



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

Document:

Memòria

Autor/Autora:

Daniel Jiménez Colomer

Director/Directora - Codirector/Codirectora:

Lluís Gil Espert

Titulació:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Convocatòria:

Quadrimestre de Primavera, 2021-2022

TREBALL DE FI D'ESTUDIS

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria donar les gràcies al meu tutor, Lluís Gil Espert, per donar-me la oportunitat i constant suport per realitzar aquest estudi com a treball de fi de grau.

També m'agradaria agrair al Evarist Tardio, que m'ha ajudat en tot moment en el laboratori realitzant conjuntament les diferents proves experimentals i a les persones que formen part del departament de resistència de materials que han mostrat sempre disposició per ajudar i col·laborar en el treball.

Finalment agrair a la família per la confiança que han dipositat en mi en tot moment.

Resum

El sector de la construcció està patint des de fa cert temps una revolució tecnològica com a resposta als grans desavantatges mediambientals i metodològics que presenten els mètodes tradicionals actuals. La tecnologia additiva o impressió 3D és una de les vies més atractives per substituir la metodologia de construcció actual a causa del gran ventall d'avantatges que presenta de forma teòrica. Tot i això, la tecnologia encara es troba en procés d'estudi i presenta pocs treballs experimentals on s'han realitzat construccions de cases, murs o peces de formigó.

Aquest estudi té com a principal objectiu ajudar a la evolució tecnològica d'aquest sector estudiant la dosificació d'aigua, additius i metodologia de mescla que necessita un formigó sec pensat per imprimir per controlar el seu procés de construcció.

Primerament es realitzarà un estudi bibliogràfic sobre la impressió 3D, el comportament del formigó i les propietats necessàries que ha de presentar al imprimir. Un cop conegudes, es procedirà a dissenyar assajos experimentals per estudiar aquestes propietats amb la mescla de ciment variant la dosificació d'aigua, additius i metodologia de mescla.

Finalment es realitzaran les proves i s'analitzaran els resultats obtinguts per determinar quina és la millor metodologia de mescla i dosificació d'aigua i additius perquè es puguin fer de forma controlada construccions de formigó amb metodologia additiva.

A partir dels resultats obtinguts s'ha determinat que el material d'estudi amb una relació aigua/ciment de 0,16 i amb una metodologia de mescla de curta duració és la solució que presenta un comportament més òptim en tot el procés d'impressió. Tot i això, amb les proves finals, relacionades amb la impressió de capa, el material es veu amb la necessitat, en condicions de pes rellevant, de millorar la seva consistència.

Abstract

The construction sector has been happened a technological revolution for some time in response to the great environmental and methodological disadvantages of traditional methods. Additive technology or 3D printing is one of the most attractive ways to replace the current construction methodology due to the wide range of advantages that this method theoretically has over current ones. However, the technology is still under study and there is few experimental works on the construction of houses, walls or concrete pieces.

The main objective of this study is to help the technological evolution of this sector by studying the dosing of water, additives and mixing methodology that needs a dry concrete designed to print to control its construction process.

Firstly, a bibliographic study is carried out on 3D printing, the behavior of concrete and the necessary properties that it must present when printing. Then, experimental tests will be designed to study these properties with the cement mixture changing the dosage of water, additives and mixing methodology.

Finally, the tests will be performed and the results obtained will be analyzed to determine the best methodology for mixing and dosing water and additives so that concrete constructions with additive methodology can be made in a controlled manner.

Based on the results obtained, it has determined that the material with a water/cement ratio of 0.16 and a short-lived mixing methodology is the solution that has a more optimal performance throughout the printing process. However, with the final tests, related to the printing of the layer, the material is seen with the need, in conditions of relevant weight, to improve its consistency.

Índex

AGRAÏMENTS	2
RESUM	3
ABSTRACT	3
ÍNDEX	5
ÍNDEX DE TAULES	9
ÍNDEX DE FIGURA	10
LLISTA D'ABREVIATURES/GLOSSARI	14
1. INTRODUCCIÓ	15
1.1. OBJECTE	15
1.2. ABAST	15
1.3. REQUERIMENTS	16
1.4. JUSTIFICACIÓ	16
2. ESTAT DE L'ART	17
2.1. IMPRESSIÓ 3D CONVENCIONAL	17
2.1.1. <i>En què consisteix la impressió 3D?</i>	17
2.1.2. <i>Funcionament genèric de la impressió 3D</i>	17
2.1.3. <i>Tecnologies de la impressió 3D</i>	17
2.1.4. <i>Materials utilitzats en les tecnologies d'impressió 3D</i>	21
2.1.5. <i>Avantatges i desavantatges de la fabricació additiva</i>	22
2.2. IMPRESSIÓ 3D DINS DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓ	23
2.2.1. <i>Procediment d'impressió 3D en la construcció</i>	24
2.2.2. <i>Tecnologies de la impressió 3D en la construcció</i>	25
2.2.3. <i>Aplicacions de la impressió 3D en la construcció</i>	27
2.2.4. <i>Materials de la impressió 3D en la construcció</i>	28
2.2.5. <i>Beneficis de la impressió 3D en la construcció</i>	29
3. FORMIGÓ CONVENCIONAL	29
3.1. INTRODUCCIÓ	29
3.2. MATERIALS QUE CONSTITUEIXEN EL FORMIGÓ	30
3.2.1. <i>Ciment</i>	30
3.2.1.1. <i>Elements que componen el ciment</i>	30
3.2.1.2. <i>Procés d'obtenció del ciment</i>	31
3.2.1.3. <i>Tipus de ciment</i>	33
3.2.2. <i>Àrids granulats</i>	34

3.2.3.	<i>Aigua</i>	34
3.2.4.	<i>Additiu</i>	34
3.3.	HIDRATACIÓ DEL CIMENT PÒRTLAND	35
3.4.	FACTORS QUE INFLUEIXEN EN LA FRAGUAT DEL FORMIGÓ	40
4.	PROPIETATS DEL FORMIGÓ EN IMPRIMIR	42
4.1.	INTRODUCCIÓ	42
4.2.	PROPIETATS DEL FORMIGÓ FRESC	42
4.2.1.	<i>Treballabilitat</i>	42
4.2.2.	<i>Extrudibilitat</i>	47
4.2.2.1.	<i>Bombament</i>	48
4.2.2.1.1.	<i>Composició de la mescla</i>	48
4.2.2.1.2.	<i>Bloquejos</i>	49
4.2.3.	<i>Temps obert</i>	49
4.2.4.	<i>Edificabilitat</i>	50
4.2.4.1.	<i>Limitació d'edificabilitat per falta de resistència de la capa</i>	50
4.2.4.2.	<i>Limitació d'edificabilitat per falta de adherència entre capes</i>	52
4.2.5.	<i>Qualitat d'extrusió</i>	52
5.	PROCEDIMENT EXPERIMENTAL	53
5.1.	INTRODUCCIÓ	53
5.2.	MESCLES DE CIMENT, EQUIPS I MATERIALS UTILITZATS	53
5.2.1.	<i>Mescles de ciment</i>	53
5.2.1.1.	<i>Tector 3D Build</i>	53
5.2.1.2.	<i>Altres mescles de ciment</i>	54
5.2.2.	<i>Equips i materials utilitzats</i>	55
5.2.2.1.	<i>Equips i materials per la realització de la mescla</i>	55
5.2.2.2.	<i>Equips i materials per la realització de les proves</i>	56
5.2.2.2.1.	<i>Prova de treballabilitat</i>	56
5.2.2.2.2.	<i>Prova d'extrudibilitat</i>	57
5.2.2.2.3.	<i>Prova de temps obert, d'edificabilitat i de qualitat d'extrusió</i>	58
5.3.	ASSAJOS EXPERIMENTALS	59
5.3.1.	<i>Prova de treballabilitat</i>	59
5.3.1.1.	<i>Objectiu</i>	59
5.3.1.2.	<i>Assajos de consistència: con d'Abrams i mesurador de plasticitat</i>	59
5.3.1.2.1.	<i>Con d'Abrams</i>	59
5.3.1.2.2.	<i>Mesurador de plasticitat</i>	62
5.3.1.3.	<i>Metodologia de la prova</i>	65
5.3.1.3.1.	<i>Metodologia de la mescla</i>	65
5.3.1.3.2.	<i>Metodologia de la prova de treballabilitat</i>	65

5.3.2.	<i>Prova d'extrudibilitat</i>	66
5.3.2.1.	<i>Objectiu</i>	66
5.3.2.2.	<i>Comportament del material al circular pel sistema de subministrament</i>	67
5.3.2.2.1.	<i>Subministrament de material</i>	67
5.3.2.2.2.	<i>Bomba</i>	67
5.3.2.2.3.	<i>Circulació del material per la mànega</i>	68
5.3.2.2.3.1.	<i>Estudi d'un flux completament desenvolupat en una mànega de secció circular</i>	68
5.3.2.2.3.2.	<i>Estudi del flux de Bingham</i>	70
5.3.2.3.	<i>Metodologia de la prova</i>	74
5.3.3.	<i>Prova de qualitat d'extrusió</i>	75
5.3.3.1.	<i>Objectiu</i>	75
5.3.3.2.	<i>Metodologia de la prova</i>	75
5.3.4.	<i>Prova de temps obert</i>	75
5.3.4.1.	<i>Objectiu</i>	75
5.3.4.2.	<i>Metodologia de la prova</i>	75
5.3.5.	<i>Prova d'edificabilitat</i>	76
5.3.5.1.	<i>Objectiu</i>	76
5.3.5.2.	<i>Metodologia de la prova</i>	76
6.	ANÀLISIS DELS RESULTATS EXPERIMENTALS	76
6.1.	INTRODUCCIÓ	76
6.2.	RESULTATS PROVA DE TREBALLABILITAT	76
6.2.1.	<i>Prova en cubell de 28L i utilització de Con d'Abrams o mesurador de plasticitat</i>	76
6.2.1.1.	<i>Variació dosificació d'aigua</i>	77
6.2.1.2.	<i>Inconvenients trobats en la metodologia de la prova</i>	79
6.2.2.	<i>Prova en 6 cubells de 8L i utilització de mesurador de plasticitat</i>	80
6.2.2.1.	<i>Modificació de la metodologia de mescla i verificació de la tercera metodologia de treballabilitat</i>	80
6.2.2.2.	<i>Remesclar la mescla</i>	81
6.2.2.3.	<i>Utilització d'additius</i>	82
6.2.2.4.	<i>Comparació amb altres mescles de ciment</i>	83
6.3.	RESULTATS PROVA D'EXTRUDIBILITAT.....	85
6.3.1.	<i>Cas d'una mescla amb relació d'aigua/ciment de 0,17</i>	86
6.3.2.	<i>Cas d'una mescla amb relació d'aigua/ciment de 0,16</i>	89
6.4.	RESULTATS PROVA DE QUALITAT D'EXTRUSIÓ	91
6.5.	RESULTATS PROVA DE TEMPS OBERT	94
6.6.	RESULTATS DE LA PROVA D'EDIFICABILITAT	97
7.	SELECCIÓ DE DOSIFICACIÓ I METODOLOGIA DE MESCLA DEL MATERIAL TECTOR 3D BUILD	98
8.	RESUM DEL PRESSUPOST I/O ESTUDI DE VIABILITAT ECONÒMICA	99

**Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per
a la seva impressió 3D**

9.	ANÀLISI I VALORACIÓ DE LES IMPLICACIONS AMBIENTALS I SOCIALS	99
10.	CONCLUSIONS.....	100
11.	AMPLIACIÓ DE L'ESTUDI.....	102
12.	REFERÈNCIES.....	103

Índex de taules

TAULA 1. MATERIALS MÉS UTILITZATS EN LES DIFERENTS TECNOLOGIES D'IMPRESSIÓ 3D [5].....	22
TAULA 2. EXEMPLES D'APLICACIONS REALITZADES AMB LES DIFERENTS TÈCNiques D'IMPRESSIÓ EN LA CONSTRUCCIÓ [8]	28
TAULA 3. CARACTERÍSTIQUES DELS DIFERENTS COMPOSTOS QUE CONFORMEN EL CLÍNQUER [26]	32
TAULA 4. CLASSIFICACIÓ DELS DIFERENTS TIPUS DE CIMENT [26]	33
TAULA 5. MESCLES DE CIMENT SEC UTILITZADES PER LES PROVES DE TREBALLABILITAT	55
TAULA 6. CONJUNT DE MATERIALS I EQUIPS UTILITZATS PER LA BARREJA DEL MATERIAL DE CIMENT AMB L'AIGUA.....	56
TAULA 7. CONJUNT DE MATERIALS I EQUIPS UTILITZATS PER LA PROVA DE TREBALLABILITAT	57
TAULA 8. CONJUNT DE MATERIALS I EQUIPS UTILITZATS PER LA PROVA D'EXTRUDIBILITAT	58
TAULA 9. CONJUNT DE MATERIALS I D'EQUIPS UTILITZATS PER LA PROVA DE TEMPS OBERT, EDIFICABILITAT I QUALITAT D'EXTRUSIÓ	59
TAULA 10. CLASSIFICACIÓ DELS RESULTATS DE LA PROVA DEL CON D'ABRAMS SEGONS LA SEVA CONSISTÈNCIA [55].....	62
TAULA 11. RESULTATS DE LA PROVA DE TREBALLABILITAT, UTILITZANT LA METODOLOGIA DE PROVA 1 I 2 I VARIANT LA DOSIFICACIÓ D'AIGUA	77
TAULA 12. RESULTATS DE LA PROVA DE TREBALLABILITAT, UTILITZANT LA METODOLOGIA DE PROVA 1 I VARIANT LA DOSIFICACIÓ D'AIGUA NOMÉS EN UNA RELACIÓ AIGUA/CIMENT 0,16; 0,17 I 0,18.....	78
TAULA 13. RESULTATS DE LA PROVA DE TREBALLABILITAT UTILITZANT LA METODOLOGIA DE LA PROVA 3 I VARIANT LA METODOLOGIA DE LA MESCLA.....	80
TAULA 14. RESULTATS DE LA PROVA DE TREBALLABILITAT DE TRES REPOSOS AMB LA MATEIXA MESCLA UTILITZANT LA METODOLOGIA DE LA PROVA 3, UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17 I METODOLOGIA DE LA MESCLA 2.	81
TAULA 15. RESULTATS DE LA CONSISTÈNCIA DE LA MESCLA A L'INICI I AL FINAL DE LA BARREJA UTILITZANT LA METODOLOGIA DE LA MESCLA 2 I UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17.	81
TAULA 16. RESULTATS DE LA PROVA DE TREBALLABILITAT UTILITZANT LA METODOLOGIA DE LA PROVA 3, UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17, METODOLOGIA DE LA MESCLA 2 I UTILITZANT ACCELERANT ...	83
TAULA 17. RESULTATS DE LA PROVA DE TREBALLABILITAT COMPARANT DIFERENTS MESCLES DE CIMENT UTILITZANT LA METODOLOGIA DE LA PROVA 3 I LA METODOLOGIA DE LA MESCLA 1	84
TAULA 18. RESULTATS DE LA PROVA D'EXTRUDIBILITAT DE DUES MESCLES AMB UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17 I 0,16.....	85
TAULA 19. COMPARACIÓ DELS RESULTATS TEÒRICS I EXPERIMENTALS DEL CABAL AMB UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17	88
TAULA 20. COMPARACIÓ DELS RESULTATS TEÒRICS I EXPERIMENTALS DEL CABAL AMB UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,16	90
TAULA 21. RESULTATS DE LA PROVA DE QUALITAT D'EXTRUSIÓ	93
TAULA 22. ERROR COMÉS EN LA PROVA DE QUALITAT D'EXTRUSIÓ.....	93
TAULA 23. ERROR COMÉS EN LA PROVA DE TEMPS OBERT	95
TAULA 24. RESULTATS DE LA PROVA D'EDIFICABILITAT.....	97

Índex de figura

FIGURA 1. FUNCIONAMENT GENÈRIC DE LA IMPRESSIÓ 3D [3]	17
FIGURA 2. ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT DE LA TECNOLOGIA D'IMPRESSIÓ 3D EXTRUSIÓ DE MATERIAL [5].	18
FIGURA 3. ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT DE LA TECNOLOGIA D'IMPRESSIÓ 3D FOTOPOLIMERITZACIÓ EN TANC [5]	19
FIGURA 4. ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT DE LA TECNOLOGIA D'IMPRESSIÓ 3D FUSIÓ DE LLIT DE POLS [5] ...	19
FIGURA 5. ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT DE LA TECNOLOGIA D'IMPRESSIÓ 3D MATERIAL JETTING [5]	20
FIGURA 6. ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT DE LA TECNOLOGIA D'IMPRESSIÓ 3D BLINDER JETTING [5]	20
FIGURA 7. ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT DE LA TECNOLOGIA D'IMPRESSIÓ 3D DEPOSICIÓ D'ENERGIA DIRIGIDA [5]	21
FIGURA 8. ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT DE LA TECNOLOGIA D'IMPRESSIÓ 3D FABRICACIÓ D'OBJECTES LAMINATS [5]	21
FIGURA 9. FACTORS A TENIR EN COMPTE DE LA IMPRESSIÓ 3D EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓ [8]	24
FIGURA 10. ESQUEMA DEL PROCEDIMENT D'IMPRESSIÓ 3D [9]	25
FIGURA 11. (A) FIGURA D'IMPRESSORA COUNTOUR CRAFTING EN EL PROCÉS D'IMPRESSIÓ (B) FIGURA DE LA EXTRUSOR CARACTERÍSTICA DE LA IMPRESSIÓ COUNTOUR CRAFTING (C) FIGURA OMLINT AMB FORMIGÓ UNA ESTRUCTURA REALITZADA AMB LA TECNOLOGIA COUNTOUR CRAFTING [10][11][12]	25
FIGURA 12. IMPRESSIÓ DE PEÇA EN FORMA DE LA LLETRA A AMB LA TECNOLOGIA CONCRETE PRINTING [20]	26
FIGURA 13. IMPRESSIÓ AMB LA TECNOLOGIA D-SHAPE AMB LA MOSTRA D'UNA PEÇA REALITZADA AMB AQUESTA TÈCNICA [21]	26
FIGURA 14. COMPARACIÓ GRÀFICA DE LES TRES TÈCNiques PRINCIPALS D'IMPRESSIÓ EN LA CONSTRUCCIÓ [8]	27
FIGURA 15. ESQUEMA OBTENCIÓ DEL CIMENT PORTLAND [24]	31
FIGURA 16. MICROSCÒPIA DEL CLÍNQUER ON ES SENYALEN ELS DIFERENTS COMPONENTS QUE EL FORMEN [25]	32
FIGURA 17. APORTACIÓ DE RESISTÈNCIA DEL CLÍNQUER DES DE L'INICI DE LA REACCIÓ D'HIDRATACIÓ[27] ..	32
FIGURA 18. GRÀFICA DE LES DIFERENTS ETAPES DE LA REACCIÓ D'HIDRATACIÓ [31]	35
FIGURA 19. PARTÍCULA DE CIMENT ABANS DE REACCIONAR AMB L'AIGUA [30]	36
FIGURA 20. REPRESENTACIÓ DE LA DISSOLUCIÓ DEL SILICAT TRICÀLCIC QUAN REACCIONA AL AIGUA [29]	36
FIGURA 21. PARTÍCULA DE CIMENT DURANT L'ETAPA DE PREINDUCCIÓ [30]	37
FIGURA 22. REPRESENTACIÓ ESQUEMÀTICA DEL MECANISME DISSOLUCIÓ-PRECIPITACIÓ EN LA HIDRATACIÓ DEL C3S, FORMANT CSH. (A) DESPRÉS DE 1 SEGON (B) DESPRÉS DE 1 MINUT (C) DESPRÉS DE 1 HORA [29]	37
FIGURA 23. PARTÍCULA DE CIMENT DURANT LA ETAPA DE INDUCCIÓ [30]	37
FIGURA 24. FORMACIÓ DE PORTLANDITA I CSH AL VOLTANT DE LES PARTÍCULES DE CIMENT [29]	38
FIGURA 25. PARTÍCULA DE CIMENT DURANT LA ETAPA D'ACCELERACIÓ [30]	38
FIGURA 26. PARTÍCULA DE CIMENT DURANT L'ETAPA DE DESACCELERACIÓ [30]	39
FIGURA 27. PARTÍCULA DE CIMENT DURANT L'ETAPA DE DIFUSIÓ [30]	39
FIGURA 28. GRÀFIC DE L'OBTENCIÓ DE RIGIDESA DEL FORMIGÓ RESPECTE AL TEMPS INDICANT LES DIFERENTS ETAPES D'HIDRATACIÓ DES D'UN PUNT DE VISTA MECÀNIC [9]	40

