acaben convertint-se en deixalles.

Gestió de recursos hídrics i energètics: La tecnologia d'impressió 3D consumeix un 20% menys d'aigua que els mètodes tradicionals. Així mateix, s'estima que la seva implementació té el potencial de reduir la utilització global d'energia en el sector en un 5%.[5][8]

Optimització de la petjada de carboni: L'anomenada "topologia optimitzada" permet imprimir estructures amb

geometries complexes que estalvien material. Un exemple clar és l'ús de parets amb un farciment (infill) del 45%, la qual cosa pot reduir les emissions de CO₂ fins a un 50% en comparació amb un mur massís convencional.[13]

Cal remarcar que la sostenibilitat real de la impressió 3D depèn de la mescla utilitzada en els materials. Tot i l'estalvi de material, moltes mescles actuals, tenen un alt contingut de ciment Portland, que és el principal contribuent de CO₂. Per aquest motiu, el model additiu és realment innovador quan s'integra amb materials reciclats o geopolimers, els quals poden arribar a reduir la petjada de l'estructura fins a un 60% o 90% respecte al formigó tradicional.[13][14]

5.4 Disseny i llibertat arquitectònica

L'apartat de disseny representa, possiblement, el punt on la comparació és més desigual a favor de la nova tecnologia. Mentre que la construcció actual es troba inherentment limitada a formes principalment rectilínies pel cost prohibitiu i la complexitat dels encofrats corbs, la impressió 3D de formigó elimina aquestes restriccions mitjançant un procés de fabricació additiva que no requereix motlles.

Aquesta tecnologia permet crear formes orgàniques, corbes i estructures tipus reticular (lattice), sense que la complexitat geomètrica suposi un increment en el cost de producció.[6][7] En la impressió 3D, imprimir una paret amb una geometria complexa és operativament equivalent a imprimir un bloc recte, la qual cosa obre la porta a una "fabricació lean" on el disseny s'adapta totalment a la funció estructural i estètica.

Un altre avantatge disruptiu és la capacitat d'assolir la personalització massiva. Durant dècades, la indústria de la construcció ha intentat equilibrar la personalització amb l'economia d'escala, sovint recorrent a la prefabricació tradicional. No obstant això, per reduir costos, els elements prefabricats solen estar estandarditzats, limitant les opcions de disseny. La impressió 3D permet adaptar cada estructura a les necessitats específiques de l'usuari final sense sacrificar l'eficiència econòmica, ja que la màquina executa el model digital directament des del programari de disseny. [6][7]

Aquesta llibertat s'accentua amb l'ús de braços robòtics, que disposen de fins a sis graus de llibertat, que permet moviments i orientacions que els sistemes tradicionals de pòrtic o la mà d'obra manual no poden replicar amb la mateixa precisió.

A partir de les enquestes realitzades es van observar opinions diverses sobre les possibilitats de disseny que ofereix la impressió 3D en la construcció. Alguns participants la consideraven una tecnologia que aporta més flexibilitat i noves opcions de disseny, mentre que d'altres assenyalaven limitacions creatives i destacaven que és especialment adequada per a estructures de geometria simple i formes ortogonals.

Malgrat aquestes diferències, la majoria de les respostes apuntaven a que la impressió 3D pot facilitar la construcció d'estructures més complexes, gràcies a la seva capacitat per executar geometries difícils de materialitzar amb els sistemes constructius tradicionals.

En resum, la impressió 3D no només és més apta per a models complexos, sinó que democratitza el disseny arquitectònic avançat en reduir-ne els costos associats. Com s'ha vist en projectes reals com l'edifici 'Office of the Future' a Dubai o el pavelló 'TECLA' a Itàlia, aquesta tecnologia t'obre tot un nou món de possibilitats estètiques i funcionals que el model tradicional no pot igualar.