FIGURA 29. . ESQUEMA DEL COMPORTAMENT DEL FORMIGÓ AL PAS DEL TEMPS DES D'UN PUNT DE VISTA MECÀNIC [34]	40
FIGURA 30. GRÀFICA TENSÍO-DEFORMACIÓ I L'EQUACIÓ D'UN FLUID BINGHAM [40].....	43
FIGURA 31. GRÀFICA TENSÍO-DEFORMACIÓ I EQUACIÓ D'UN FLUID AMB COMPORTAMENT HERSCHEL-BULKLEY [35]	44
FIGURA 32. GRÀFICA TENSÍO-DEFORMACIÓ DE TRES CIMENTES DIFERENTS (CONVENCIONAL, AUTOCOMPACTANT I D'ALT RENDIMENT) [35]	44
FIGURA 33. GRÀFICA TENSÍO DE TALL-TEMPS ON S'OBSERVA EL COMPORTAMENT TIXOTROPIC DEL FORMIGÓ [9]	45
FIGURA 34. XARXA DE PARTÍCULES DE CIMENT QUE INTERACTUEN EN EL PERÍODE DE LATÈNCIA. (A) LES PARTÍCULES DE CIMENT ES DISPENSEN AL FINAL DE LA FASE DE BARREJA; (B) UN PARELL DE SEGONS DESPRÉS DEL FINAL DE LA BARREJA, LES PARTÍCULES DE CIMENT FLOCULEN FORMANT UNA XARXA FILTRADA D'INTERACCIONS COL·LOÏDALS. LES PARTÍCULES MÉS FOSQUES PERTANYEN A UN CAMÍ DE PERCOLACIÓ. ALS PUNTS DE PSEUDO-CONTACTE ENTRE PARTÍCULES, LA NUCLEACIÓ DE CSH (PUNTS BLANCS I NEGRES) COMENÇA IMMEDIATAMENT A CONVERTIR LOCALMENT LA INTERACCIÓ COL·LOÏDAL ENTRE LES PARTÍCULES DE CIMENT EN UNA INTERACCIÓ MOLT MÉS RÍGIDA; (C) TOTES LES PARTÍCULES EN EL CAMÍ DE PERCOLACIÓ (PARTÍCULES NEGRES) ESTAN UNIDES PER PONTS CSH QUE FORMEN UNA XARXA RÍGIDA DEL MATERIAL; (D) EL MÒDUL D'ELASTICITAT DE LA BARREJA CONTINUA AUGMENTANT A MESURA QUE AUGMENTA LA MIDA DELS PONTS CSH (PUNTS NEGRES I BLANCS) [37].....	46
FIGURA 35. PONT CSH ENTRE DOS GRANS DE CIMENT [37].....	46
FIGURA 36. VISUALITZACIÓ DELS ASPECTES MES IMPORTANTS DE LA TEORIA PFI [38]	47
FIGURA 37. GRÀFICA TENSÍO-DEFORMACIÓ DEL COMPORTAMENT TIXOTROPIC I DE BINGHAM DEL FORMIGÓ [39]	47
FIGURA 38. FIGURA DEL BLOQUEIG D'UNA CANONADA DEGUT A LA ACUMULACIÓ D'ÀRID [40].....	49
FIGURA 39. EVOLUCIÓ DEL LÍMIT ELÀSTIC D'UNA CAPA DE FORMIGÓ EN EL MOMENT QUE ES DIPOSITA [43]...	50
FIGURA 40. EXTRUSIÓ I DEPOSICIÓ D'UNA CAPA DE ESPESSOR h_0 SOBRE EL PLA [37]	51
FIGURA 41. FABRICACIÓ ADDITIVA PER EXTRUSIÓ D'UN MUR D'ALTURA H. LA FIGURA MOSTRA LES DIFERENTS CAPES QUE CONFORMEN LA PEÇA ON LES TONALITATS GRISES REPRESENTEN EL TEMPS QUE HA ESTAT EL MATERIAL DIPOSITAT (CONTRA MÉS TEMPS MÉS FOSC) [37]	51
FIGURA 42. ESQUEMA D'UNA CAPA EXTRUÏDA EN UN INTERVAL DE TEMPS [9].....	52
FIGURA 43. SAC DE MORTER SEC TECTOR 3D BUILD [57].....	53
FIGURA 44. A L'ESQUERRA ESQUEMA I MIDES DEL MOTLLE CÒNIC DEL CON D'ABRAMS. A LA DRETA IMATGE DEL MOTLLE CÒNIC. [52]	59
FIGURA 45. BARRA D'ACER INOXIDABLE QUE S'UTILITZA PER LA PROVA DEL CON D'ABRAMS [53]	60
FIGURA 46. PLATAFORMA METÀL·LICA ON ES REALITZA LA PROVA DEL CON D'ABRAMS	60
FIGURA 47. HUMITEJAR BASE METÀL·LICA I PART INTERNA DEL CON [54].....	60
FIGURA 48. COL·LOCACIÓ DEL MOTLLE CÒNIC SOBRE LA PLATAFORMA METÀL·LICA [54]	60
FIGURA 49. EXTRACCIÓ DEL MOTLLE CÒNIC [54].....	61
FIGURA 50. MESURA DE L'ASSENTAMENT [54]	61
FIGURA 51. REPRESENTACIÓ D'UN ASSENTAMENT SIMÈTRIC I UN ESBIAXAT [55].....	62
FIGURA 52. A L'ESQUERRA, ESQUEMA DEL MESURADOR DE PLASTICITAT ON S'INDIQUEN LES SEVES PART. A LA DRETA, IMATGE DEL MESURADOR DE PLASTICITAT [56]	63

FIGURA 53. VISTA DE LA PART SUPERIOR DEL MESURADOR DE PLASTICITAT	63
FIGURA 54. A L'ESQUERRA, MESURADOR DE PLASTICITAT INTRODUÏT EN UN CUBELL AMB MORTER. A LA DRETA, VISTA LATERAL DEL MESURADOR DE PLASTICITAT ON S'INDICA LA MARCA FINS ON S'HA D'INTRODUIR L'APARELL AL FORMIGÓ.	64
FIGURA 55. REPRESENTACIÓ DEL GIR HORARI DEL MESURADOR MENTRE QUE L'AGULLA GIRA EN EL SENTIT ANTIHORARI.	64
FIGURA 56. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LA PROVA 1 DE TREBALLABILITAT	65
FIGURA 57. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LA PROVA 2 DE TREBALLABILITAT	66
FIGURA 58. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LA PROVA 3 DE TREBALLABILITAT	66
FIGURA 59. REPRESENTACIÓ DEL PROCÉS DE SUBMINISTRAMENT DE LA BOMBA	67
FIGURA 60. REPRESENTACIÓ DEL MOVIMENT DEL MATERIAL DINS LA BOMBA.....	67
FIGURA 61. REPRESENTACIÓ DEL ROTOR HELICOÏDAL QUE BOMBEJA EL MATERIAL I POSICIÓ D'AQUEST EN LA BOMBA	68
FIGURA 62. ESQUEMA DE FLUX DESENVOLUPAT EN UNA CANONADA	68
FIGURA 63. VOLUM DE CONTROL FIX DEL FLUX EN UNA CANONADA	69
FIGURA 64. REPRESENTACIÓ DEL PERFIL VELOCITAT DE BINGHAM EN UNA CANONADA VIST DE PERFIL	71
FIGURA 65. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DEL PERFIL DE VELOCITAT DEL FLUX DE BINGHAM EN UNA CANONADA VIST DE PERFIL I DE FRONT.....	73
FIGURA 66. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LA PROVA D'EXTRUDIBILITAT.....	74
FIGURA 67. REPRESENTACIÓ DE LA PROVA DE QUALITAT D'EXTRUSIÓ DE LA CAPA IMPRESA [9].....	75
FIGURA 68. REPRESENTACIÓ DE LA PROVA DE TEMPS OBERT [9].....	75
FIGURA 69. REPRESENTACIÓ DE LA PROVA D'EDIFICABILITAT [9].....	76
FIGURA 70. REPRESENTACIÓ DE LES DADES OBTINGUDES DE LA PROVA DE TREBALLABILITAT UTILITZANT LA METODOLOGIA DE PROVA 1 I 2 VARIANT LA DOSIFICACIÓ D'AIGUA	77
FIGURA 71. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LES DADES OBTINGUDES EN LA SEGONA PROVA DE TREBALLABILITAT, UTILITZANT LA METODOLOGIA 1 I VARIANT LA DOSIFICACIÓ D'AIGUA NOMÉS EN UNA RELACIÓ AIGUA/CIMENT 0,16;0,17 I 0,18.	79
FIGURA 72. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LES DADES OBTINGUDES A LA PROVA DE TREBALLABILITAT UTILITZANT LA METODOLOGIA DE LA PROVA 3 I VARIANT LA METODOLOGIA DE LA MESCLA.....	80
FIGURA 73. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LES DADES OBTINGUDES DE LA PROVA DE TREBALLABILITAT DE TRES REPOSOS AMB LA MATEIXA MESCLA UTILITZANT LA METODOLOGIA DE LA PROVA 3, UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17 I METODOLOGIA DE LA MESCLA 2.....	82
FIGURA 74. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LES DADES OBTINGUDES DE LA PROVA DE TREBALLABILITAT UTILITZANT LA METODOLOGIA DE LA PROVA 3, UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17, METODOLOGIA DE LA MESCLA 2 I UTILITZANT ACCELERANT	83
FIGURA 75. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LES DADES OBTINGUDES DE LA COMPARACIÓ DE DIFERENTS MESCLES DE CIMENT UTILITZANT LA METODOLOGIA DE LA PROVA 3 I LA METODOLOGIA DE LA MESCLA 1	84
FIGURA 76. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LA PROVA D'EXTRUDIBILITAT DE DUES MESCLES AMB UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17 I 0,16.....	86
FIGURA 77. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LA COMPARACIÓ DELS RESULTATS TEÒRICS I EXPERIMENTALS DEL CABAL AMB UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17	88

FIGURA 78. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE L' ERROR ABSOLUT COMÉS ENTRE ELS RESULTATS TEÒRICS I EXPERIMENTALS DEL CABAL AMB UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,17 88

FIGURA 79. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LA COMPARACIÓ DELS RESULTATS TEÒRICS I EXPERIMENTALS DEL CABAL AMB UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,16 90

FIGURA 80. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DEL ERROR ABSOLUT COMÉS ENTRE ELS RESULTATS TEÒRICS I EXPERIMENTALS DEL CABAL AMB UNA RELACIÓ D'AIGUA/CIMENT DE 0,16 90

FIGURA 81. PERFIL I PLANTA DE LA PEÇA A EXTRUDIR PER FER LA PROVA DE QUALITAT D'EXTRUSIÓ 91

FIGURA 82. PROCÉS DE BARREJA DETERMINAT SEGONS ELS EXPERIMENTS REALITZATS DE LES DIFERENTS PROPIETATS ESSENCIALS DEL MATERIAL D'IMPRESSIÓ 3D..... 99

Llista d'abreviatures/Glossari

Concepte	Definició
C_3S	Silicat tricàlcic (Alita); Composició: Ca_3SiO_5
C_2S	Silicat bicàlcic (Belita); Composició: Ca_2SiO_4
C_3A	Aluminat tricàlcic; Composició: $Ca_3Al_2O_6$
C_4AF	Aluminat ferric tetracàlcic; Composició: $Ca_4Fe_2Al_2O_{10}$
CH	Hidròxid càlcic (Portlandita); Composició: $Ca(OH)_2$
CSH	Silicat càlcic hidratat; Composició: $Ca_3Si_2H_6O_{10}$
Aft	Ettringita; Composició: $C_6AS_3H_{32}$
Afm	Monosulfoaluminat càlcic hidratat; Composició: $3C_4ASH_{12}$
A_{tix}	La velocitat a la que augmenta el límit elàstic d'una mescla de ciment

1. Introducció

1.1. Objecte

L'objectiu principal d'aquest treball és realitzar un estudi sobre la dosificació òptima que ha de tenir una mescla de ciment per poder ser utilitzada com a material d'impressió 3D en el sector de la construcció.

Durant el procés d'impressió, perquè el resultat final sigui el desitjat, la mescla ha de presentar certes característiques, com ara la treballabilitat, la fluïdesa, el temps d'enduriment, entre d'altres. Amb la finalitat de comprovar que el material compleix amb unes propietats adients, es duran a terme un seguit de proves experimentals per observar el seu comportament. Es farà una anàlisi i una recopilació de les dades resultants per a després, mitjançant la realització de diferents proves en la impressora, extreure les conclusions finals.

La gran majoria d'estudis sobre les mescles de ciment en màquines d'impressió es realitzen des d'un punt de vista quasi teòric. Aquest treball se centra molt més en la part experimental, per així poder obtenir una dosificació de la mescla amb la qual poder fer estructures.

1.2. Abast

El desenvolupament del treball es dividirà en dues parts. En la primera es realitzarà una investigació i un estudi bibliogràfic del material d'impressió (formigó), per poder contextualitzar la informació coneguda fins a l'actualitat. Per altra banda, en la segona es farà un estudi experimental de la mescla en estat fresc per extreure dades i poder determinar la dosificació òptima.

Les tasques a realitzar en l'estudi són:

- Anàlisi bibliogràfica sobre la fabricació additiva en general i en el camp de la construcció, del funcionament general de les impressores 3D i de les mescles de ciment que s'utilitzen. Aquest estudi es du a terme per posar en context el treball i observar la informació que hi ha actualment sobre el tema.
- Estudi sobre les característiques generals del formigó convencional emprat en l'obra amb la finalitat d'entendre la seva composició i comportament habitual.
- Estudi i determinació de les propietats que ha de complir el formigó en estat fresc per poder fer la impressió.
- Estudi del comportament del fluid durant la impressió. Observar les seves propietats després de produir-se el bombament i estudiar la seva viscositat per tenir-lo controlat durant el procés d'impressió.
- Determinació de les proves que es realitzaran en els assajos experimentals per poder trobar les propietats adients i obtenir la mescla de ciment òptima.
- Determinar les característiques de la impressora 3D, els instruments i materials que s'utilitzaran durant les proves experimentals.
- Realització de proves en el laboratori.
- Recopilació i anàlisi de les dades extretes en les proves experimentals.
- Extracció de conclusions dels resultats assolits i determinació de la dosificació adequada de la mescla de ciment.

En aquest estudi no es durà a terme un anàlisi en profunditat sobre el funcionament de la impressora de formigó utilitzada en la part experimental, però sí que es determinaran alguns elements que la componen i les característiques més rellevants d'aquesta que poden afectar el material.

1.3. Requeriments

El treball presenta certes restriccions, sobretot en l'aspecte experimental, les quals limitaran l'estudi. Aquestes són:

- La mescla d'estudi ja conté una composició d'àrids i ciment establerta, és a dir, s'utilitzarà un morter sec ja preparat amb la seva dosificació. L'estudi consistirà a obtenir la dosificació òptima d'aigua i additius, si són necessaris, en la mescla per tal d'obtenir les propietats addients de morter.
- Els aparells disponibles per poder fer la mescla (formigonera i mescladora manual) són proporcionats pel laboratori, així com els instruments per realitzar les proves experimentals. Per altra banda, cal tenir en compte que la impressora 3D, proporcionada per l'ESEIATT, limita el material pel que fa a les característiques de la bomba, la boca d'extrusió i la mànega.

1.4. Justificació

La fabricació additiva, més coneguda com a impressió 3D, és una tecnologia amb contínua evolució que està revolucionant la forma de treballar de molts sectors. Tot i que sembla una tecnologia molt innovadora, aquesta ja fa temps que es troba en la indústria. De fet, s'han realitzat molts estudis sobre aplicacions, tècniques d'implementació i materials a utilitzar.

Un sector que està començant a créixer en aquest àmbit és el de la construcció i això és degut, principalment, als grans avantatges que pot oferir enfront dels mètodes convencionals, així com: la llibertat de realitzar dissenys més complexos, l'aprofitament de material fent una construcció òptima de l'estructura, la velocitat de fabricació respecte a la mà d'obra o la reducció de l'impacte ambiental a causa de la disminució de residus durant el procés de construcció.

L'ESEIATT disposa d'una impressora 3D pel sector de la construcció amb el propòsit de fer proves del seu funcionament. Per la seva correcta utilització és necessari emprar una mescla de ciment adient per obtenir els resultats desitjats. Tot i que la fabricació additiva és una tecnologia en alça en el sector de construcció, no hi ha molta informació sobre les característiques i dosificacions del material d'ús. Per aquest motiu, el present memòria té la intenció de fer un estudi experimental amb la finalitat de trobar una solució a aquesta problemàtica.

El desenvolupament d'aquest treball em permetrà posar en pràctica coneixements obtinguts durant els anys de carrera i aprendre sobre la fabricació additiva, una de les tecnologies amb més futur en el sector de la construcció.

2. Estat de l'art

2.1. Impressió 3D convencional

2.1.1. En què consisteix la impressió 3D?

La impressió 3D és una tecnologia que consisteix en la creació d'objectes físics tridimensionals a partir d'un model digital. Aquesta tècnica es basa principalment en el mètode de fabricació per addició on a través de la superposició successiva de capes de material s'aconsegueix l'objecte desitjat [1][2].

2.1.2. Funcionament genèric de la impressió 3D

El procediment per la creació d'objectes mitjançant la fabricació additiva es basa en quatre etapes: disseny de l'objecte, preparació de la impressora, fabricació de l'objecte i tractaments de la peça final.

1. Disseny de l'objecte

El primer pas és fer un disseny 3D en format digital de l'objecte a fabricar. Aquest model pot ser creat utilitzant eines de disseny assistit per ordinador (CAD), com ara *AutoCad*, *Solidworks*, *Catia* o mitjançant l'escaneig d'una determinada peça. Una vegada elaborat l'arxiu definitiu, aquest és dividit en capes fines emprant un programa específic per poder ser imprès.

2. Preparació de la impressora

L'arxiu és enviat a la impressora 3D on es determinaran els paràmetres de fabricació i el material, segons la tecnologia a utilitzar.

3. Fabricació de l'objecte

Finalment es procedirà a la creació de l'objecte.

4. Tractaments peça final

Un cop obtinguda la peça final, depenent de la tecnologia additiva i dels materials utilitzats, serà necessari l'aplicació d'alguns tractaments físics o químics pel seu acabat. [3]

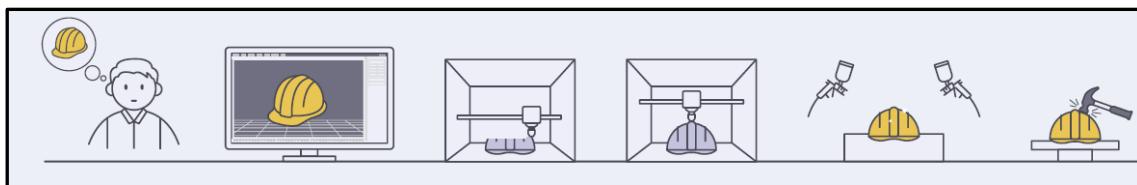


Figura 1. Funcionament genèric de la impressió 3D [3]

2.1.3. Tecnologies de la impressió 3D

Totes les tecnologies de fabricació additiva es basen en el principi de la creació d'objectes mitjançant l'adhesió de capes de material. La diferència entre cadascuna d'elles es troba en el mètode emprat per fer aquesta adhesió, és a dir, en el procés d'impressió i en els materials utilitzats els quals tindran un cert impacte en el resultat final.

La Societat Americana per Proves i Materials (ASTM) i l'Organització Internacional de Normatització (ISO) van publicar un document l'any 2015 definint la terminologia estàndard per la fabricació additiva i la van dividir en diferents mètodes¹. [4]

▪ Extrusió de material (ME)

Existeixen diverses metodologies d'extrusió de material, però la més important és el modelatge de deposició per fusió (FDM). El procés d'impressió FDM utilitza un material termoplàstic sòlid en forma de filament el qual s'insereix en un extrusor calent on es fon. La impressora mou l'extrusor en una trajectòria específica per realitzar la peça i deposita el material fos inicialment en una plataforma de construcció. Instantàniament, després de la deposició, el material es refreda i se solidifica proporcionant el suport per les següents capes fins conformar la peça final.

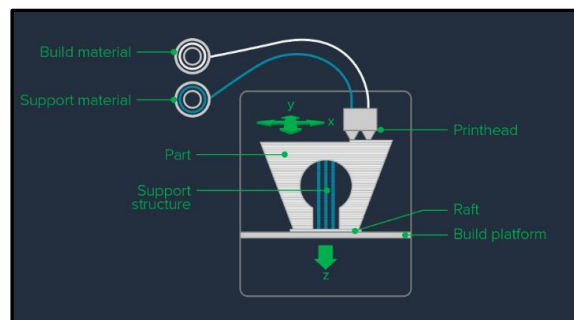


Figura 2. Esquema del funcionament de la tecnologia d'impressió 3D extrusió de material [5]

Aquest mètode es caracteritza per l'obtenció de peces de forma molt econòmica, però presenta una baixa precisió dimensional en comparació a altres mètodes, ja que és necessari un posttractament i el mateix mecanisme de creació de la peça fa que el material sigui inherentment anisotròpic.[5]

▪ Fotopolimerització en tanc

Dins el procés de fabricació additiva de la fotopolimerització es troben diversos mètodes que es basen en l'estereolitografia per conformar la peça definitiva. Aquesta tecnologia pretén crear objectes mitjançant la reacció química d'un líquid fotocurable amb un làser de llum ultraviolada perquè es produeixi la solidificació del material.

Per realitzar la impressió, la màquina consta d'una plataforma de construcció la qual es troba submergida dins d'aquest líquid fotocurable. Un làser d'un sol punt, ubicat dins la màquina, impacta contra el líquid fent moviments determinats segons les dades aportades a la impressora. Amb això s'aconsegueix que la zona de líquid glopejada pel làser se solidifiqui a causa de les propietats del material. Una vegada solidificada, la plataforma baixa verticalment deixant que una nova capa de líquid flueixi per sobre de la capa solidificada. Aquest procés es va repetint capa a capa fins conformar la peça sencera que, posteriorment, es pot curar amb llum ultraviolada (UV) per millorar les seves prestacions mecàniques.

L'estereolitografia (SLA) és la metodologia més estesa, no obstant això, es poden trobar d'altres que milloren les prestacions de l'anterior sistema, com és el cas de Direct Light Processin (DLP) i el

¹ Norma Internacional UNE-EN ISO/ASTM 52900:2015 elaborada pel comitè tècnic ISO/TC 261 *Sistemes industrials automatitzats*. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/EXT_oiMifAjZW10M9wx0v4fA.pdf

Continuous Direct Light Processin (CDLP). La diferència principal és la manera de projectar el làser. En aquests dos últims mètodes es projecta la imatge sencera, mentre que en l'estereolitografia es dibuixa la imatge amb el làser. Aquest canvi en la metodologia convencional provoca una millora significativa del temps d'impressió. [6]

Aquests mètodes destaquen per produir peces amb una gran precisió dimensional i amb unes prestacions mecàniques decents per diverses aplicacions. Així i tot, presenten un gran deteriorament pel pas del temps a causa de la naturalesa del material. [5]

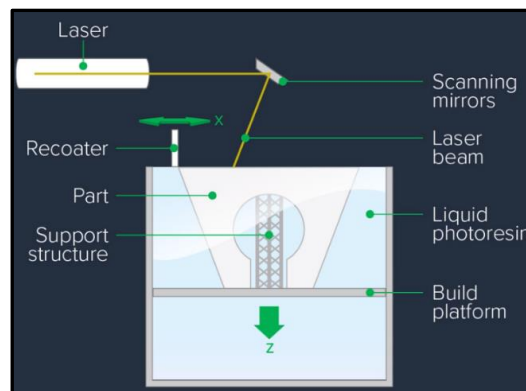


Figura 3. Esquema del funcionament de la tecnologia d'impressió 3D fotopolimerització en tanc [5]

▪ Fusió de llit de pols (PBF)

La següent tecnologia de fabricació additiva es basa en la fusió selectiva d'una capa de pols. El procés comença escampant una fina capa de pols sobre una plataforma de construcció. La secció transversal de la peça és escanejada i sinteritzada o fosa, depenent de si el material és plàstic (SLS) o metall (SLM, DMLS o EBM), i això provoca la seva posterior solidificació. Seguidament, la plataforma baixa l'espessor d'una capa i se li aplica una nova capa de pols. El procés es va repetint fins produir la peça sòlida.

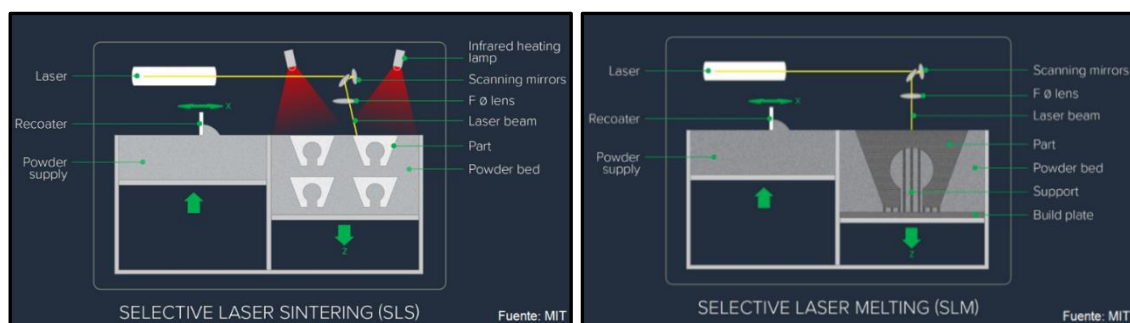


Figura 4. Esquema del funcionament de la tecnologia d'impressió 3D fusió de llit de pols [5]

Aquest mètode destaca per la gran llibertat de disseny que ofereix i per les altes prestacions mecàniques que presenta la peça final. Tot i això, els objectes acabats mostren porositat interna i rugositat superficial pel fet que el material utilitzat es troba en forma de pols. [5]

- **Material Jetting (MJ)**

El procés de fabricació additiva *Material Jetting* (MJ) s'aconsegueix dipositant petites gotes de material, una cada vegada, amb control espacial. Els principis de funcionament són similars als d'una impressora de tinta convencional, excepte que en aquest cas les gotes de tinta es van dipositant en capes per conformar una peça 3D.

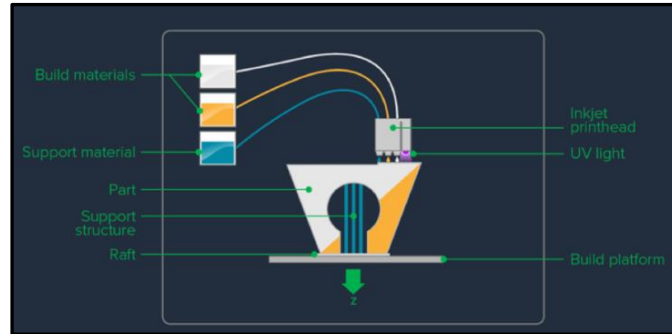


Figura 5. Esquema del funcionament de la tecnologia d'impressió 3D Material Jetting [5]

Aquest mètode es caracteritza pel seu excel·lent acabat i detall, però el seu cost és elevat i presenta unes propietats mecàniques fràgils que es degraden amb el temps [5].

- **Blinder Jetting (BJ)**

Blinder Jetting (BJ) és un procés de fabricació additiva on s'utilitzen dos tipus de materials. Un és un material en pols de base ceràmica o metàl·lica i l'altre és un agent aglutinant que actua per unir les capes de pols.

El procés consisteix a dipositar gotes de l'agent aglutinant sobre una capa de pols imitant el procés d'impressió d'una impressora convencional. Una vegada completada la capa, el llit de pols es desplaça cap a baix mitjançant una plataforma mòbil i s'estén una nova capa de material sobre l'àrea de construcció. El procés es va repetint fins a conformar la peça final.

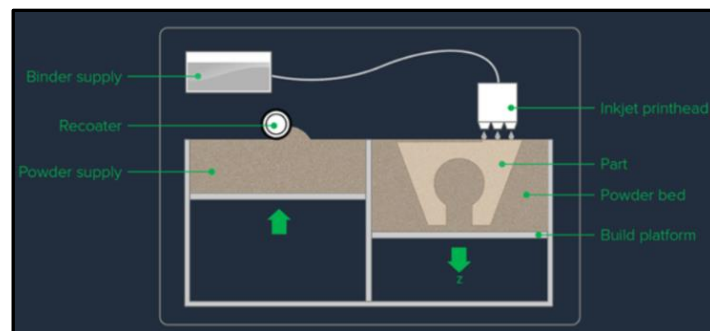


Figura 6. Esquema del funcionament de la tecnologia d'impressió 3D Blinder Jetting [5]

Aquest mètode es caracteritza per obtenir peces finals de gran estètica, però amb propietats mecàniques deficientes. [5]

- **Deposició d'energia dirigida (DED)**

El procés de fabricació additiva per deposició d'energia dirigida és una tecnologia que consisteix a utilitzar un flux de pols o filaments juntament amb una font d'energia, com un làser, arc o flux d'electrons per construir peces metàl·liques de forma directa.

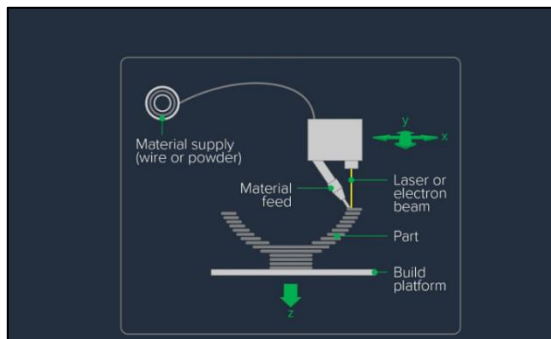


Figura 7. Esquema del funcionament de la tecnologia d'impressió 3D deposició d'energia dirigida [5]

El mètode es caracteritza per poder tenir un gran control de l'estructura del gra i, per tant, poder reparar peces funcionals d'alta qualitat. Així i tot, els productes finals tenen un acabat que necessita un tractament posterior i el material és limitat [5].

- **Fabricació d'objectes laminats (LOM)**

El procés de fabricació additiva per fabricació d'objectes laminats consisteix a apilar làmines que s'uneixen i es tallen per conformar l'objecte final.

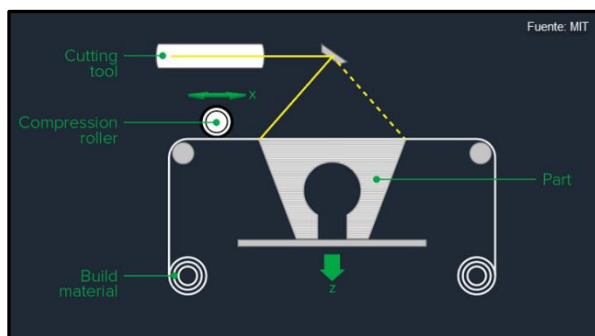


Figura 8. Esquema del funcionament de la tecnologia d'impressió 3D fabricació d'objectes laminats [5]

El mètode es caracteritza per la seva fabricació ràpida i econòmica, però les peces resultants depenen del material que no té suficient resistència, l'acabat superficial és deficient i la llibertat de disseny es troba limitada [5]

2.1.4 Materials utilitzats en les tecnologies d'impressió 3D

Per cada tecnologia mencionada anteriorment, s'utilitzen uns materials adients segons el mètode d'impressió. En la taula següent hi ha un resum dels materials més usats en cada mètode.

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

TECNOLOGIA	MÈTODES	MATERIALS USUALS
Extrusió de material (ME)	FDM	Termoplàstics (niló, resines ABS o el PLA) i metalls.
Fotopolimerització en tanc	SLA	Resina fotocurable.
	DLP	
	CDLP	
Fusió de llit de pols (PBF)	SLS	Niló, alumide (poliamida associada amb pols d'alumini), niló farcit de fibres de carboni...
	SLM	Alumini, titani, acer inoxidable, aliatges de níquel, aliatge de cobalt-crom...
	DMLS	
	EBM	Aliatges titani i de cobalt-crom.
Material Jetting (MJ)	MJ	Resina ABS, ceres o plàstics semblants al cautxú.
Blinder Jetting (BJ)	BJ	Materials ceràmics, sorres, guix, materials metàl·lics (acer inoxidable o aliatge de cobalt i crom).
Deposició d'energia dirigida (DED)	DED	Titani, acer inoxidable, alumini, coure...
Fabricació d'objectes laminats (LOM)	LOM	Paper, metall i plàstic.

Taula 1. Materials més utilitzats en les diferents tecnologies d'impressió 3D [5]

2.1.5 Avantatges i desavantatges de la fabricació additiva

La impressió 3D és una tecnologia a l'alça que actualment es troba en ple desenvolupament. Aquesta tot i tenir certs inconvenients presenta una gran quantitat d'avantatges que la fan destacar per sobre d'altres mètodes de fabricació. Per entendre el seu potencial, a continuació s'enumeren els principals avantatges i desavantatges d'aquesta moderna tecnologia [1].

- **Avantatges:**
 1. Creació de dissenys complexos.
 2. Personalització dels elements.
 3. Generació de menys residus en comparació altres mètodes de fabricació.
 4. Facilitat per elaborar els elements.
 5. L'ús de motlles o similars no és necessari en comparació altres mètodes de fabricació.

- **Desavantatges:**
 1. Poca varietat per l'elecció de material.
 2. Elevat cost quan es tracten de llargues produccions.
 3. Prestacions mecàniques de les peces limitades.

2.2 Impressió 3D dins del sector de la construcció

Durant els darrers vint anys la tecnologia d'impressió 3D ha anat evolucionant en el sector de la construcció implementant-se diverses metodologies de fabricació additiva. El principal interès que té el sector en el desenvolupament d'aquesta tecnologia són els beneficis significatius que pot aportar en un futur i que milloren les prestacions dels mètodes tradicionals. Alguns d'aquests avantatges són: una major personalització dels elements de fabricació i la reducció del temps de construcció, de la mà d'obra, del material i dels costos de construcció.

Actualment, la tecnologia d'impressió 3D en la indústria té la capacitat per imprimir models arquitectònics i edificis. Un exemple és el cas de l'empresa Winsun que l'any 2015 va aconseguir imprimir una vila i un edifici de cinc pisos utilitzant tecnologia d'impressió 3D [7]. El seu potencial és il·limitat i s'espera que es realitzin estudis futurs en aquesta àrea per tal de consolidar i ampliar les aplicacions.

Si s'ha de plantejar l'elaboració d'un element amb tecnologia d'impressió 3D, prèviament s'ha de tenir en compte un seguit de factors:

- **Procediment d'impressió:** per poder fer una gestió adequada en la cadena de fabricació, cal conèixer les etapes que presenta qualsevol procés d'impressió 3D en la construcció, ja que un control eficient i flexible pot millorar la qualitat de les peces resultants.
- **Tecnologies d'impressió 3D:** conèixer els mètodes actuals de fabricació additiva disponibles en la construcció impresa en 3D i alguna de les seves aplicacions.
- **Aplicacions d'impressió 3D:** conèixer els elements que s'han construït, fins ara, amb aquesta tecnologia.
- **Sistemes de construcció:** conèixer els sistemes de construcció més utilitzats en la tecnologia d'impressió 3D.
- **Mescla de ciment:** determinar les característiques de la mescla de ciment més adequades segons l'element de construcció i la metodologia emprada per la impressió 3D.
- **Beneficis de la impressió 3D:** conèixer els beneficis respecte a altres mètodes de construcció per tal de comprovar la seva rendibilitat a l'hora d'utilitzar la tecnologia d'impressió 3D [8].

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

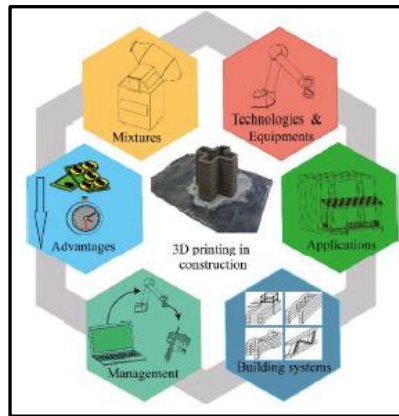


Figura 9. Factors a tenir en compte de la impressió 3D en el sector de la construcció [8]

2.2.1 Procediment d'impressió 3D en la construcció

En la indústria de la construcció existeixen diferents tecnologies d'impressió 3D les quals varien en certs aspectes, com ara la metodologia de fabricació o la mescla de ciment, però el funcionament en general és el mateix.

Les tres etapes principals que es duen a terme són: la preparació de les dades, la del material i la impressió de la peça [9].

▪ Preparació de les dades

En aquesta etapa es fa l'arxiu digital que es imprèn utilitzant les mateixes eines que en la impressió 3D convencional. A més, es determinen els paràmetres operatius de la màquina perquè en realitzar l'extrusió aquesta es pugui dur a terme de forma continuada sense que succeeixi cap problema, com pot ser la sobreimpressió (una quantitat excessiva de material dipositat) o la subimpressió (pauza en la deposició que no coincideix amb el moviment de la extrusor) [1][9].

▪ Preparació del material

La preparació del formigó implica barrejar els components necessaris en les dosis establertes per obtenir la mescla fresca i així subministra-la a la impressora.

▪ Impressió de la peça

Amb la finalitat d'una impressió exitosa, la impressora consta de tres sistemes principals:

- **Sistema de subministrament:** és el sistema que s'encarrega de transportar la mescla de ciment des d'un contenidor on es reserva el material fins al sistema d'extrusió, mitjançant una mànega. Per fer-ho, s'ha d'utilitzar un mecanisme de desplaçament, com ara una bomba.
- **Sistema d'extrusió:** està compost per un mecanisme d'extrusió i la extrusor. S'encarrega d'extrudir la mescla fresca i que aquesta surti en un flux continu.
- **Sistema de moviment:** aquest sistema entrega suport i moviment al sistema d'extrusió que, depenent de la impressora, pot ser en coordenades cartesianes o polars. Això permetrà que, durant l'extrusió, la extrusor es desplaci de la forma adequada per obtenir la peça final [9].

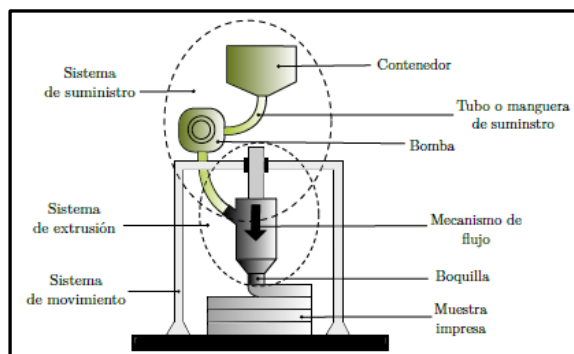


Figura 10. Esquema del procediment d'impressió 3D [9]

Durant el procés d'impressió és important el control dels tres sistemes, ja que un canvi en un d'ells té repercussió en els altres dos. Per aquest motiu, s'ha de determinar una tècnica d'impressió que defineixi la velocitat de moviment del material pel sistema, la velocitat d'extrusió (velocitat del material a ser dipositat), la quantitat de material subministrat i el temps de subministrament aconseguint, d'aquesta manera, el número i la dimensió (amplada, gruix i altura) de capes que es dissenyen per construir la peça. D'altra banda, poden aparèixer uns altres paràmetres que no formen part del sistema d'impressió, com pot ser el medi ambient de treball. Aquests poden influir en el procés de construcció i és important controlar-los.

2.2.2 Tecnologies de la impressió 3D en la construcció

D'ençà que s'ha començat a implementar aquesta tecnologia, els estudis realitzats en el sector de la construcció han permès desenvolupar nous mètodes de fabricació additiva per la fabricació d'elements. Aquests mètodes, encara en desenvolupament, es divideixen principalment en tres tecnologies: *Countour Crafting*, *Concrete Printing* i *D-Shape*. Les tres han demostrat que són adients per aplicacions de construcció, ja que han aconseguit fabricar elements de mides significatives.

- Countour Crafting (CC):** es tracta del primer sistema d'impressió 3D de mescles de ciment a gran escala basat en un pòrtic. La seva metodologia d'impressió consisteix en l'extrusió d'una pasta a base de ciment a través d'un extrusor per formar el contorn de l'estructura a fabricar. L'extrusor i les dues pales planes verticals adherides a ell, a part d'extrudir el material, també s'encarreguen de raspar la superfície lateral i superior de la capa d'extrusió per aconseguir que cadascuna d'elles tingui una superfície final llisa i precisa. Es considera que la màquina imprimeix una capa quan l'extrusor torna a la seva posició inicial. D'aquesta manera, va imprimint capes superposades formant el contorn de l'estructura. Una vegada imprès, l'interior de l'estructura es pot omplir amb el material que es desitgi, normalment es tracta del mateix amb el que s'han construït les parets [12] [13].

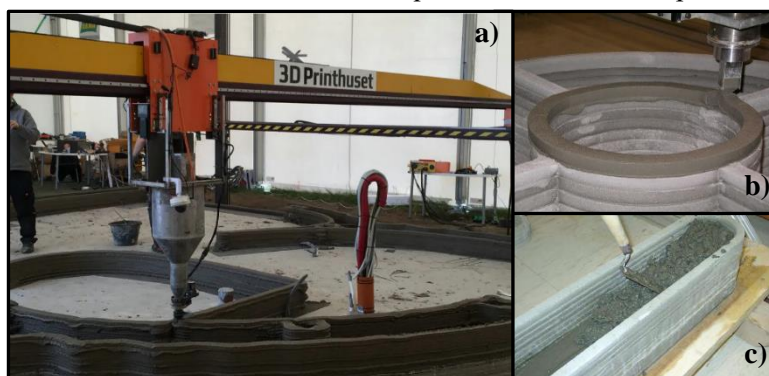


Figura 11. (a) Figura d'impressora Countour Crafting en el procés d'impressió (b) Figura de la extrusor característica de la impressió Countour Crafting (c) Figura omplint amb formigó una estructura realitzada amb la tecnologia Countour Crafting [10][11][12]

- **Concrete Printing:** es tracta d'una tècnica d'impressió 3D basada en l'extrusió de mescles de ciment amb l'ajuda d'un pòrtic per construir un model en capes 3D sense utilitzar un encofrat. A diferència de la tecnologia *Countour Crafting*, l'extrusor no només es mou en la zona perimetral de la figura sinó que aquest té més llibertat de moviment per construir la peça completa i que no quedi buida per dins. El sistema presenta una menor resolució de deposició, la qual cosa permet un major control tant de la geometria interna com l'externa [12] [13].



Figura 12. Impressió de peça en forma de la lletra A amb la tecnologia Concrete Printing [20]

- **D-Shape:** es tracta d'un sistema d'impressió 3D que es basa en la tècnica de *Blinder Jetting*. El procés construeix la peça final a través de successives capes transversals de partícules, les quals s'aniran adherint per la deposició selectiva d'aglutinant a través del extrusor. El procés tèrmic o la infiltració es poden realitzar com a tractaments posterior per millorar la resistència i durabilitat de la peça impresa. [12] [13]



Figura 13. Impressió amb la tecnologia D-Shape amb la mostra d'una peça realitzada amb aquesta tècnica [21]

Si es comparen les tres tècniques d'impressió cada mètode presenta les seves avantatges i desavantatges depenent de les aplicacions[8]:

- **Dimensió de fabricació:** les tres tècniques presenten restriccions de dimensions de fabricació , principalment, a causa del seu mètode de deposició de material i de l'estructura mecànica.
- **Velocitat d'impressió:** pel que fa a la velocitat d'impressió, les tècniques de *Countour Craftings* i *Concrete Printing* presenten un procediment de fabricació més ràpid en comparació a la del *D-Shape*.
- **Resolució d'impressió:** el mètode d'impressió *D-Shape* té una resolució més alta i un grossor de capa més prim que les altres dues tècniques a causa de la utilització d'un extrusor amb un diàmetre més petit.

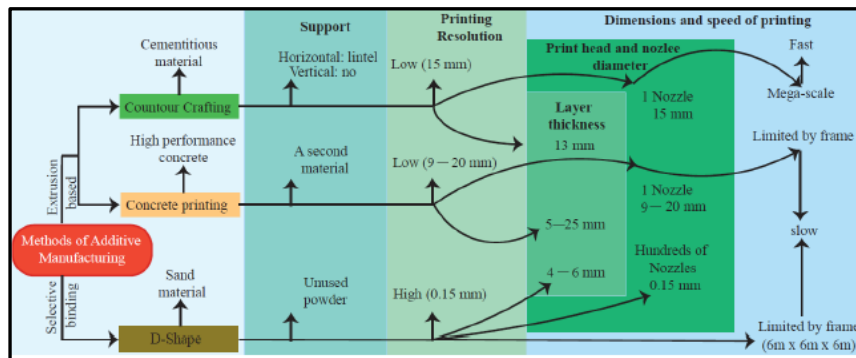




Figura 14. Comparació gràfica de les tres tècniques principals d'impressió en la construcció [8]

2.2.3 Aplicacions de la impressió 3D en la construcció

La tecnologia d'impressió 3D en el sector de la construcció presenta un ampli ventall d'aplicacions amb una gran projecció de futur. Tot i això, la gran majoria d'elements fabricats amb aquesta tecnologia encara no tenen una funció real en la vida quotidiana i només serveixen com a exemple per estudis, com ara d'aplicacions en murs, en escultures o en cases d'una o dues plantes. Tots aquests elements poden variar en una gran quantitat d'aspectes com la forma, dimensions, material, sistema utilitzat, precisió de la màquina, etc. La mida dels elements i la seva complexitat requereixen recursos, investigació i desenvolupaments importants que fan que sigui inversament proporcional a la magnitud de producció. Per tant, trobar una forma homogènia de fabricar els elements i poder realitzar una producció massiva amb finalitats de mercat és complex i són necessaris més estudis per explorar aquest camp [8].

En la següent taula es poden veure alguns exemples d'aplicacions que s'han dut a terme fins ara. La classificació s'ha realitzat segons els elements més habituals que es fabriquen, com poden ser mobles, murs, edificis, components i escultures.

ELEMENT	APLICACIÓ	IMATGE
Moble	Banc (Universitat de Loughborough, UK)	
Escultura	Radiolaria (Enrico Dini)	
Components	Panells impresos horitzontalment (TU Delft, Països Baixos)	
Murs	Mur doble (Gosselin, França)	

Edificis	Casa impresa en la seva totalitat (Italià)	
----------	--	---

Taula 2. Exemples d'aplicacions realitzades amb les diferents tècniques d'impressió en la construcció [8]

2.2.4 Materials de la impressió 3D en la construcció

Els materials utilitzats són molt diversos i cada vegada s'estan fent més estudis i ampliant el seu nombre. Tot i així, aquest treball es centra especialment en el formigó, el material més utilitzat en la construcció.

Com s'ha observat anteriorment, existeixen tres pilars tecnològics en la construcció de peces fetes de mescles de ciment. Dues d'aquestes tecnologies es basen en un sistema d'extrusió mentre que l'altra utilitza un sistema semblant a la tecnologia d'impressió 3D *Blinder Jetting*.

En el cas dels sistemes d'extrusió, la mescla ha de ser prou manejable i fluida per poder ser bombejada i per facilitar la seva circulació a través de la mànega. Tanmateix, és necessari que una vegada el material sigui extrudit en forma de capa, aquesta tingui la capacitat de mantenir la seva forma, d'aguantar el pes de les capes posteriors i d'adherir-se correctament a les capes properes. A més, també és important el control del temps de reacció d'hidratació de la mescla, la viscositat que presenta i la seva consistència durant tot el procés d'impressió [14].

En la indústria encara no està establert una dosificació estandarditzada de la mescla de ciment, però algunes empreses o grups d'investigació han utilitzat alguna de les dues tecnologies d'extrusió esmentades per la fabricació d'elements constructius.