6 RESULTATS

Aquest apartat presenta un breu resum de les conclusions obtingudes sobre la comparació entre el model de construcció tradicional i el model d'impressió 3D. L'anàlisi exhaustiva de les dades recollides confirma que la impressió 3D de formigó s'ha consolidat com una alternativa superior en aquells projectes on la prioritat és la rapidesa d'execució, la sostenibilitat ambiental i la complexitat geomètrica.

6.1 Temps

Els resultats indiquen que aquesta tecnologia pot reduir el temps de construcció entre un 6% i un 88%, essent fins a un 50% més ràpida en processos totalment automatitzats.[10] Aquesta eficiència temporal es veu reforçada per la capacitat de la impressió 3D de materialitzar dissenys orgànics i estructures optimitzades topològicament sense els sobre costos que els encofrats especials imposarien en el model tradicional.

6.2 Sostenibilitat

La impressió 3D demostra un rendiment mediambiental molt més elevat que la construcció convencional. La naturalesa additiva del procés permet reduir residus de fins al 60% i un estalvi en el consum d'aigua d'un 20%. [8][11] A més, l'optimització de la quantitat de material dipositat té el potencial de reduir la petjada de carboni fins a un 50% en comparació amb els mètodes de la construcció tradicional. [13][14]

6.3 Economia

La viabilitat econòmica presenta una dualitat crítica. Si bé s'estima un estalvi de fins al 78% en els costos totals d'obra i un 60% en la mà d'obra directa, el cost dels materials especialitzats actua com una barrera significativa, podent ser entre un 44% i un 472% més car que el formigó estàndard.[5][10] Aquest factor, sumat a l'alta inversió inicial en maquinària que requereix almenys sis mesos d'ús continuat per ser amortitzada, fa que el model tradicional encara sigui més competitiu en projectes amb pressupostos de materials molt ajustats o d'escala reduïda.

6.4 Normativa

En darrer lloc, la manca de normes clares i regulacions acceptades globalment per a la inspecció i certificació d'aquestes estructures dificulta la seva generalització completa. Existeix també una incertesa sobre l'evolució i durabilitat a llarg termini d'aquestes estructures sota condicions ambientals reals. Per aquests motius, els resultats indiquen que, actualment, la impressió 3D ha d'actuar com un sistema híbrid o de suport conjuntament amb la

construcció tradicional, especialment en projectes de gran escala.

Finalment, podem veure en la taula 2, un resum de la comparació.

Aspecte	Construcció tradicional	Impressió 3D
Temps d'execució	Procés més lent i dependent de diverses fases constructives.	Execució més ràpida gràcies a l'automatització i l'eliminació de processos intermedis.
Sostenibilitat	Major consum de recursos i generació de residus.	Menor impacte ambiental, amb una millor optimització dels materials i dels recursos.
Economia	Menor inversió inicial però elevada dependència de mà d'obra.	Potencial d'estalvi en l'execució, tot i requerir una inversió inicial elevada i materials més especialitzats.
Normativa	Sistema plenament consolidat i regulat.	Tecnologia emergent amb limitacions normatives i necessitat de major validació a llarg termini.

Taula 2 Comparació: Construcció tradicional i Impressió 3D. (elaboració pròpia, amb l'ajut de les fonts dels apartats 5 i 6)

7 NORMATIVA

En detectar durant la comparació que la manca de regulació és una barrera crítica, resulta interessant analitzar el marc normatiu existent tant a escala internacional com nacional, així com la situació en altres països on aquesta tecnologia ja s'està implementant.

7.1 Normativa internacional

Actualment, no existeix una norma única global, però destaca la ISO/ASTM 52939:2023.[16] Aquesta norma estableix principis generals per a la qualificació, el control de qualitat i la verificació dels processos de fabricació additiva aplicats a elements estructurals i d'infraestructura. Aquests estàndards no constitueixen una regulació legal obligatòria, però proporcionen una base tècnica comuna que facilita la validació de nous sistemes constructius i contribueix a harmonitzar els criteris de qualitat i seguretat entre diferents països. En conseqüència, el panorama internacional actual es caracteritza per una transició progressiva des de l'absència d'una regulació específica cap a l'establiment de referències tècniques comunes que permetin garantir la fiabilitat i la seguretat de les construccions realitzades mitjançant impressió 3D.

7.2 Normativa a Espanya

El panorama normatiu a Espanya es defineix per l'absència d'una regulació específica per a la impressió 3D, obligant aquestes construccions a emparar-se en el marc general d'edificació residencial. Les peces clau d'aquest marc són la Llei d'Ordenació de l'Edificació (LOE) i el Codi Tècnic de l'Edificació (CTE).[17][18]

D'aquests, el CTE és el més determinant, ja que imposa les exigències bàsiques de seguretat estructural, habitabilitat i eficiència que qualsevol habitatge ha de satisfer. Per tant, un edifici imprès en 3D no es jutja per la tecnologia que s'ha fet servir, sinó per la seva capacitat de demostrar un nivell de prestacions equivalent al de la construcció tradicional.

En resum, la normativa espanyola no fiscalitza el "com" es construeix (la impressió), sinó el "què" s'obté, assegurant que el compliment dels requisits tècnics i de seguretat sigui tan exigent com en el model convencional.

7.3 Altres països

La implantació de la impressió 3D en la construcció varia considerablement entre països. Alguns estats han desenvolupat mecanismes específics que faciliten l'autorització de sistemes constructius innovadors.

Un dels casos més destacats és Alemanya, tot i que, com a Espanya, no té una llei específica per a la impressió 3D, el seu sistema regulador és més àgil a l'hora de validar tècniques innovadores mitjançant avaluacions tècniques individualitzades (com el mecanisme ZiE o Zulassung im Einzel-fall).[19]

Aquest model d'aprovació permet verificar que les noves estructures compleixen amb el mateix rigor que la construcció tradicional en termes de seguretat estructural, protecció contra incendis i eficiència energètica. Gràcies a aquestes eines de validació, Alemanya s'ha convertit en pionera a Europa en l'edificació residencial impresa.

En definitiva, el seu èxit no rau en una normativa més relaxada, sinó en la possessió de protocols més eficaços per certificar la seguretat de les tecnologies emergents.

Analitzades les normatives podem concloure que:

Transició cap a l'estandardització: Tot i l'absència d'una llei global, l'aparició de la norma ISO/ASTM 52939:2023 marca l'inici d'un control de qualitat unificat, passant d'un buit legal a una fase d'estandardització tècnica.

Regulació basada en prestacions: La majoria dels marcs normatius actuals no regulen específicament la impressió 3D, sinó que exigeixen que les construccions compleixin els mateixos requisits de seguretat, habitabilitat i eficiència que les edificacions convencionals.

Mecanismes d'agilitat: L'exemple d'Alemanya demostra que l'èxit de la impressió 3D depèn de tenir protocols de validació individual (com el ZiE) que permetin certificar la seguretat de sistemes innovadors abans que existeixi una norma general.

En definitiva, la seguretat jurídica és el darrer obstacle per a la massificació de la tecnologia.

8 EXEMPLES I FUTUR DE LA IMPRESSIÓ 3D EN LA CONSTRUCCIÓ

8.1 Exemples arreu del món

Per a veure que aquesta tecnologia és una opció real, mostrem uns exemples dels projectes que s'han portat a terme en la vida real:

Wolf Ranch (Austin, Texas, EUA): Aquest projecte, desenvolupat per l'empresa ICON en col·laboració amb Lennar i co-dissenyat per l'estudi d'arquitectura BIG, es proposa com la comunitat d'habitatges impresos en 3D més gran del món amb un total de 100 cases.

La seva execució mitjançant sistemes de pòrtic de gran escala demostra la capacitat de la tecnologia per transicionar des d'habitatges aïllats fins a la producció massiva de barris complets, optimitzant els terminis en el sector residencial.[6] La imatge sobre aquest projecte la podem trobar en la il·lustració 5 a l'apèndix del treball.