- Un estudi de la Univeristat de Loughborough en el Regne Unit determina que la mescla més òptima és una relació de sorra i aglomerant 60:40. El aglomerant és una mescla formada per un 70% de ciment, un 20% de cendres volants i un 10% de fum de silici. Al aglomerant també se li afegeix 1,2 kg de microfibras de propilè per reduir la contracció i deformació en l'extrusió. Per altra banda, la relació de l'aigua-ciment de la mescla és de 0,37 i s'afegeixen com a additius un 1% de superplastificant i un 0,5% de retardant per obtenir una major manejabilitat de la mescla. Finalment, s'obté un material amb un 0,55 kPa de resistència de tall i un temps obert de fins a 100 min [22].
- L'empresa COBOD va utilitzar materials de ciment formats per un 30-35% de ciment i la resta grava i rajoles reciclades. Pel que fa la mida de gra del morter, aquest no supera els 8mm. Tot i així, la companyia no especifica la relació d'aigua-ciment, ni la utilització de cap tipus d'additiu [15].
- L'empresa Alaska Housing Finance Corporation (AHFC) va realitzar un estudi per la impressió 3D de cases rurals en Alaska. La mescla utilitzada per fer les proves està composta per un 55% d'àrid i la resta de ciment Portland. Pel que fa la relació aigua/ciment, aquesta és de 0,45. Segons els resultats de l'estudi, les propietats mecàniques quan endureix la mescla són bones, però és necessari dur a terme més estudis de seguiment per avaluar el seu rendiment i durabilitat a llarg termini. [16].
- L'empresa Apis-Cor utilitza una barreja patentada per al seu material d'impressió de formigó. La barreja inclou geopolímers respectuosos amb el medi ambient que tenen la finalitat d'augmentar la resistència i la fiabilitat de l'estructura, a més de reduir la necessitat d'additius industrials emprats en la impressió 3D de formigó [17].

- Un grup d'investigació de Califòrnia aconsegueix una mescla de formigó per la tecnologia *Countour Crafting* basada en experiments d'assaig i error. Els components de la mescla són 37% de ciment Portland tipus II, un 41% de sorra i un 3% de plastificant, que s'utilitza per augmentar la treballabilitat d'aquesta. Pel que fa la relació aigua/ciment, aquesta és de 0,5. Els experiments mostren que la resistència a compressió del material és de 18,9 N/mm² després de poques hores de fraguat [18].

Per altra banda, en el cas del *D-Shape*, un sistema similar al mètode de *Blinder Jetting*, el que es busca és que l'aglomerant dipositat sobre el material granulat (sorra, grava, cautxú, agregats reciclats...) sigui capaç d'unir els grans entre si. De tots els materials, el més estudiat és el formigó Portland 32,5R amb sorra gruixuda [19].

2.2.5 Beneficis de la impressió 3D en la construcció

La impressió 3D aporta grans beneficis a la indústria de la construcció, essent una solució que toca gairebé totes les àrees de la cadena de valor del sector. Els principals beneficis són:

- **Alta velocitat de construcció:** una casa comú amb la tecnologia convencional es triga en construir entre 6 a 9 mesos, mentre que amb la d'impressió 3D pot ser construïda en un dia.
- **Gran llibertat de disseny:** actualment, les construccions utilitzen encofrats que limiten les formes, ja que conté geometries planes. En canvi, amb la impressió 3D es pot construir una gran varietat de formes (corbes, rodones, asimètriques...).
- **Construccions respectuoses amb el medi ambient:** la construcció convencional genera grans quantitats de residus. Per exemple, la construcció d'una casa tradicional produeix entre 3 a 7 tones de residus aproximadament. Per contra, la tecnologia d'impressió 3D és més eficient i no origina tanta pèrdua de material.
- **Reducció de costos:** es redueix tant en la quantitat de material, menys material rebutjat que en els mètodes tradicionals, com en la mà d'obra.
- **No és necessari estructures sòlides i massives:** aquestes estructures poden ser molt útils en les parets de les cases per posar les canonades, sistemes aïllants, sistemes elèctrics,...
- **Disminució d'accidents i lesions en les obres de construcció.**
- **Fabricació d'edificacions econòmiques:** és possible la construcció de cases dignes a un cost competitiu que siguin assequibles a famílies de pocs recursos [9].

3. Formigó convencional

3.1. Introducció

El formigó és el material per excel·lència en el sector de la construcció. La seva alta resistència a esforços de compressió i el seu baix cost de producció, són els principals motius perquè s'utilitzi durant tants anys. A més, presenta altres avantatges enfront altres tipus de materials, com pot ser, la seva gran plasticitat i mal·leabilitat quan es troba en estat fresc, la seva alta resistència davant el foc i la seva gran durabilitat al pas del temps.

D'altra banda, el formigó també consta d'aspectes negatius. El més important és la seva baixa resistència a esforços de tracció, flexió o tallants, sent aquesta deu vegades menor que la seva resistència a la compressió. Per aquest motiu, és habitual utilitzar-lo juntament amb l'acer formant el formigó armat, material compost per formigó convencional reforçat per barres d'acer en el seu interior que fan millorar les prestacions mecàniques de les quals flaqueja el formigó.

El formigó és el material que més s'utilitza en el sector de la construcció i es troba quasi sempre present en la major part d'elements constructius a causa de la dificultat de substituir-lo en les edificacions. Actualment, pel que fa a la metodologia de construcció, amb la tecnologia d'impressió 3D el sector està patint una revolució, però malgrat això, encara el formigó continua sent el material més emprat. És per aquesta raó que, abans d'endinsar-nos en les característiques que ha de complir el formigó per la seva impressió, s'ha d'entendre el seu comportament.

En aquest capítol es determinaran els elements que componen aquest material i les diferents etapes que pateix el formigó quan es produeix la reacció d'hidratació, és a dir, des de l'inici de la mescla barrejada fins a l'enduriment del material.

3.2. Materials que constitueixen el formigó

El formigó és el resultat de la mescla d'un aglomerant (normalment ciment), àrids (grava, graveta i sorra), aigua i, en alguns casos, additius i adicions.

Existeixen grans varietats de formigons, però tots es caracteritzen per tenir gairebé els mateixos elements en la seva composició. Tot i així, pot variar la quantitat dels seus components, la utilització d'algun additiu per modificar part del procés de fraguat o la utilització de fibres de reforç.

A continuació es tractarà cada element per separat i es farà èmfasi en la funció que cadascú té en la mescla i en la seva importància.

3.2.1. Ciment

És un aglomerant hidràulic de naturalesa inorgànica que es caracteritza per endurir-se quan es barreja amb aigua. La seva funció en la mescla és omplir els forats buits que deixa l'àrid i aglomerar-los. A més a més, quan es troba en estat fresc, la pasta lubrica i dona cohesió per, finalment, proporcionar la resistència al formigó endurit [23].

3.2.1.1. Elements que componen el ciment

Els elements que componen el ciment són principalment tres: el clínquer, el guix o calç i les adicions.

- **Clínquer:** és el component responsable de la reacció del ciment amb l'aigua iniciant el procés de fraguat fins l'enduriment del material. El clínquer està format per diferents compostos químics que sorgeixen com a resultat de la combinació de diversos òxids, principalment, el calci (CaO) i el silici (SiO_2) i en menors quantitats l'alumini (Al_2O_3) i el ferro (Fe_2O_3) [23].
- **Guix o calç:** és el component responsable de regularitzar el temps de fraguat, és a dir, és l'encarregat de retardar-lo per poder manejar el ciment. Si aquest element no s'afegís, el ciment solidificaria ràpidament en contacte amb l'aigua. A més a més, el guix també presenta altres beneficis com la millora de la treballabilitat i l'increment de la resistència de la mescla a curt termini. S'ha de vigilar de no afegir altes dosis d'aquest material, perquè poden produir problemes d'expansió i, per tant, en solidificar es poden crear fissures internes que no interessin en el resultat final [23].

▪ **Addicions:** aquests materials s'addicionen a la mescla per millorar la treballabilitat, durabilitat i resistència d'aquesta. Existeixen diverses addicions que poden realitzar aquesta funció, com la putzolana, material compost de silici o alumini-silici que no presenta cap propietat aglomerant. Tot i això, quan es divideix finament i en presència d'aigua, reacciona químicament amb l'hidròxid de calci a temperatura ambient per formar compostos que si presenten aquesta propietat. Hi ha putzolanes naturals com les roques volcàniques o roques on el constituent silici conté òpal i artificials com les cendres volants, l'escòria granulada d'alt forn o el fum de silici [23].

3.2.1.2. Procés d'obtenció del ciment

Per l'obtenció del ciment, inicialment es mesclen les matèries primeres que la componen amb les proporcions de 64% CaO, 21% SiO₂, 5,5% Al₂O₃, 4,5% Fe₂O₃, 2,4% MgO, 1,6% sulfats i un 1% d'altres materials. La barreja es manté en un forn rotatori on s'escalfa a temperatures entre 1400°C i 1650°C i s'inicia el procés de clinquerització on, a causa d'un procés químic, la barreja es converteix en un ciment endurit (clínquer) que es refreda i es polvoritza. Finalment, se li afegeix aproximadament un 2% de guix amb la finalitat de controlar el temps de fraguat [24][26].

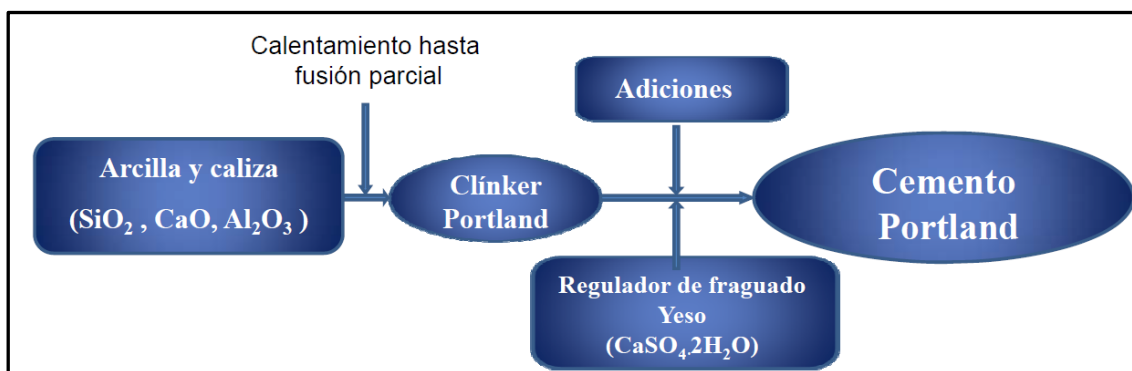


Figura 15. Esquema obtenció del ciment Portland [24]

Durant el procés de clinquerització es formen diversos compostos, d'entre els quals destaquen quatre, que serviran per determinar els tres aspectes fonamentals del formigó: la calor d'hidratació, l'obtenció de resistència i la velocitat de la reacció d'hidratació.

▪ **Silicat tricàlcic (C₃S, Alita):** es forma per la reacció química de 3CaO amb SiO₂ i suposa entre el 50% i el 70% del clínquer del ciment Portland. Aquesta reacció presenta una calor d'hidratació moderada de l'ordre de 502 kJ/kg i una velocitat de reacció ràpida. Els hidrats que formen representen la fase constituent més important pel desenvolupament de la resistència inicial o a curt termini del ciment a causa d'una reacció ràpida amb l'aigua [25].

▪ **Silicat bicàlcic (C₂S, Belita):** es forma per la reacció química de 2CaO amb SiO₂ i representa el 30% del clínquer del ciment Portland. En reaccionar presenta una calor baixa d'hidratació de l'ordre de 251 kJ/kg i una alta estabilitat complementant el C₃S (Alita). Els hidrats que formen incrementen la resistència de la mescla durant el pas del temps (a llarg termini) per una reacció lenta amb l'aigua [25].

▪ **Aluminat tricàlcic (C₃A):** es forma per la reacció química de 3CaO amb Al₂O₃ i representa aproximadament el 5-10% del clínquer del ciment Portland. En reaccionar presenta una alta velocitat d'hidratació i una calor elevada d'hidratació de l'ordre de 867 -879 kJ/kg donant lloc a valors alts de retracció. Els hidrats formats no aporten resistència mecànica[25].

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

- **Aluminat fèrric tetracàlcic (C_3AF):** es forma per la reacció química de $4CaO$, Al_2O_3 , i Fe_2O_3 . La presència del ferro és la responsable del color gris del ciment i en reaccionar mostra una velocitat d'hidratació alta i una moderada calor d'hidratació de l'ordre de 419 kJ/kg . Els hidrats que el formen no aporten resistència [25].

Compost	Velocitat d'hidratació	Calor d'hidratació i desenvolupament	Desenvolupament de resistència
C_3S	Gran	Gran i ràpid	Ràpid i mantingut
C_2S	Petita	Petit i lent	Lent i molt mantingut
C_3A	Molt gran	Molt gran i ràpid	Molt ràpid i de curta duració
C_4AF	Gran	Moderat i lent	Lent i poc significatiu

Taula 3. Característiques dels diferents compostos que conformen el clínquer [26]

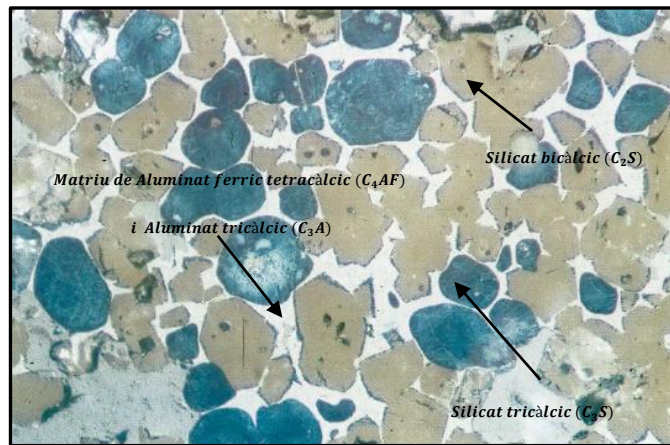


Figura 16. Microscòpia del clínquer on es senyalen els diferents components que el formen [25]

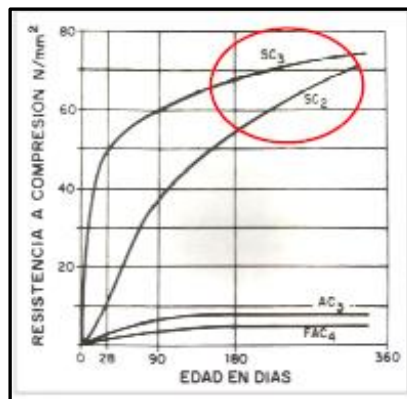


Figura 17. Aportació de resistència del clínquer des de l'inici de la reacció d'hidratació [27]

Tots els ciments tenen els mateixos components i, segons els interessos, a partir de la mescla base es poden obtenir d'altres variant en les proporcions dels components que la formen o afegint addicions.

3.2.1.3. Tipus de ciment

Classificació del diversos tipus de ciment²:

Tipus de ciment	Denominacions	Designacions
I	Ciment Pòrtland	CEM I
II	Ciment Pòrtland amb addicions	CEM II
III	Ciment Pòrtland amb escòries d'alt forn	CEM III
IV	Ciment putzolànic	CEM IV
V	Ciment compost	CEM V

Taula 4. Classificació dels diferents tipus de ciment [26]

A continuació s'especificarà en més profunditat cada tipus:

- **Tipus I:** es tracta del ciment Pòrtland per un ús general. S'utilitza quan el formigó no és exposat a un gran atac de sulfats de l'aigua o del sòl, o bé, quan no es produeix un increment important de la temperatura a causa de la calor generada per la hidratació del ciment.

Les seves aplicacions principals són per formigons de resistències molt altes, per a obres públiques especials en formigó pretensat i per a fabricació d'elements de formigó [26].

- **Tipus II:** és el ciment intermedi entre el de tipus I i el siderúrgic (ciment amb addicions d'escòria) o putzolànic. Aquest tipus de ciment adquireix la mateixa resistència que els CEM I, però en un període més llarg de temps.

La seva aplicació més important és per formigons i morters en general [26].

- **Tipus III:** és el ciment que presenta un alt percentatge d'escòria siderúrgica juntament amb el clínquer Portland (clínquer Portland + guix + escòries). Es caracteritza per una alta resistència inicial, gràcies als continguts de C_3S (Alita) i C_3A (Aluminat tricàlcic).

La seva aplicació és per a formigons en ambients agressius per sulfats i aigua de mar [26].

- **Tipus IV:** és el ciment on se li afegeixen putzolanes com a addicions, alguns exemples habituals són les cendres volants i el fum de sílice (clínquer Portland + guix + putzolanes). Es caracteritza per presentar una calor baixa durant la hidratació a causa de la limitació de compostos amb major influència en la formació de calor per hidratació que són el C_3A i C_3S . Aquests compostos són també els responsables de la resistència inicial i en limitar-los provoquen que la barreja de ciment adquireixi aquesta resistència amb més lentitud que el ciment tipus I.

Les seves aplicacions més importants són per a formigons i morters en general, en ambients àcids moderadament agressius i per obres hidràuliques[26].

- **Tipus V:** és un ciment amb alta resistència a l'acció de sulfats que s'assoleix minimitzant el contingut de C_3A , ja que aquest compost és el més susceptible al seu atac.

Les seves aplicacions són per l'estabilització de terres i terrenys, en bases tractades per a carreteres i per a fers de formigó i, també, per a grans massissos de formigó de presses [26].

² Classificació dels diversos tipus de ciment segons l'Associació Espanyola de Normalització i Certificació (AENOR) UNEEN 197-2000.

3.2.2. Àrids granulats

Són materials inerts, com poden ser les sorres, graveta o graves que serveixen de base per la composició de molts dels materials que s'utilitzen en construcció, com ara la composició del formigó i la del morter. Aquests productes són naturals i es poden obtenir mitjançant:

- **Cribat:** s'obtenen materials com còdols de rius i cantons arrodonits.
- **Machaca:** s'obtenen grans amb cantons angulosos (molt més útil en l'àmbit estructural).

Prop del 70% del volum del formigó està ocupat pels àrids, per això, la qualitat d'aquests és molt important. Els àrids són l'esquelet inert del formigó que donen rigidesa per resistir a l'acció de càrregues, de l'abradió, del pas de la humitat i de les sol·licitacions químiques. A més, milloren l'estabilitat dimensional en reduir canvis en el volum de la pasta de ciment, milloren l'economia del material, aturen la fissuració i tenen millor durabilitat que la pasta de ciment.

Els àrids segons les seves dimensions es poden classificar en:

- **Àrids fins o sorres:** àrids amb un diàmetre inferior a 5mm.
- **Àrids gruixuts o graves:** àrids amb un diàmetre superior a 5mm [28].

3.2.3. Aigua

L'aigua hidrata al ciment, genera la reacció d'hidratació del formigó i en estat fresc li confereix plasticitat.

3.2.4. Additius

Són elements que s'agreguen al formigó en petites quantitats per modificar alguna propietat per acció física, química o fisicoquímica. Aquests es poden afegir abans de realitzar la mescla o durant la barreja.

L'efectivitat dels additius en el formigó es troben en funció de diferents variables, com ara la composició química de l'additiu, la temperatura en la qual es troba el formigó, la composició i finor del ciment, el contingut del ciment i la presència d'un altre additiu.

Segons la seva funció es poden classificar en:

- **Plastificant:** material que ofereix una alta treballabilitat al formigó i redueix la relació aigua/ciment sense afectar a les seves característiques. Incrementar el contingut d'aigua per aconseguir millorar la treballabilitat, repercuteix de forma negativa en la resistència mecànica, en la durabilitat i en la permeabilitat. Per mitjà de la utilització dels plastificants es pot obtenir una reducció de la quantitat d'aigua en la mescla fins a un 15%.
- **Retardador:** material que disminueix la velocitat de la reacció química entre el ciment i l'aigua endarrerint l'inici del procés de fraguat. Es fa servir, principalment, per compensar l'efecte accelerant que té el clima càlid en el fraguat del formigó, per retardar el fraguat inicial del formigó quan es presenten condicions difícils o poc usuals i per endarrerir el fraguat en aplicacions d'acabats especials.
- **Accelerant:** material que augmenta la velocitat de la reacció química entre el ciment i l'aigua i agilitza l'inici del fraguat. S'utilitza principalment per accelerar el desenvolupament de la resistència inicial del formigó.
- **Plastificant retardador:** material que combina les accions del plastificant i el retardador.

- **Plastificant acceleradors:** material que combina les accions del plastificant i l'accelerant.
- **Superplastificant:** material que ofereix una alta treballabilitat del formigó reduint la relació aigua/ciment sense afectar les característiques del ciment. Incrementar el contingut d'aigua per aconseguir millorar la treballabilitat repercuteix de forma negativa en les resistència mecànica, en la durabilitat i en la permeabilitat. Amb la utilització dels superplastificants es pot aconseguir una reducció de la quantitat d'aigua en la mescla fins a un 30%.
- **Superplastificant retardador:** material que combina les accions d'un superplastificant i un retardador.
- **Incorporació d'aire:** material que permet que una quantitat controlada de petites bombolles d'aire incorporades durant la barreja de la mescla romangui després de l'enduriment. S'utilitza per retenir intencionalment bombolles microscòpiques d'aire dins el formigó, millorar dràsticament la durabilitat dels formigons exposats a la humitat durant els cicles de congelació i desgel, millorar considerablement la resistència del formigó contra el despeniment de la superfície i millorar de manera important la treballabilitat del formigó fresc i la segregació [9].

3.3. Hidratació del ciment Pòrtland

La hidratació del ciment Pòrtland és una seqüència de reaccions químiques entre el clínquer, el guix i l'aigua que es produeixen de forma simultània, a diferents velocitats i que s'influencien una sobre l'altre. Aquest procés condueix a un fraguat i un enduriment de la pasta de ciment. Com a resultat, s'obté un material amb unes propietats diferents de les inicials.

Cal esmentar també que durant tot el procés d'hidratació la mescla allibera calor, és a dir, la reacció d'hidratació és exotèrmica. Així i tot, cada component del ciment allibera una quantitat d'energia diferent [29].

El procés d'hidratació del ciment Pòrtland és un procés complex de dissolució-precipitació que segons l'emissió de calor de la mescla es pot dividir en cinc etapes:

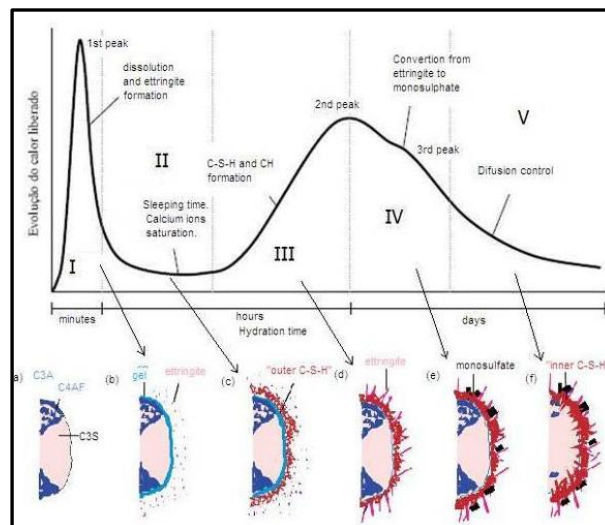


Figura 18. Gràfica de les diferents etapes de la reacció d'hidratació [31]

▪ **Etapa 1: Preinducció**

Com s'ha esmentat anteriorment, el ciment Portland està compost pel clínquer, format per quatre fases de C₃S, C₂S, C₃A i C₄AF en diferents proporcions, i guix.