Haus Beckum (Beckum, Alemanya): Construïda el 2021 per l'empresa PERI, aquesta casa unifamiliar representa el primer edifici residencial imprès en 3D d'Alemanya. El projecte es va realitzar mitjançant una estratègia d'impressió in situ amb segmentació horitzontal, utilitzant la impressora de pòrtic BOD2 del fabricant COBOD.

Aquest cas és especialment rellevant per haver validat la tecnologia sota els estrictes estàndards i normatives d'edificació alemanys.[6] La imatge sobre aquest projecte la podem trobar en la il·lustració 6 a l'apèndix del treball.

Barri de 50 cases a Nacajuca (Mèxic): En un context de cooperació humanitària, la col·laboració entre ICON, New Story i ÉCHALE va permetre edificar una comunitat de 50 habitatges resilents per a famílies en situació de vulnerabilitat. Aquests habitatges van ser dissenyats específicament per oferir seguretat estructural davant fenòmens naturals i s'erigeixen en un model de solució ràpida i eficient davant el dèficit global d'habitatge social.[6]

TECLA (Massa Lombarda, Itàlia): Dissenyat per l'empresa WASP, TECLA és un prototip d'habitatge eco-sostenible imprès íntegrament amb materials basats en argila i sòls locals. La seva característica geometria de cúpula corba i el procés d'impressió de baix impacte ambiental subratllen la llibertat de disseny de la impressió 3D i la seva capacitat per utilitzar recursos naturals i biodegradables de l'entorn immediat.[6]

Es pot contemplar una imatge d'aquest projecte en la il·lustració 4.



Il·lustració 4 Habitatge TECLA [13]

8.2 Futur de la impressió 3D en la construcció

El futur de la impressió 3D en el sector de la construcció es preveu com una transició cap a la "Construcció 4.0", on la tecnologia passarà de projectes aïllats a una implementació massiva i estandarditzada.

Es pot preveure que la integració total amb el disseny digital (BIM) permetrà una personalització massiva sense incrementar costos, mentre que l'ús de materials més sostenibles, com els geopolímers o àrids reciclats, reduirà dràsticament l'impacte ambiental de l'obra.

Tot i que encara s'han de resoldre reptes crítics com l'automatització del reforç estructural i la creació de marcs normatius globals, la impressió 3D es proposa com la solució clau per resoldre el dèficit d'habitatge social i oferir refugis ràpids en situacions d'emergència.

En definitiva, el futur més immediat no planteja una substitució total, sinó un model híbrid on la impressió 3D i els mètodes tradicionals conviuran per assolir edificis més eficients, segurs i econòmics. [5][13][14]

9 CONCLUSIÓ

En aquest treball s'han assolit els objectius proposats mitjançant una anàlisi crítica de la impressió 3D com a model constructiu alternatiu. A través de la literatura científica, s'ha constatat que malgrat les limitacions tècniques actuals, aquesta tecnologia presenta avantatges competitius significatius, especialment en la sostenibilitat, que la posicionen com una eina de suport indispensable per al model tradicional en l'actual fase de transició.

Per una altra banda, les entrevistes realitzades a arquitectes del Col·legi d'arquitectes de Catalunya (COAC), han posat de manifest matisos rellevants. Tot i que no existeixen barreres estructurals que impossibilitin la construcció d'elements urbans com ponts o mobiliari urbà, les dimensions de la maquinària actual en dificulten la implementació logística en entorns urbans consolidats. No obstant això, l'evolució cap a equips més compactes permetrà, a llarg termini, una integració més fluida en la trama urbana. Igualment, s'ha evidenciat en les entrevistes, que la impressió 3D podria ser eficaç en contextos d'emergència o de necessitat social, com l'habitatge assequible, escenaris

de postguerra o catàstrofes recents com la DANA a València, on la immediatesa i l'eficiència són prioritàries. Malgrat això, la seva rendibilitat en l'edificació individual encara requereix una maduració tecnològica per esdevenir una alternativa de mercat masiva.