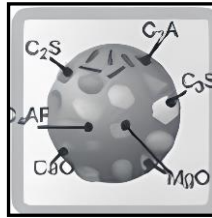


Figura 19. Partícula de ciment abans de reaccionar amb l'aigua [30]

La fase de preinducció s'inicia just quan l'aigua entra en contacte amb el ciment. En aquest moment es produeix una dissolució ràpida de les quatre fases del clínquer i els sulfats presents en el ciment.

Els components que reaccionen més ràpidament i de forma violenta són el C₃S i el C₃A. Aquests produeixen un augment de la temperatura de la mescla que finalitza al cap de 10-15 min aproximadament després del seu inici. Durant aquest període inicial el silicat tricàlcic o alita (C₃S) es dissol superficialment en ions de silicat, H₂SiO₄⁻⁵, ions OH⁻ i ions Ca²⁺ que passen a la solució.

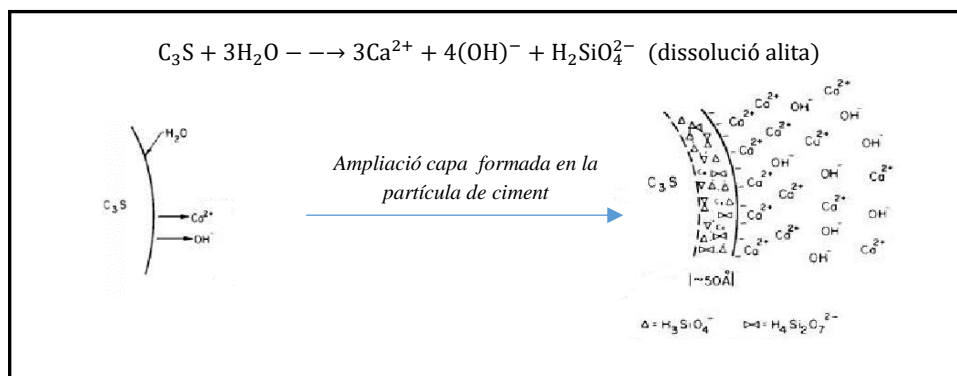
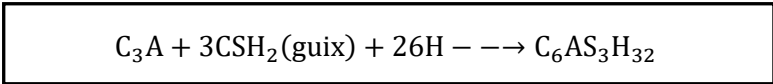
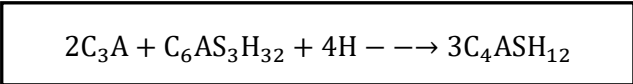


Figura 20. Representació de la dissolució del silicat tricàlcic quan reacciona amb l'aigua [29]

En aquesta etapa la concentració de Ca²⁺ augmenta mentre que la dels ions de Si⁴⁺ arriba fins a un màxim i, posteriorment, disminueix. A la vegada, el C₃A reacciona amb el guix i l'aigua formant l'ettringita que crea una capa que recobreix el gra de ciment amb l'objectiu d'obstaculitzar la difusió de Ca²⁺, OH⁻, SO₄⁻ a través del mateix gra i disminuir la velocitat d'hidratació.



L'ettringita (Aft) es forma constantment fins que s'esgota la quantitat d'anions de sulfat i el compost reacciona amb C₃A per formar una nova fase anomenada monosulfoaluminat càlcic hidratat (Afm). Aquesta reacció succeeix en etapes posteriors.



En aquest moment l'estat de les partícules de ciment seria tal com es pot veure en la següent imatge amb l'inici de la formació de gel C-S-H, a causa de la hidratació inicial de la C_3S que es forma al voltant de la partícula i la formació d'ettringita (Aft).



Figura 21. Partícula de ciment durant l'etapa de preinducció [30]

Pel que fa a les propietats mecàniques es produeixen canvis en la composició de la fase líquida que poden influir en el fraguat posterior [30].

▪ Etapa 2: Inducció

A mesura que la reacció d'hidratació evoluciona, la velocitat dels processos d'hidratació es redueixen de manera significativa, aproximadament entre 2 i 3 hores. L'emissió de calor finalitza i la concentració d'ions Ca^{2+} arriba fins a un nivell de saturació. Per consegüent, comença la nucleació i precipitació del gel C-S-H al voltant dels grans de ciment i de portlandita. Aquest últim compost apareix perquè la quantitat de calci (Ca) en el silicat anhídrid (sense hidratar) és superior a la del silici (Si) i això provoca una alliberació d'ions $(OH)^-$ i Ca^{2+} excedents.

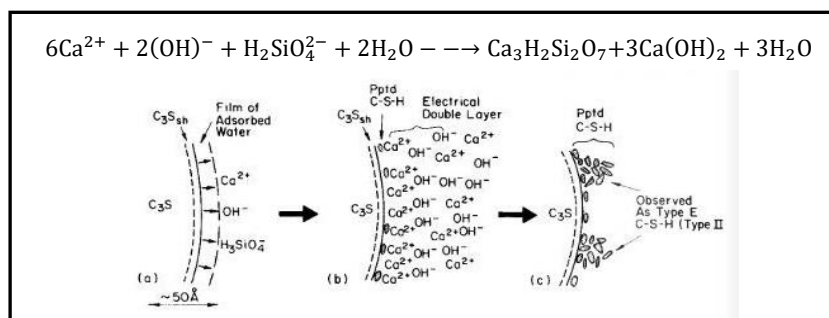


Figura 22. Representació esquemàtica del mecanisme dissolució-precipitació en la hidratació del C_3S , formant CSH. (a) Després de 1 segon (b) Després de 1 minut (c) Després de 1 hora [29]

En aquesta etapa es formen els productes d'hidratació i l'alliberació de calor baixa. A més, hi ha un increment continu de la viscositat del compost. La hidratació del silicat de calci determinarà l'inici del fraguat i la fi del període d'inducció. Les partícules de ciment en aquesta etapa presenten l'ettringita i la formació de CSH i portlandita en l'exterior.

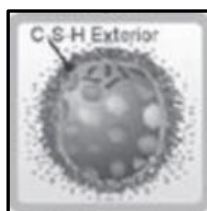


Figura 23. Partícula de ciment durant la etapa de inducció [30]

Pel que fa a les propietats mecàniques, s'obté una pasta manejable i fàcil de treballar que permet donar forma al ciment perquè posteriorment fragui i s'endureixi [29].

▪ **Etapa 3: Acceleració**

En aquesta etapa s'inicia el procés de fraguat. El procés d'hidratació, controlat per la nucleació i creixement dels productes d'hidratació, s'accelera de nou i l'emissió de calor de la pasta de ciment s'eleva una altra vegada. Es formen grans quantitats de CSH i la portlandita continua precipitant produint un descens de la concentració d'ions Ca^{2+} el que provoca una acceleració en la velocitat de dissolució de C_3S .

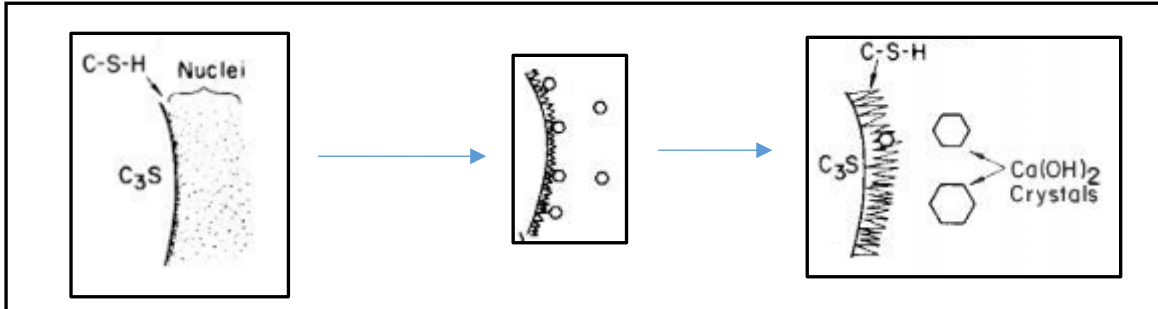


Figura 24. Formació de portlandita i CSH al voltant de les partícules de ciment [29]

La ràpida formació de compostos hidratats fa passar de l'estat fluid del material a un estat sòlid (etapa de fraguat) provocant una disminució de la porositat. Durant aquesta etapa, les partícules de ciment mostren ettringita i la quantitat més gran de formació de CSH i portlandita en l'exterior de la partícula reduint el volum entre elles.

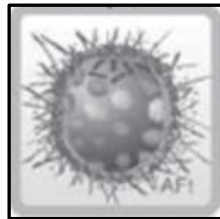


Figura 25. Partícula de ciment durant la etapa d'acceleració [30]

Pel que fa a les propietats mecàniques, la pasta de ciment passa d'una consistència plàstica a una de rígida (fraguat inicial i final) desenvolupant la resistència inicial del material [29].

▪ **Etapa 4: Desceleració**

La pasta finalitza el fraguat i comença l'etapa d'enduriment. A diferència de les fases anteriors, on el mecanisme de control de la velocitat de la reacció és la dissolució de C_3S , en aquesta etapa el mecanisme és la difusió de Ca^{2+} i Si^{4+} a través de les capes de gel C-S-H que envolten els grans de ciment. L'hidratació del C_2S , similar a la de C_3S , comença a ser més significativa perquè aporta un augment de la resistència mecànica de la mescla i es produeix la formació del monosulfoaluminat càlcic hidratat esmentat anteriorment. A més, durant aquesta quarta etapa la calor emesa per la mescla comença a disminuir i apareix un descens continu de la porositat a causa de la formació d'enllaços entre partícules de ciment i d'aquestes mateixes unides amb l'àrid.

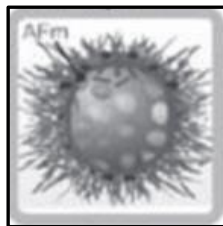


Figura 26. Partícula de ciment durant l'etapa de desacceleració [30]

En referència a les propietats mecàniques de la mescla, es produeix un desenvolupament continu de la seva resistència que fa disminuir la fluència, porositat i morfologia del sistema hidratat que determinarà la resistència final, l'estabilitat de volum i la durabilitat del material [29].

▪ **Etapa 5: Difusió**

Al llarg d'aquesta etapa, el gel C-S-H es condensa i densifica, com a conseqüència de la disminució del coeficient de difusió dels ions Ca^{2+} i Si^{4+} . Durant aquest procés, continua el creixement dels cristalls de portlandita i les partícules de ciment segueixen hidratant-se formant CSH.

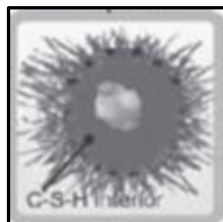


Figura 27. Partícula de ciment durant l'etapa de difusió [30]

En relació a les propietats mecàniques, la mescla continua endurint-se, però a un nivell molt lent en comparació a l'etapa anterior. Aquest augment de resistència segons el tipus de ciment pot durar anys [29].

Segons les propietats mecàniques del ciment Portland durant el procés d'hydratació es pot dividir el seu comportament en tres etapes: estat fresc, fraguat i enduriment.

- **Estat fresc:** és la primera fase de la hidratació que comença quan el ciment entra en contacte amb l'aigua. Es forma una pasta en estat plàstic manipulable i modelable. A mesura que va passant el temps, la pasta va adquirint rigidesa, fins al punt de perdre certa plasticitat i ser difícil de manipular (començament del fraguat). La manipulació del formigó, ja sigui per temes de transport, col·locació o compactació, es realitza durant aquesta etapa que té una duració aproximada de 3 h. Si es manipula passat aquest temps, es poden trencar els enllaços que s'estan formant i això perjudica el resultat final.
- **Fraguat:** correspon a l'etapa compresa entre el fraguat inicial i el final del formigó. En aquest estat el material es troba en un constant augment de rigidesa i progressivament va perdent la seva plasticitat. La duració de l'etapa de fraguat s'estima en unes deu hores, encara que pot anar variant, depenent de l'humitat relativa, de la temperatura ambient, de la quantitat de ciment, de la finor d'aquest, de l'ús d'additius, etc.
- **Enduriment:** etapa posterior al fraguat final. El formigó comença la seva fase d'enduriment on es desenvolupen les seves resistències mecàniques de manera progressiva. Durant aquesta etapa el formigó es torna més dur i resistent. L'augment de la resistència pot durar uns quants dies [9].

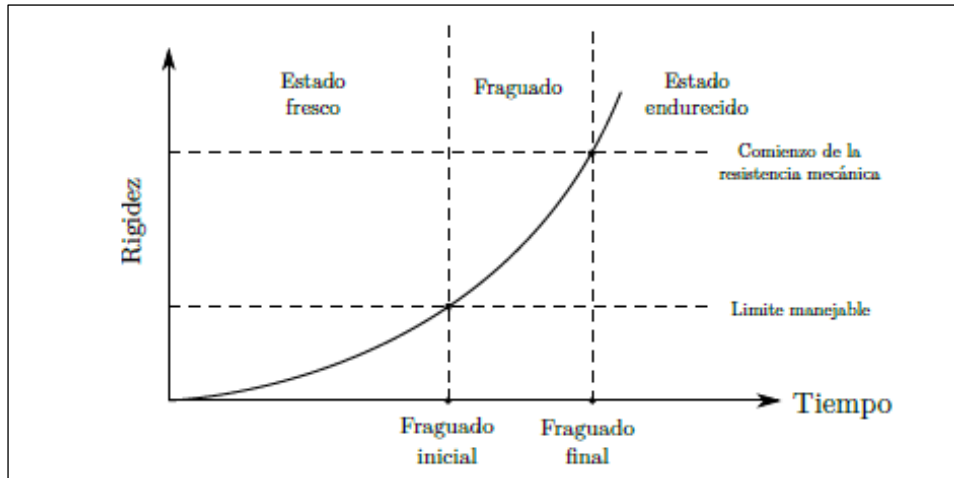


Figura 28. Gràfic de l'obtenció de rigidesa del formigó respecte al temps indicant les diferents etapes d'hidratació des d'un punt de vista mecànic [9]

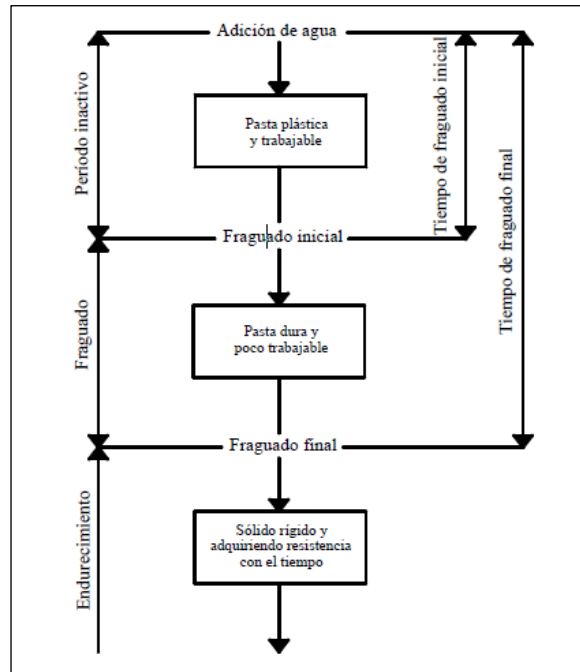


Figura 29. . Esquema del comportament del formigó al pas del temps des d'un punt de vista mecànic [34]

3.4. Factores que influeixen en la fraguat del formigó

El procés d'hidratació del ciment afecta directament al fraguat del formigó. Entre els factors que influeixen més en la hidratació del ciment destaquen el tipus i finor del ciment, la relació aigua/ciment, la temperatura i humitat ambientals i la utilització d'adicions i additius.

▪ Tipus i finor del ciment

El tipus de ciment ve determinat, principalment, per la composició química i la quantitat del clínquer. Si s'utilitzen altes quantitats de clínquer en la composició del formigó, les de silicats (SiO_4^{-4}) augmentaran. Això farà que es pugui hidratar més ràpidament i, per tant, reduir el temps de fraguat.

D'una altra banda, la finor del ciment també és un aspecte influent en la seva hidratació. Si el gra és més fi (grans més petits), hi haurà més superfície específica per produir la hidratació, de manera que es reduirà el temps de fraguat [33].

▪ Relació aigua /ciment

Per començar la hidratació i el fraguat es necessita una quantitat mínima d'aigua que vindrà determinada per la quantitat de ciment. Per aconseguir un fraguat ràpid serà necessari poca quantitat d'aigua, és a dir, una relació aigua/ciment baixa, la mínima per assegurar la consistència desitjada [33].

▪ Temperatura i humitat ambiental

La temperatura de l'ambient influeix significativament, accelerant el fraguat en el cas de temperatures elevades i amb baixa humitat (properes als 30°C) o reduint-lo per poder aconseguir parar la recció en temperatures pròximes als 0°C [33].

▪ Utilització d'addicions

La utilització d'aquest tipus de compostos es pot classificar en addicions actives i inertes.

- **Addicions actives:** són aquelles que tenen activitat putzolànica i reaccionen químicament (fum de sílice, cendres volants, escòria...). Provoquen modificacions en la hidratació del ciment en funció de la composició química i percentatge de substitució de ciment.

Les putzolanes (fum de sílice, cendres volants, escòria...) disminueixen la proporció de portlandita i augmenten la de CSH (producte de l'enduriment), milloren la durabilitat, contribueixen a la resistència a llarg termini, alenteixen la velocitat de reacció i produeixen menor calor d'hidratació que el ciment sense addició.

- **Addicions inertes:** són aquelles que s'utilitzen com a complement de la corba granulomètrica per les mides més fines (farina de quars, filler de calisa). No provoquen modificacions en la hidratació del ciment i la seva funció principal és omplir els forats de la mescla [33].

▪ Utilització d'additius

Són productes que s'afegeixen en el ciment durant la seva elaboració amb l'objectiu de modificar les seves propietats, tant en estat fresc com endurit. Sobre aquest tipus de substàncies és important tenir en compte els següents aspectes:

- L'efecte d'un mateix additiu en la mateixa proporció pot ser diferent segons el tipus de ciment.
- La quantitat d'additiu és molt important i no té per què tenir una relació directa i lineal amb l'efecte que es vol produir.

- Es poden utilitzar additius líquids i en pols en funció de les característiques i altres aspectes de la mescla.
- S'han d'utilitzar additius seguint la normativa establerta [33].

4. Propietats del formigó en imprimir

4.1. Introducció

Com ja s'ha esmentat en l'apartat 2.2 *Impressió 3D dins del sector de la construcció* el material a imprimir (formigó) i la tècnica d'impressió són aspectes fonamentals d'estudi per a la realització d'una correcta impressió.

Pel que fa al material, les diverses propietats que presenta el formigó convencional no sempre seran aplicables a un formigó d'impressió, pel fet que aquest es modifica per presentar característiques que s'ajusten millor al procés d'impressió. S'ha de considerar que el material ha de ser transportat per un sistema de subministrament i posteriorment ha de passar per un sistema d'extrusió. Per aquest motiu, el formigó ha de presentar certa fluïdesa durant tot el procés per poder ser finalment extrudit. A més, ha de ser capaç de construir-se per capes amb una qualitat, unió i resistència acceptable tant en estat fluid, mantenint la forma sense deformar-se, com una vegada endurit.

Altres aspectes rellevants que afecten a la impressió són la tècnica d'impressió (velocitat procés d'impressió i extrusió, forma de subministrament...), la complexitat de la peça final i les condicions ambientals a l'hora d'imprimir.

Per aquest motiu, en aquest capítol es determinaran les propietats més importants que ha de presentar el formigó fresc per construir peces utilitzant aquesta tecnologia.

4.2. Propietats del formigó fresc

L'etapa de formigó fresc s'inicia quan el formigó sec entra en contacte amb l'aigua. D'aquesta manera, s'obté una mescla en estat plàstic fàcil de manipular i donar forma. Seguidament, comença el procés de fraguat el qual posa fi a aquesta etapa.

El formigó d'impressió té una sèrie de característiques i requisits particulars que s'han de complir perquè aquest es pugui utilitzar en una màquina d'impressió. És indispensable, per exemple, que el material presenti una consistència acceptable una vegada és extrudit.

Les cinc propietats principals que s'han de tenir en compte per qualsevol mescla de ciment en estat fresc amb la que es vulgui realitzar una correcta impressió són: l'extrudibilitat, l'edificabilitat, la treballabilitat, el temps obert i la qualitat d'extrusió. Aquestes propietats estan relacionades entre elles, per la qual cosa, és important conèixer-les per poder entendre aquestes relacions i trobar un equilibri entre elles [9].

4.2.1. Treballabilitat

És la propietat del formigó fresc que determina la facilitat de transportar-lo, manejar-lo i col·locar-lo, sense un risc apreciable de segregació³. Aquest és un paràmetre imprescindible no només per les tècniques d'impressió, sinó també per les convencionals, ja que la consistència del material afecta directament a la seva facilitat de manipulació i al resultat final quan aquest s'endureix [9].

³ La segregació del formigó és la separació dels seus components una vegada barrejats provocant que la mescla de formigó fresc presenti una distribució no uniforme de les seves partícules.

En el cas de la impressió 3D, la treballabilitat és un concepte massa genèric per mantenir controlat el material durant tot el procés. Això és degut a què en aquesta tècnica de construcció, a diferència d'altres, és necessari que el material passi per una bomba, que després circuli per una manega i finalment sigui extrudit. És difícil pensar que la mescla es trobarà en les mateixes condicions de treballabilitat tant en l'inici com al final del procés. Per aquest motiu, es necessari realitzar un estudi de la reologia⁴ del formigó per tal de controlar-lo millor.

La determinació del comportament del formigó fresc és complex, ja que es tracta d'una mescla de components. La seva aparença és una pasta viscosa no homogènia, formada per partícules (grans de ciment) en un líquid (aigua), on es troben en suspensió partícules sòlides (àrids). Tot i això, a nivell macroscòpic la mescla flueix sent incapaç de mantenir la seva forma al aplicar-se esforços tangencials sobre ella [35].

Qualsevol fluid presenta una relació entre l'esforç tallant que ha de suportar i el gradient de velocitat que indueix en ell. D'aquesta manera, es poden trobar fluids on la determinació del seu comportament és senzilla, com els fluids Newtonians, i altres que no ho són tant. En el cas del formigó fresc, diversos autors com Tattersall i Banfill han estudiat la reologia del material i coincideixen en el fet que el seu comportament s'aproxima al d'un fluid Bingham. Aquest es caracteritza per fluir quan el material és sotmès a una tensió superior o igual a un valor crític anomenat tensió o esforç de fluïdesa (τ_0). Quan és superat, la mescla es comporta similar a un fluid Newtonià on el gradient de velocitat evoluciona de forma proporcional a l'esforç tallant, sent el factor de proporcionalitat la viscositat plàstica (μ) [36].