En definitiva, he pogut comprovar que aquest model es troba en ple procés d'evolució. A mesura que es perfeccionin els aspectes tècnics i logístics pendents, la impressió 3D té el potencial de consolidar-se com una alternativa altament sostenible i eficient enfront del model de construcció convencional. Paral·lelament, penso que també serà necessari avançar en l'àmbit normatiu, ja que l'absència de regulacions específiques continua representant una barrera per a la implantació generalitzada d'aquesta tecnologia.

AGRAÏMENTS

Al tutor: Gràcies, Xavier, pel seguiment del treball, les idees proposades per a un millor enfocament i per la resolució de dubtes que han anat sorgint al llarg del treball.

A la família i amics: Gràcies pel suport constant i recolçament durant el treball.

A la Universitat: Gràcies pels coneixements rebuts durant la carrera.

Als arquitectes entrevistats: Gràcies pel seu temps i els seus coneixements, que em van ajudar a millorar parts del treball i aportacions sobre nous enfocaments pel futur. Especialment, gràcies, Begoña Rull, que va ser el principal contacte per a després poder realitzar aquestes dues entrevistes entre diferents grups d'arquitectes de diferents edats.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Addis, W. (2007). Building: 3000 years of design, engineering and construction. Phaidon Press.
- [2] Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry.
- [3] Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research.
- [4] Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing.
- [5] Banihashemi, S., Akbarnezhad, A., Sheikhhoshkar, M., et al. (2025). 3D printing in construction: sustainable technology for building industry. *Progress in Additive Manufacturing*, 10, 11729-11762.
- [6] Placzek, G., & Schwerdtner, P. (2024). A global snapshot of 3D-printed buildings: uncovering robotic-oriented fabrication strategies.
- [7] Puzatova, A., Shakor, P., Laghi, V., & Dmitrieva, M. (2022). Large-Scale 3D Printing for Construction Application by Means of Robotic Arm and Gantry 3D Printer: A Review.
- [8] Ji, C., & Zhao, Z. (2024). Life Cycle Assessment of 3D Printed Recycled Concrete. *Proceedings of the International Conference on Construction, Civil Engineering and Smart Energy Management (CCSEm 2024)*.
- [9] Agegn, A. A., Regassa, Y., Angassa, K., & Mekonnen, K. N. (2026). Systematic review on 3D concrete printing technology: breakthroughs and challenges.
- [10] Placzek, G., Dahlberg, M., Thormählen, J., & Schwerdtner, P. (2025). How productive is 3D concrete printing? A systematic

- review. In Proceedings of the Creative Construction Conference (CCC 2025).
- [11] Heywood, K., & Nicholas, P. (2023). Sustainability and 3D concrete printing: identifying a need for a more holistic approach to assessing environmental impacts.
 - [12] Strohle, M., Sadique, M., Dulaimi, A., & Kadhim, M. A. (2022). Prospects and barriers of 3D concrete printing: a systematic review.
 - [13] Alami, A. H., Olabi, A. G., Ayoub, M., Aljaghoub, H., Alasad, S., & Abdelkareem, M. A. (2023). 3D concrete printing: recent progress, applications, challenges, and role in achieving sustainable development goals.
 - [14] Zhuang, Z., Xu, F., Ye, J., Hu, N., Jiang, L., & Weng, Y. (2024). A comprehensive review of sustainable materials and toolpath optimization in 3D concrete printing.
 - [15] Girskas, G., & Kligys, M. (2025). 3D concrete printing review: equipment, materials, mix design, and properties.
 - [16] International Organization for Standardization (ISO) & ASTM International. (2023). ISO/ASTM 52939:2023. Additive manufacturing for construction — Qualification principles — Structural and infrastructure elements.
 - [17] Gobierno de España. (1999). Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE). Boletín Oficial del Estado.
 - [18] Ministerio de la Presidencia. (2006). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE). Boletín Oficial del Estado.
 - [19] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). (s. f.). The German regulatory system for construction products and construction techniques.

APÈNDIX

A1. APÈNDIX TEÒRIC

Continuitat tangencial: en impressió 3D es refereix a la transició suau i sense angles entre dues superfícies o línies de capa.

Bombabilitat: capacitat del material per ser transportat a través de les mànegues sense segregació ni obstruccions.

Extrudibilitat: capacitat del material per ser dipositat de manera contínua a través del broquet.

Constructibilitat: capacitat del material fresc per mantenir la seva forma i suportar les capes superiors sense deformacions.

Estructures reticulars(lattice): Són estructures internes formades per una xarxa tridimensional de cel·les repetitives interconnectades, utilitzades en impressió 3D per reduir el pes i el consum de material de les peces, mantenint-ne les propietats mecàniques essencials.

A2. IMATGES



Il·lustració 5 Projecte Wolf Ranch [6]



Il·lustració 6 Haus Beckum [6]

A3. ENTREVISTES

A3.1 Guió de l'entrevista

(Breu presentació dels entrevistats)

- Creus que hi poden haver millores en el sector de la construcció? Quines?

- Esteu familiaritzats amb la impressió 3D?
- Sabeu d'algun cas on s'hagi implementat aquesta tecnologia en la construcció?

(Es va realitzar una breu explicació de conceptes sobre la impressió 3D en la construcció amb l'objectiu d'entendre millor aquesta tecnologia, donat que no havien sentit a parlar gaire de la impressió 3D.)

- Que opineu de la impressió 3D en la construcció?

- Us sembla un model complex?

- Creieu que pot ajudar/millorar al model actual?

- Creieu que la impressió 3D té futur en el sector de la construcció?

- Us sembla una bona alternativa per millorar el model actual?

(A continuació, es va fer un apartat de preguntes extra per a temes no tant teòrics)

- Com a arquitectes, trobeu més còmode treballar amb una impressora que amb mà d'obra?

- Teniu constància de que en la carrera d'arquitectura es faci alguna assignatura sobre la impressió 3D?

- Per finalitzar, us fariem de viure en una vivienda impressa en 3D?

Les entrevistes van seguir l'ordre estructurat del guió, tot i que a mesura que avançaven, es van generar debats que van portar a tractar temes no previstos inicialment, però d'un gran interès i que van aportar informació rellevant pel treball.

A3.2 Resultats

S'han realitzat diferents enquestes a diferents arquitectes, per veure el punt de vista desde aquest camp del sector de la construcció. Aquestes entrevistes s'han realitzat en grups de 3 a 4 persones, per compartir idees i pensaments en conjunt, i així, poder generar un debat que ens portes a temes més diversos als previstos en el guió original.

Els entrevistats coincideixen que la impressió 3D representa una millora substancial en l'eficiència del model actual, especialment pel que fa a la rapidesa d'execució i a la introducció de personal qualificat, un recurs que actualment escasseja.

Es destaca la fiabilitat del procés automatitzat, que minimitza l'error humà i permet prescindir d'encofrats i juntes. Logísticament, es valora molt positivament la capacitat de traslladar la "fàbrica" (la impressora) directament a l'obra. Tot i això, es detecten limitacions clares:

Àmbit d'aplicació: Es considera ideal per a habitatge social, processos repetitius o situacions d'emergència, però menys viable per a habitatges particulars complexos o zones urbanes denses com Barcelona per les dimensions de la maquinària.

Integració tècnica: Existeixen dubtes sobre com integrar les instal·lacions i tancaments de forma totalment automatitzada.

En conclusió, els professionals veuen la impressió 3D com una alternativa real de futur que ja s'està introduint en la formació universitària, tot i que encara ha de madurar i obtenir certificacions oficials per generar una confiança total en el mercat.