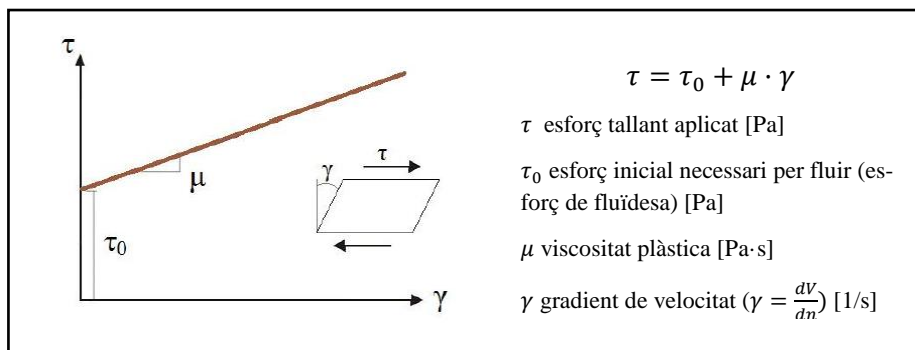


Figura 30. Gràfica tensió-deformació i l'equació d'un fluid Bingham [40]

Alguns formigons, com els autocompactants i autonivellants, difereixen una mica d'aquest model, ja que no compleixen la funció lineal de l'equació de Bingham. En aquests casos particulars, s'utilitza l'equació de Herschel-Bulkley (HB). Aquesta és més complexa i sovint quan els valors dels gradients de velocitats són baixos l'equació s'aproxima a una relació lineal entre l'esforç tallant i la velocitat de tall [35].

⁴ La reologia és la ciència que estudia la deformació i el fluir de la matèria. El seu objectiu és trobar equacions constitutives que modelin el comportament del material.

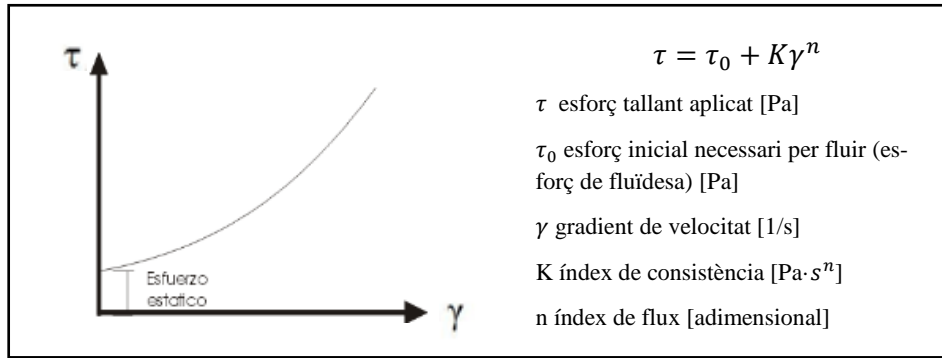


Figura 31. Gràfica tensió-deformació i equació d'un fluid amb comportament Herschel-Bulkley [35]

Existeixen molts factors que poden variar el comportament fluid de la mescla de ciment. Els principals que afecten la reologia del formigó són els relacionats amb la composició de la mescla com la forma i tipus d'àrids utilitzats, el contingut d'aigua i les característiques del ciment.

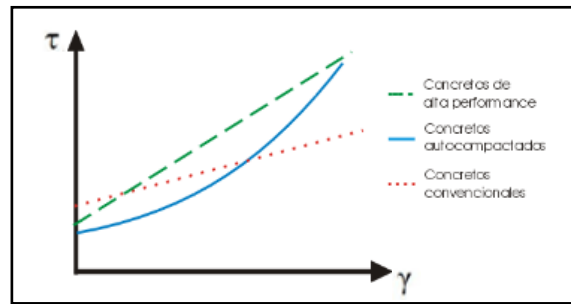


Figura 32. Gràfica tensió-deformació de tres ciments diferents (convencional, autocompactant i d'alt rendiment) [35]

Ara bé, també existeixen factors secundaris com el mètode utilitzat durant la barreja, seqüència d'introducció dels materials per barrejar-los, el temps de mescla i la temperatura ambient de treball que cal tenir en compte en l'afectació de la reologia del formigó.

Una altra característica rellevant del formigó, que afecta directament a la treballabilitat, és el seu comportament tixotropi⁵. Aquesta característica provoca que el formigó mantingui les seves propietats fluides si es troba en moviment a l'aplicar-li un esforç de tall mínim anomenat límit elàstic dinàmic. Ara bé, si el formigó una vegada mesclat el deixem en repòs, sense moure'l, aquest començarà a adquirir viscositat fins a convertir-se en una massa incapaç de fluir. D'aquesta manera, augmenta el límit elàstic de la mescla i disminueix la seva capacitat de deformació, convertint-se en un material més fort i rígid. Si volem que la mescla torni a ser fluida haurem d'aplicar un esforç de tall superior al límit elàstic dinàmic anomenat límit elàstic estàtic. Amb el temps el límit elàstic estàtic i dinàmic s'incrementa independentment del moviment provocat a la mescla a causa de la reacció d'hidratació [37].

⁵ La tixotropia és la propietat d'alguns fluids no Newtonians o pseudocoplàstics de no mantenir una viscositat constant al llarg del temps, disminuint quan es troben sota un esforç tallant i augmentant si el fluid es deixa en repòs.

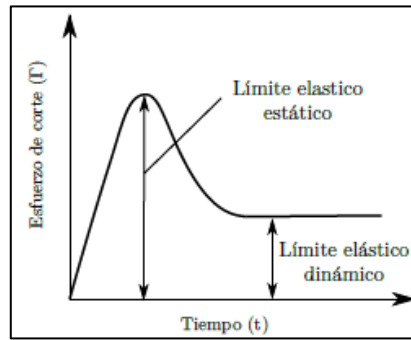


Figura 33. Gràfica tensió de tall-temps on s'observa el comportament tixotòpic del formigó [9]

Per explicar aquest comportament tixotòpic del formigó s'ha d'observar la mescla des d'un punt de vista microscòpic. Segons Nicolas Roussel, s'ha demostrat que la capacitat que tenen les mescles de ciment per presentar un límit elàstic i construir una estructura, quan es troba en repòs, s'origina per la seva capacitat de flocular i nuclear hidrats (CSH) en els punts de pseudo-contacte entre els grans de ciment. A continuació, s'analitzarà l'evolució microscòpica que ha patit el material una vegada ha finalitzat la barreja.

1. **Etapa inicial:** en la primera fase just acabada la mescla entre el ciment, l'aigua i els àrids les partícules de ciment es dispersen.
2. **Etapa de floculació:** en la segona fase, a causa de les forces d'atracció col·loïdals, les partícules de ciment floculen i es forma una xarxa de partícules, amb un mòdul elàstic i un límit elàstic inicial, que li permeten resistir esforços. S'ha demostrat que aquest comportament elàstic apareix en qüestió de segons després que el flux estigui en repòs. El material continua reorganitzant-se durant més temps fins a aconseguir una xarxa de partícules de ciment que interactuen entre elles.
3. **Etapa de nucleació:** en els punts de pseudo-contacte entre partícules dins de la xarxa formada té lloc la nucleació d'hidrats (CSH). Tot i que el material es trobi en l'etapa d'inducció o latència, on les reaccions són més lentes, aquesta nucleació a escala local converteix les interaccions col·loïdals dèbils entre partícules de ciment en interaccions més fortes energèticament. Com a conseqüència, augmenta el mòdul elàstic del material.
4. **Etapa d'estructuració:** l'augment de mida i número dels ponts d'hidrats (CSH) provoquen un augment del mòdul elàstic i del límit elàstic a escala macroscòpica. A escala microscòpica es produeixen reaccions irreversibles que creen enllaços d'hidrats entre partícules. Tot i això, aquests enllaços poden ser prou dèbils per poder ser trencats a través de la cisalla o remescla de la pasta de ciment. La formació d'enllaços no és incompatible amb una evolució reversible com s'espera en un comportament tixotòpic. Per tant, la hidratació pot ser reversible sempre i quan la força de la remescla sigui prou forta per trencar els ponts d'hidrats entre partícules de ciment. Tanmateix, la reacció d'hidratació és l'origen de la solidificació de la mescla i és qüestió de temps que la força per mesclar la pasta sigui massa elevada per trencar les connexions entre partícules [37].

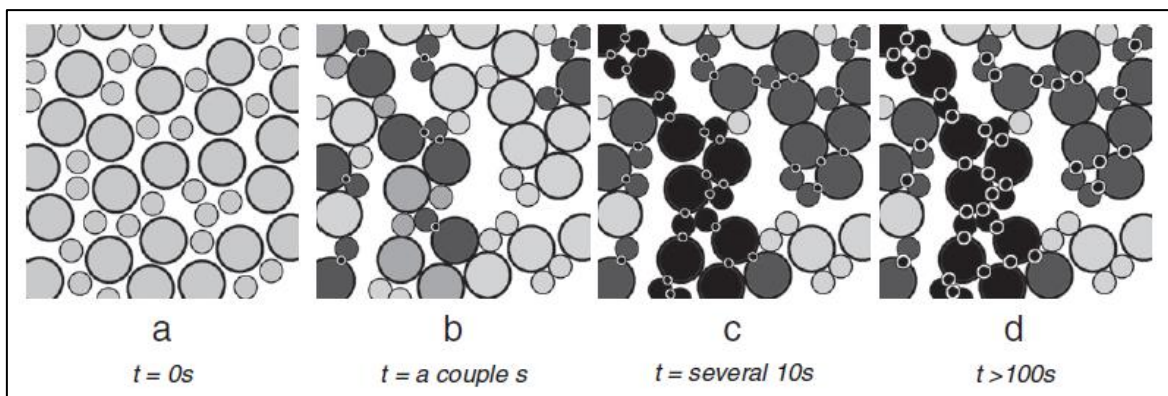


Figura 34. Xarxa de partícules de ciment que interactuen en el període de latència. (a) Les partícules de ciment es dispersen al final de la fase de barreja; (b) Un parell de segons després del final de la barreja, les partícules de ciment flocculen formant una xarxa filtrada d'interaccions col·loïdals. Les partícules més fosques pertanyen a un camí de percolació. Als punts de pseudo-contacte entre partícules, la nucleació de CSH (punts blancs i negres) comença immediatament a convertir localment la interacció col·loïdal entre les partícules de ciment en una interacció molt més rígida; (c) Totes les partícules en el camí de percolació (partícules negres) estan unides per ponts CSH que formen una xarxa rígida del material; (d) El mòdul d'elasticitat de la barreja continua augmentant a mesura que augmenta la mida dels ponts CSH (punts negres i blancs) [37]

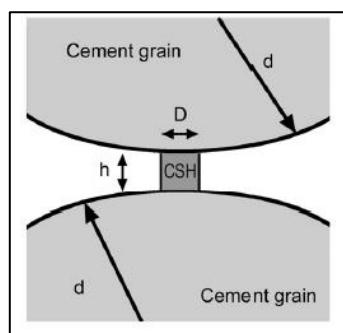


Figura 35. Pont CSH entre dos grans de ciment [37]

El comportament tixotropi de la mescla depèn del temps de repòs i aquest es troba present en el material durant un temps limitat. Si deixem la mostra molta estona en repòs, s'haurà deixat durant massa temps fent que el material formi enllaços forts entre partícules que no es poden separar. Tot i això, la reacció d'hidratació, independentment del temps de repòs, anirà endurent el material de forma progressiva.

Aquesta limitació s'explica en un estudi del comportament tixotropi realitzat per Wallevik on s'exposa la teoria PFI. L'autor comenta que una vegada duta a terme la mescla si el formigó no pateix cap esforç tallant, és a dir, si es deixa en repòs, les partícules de ciment de la mescla es van hidratant formant enllaços entre elles. Inicialment, es troben partícules de ciment lliures i enllaços entre partícules que poden ser tant de naturalesa reversible com permanent [Figura7,a]. Si en aquest estat es torna a barrejar la mescla, els enllaços reversibles es trenquen mentre que les partícules amb connexions permanents romanen connectades entre si [Figura7,b]. Ara bé, si el temps de repòs és més elevat es deixa que la mescla produeixi més enllaços permanents [Figura7,c]. A simple vista, ens pot enganyar la consistència de la pasta de ciment, ja que en l'estat de la [Figura 36,a] i la [Figura 36,c] es presenta la mateixa treballabilitat. La diferència es troba en el fet que el primer estat pot tornar a ser fluid si s'agita la mescla, en canvi, en el segon això no es pot fer. La [Figura 36,e] es troba en un estat de fraguat on està començant el desenvolupament de l'enduriment del material i, per tant, de la seva força. Aquest estat es considera fora de l'abast de la teoria PFI, ja que aquesta només comprèn l'etapa d'inducció [38].

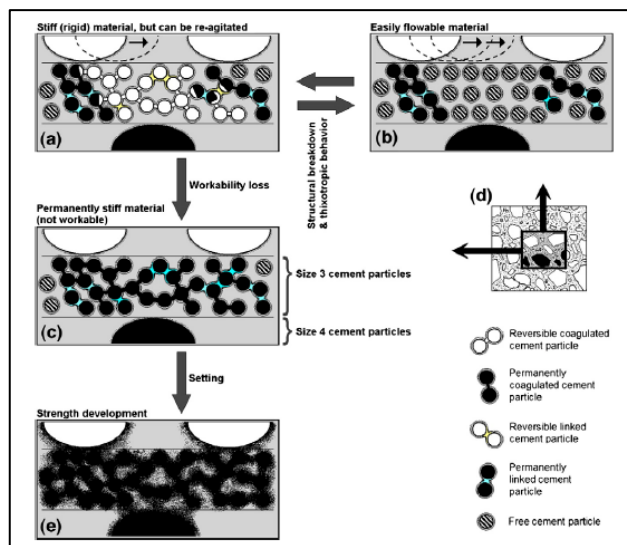


Figura 36. Visualització dels aspectes més importants de la teoria PFI [38]

Segons diversos articles de caràcter experimental el comportament final que presenta la mescla de ciment és com s'observa a la figura 37. En aquesta es pot veure clarament que el morter s'ajusta al model de Bingham amb la corba de baixada aproximada a una línia recta on el flux està totalment desenvolupat. Així i tot, no se superposa a la corba ascendent, ja que per poder obtenir el flux totalment desenvolupat cal realitzar una ruptura estructural durant el període de repòs que és el que produeix la forma corbada del gràfic de la figura 37 [39].

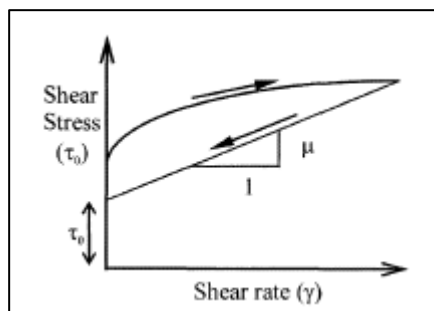


Figura 37. Gràfica tensió-deformació del comportament tixotòpic i de Bingham del formigó [39]

4.2.2. Extrudibilitat

Segons diversos autors es defineix l'extrudibilitat o capacitat d'extrusió com la capacitat de transportar el formigó fresc a través d'un sistema de subministrament i bombament fins a un extrusor on el material s'extrudeix en forma de filaments continus [9].

A causa de l'existència de diferents màquines d'impressió 3D els sistemes d'extrusió i mecanismes són diversos. Aquest poden ser el tipus de bomba, l'extrusor que pot variar en forma, secció o mida, entre d'altres. Per tant, aquesta propietat ve molt determinada pel tipus de sistema utilitzat en la impressió.

4.2.2.1. Bombament

Dins del sistema de subministrament l'element més rellevant i que és el causant del moviment del fluid és la bomba. La capacitat de bombament del formigó es pot definir com la facilitat que aquest té per fluir a través d'un conducte a causa de la pressió exercida per una bomba. Aquesta depèn principalment de les propietats específiques de la mateixa mescla, però existeixen aspectes secundaris que també afecten el bombament de la mescla com l'equip de treball, la longitud i l'altitud de la màniga o la temperatura.

Perquè el formigó tingui una capacitat de bombament òptima ha de complir certs criteris com romandre homogeni durant tot el procés sense presentar segregació en cap moment. A més, la mescla ha de presentar una treballabilitat mínima durant tot el procés de bombeig per fluir adequadament i per mantenir la dimensió de capa en finalitzar.

Tot i això, els dos factors que determinen que un bombament es realitzi de forma correcta són la composició de la mescla i evitar l'aparició de bloquejos.

4.2.2.1.1. Composició de la mescla

La influència de la composició del formigó per facilitar el seu bombeig està recollida en diversos manuals amb el fi d'obtenir mescles òptimes com pot ser la publicada per l'ACI (1996) o per Bergemann, Klafszky i Wirsching (2004) [41][42].

Aquestes publicacions parlen de la influència dels components de la mescla durant bombejos en construccions d'obra. Tot i això, aquestes influències es poden replicar en un sistema de bombeig per impressió.

- **Àrids:** pel que fa a la seva forma aquests poden presentar una forma angular o arrodonida. Les dues poden ser bombejades de forma satisfactòria, però es preferible una forma arrodonida. Per altra banda, pel que fa a la mida, en impressió no se solen utilitzar mescles de ciment amb àrids molts grans, més aviat s'utilitzen només àrids amb diàmetres que no superen els 5 mm, és a dir, morters de ciment. També és important tenir un control de la quantitat d'àrid, ja que aquesta pot afectar a la treballabilitat de la mescla [40][41][42].
- **Relació aigua/ciment:** la proporció d'aigua en la mescla afecta la consistència i treballabilitat d'aquesta en estat fresc i a la seva resistència una vegada ja endurit. La seva quantitat està determinada per les mides màximes d'àrids del material i del valor d'assentament que vulguem obtenir. Afegir aigua a la mescla fa que aquesta sigui més fluida, per tant, més treballable i amb un assentament més elevat, el qual beneficia el seu bombament. Tot i això, un excés d'aigua produeix una segregació de la mescla que no ens interessa perquè és la principal causa dels bloquejos en els tubs. Cal tenir en compte que és possible la pèrdua d'assentament entre l'inici del bombeig i l'extrusió del material, ja que els àrids poden absorbir part de l'aigua afavorida per la pressió en bombejar [40][41][42].
- **Utilització d'additius i fibres:** els additius s'utilitzen principalment per millorar la treballabilitat de la mescla de ciment en termes de bombeabilitat. Els més usats són els superplastificants, additius que incorporen aire o minerals fins com les putzolanes. Pel que fa a les fibres, tot i que aquestes afecten la viscositat del formigó la majoria no presenten un efecte negatiu en la capacitat de bombeig [40][41][42].

4.2.2.1.2. Bloquejos

Per garantir un bombeig satisfactori és important evitar que es produeixin bloquejos, ja que poden provocar la paralització del procés d'impressió i la posterior neteja i extracció del material en totes les etapes del procés d'impressió.

Bamforth i Browne (1977) van estudiar aquest fenomen de forma extensa per trobar solucions al problema. Els científics van arribar a la conclusió que la principal dificultat que presentava el material a fluir era la segregació del formigó i com a conseqüència es produïen taps en el tub per l'acumulació d'àrid [40].

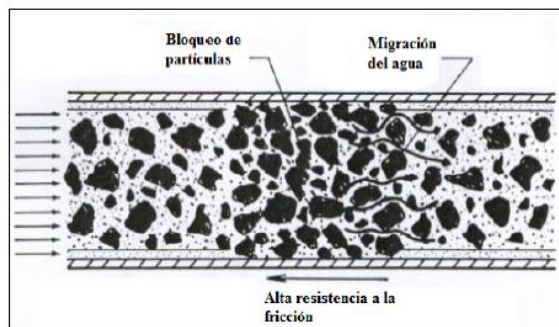


Figura 38. Figura del bloqueig d'una canonada degut a la acumulació d'àrid [40]

Per evitar l'aparició de bloquejos s'han de prendre certes precaucions com:

- El formigó no ha de mostrar facilitat a segregar-se. Per tant, no és recomanable que la mescla tingui un excés d'aigua.
- Al inici del bombament és recomanable retirar certa quantitat de material per tal d'eliminar els àrids que no es trobin en suspensió dins del fluid [40].

4.2.3. Temps obert

El temps obert és un paràmetre que determina el canvi de la treballabilitat del material en el temps. El seu coneixement és imprescindible per poder controlar si el material serà capaç d'adherir-se a la capa que s'afegirà damunt seu i si a la vegada tindrà la consistència suficient per suportar el seu pes.

Per fer aquest control primer s'ha de determinar quina és la consistència mínima que ha de presentar el material perquè es pugui imprimir una capa sobre seu sense que es deformi. Seguidament, cal conèixer el temps que trigà a obtenir aquesta consistència.

L'evolució esperada del límit elàstic del formigó en el moment que es comença a imprimir es pot dividir en 4 etapes.

- **Etapa anterior a la disposició:** el formigó està sotmès a un elevat tall a causa de la seva barreja en la bomba i en l'extrusor. Pel que fa al seu comportament tixotrop, el material en trobar-se en continu moviment no guanya viscositat i flueix.
- **Etapa de deposició:** el material es diposita en capes primes en comparació a l'altura de la peça final. Això es realitza per limitar la tensió inicial causada per la gravetat. Aquest gruix pot variar entre 1mm fins a 10 cm. Per tal que la capa es mantingui estable després de la disposició el material ha d'adquirir un límit elàstic adequat prou ràpid per no deformar-se. Aquest apareix en els instants inicials quan el material està en repòs a conseqüència del procés de floculació i nucleació. El límit elàstic inicial del material juntament amb la gravetat dona l'origen de la forma de la capa dipositada.

- **Etapa de resistència en verd:** és un període de transició on el límit elàstic continua augmentant amb el temps. En deixar el material en repòs el formigó fresc va adquirint resistència en verd, un concepte esmentat en l'article [43] que fa referència a la resistència en verd que apareix en els processos de sinterització de metalls o materials ceràmics. En aquest context el terme defineix l'etapa en la qual el formigó presenta prou resistència per a conservar la seva forma. Tot i això, el material és incapaç de suportar el pes de múltiples capes i és essencial que aquesta etapa no sigui molt extensa, és a dir, que el temps entre l'etapa de deposició i l'etapa de ràpid guany de resistència sigui mínima. Aquesta és la fase que representa el temps obert durant el qual el formigó encara es pot manipular i col·locar.
- **Etapa de ràpid guany de resistència:** en aquesta etapa es produeix un augment sobtat del límit elàstic que representa un punt clau en la construcció d'estructures d'impressió 3D, ja que en aquest estat el material pot suportar més pes [43].

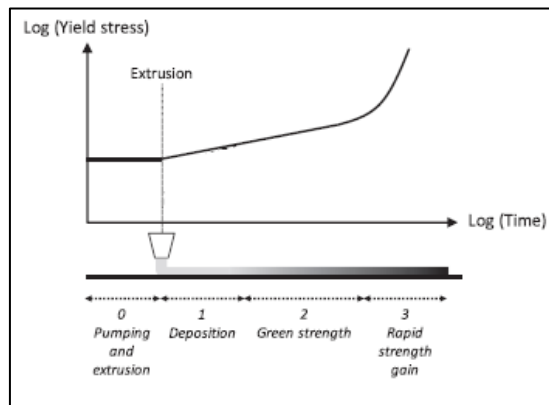


Figura 39. Evolució del límit elàstic d'una capa de formigó en el moment que es diposita [43]

4.2.4. Edificabilitat

L'edificabilitat és la capacitat que té el formigó fresc per ser construït en un número considerable de capes sense una deformació apreciable a causa del seu propi pes, del pes de les capes superiors i de la pressió de l'extrusió. A més, cal assegurar una bona adherència entre les capes.

Aquesta propietat presenta dues limitacions principals. La primera és que la resistència del formigó ha de ser prou per suportar el pes de les capes superiors sense deformar-se i la segona és que s'ha de poder adherir a la capa que s'imprimeixi a sobre seu. Per tal d'aconseguir les dues condicions esmentades s'ha de deixar la capa en un interval de temps determinat que s'haurà de controlar des del moment en què és dipositada. L'interval de temps ha de ser prou llarg perquè el límit elàstic de la capa augmenti i pugui suportar el seu pes i el dels anteriors. A més a més, també ha de ser prou curt per no perdre l'adherència entre capes. Per tant, serà el temps més curt en què la capa obté la rigidesa suficient per suportar el seu propi pes i el de les capes posteriors el que obtindrà millors resultats. Aquest temps és la propietat que ja s'ha anomenat anteriorment com a temps obert.

4.2.4.1. Limitació d'edificabilitat per falta de resistència de la capa

La capacitat de les capes extrudides per aguantar el seu propi pes i el dels posteriors durant l'etapa d'inducció està vinculada al límit elàstic del material. Com s'ha mencionat anteriorment als apartats de treballabilitat i temps obert, quan el material es troba en repòs el seu límit elàstic augmenta amb el pas del temps a causa de la floculació i de la posterior nucleació dels grans de ciment en els punts de pseudo-contacte formant hidrats (CSH). Aquest augment del límit elàstic, segons diversos

autors, segueix una progressió lineal i, per tant, la capacitat que té una capa per suportar més pes augmenta linealment amb el temps.

El límit elàstic inicial que obté la capa una vegada impresa és $\tau_{0,0} = \rho gh_0/\sqrt{3}$. On ρ és la densitat, g la gravetat i h l'altura de la capa. Aquest valor de tensió és el que s'aconsegueix per a qualsevol fluid estàtic.

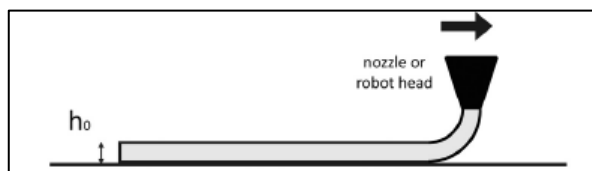


Figura 40. Extrusió i deposició d'una capa de espessor h_0 sobre el pla [37]

Al final de tot el procés el límit elàstic de la primera capa impresa ha de ser prou per suportar tota l'altura de la peça final impresa. Per tant, el seu valor és de $\tau_{0,f} = \rho gH/\sqrt{3}$.

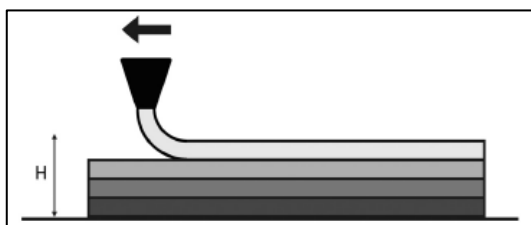


Figura 41. Fabricació additiva per extrusió d'un mur d'altura H . La Figura mostra les diferents capes que conformen la peça on les tonalitats grises representen el temps que ha estat el material dipositat (contra més temps més fosc) [37]

La velocitat a la qual augmenta el límit elàstic és un paràmetre molt important com ja s'ha esmentat en apartats anteriors. Aquest valor l'anomenarem A_{tix} i té un valor de

$$A_{tix} = \frac{\rho gH}{\sqrt{3} \cdot t_{H,min}} = \frac{\rho gh}{\sqrt{3} \cdot t_{h,min}} \quad [\text{Pa/s}]$$

On $t_{H,min}$ i $t_{h,min}$ és el valor mínim necessari per arribar a la capa final i per finalitzar una capa, respectivament.

Podem definir el temps mínim per elaborar una capa aïllant el terme de $t_{h,min}$ de l'expressió d' A_{tix} i obtenim una funció tal que així:

$$t_{h,min} = \frac{\rho gh}{\sqrt{3}A_{tix}} \quad [\text{s}]$$

Aquesta expressió es pot utilitzar per definir una velocitat horitzontal màxima (V). Per sobre de la qual, la formació estructural del formigó no seria prou ràpida per suportar la velocitat de deposició de la següent capa de material:

$$V < \frac{\sqrt{3}LA_{tix}}{\rho gh} \quad [\text{m/s}]$$

On L és la longitud de la capa. Segons un article elaborat per Roussel el valor de A_{tix} és una constant que es troba compresa entre un valor de 0 Pa/s pels ciments no trixotropics i un valor de 2 Pa/s pels més tixotropics [37][44].

4.2.4.2. Limitació d'edificabilitat per falta de adherència entre capes

La capacitat d'unió i adherència entre capes és una debilitat que presenten els sistemes de fabricació per adhesió i que, per tant, hem de tenir en compte. Segons diversos estudis s'ha arribat a la conclusió que els intervals de temps llargs condueixen a una resistència menor d'unió entre capes. Això significa que és important reduir el màxim l'interval de temps d'impressió de capes. Ara bé, la velocitat d'impressió tampoc ha de ser excessivament ràpida, ja que s'ha de deixar un temps suficient perquè la capa dipositada tingui la capacitat de resistir les càrregues de les capes posteriors.

De fet, recents estudis sobre formigons imprimibles han determinat que a altes taxes d'estructuració podrien formar al que s'anomena com juntes fredes i interfícies dèbils entre capes. S'ha definit un temps màxim de repòs ($t_{h,max}$) el qual la capa no ha de sobrepassar per la correcta adhesió entre elles.

$$t_{h,max} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho gh)^2}{12} + \left(\frac{2\mu V}{h}\right)^2}}{A_{tix}}$$

On μ és la viscositat plàstica de la mescla, A_{tix} es la constant de taxa d'estructuració, ρ és la densitat de la mescla, g la gravetat, V és la velocitat d'impressió [44].

4.2.5. Qualitat d'extrusió

Definim la qualitat d'extrusió com les propietats que presenta una capa impresa. Aquesta propietat està molt relacionada amb la capacitat d'extrusió, ja que una mala extrudibilitat de la mescla comporta una deficient qualitat d'extrusió i viceversa.

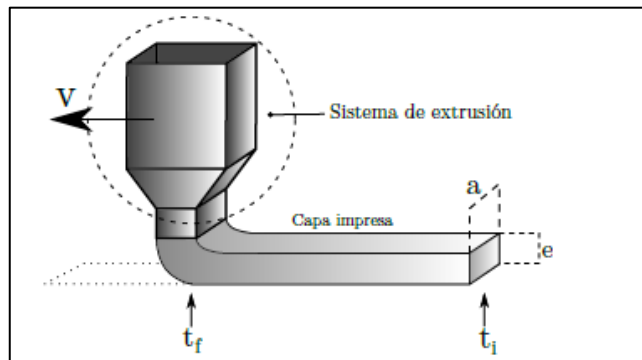


Figura 42. Esquema d'una capa extruïda en un interval de temps [9]

En quant als principals requisits que ha de complir una capa impresa per tenir una qualitat acceptable cal fixar-se en la qualitat superficial, la conformitat i l'estabilitat dimensional.

- **Qualitat superficial:** la capa del material imprès no ha de presentar cap defecte superficial, com pot ser la segregació, forats o esquerdes .
- **Conformitat dimensional:** les dimensions de la secció de les capes han de mantenir unes proporcions específiques.

- **Estabilitat dimensional:** és la capacitat que té la capa impresa a mantenir la conformitat dimensional durant el pas del temps [9].

5. Procediment experimental

5.1. Introducció

L'objectiu d'aquest capítol és dissenyar diferents assajos sobre les propietats principals que ha de presentar una mescla de ciment per facilitar la seva impressió 3D. Aquestes són: la treballabilitat, l'extrudibilitat, el temps obert, l'edificabilitat i la qualitat d'extrusió, les quals s'han comentat i definit més exhaustivament en l'apartat 4. *Propietats del formigó en imprimir*.

Per caracteritzar el material s'ha utilitzat un formigó sec del qual desconeixem la seva composició específica. L'empresa ha hagut de realitzar estudis per poder dissenyar un material de base de ciment que en reaccionar amb l'aigua presenti un comportament adient per la seva impressió 3D. Per aquest motiu, ha hagut de definir les quantitats específiques de ciment (aglomerant) i àrids, així com, l'elecció i les proporcions d'utilització d'additius i d'addicions.

En tots els assajos s'ha variat la dosificació d'aigua de la mescla i en alguns s'han afegit additius, sobre els que ja presenta el material i desconeixem, per obtenir una consistència òptima i per controlar-la durant tot el procés d'impressió. Les proves s'han dut a terme en un dels laboratoris del TR3 de l'ESEIAAT.

5.2. Mescles de ciment, equips i materials utilitzats

En aquest subapartat es mencionen les mescles de ciment, equips i materials utilitzats per realitzar les diferents proves. Aquests han sigut proporcionats pel departament de Resistència de materials de l'ESEIAAT.

5.2.1. Mescles de ciment

5.2.1.1. Tector 3D Build

El material d'estudi es tracta d'un morter monocomponent sec anomenat Tector 3D Build i està elaborat per l'empresa de construcció *Lafarge Holcim*. Es coneix que el material està compost per una base de ciment i àrids d'un diàmetre màxim de 3 mm. Tot i això, es desconex la seva proporció, així com, la composició i dosificació dels diferents components del ciment. La suposició que es du a terme és que es tracta d'un ciment Portland el qual presenta addicions, com fibres, les quals es poden veure a simple vista i que tenen la finalitat de millorar la resistència inicial de la capa una vegada extrudida, i additius, com superplastificants, per millorar la seva plasticitat sense afegir grans quantitats d'aigua en la mescla.







Figura 43. Sac de morter sec Tector 3D Build [57]


Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

El material està dissenyat per potenciar la propietat tixotropica del ciment la qual és molt beneficiosa en el procés d'impressió. Aquesta manté fluida la mescla quan es troba en moviment, és a dir, des que s'aboca a la bomba fins que s'extrudeix. Posteriorment, realitza una ràpida etapa de floculació i nucleació durant l'etapa de latència del ciment per obtenir un material que va augmentant la seva consistència quan està en repòs, és a dir, quan ja ha estat extrudida la capa.

5.2.1.2. Altres mescles de ciment

Per les proves de treballabilitat del Tector 3D Build s'ha volgut comparar el material d'estudi amb el comportament d'altres mescles de ciment. Concretament, s'han utilitzat cinc materials dels quals es mostren les seves característiques més rellevants en la següent taula:

MATERIAL	DESCRIPCIÓ	IMATGE DEL MATERIAL
Bikain R3	És un morter hidràulic que conté ciment Pòrtland, àrids i addicions polimèriques. Està dissenyat per a la reparació estructural [45].	 <i>Font: [45]</i>
Formigó sec Fiasa HS-20	És un formigó sec que conté ciment Pòrtland, sorra i àrids amb una granulometria màxima de 12 mm i additius (plastificant). Està dissenyat per a treballs en la construcció, pavimentacions i impermeabilitzacions.	 <i>Font: [46]</i>
Pasta anivellant de paviment Axton	És un morter compost per ciment, àrids de silici, additius i resines que permeten el seu ús tant en interiors com en exteriors. Està dissenyat per anivellar paviments amb un desnivell màxim de 15 mm. El temps de fraguat oscil·la entre 3-4 hores segons el fabricant [47].	 <i>Font: [47]</i>
X Mesh M25 de Prodotti Speciali	És un morter hidràulic que conté ciment Pòrtland, àrids, addicions putzolànics i additius específics. Està dissenyat per l'aplicació en paredat [46].	 <i>Font: [45]</i>

<p>Morter Nivoplan</p>	<p>És un morter dissenyat per l'anivellació de parets i sostres, tant d'interior com d'exterior, en capes de gruixos variables d'entre 2 a 20 mm. El temps de fraguat oscil·la entre 2-3 hores segons el fabricant [48].</p>	 <p>Font: [48]</p>
-------------------------------	--	---

Taula 5. Mescles de ciment sec utilitzades per les proves de treballabilitat




5.2.2. Equips i materials utilitzats

Els assajos de les diferents proves s'han dut a terme mitjançant equips i materials que pertanyen al departament de Resistència de materials ubicat a l'ESEIAAT. Seguidament, es mostrarà una petita descripció i classificació de cadascun d'ells segons la seva funció en les proves:

5.2.2.1. Equips i materials per la realització de la mescla

EQUIPS I MATERIAL	DESCRIPCIÓ	IMATGE
<p>Mescladora per morter RUBIMIX-9 N</p>	<p>Equip que s'encarrega de barrejar la mescla del morter Tector 3D Build o qualsevol altre mescla de ciment sec utilitzada en les proves amb aigua. Aquest aparell només és capaç de barrejar morter sec, ja que el formigó presenta uns àrids amb mides excessives que dificulten el seu treball.</p>	
<p>Formigonera</p>	<p>Equip que s'encarrega de barrejar la mescla de formigó sec amb aigua.</p>	
<p>Cubells amb una capacitat de 26 L</p>	<p>Recipients on s'ha dut a terme la barreja, en el cas de la mescladora per morter, o la recollida del material ja barrejat de la formigonera. Els cubells utilitzats per aquesta funció tenen una capacitat de 26 L.</p>	

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D




Aigua	Aigua provinent de la xarxa de distribució d'aigua de Terrassa, obtinguda en el laboratori del TR3 on es desenvolupen les proves experimentals.	
Got mesurador de 1000 ml	Recipient amb marcador de capacitat per afegir al morter o formigó sec la quantitat d'aigua establerta.	
Pala metàl·lica petita	En el cas de la mescladora per morter, aquesta ens ajuda a barrejar la mescla, ja que en alguns casos, només amb la utilització de l'aparell es queda part de la barreja sense hidratar. En el cas de la formigonera, la pala ens ajuda a abocar al formigó al cubell.	

Taula 6. Conjunt de materials i equips utilitzats per la barreja del material de ciment amb l'aigua

5.2.2.2. Equips i materials per la realització de les proves




5.2.2.2.1. Prova de treballabilitat

EQUIPS I MATERIAL	DESCRIPCIÓ	IMATGE
Con d'Abrams	Assaig que es realitza pel formigó i morter en estat fresc i serveix per mesurar la seva consistència.	 <p style="text-align: center;"><i>Font: [49]</i></p>
Mesurador de plasticitat	Assaig que es realitza pel formigó i morter en estat fresc i serveix, així com el con d'Abrams, per mesurar la seva consistència.	


Cubells amb una capacitat de 26 L	Recipients utilitzats per mantenir la mescla de ciment en repòs per, posteriorment, realitzar una prova de consistència.	
Cubells amb una capacitat de 8L	Recipients utilitzats per mantenir la mescla de ciment en repòs per, posteriorment, realitzar una prova de consistència.	
Accelerant	Additiu que s'utilitzen per accelerar la reacció d'hidratació del ciment.	

Taula 7. Conjunt de materials i equips utilitzats per la prova de treballabilitat

5.2.2.2.2. Prova d'extrudibilitat


EQUIPS I MATERIAL	DESCRIPCIÓ	IMATGE
Bomba UP-Pictor	Equip que s'utilitza per bombejar la mescla de ciment.	
Mànega	Conducte que es connecta a la bomba i la seva utilitat és transportar la mescla de ciment fins a l'extrusor.	
Cubell capacitat 8 L	Recipient que s'utilitza per realitzar els càlculs de cabal de la prova d'extrudibilitat.	

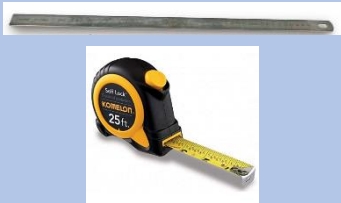
**Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per
a la seva impressió 3D**

Lubricant mànega	Material que s'aplica a la mànega per reduir la fricció entre aquesta i el material.	
-------------------------	--	---

Taula 8. Conjunt de materials i equips utilitzats per la prova d'extrudibilitat

5.2.2.2.3. Prova de temps obert, d'edificabilitat i de qualitat d'extrusió

EQUIPS I MATERIAL	DESCRIPCIÓ	IMATGE
Impressora 3D CONS	Impressora 3D de formigó que permet imprimir capes de material per les proves de temps obert, d'edificabilitat i de qualitat d'extrusió.	
Bomba UP-Pictor	Equip que s'utilitza per bombejar la mescla de ciment.	
Mànega	Conducte que es connecta a la bomba i la seva utilitat és transportar la mescla de ciment fins a l'extrusor.	
Lubricant mànega	Material que s'aplica a la mànega per reduir la fricció entre aquesta i el material.	

Regla i cinta mètrica	Instruments que serveixen per mesurar les dimensions de les capes.	 Font: [50][51]
------------------------------	--	---

Taula 9. Conjunt de materials i d'equips utilitzats per la prova de temps obert, edificabilitat i qualitat d'extrusió

5.3. Assajos experimentals

5.3.1. Prova de treballabilitat

5.3.1.1. Objectiu

L'objectiu d'aquest assaig és observar el comportament de la mescla de ciment Tector 3D Build quan es deixa en repòs una vegada s'ha barrejat amb aigua. S'utilitzaran diferents dosificacions d'aigua en la barreja, additius i diverses metodologies de mescla. A més, es faran proves que consistiran a barrejar la mateixa mescla diversos cops per fer una comparació del seu comportament al llarg del temps. Finalment, el comportament del morter Tector 3D Build es compararà amb altres mescles de ciment que no estan dissenyades específicament per la impressió 3D.

5.3.1.2. Assajos de consistència: con d'Abrams i mesurador de plasticitat

El con d'Abrams i el mesurador de plasticitat són dos assajos que s'utilitzen per determinar la consistència del material. Tot i això, l'obtenció d'aquests valors es basa en processos diferents i cadascun presenta certs avantatges i desavantatges.

5.3.1.2.1. Con d'Abrams

▪ Equipament

- Motlle cònic: consisteix en un motlle de forma cònica que presenta unes dimensions normalitzades les quals es poden observar a la figura 44. A més, adherides a la part externa superior del motlle hi ha presents uns agafadors i a la part inferior unes aletes les quals estan dissenyades per facilitar la realització de la prova.

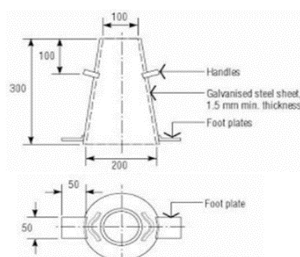


Figura 44. A l'esquerra esquema i mides del motlle cònic del con d'Abrams. A la dreta imatge del motlle cònic. [52]

- Vareta d'acer: barra d'acer inoxidable de 16 mm de diàmetre i 600 mm de llargada amb els extrems arrodonits.

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D



Figura 45. Barra d'acer inoxidable que s'utilitza per la prova del con d'Abrams [53]

- Base metàl·lica: plataforma metàl·lica amb una nansa al centre d'un dels seus costats.



Figura 46. Plataforma metàl·lica on es realitza la prova del con d'Abrams

▪ Instruccions d'us

A continuació, s'exposaran els diferents passos per realitzar un correcte assaig de con d'Abrams.

- 1) Humitejar la part interna del motlle cònic i la part superior de la base metàl·lica.



Figura 47. Humitejar base metàl·lica i part interna del con [54]

- 2) Col·locar el motlle cònic sobre la plataforma metàl·lica en una superfície horitzontal pressionant amb els peus les aletes inferiors d'aquest per assegurar que està fix.



Figura 48. Col·locació del motlle cònic sobre la plataforma metàl·lica [54]

- 3) Omplir el motlle amb el material en tres capes. Cada capa ha de tenir un gruix aproximat d'un terç de l'altura del motlle, és a dir, 100 mm. Cada vegada que s'omple una capa aquesta s'ha de colpejar amb la vareta 25 cops abans d'afegir la següent. La barra ha de penetrar lleugerament en les capes inferiors de forma que el material quedi compacte.



Figura 49. Procediment de com s'omple el con d'Abrams [54]

- 4) Extreure el material sobrant del motlle un cop omplert i quan passin uns 5-10s retirar el motlle.



Figura 49. Extracció del motlle cònic [54]

- 5) Col·locar la part inferior del motlle cònic a terra, al costat de l'assentament de formigó resultant, i amb l'ajuda de la barra metàl·lica disposada en forma horitzontal sobre el motlle mesurar la distància entre aquesta i el punt més alt de l'assentament.



Figura 50. Mesura de l'assentament [54]

▪ **Valoració dels resultats**

Segons la distància obtinguda entre el punt més alt del formigó assentat i la barra metàl·lica es pot determinar, aproximadament, la consistència de la mescla de ciment a partir de la següent classificació:

Tipus de consistència	Assentament del con d'Abrams (cm)	Tolerància (cm)
Seca (S)	0-2	0
Plàstica (P)	3-5	±1
Tova (T)	6-9	±1
Fluida (F)	10-15	±2
Líquida (L)	16-20	±2

Taula 10. Classificació dels resultats de la prova del con d'Abrams segons la seva consistència [55]

▪ **Avantatges del mètode**

- Mètode estandarditzat internacionalment per calcular la consistència del formigó.

▪ **Inconvenients del mètode**

- Els passos s'han de seguir correctament si no l'assentament resultant pot despendre's per un lateral, el que es coneix com assentament esbiaixat, i la prova queda invalidada.

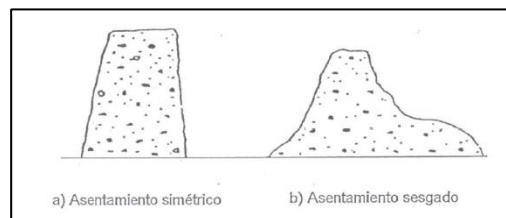


Figura 51. Representació d'un assentament simètric i un esbiaixat [55]

- És necessari utilitzar aproximadament uns 12 kg de material sec en la mescla per omplir el motlle, el qual no es pot tornar a aprofitar després de l'assaig.

5.3.1.2.2. Mesurador de plasticitat

▪ **Equipament i estructura de l'instrument**

El mesurador de plasticitat està fabricat per un contenidor exterior A4. Al seu interior hi ha localitzats diferents mecanismes com el motlle A3, que s'encarrega de detectar la plasticitat en el test del material, el rotor A2, que mou l'indicador A1, i la peça A9, que connecta el rotor amb l'indicador A1. Les tres fulles de la pala A6 estan unides a l'eix A5 que transmet la força aplicada a la fixació A8 que es connecta amb el motlle A3. En el cap de l'equip hi ha un mànec de plàstic A11 que ajuda a fer el gir de l'aparell i un anell amb valors A13 que permet veure ràpidament el resultat del test [56].

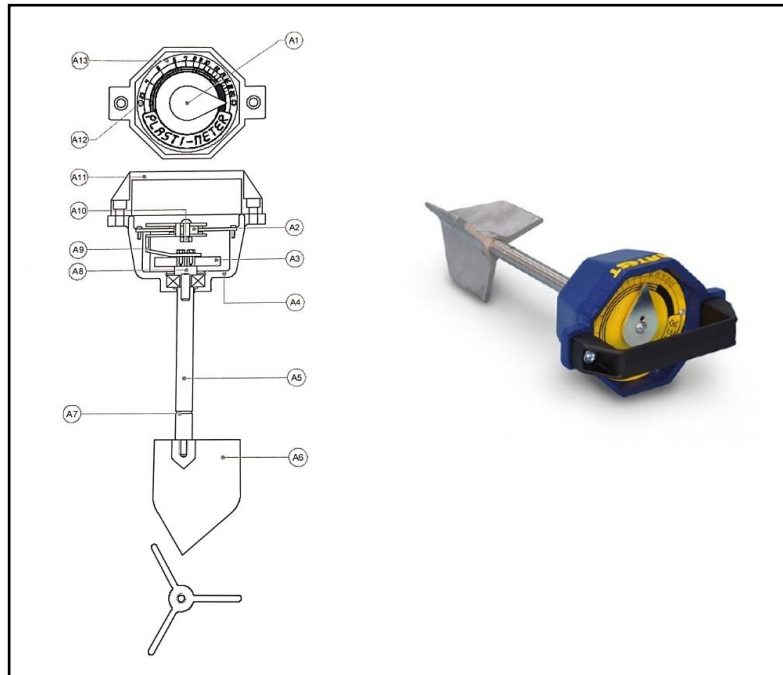


Figura 52. A l'esquerra, esquema del mesurador de plasticitat on s'indiquen les seves part. A la dreta, imatge del mesurador de plasticitat [56]

▪ Instruccions d'ús

A continuació, s'exposaran els diferents passos per realitzar un correcte assaig del mesurador de plasticitat.

- 1) Posar l'índex A1 en la zona negra que correspon al valor més elevat que pot mesurar l'aparell (graduació 20).



Figura 53. Vista de la part superior del mesurador de plasticitat

- 2) S'introdueixen les tres fulles de la pala dins del material fins a una marca que apareix a l'eix.

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D



Figura 54. A l'esquerra, mesurador de plasticitat introduït en un cubell amb morter. A la dreta, vista lateral del mesurador de plasticitat on s'indica la marca fins on s'ha d'introduir l'aparell al formigó.

- 3) Deixar al mesurador de plasticitat uns pocs segons dins del material perquè l'aparell tingui prou temps perquè les fulles de la pala s'estableixin correctament.
- 4) Girar lentament en sentit horari el mesurador utilitzant el mànec de plàstic i aturar-lo quan el morter es talli, és a dir, quan les fulles comencin a girar i el mesurador no es mogui.



Figura 55. Representació del gir horari del mesurador mentre que l'agulla gira en el sentit antihorari.

▪ Avantatges del mètode

- Mètode més fàcil i ràpid de realitzar que la prova del con d'Abrams.
- El material utilitzat per fer la prova es pot reutilitzar.

▪ Inconvenients del mètode

- Per realitzar la prova és necessari que el material es trobi en un cubell prou profund perquè entri la part inferior del mesurador de plasticitat fins a la marca de l'eix.

5.3.1.3. Metodologia de la prova

5.3.1.3.1. Metodologia de la mescla

Pel que fa a la metodologia de la mescla, s'han realitzat dues en aquest treball. En ambdues, es barreja el morter sec amb aigua en el cubell de 28 L amb l'ajuda de la mescladora elèctrica. La diferència principal entre les dues metodologies és el temps de barreja.

En el primer cas, es barreja la mescla de forma contínua amb una duració d'entre 3-4 min. Aquest temps ha estat determinat a partir de l'experiència en fer les proves, a través de la qual s'ha pogut observar que és aquesta la duració mínima necessària perquè la mescla sigui homogènia.

En el segon cas, es barreja la mescla de forma discontinua amb una duració total de 8 min. Primerament, la mescla es barreja uns 3 min per donar temps a homogeneïtzar la mescla, en acabar es fa una pausa de 2 min deixant la mescla en repòs en el cubell i, finalment, es torna a barrejar durant 3 min més.

Les proves de treballabilitat s'han realitzat amb aquestes dues metodologies de mescla les quals poden diferir en la consistència obtinguda, independentment de la quantitat d'aigua que s'afegeixi a la barreja.

5.3.1.3.2. Metodologia de la prova de treballabilitat

S'han realitzat tres procediments d'assaig similars que es basen a mesurar la consistència del material, ja sigui amb l'assaig del con d'Abrams o amb el mesurador de plasticitat, durant el pas del temps deixant-lo en repòs. La principal diferència entre els tres procediments es deu a la manera de prendre les mesures i a la zona on es deixa el material en repòs.

1) Material en repòs en un cubell de 28L i assaig del con d'Abrams

La metodologia de la prova consisteix a realitzar primer la mescla de ciment amb una de les dues metodologies descrites anteriorment. Seguidament, un cop realitzada la mescla es deixa reposar en el cubell durant un temps determinat i es mesura la consistència amb l'assaig del con d'Abrams.

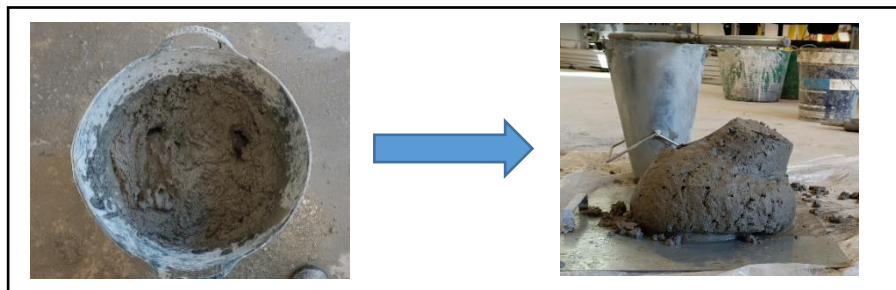


Figura 56. Representació gràfica de la prova 1 de treballabilitat

2) Material en repòs en un cubell de 28L i assaig del mesurador de plasticitat

La metodologia de la prova inicia, així com a la prova anterior, consisteix a realitzar la mescla del formigó o morter amb una de les dues metodologies descrites anteriorment. Seguidament, un cop feta la mescla, es deixa reposar en el cubell durant un temps determinat i es mesura la consistència amb el mesurador de plasticitat. El principal avantatge d'aquesta prova és que es poden dur a terme diferents mesures en diferents temps amb el mateix material i no només una mesura com succeïa en la prova anterior. Tot i això, fer la prova amb el mateix material i cubell varies vegades pot induir a errors de resultats. Per exemple, si

duem a terme el primer assaig deixant el material reposar 30 min i després tornem a fer l'assaig 30 min després el valor obtingut en 1 hora de repòs no és realista del tot, ja que als 30 min s'ha cisellat, tot i que es tracti d'un petit esforç. Com a resultat podem obtenir valors, sobretot quan la constància és fluida, que poden no ser del tot correctes.

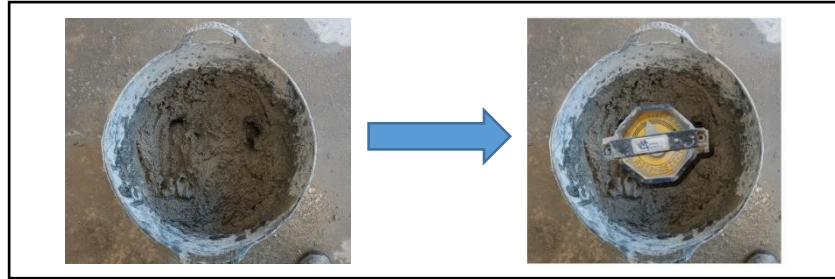


Figura 57. Representació gràfica de la prova 2 de treballabilitat

3) Material en repòs en cubells de 8L i assaig de mesurador de plasticitat

Per solucionar el problema de la prova anterior es va dissenyar aquesta prova. La metodologia de la prova inicia, així com a les dues proves anteriors, consisteix a fer la mescla del morter amb una de les dues metodologies descrites anteriorment. Seguidament, un cop realitzada la mescla s'omplen parcialment 6 cubells de 8L. Aproximadament, s'emplen uns 5L, sent prou volum per poder arribar a la marca de l'eix del mesurador de plasticitat i fer la prova. Cada cubell es deixa reposar durant un temps determinat, concretament, el primer cubell 10 min, el segon 20min i així successivament fins a arribar als 60 min. A diferència de la prova anterior, cada cubell reposa durant un temps determinat sense ser cisellat en cap moment en el procés de repòs. D'aquesta manera, s'obté, teòricament, una prova més correcta.

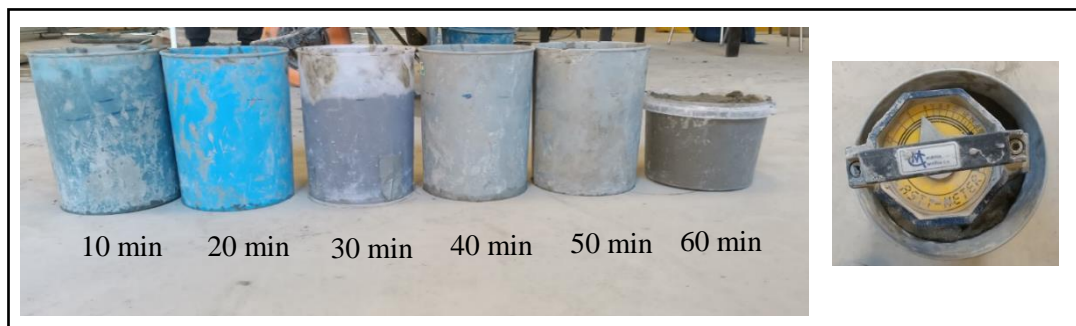


Figura 58. Representació gràfica de la prova 3 de treballabilitat

En aquestes proves es variarà la relació d'aigua/ciment del material, la metodologia de mescla utilitzada, es faran servir additius, es realitzaran proves de forma consecutiva amb el mateix material i s'usaran altres mescles de ciments diferents al Tector 3D Build per poder comparar els resultats.

5.3.2. Prova d'extrudibilitat

5.3.2.1. Objectiu

L'objectiu d'aquest assaig és observar el comportament i la dificultat a fluir que té el material quan travessa el sistema de subministrament i el d'extrusió. Per fer-ho, es realitzaran proves per tal de determinar paràmetres que ajudaran a conèixer el comportament del material durant la impressió com la viscositat en la mànega o la relació entre la pressió exercida per la bomba i el cabal resultant que circula per ella.

5.3.2.2. Comportament del material al circular pel sistema de subministrament

Per explicar el comportament del material durant tot el procés d'impressió fins que finalment s'extrudeix, s'explicarà detalladament cada part del procés. Aquest es divideix en tres etapes:

- 1) Subministrament de material.
- 2) Bomba.
- 3) Circulació per la mànega.

5.3.2.2.1. Subministrament de material

El primer pas per imprimir és realitzar la mescla utilitzant una de les dues metodologies descrites anteriorment. Quan la mescla presenta una consistència correcta i homogènia (determinada en l'assaig de treballabilitat) s'introdueix a la bomba UP-Pictor mitjançant un embut. El subministrament de la bomba es fa de manera manual.

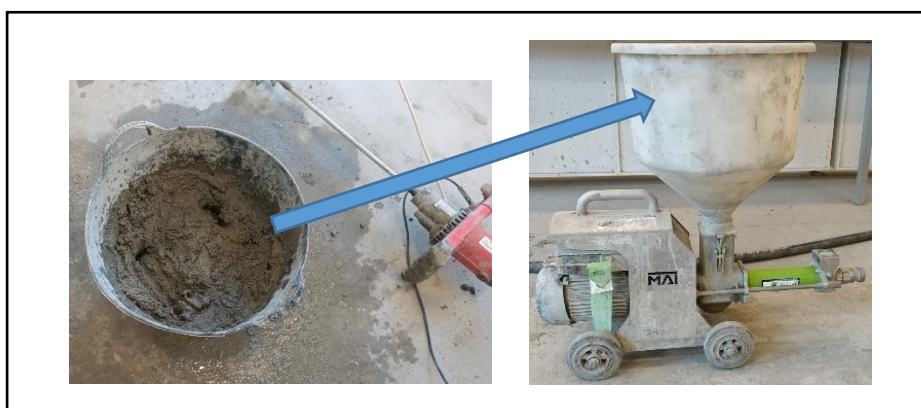


Figura 59. Representació del procés de subministrament de la bomba

Una vegada al material es troba dins l'embut s'activa la bomba. Seguidament, el morter de l'embut comença a baixar a causa de l'acció d'un petit rotor que és el que s'observa en la figura 60. La seva funció és proporcionar al rotor helicoidal principal, situat dins d'una camisa fixa de cautxú, un moviment giratori i transportar-li la mescla des de l'embut. Aquest és l'encarregat de bombejar el material a través d'un sistema de subministrament.

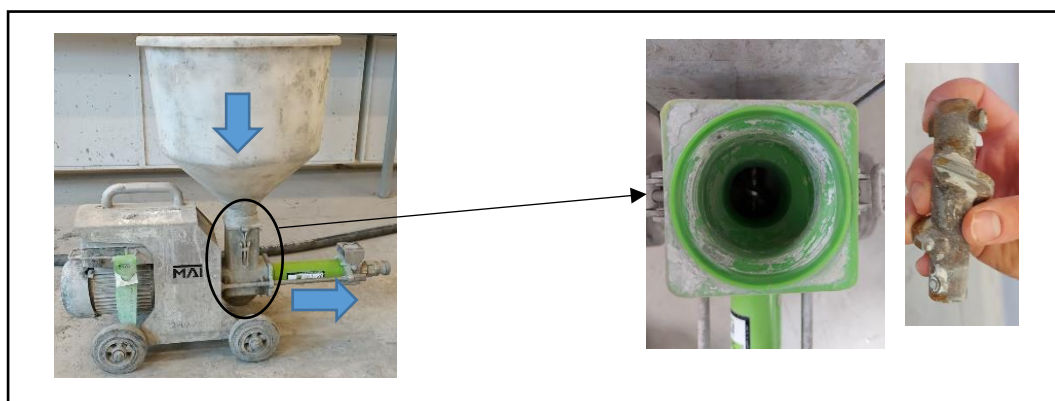


Figura 60. Representació del moviment del material dins la bomba

5.3.2.2.2. Bomba

La bomba s'encarrega de bombejar el material aplicant-li una pressió a l'inici de la mànega perquè la mescla es pugui desplaçar a través d'ella independentment de l'altura d'aquesta. Per fer-ho, la bomba UP-Pictor utilitza un rotor helicoidal d'acer inoxidable que es mou de forma excèntrica

dins d'un estator de cautxú. Durant el procés el rotor es mou sobre la superfície de goma comprimint el material en cada rotació i aplicant-li un desplaçament que genera una pressió la qual permet el moviment del material a través de la mànega.

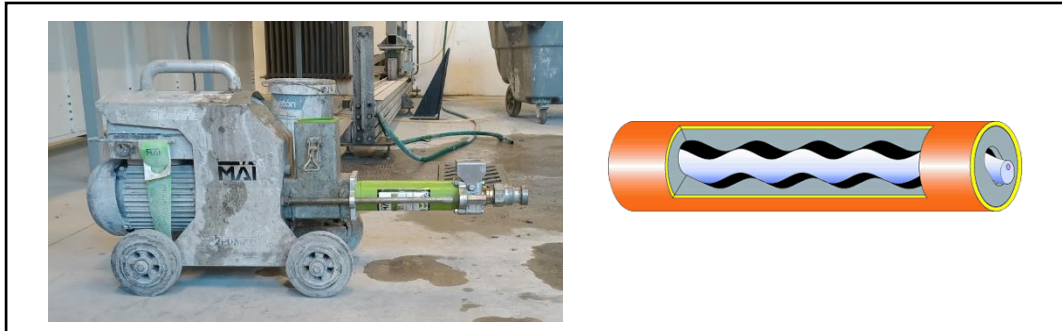


Figura 61. Representació del rotor helicoidal que bombeja el material i posició d'aquest en la bomba

5.3.2.2.3. Circulació del material per la mànega

La bomba expulsa el material per l'extrusor de la bomba que es troba connectat a la mànega. A partir d'aquí, el morter circula per aquesta i arriba fins a l'extrusor de la impressora per on aquest és expulsat.

Aquesta zona és la més crítica en el procés d'impressió, ja que el material a més de fluir per la mànega també pot produir bloquejos. Per altra banda, si aquest presenta una consistència poc fluida la bomba pot sobrecarregar-se fent augmentar la pressió de l'entrada de la mànega. Això té com a conseqüència un augment de la perillositat del procés. Per aquest motiu i també perquè és la zona on podem obtenir més dades, s'ha decidit estudiar l'extrudibilitat del material en aquest punt. Per fer-ho, en aquesta zona s'han fet proves que permeten mantenir un control del morter quan flueix per la mànega des de l'entrada de material fins a la sortida.

Primerament, es farà un estudi d'un flux completament desenvolupat en una mànega cilíndrica, la forma que presenta en les proves experimentals, de manera genèrica sense tenir en compte si el comportament del material és newtonià o no. Per fer-ho, es plantejaran certes hipòtesis, es determinarà un volum de control del flux i es plantejaran dues de les lleis que determinen el comportament d'un fluid, la llei de la conservació de la massa i la de la quantitat de moviment.

Seguidament, s'imposarà al resultat obtingut que el comportament del material és similar al d'un fluid de tipus Bingham i s'obtindrà l'expressió del perfil de velocitats i del cabal del morter.

5.3.2.2.3.1. Estudi d'un flux completament desenvolupat en una mànega de secció circular

▪ Hipòtesis

- Suposem que la mànega té unes dimensions de llargada molt més grans que les dimensions de la secció circular. En la realització de les proves experimentals s'ha utilitzat una mànega amb una llargada de 15 m i un radi d'1,35 cm. Això ens deixa entreveure que la suposició feta és correcta. Com a resultat, el flux només presenta velocitat en l'eix z, ja que es menysprea la velocitat en la direcció del radi per ser molt més petita que l'eix z. Per altra banda, es considerarà nul·la la velocitat en θ .

$$v_{\theta} = 0 \quad i \quad v_r \ll v_z$$

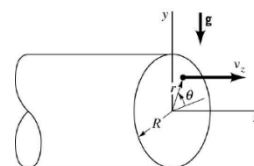


Figura 62. Esquema de flux desenvolupat en una canonada

- Tenim simetria cilíndrica, per tant, cap paràmetre varia en la direcció de θ .

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$$

- Flux estacionari i incompressible.
- Efectes de la gravetat menyspreables.

▪ **Volum de control del flux en la mànega**

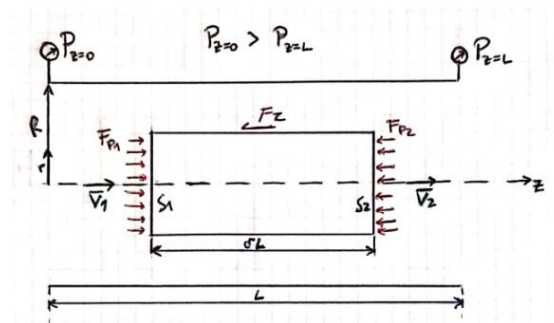


Figura 63. Volum de control fix del flux en una canonada

▪ **Equacions per determinar el comportament del flux**

- Conservació de la massa

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV + \int \rho \vec{v} dS = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = 0 \text{ (a causa de la suposició d'estacionarietat del flux)}$$

$$\int \rho \vec{v} dS = \rho(\bar{v}_2 S_2 - \bar{v}_1 S_1) = 0$$

$$\bar{v}_2 S_2 = \bar{v}_1 S_1 \longrightarrow Q_2 = Q_1$$

Segons les hipòtesis fetes s'obté que el cabal d'entrada i sortida en el volum de control és igual. El fet que el volum de control sigui fix i no es deformi fa que les superfícies 1 i 2 siguin idèntiques i el seu diàmetre no canviï en cap moment ($S_1 = S_2 = \pi r^2$). Per tant, la velocitat d'entrada i sortida al volum de control també és igual ($\bar{v}_2 = \bar{v}_1$).

- Conservació de la quantitat de moviment

$$\sum F_{\text{ext},z} = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho v_z dV + \int \rho v_z (\vec{v} dS)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho v_z dV = 0 \text{ (a causa de la suposició d'estacionarietat del flux)}$$

$$\int \rho v_z (\vec{v} dS) = 0 \text{ (a causa del resultat de l'equació de la conservació de la massa)}$$

Per tant, l'equació de la conservació de la quantitat de moviment es simplifica de manera que la suma de forces externes que actuen en l'eix z és igual a 0.

$$\sum F_{\text{ext},z} = 0$$

Les forces externes es poden dividir en màssiques, superficials i mecàniques:

- **Màssiques:** no estan presents a l'eix z, ja que aquestes segueixen la direcció de la gravetat.
- **Superficials:** hi ha la força de pressió i la força de fricció.

$$|F_{p1}| - |F_{p2}| = pS1 - \left(p + \frac{\partial p}{\partial z} \partial l \right) S2 = \pi r^2 p - \pi r^2 \left(p + \frac{\partial p}{\partial z} \partial l \right)$$

$$|F_{\tau}| = 2\pi r \partial l \tau$$

- **Mecàniques:** no hi ha cap força reactiva on la superfície de control talli un objecte sòlid.

Per tant, el sumatori quedaria de la manera següent:

$$\pi r^2 p - \pi r^2 \left(p + \frac{\partial p}{\partial z} \partial l \right) + 2\pi r \partial l \tau = 0$$

$$\pi r^2 \frac{\partial p}{\partial z} \partial l + 2\pi r \partial l \tau = 0$$

$$r \frac{\partial p}{\partial z} + 2\tau = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{2}{r} \tau$$

5.3.2.2.3.2. Estudi del flux de Bingham

Com s'ha mencionat en l'apartat 4.2.1 *Treballabilitat*, el formigó o morter, segons diversos estudis, presenta un comportament similar al d'un fluid de Bingham. El material per fluir necessita que se li apliqui un esforç, anomenat esforç de fluïdesa o tap (τ_p) i quan s'arriba o se supera aquest esforç el material flueix d'una manera semblant a un fluid newtonià. En aquestes proves, l'efecte de la tixotropia del material se suposa que no és tan rellevant com a les proves de treballabilitat, ja que aquest es troba en moviment la majoria de temps i manté una consistència similar en duracions no molt llargues. Si el temps de la impressió és elevat amb el material estàtic sí que s'haurà de tenir en compte la propietat de tixotropia del morter, ja que començarà a disminuir la seva viscositat. A més, contra més temps passi els efectes de la reacció d'hidratació tindran més rellevància, fins a acabar incapacitant el material a poder fluir.

El material com s'ha estudiat flueix per una mànega circular, per tant, l'expressió de Bingham per canonades de secció circular i la forma del perfil de velocitats corresponents són:

$$\tau = \tau_p + \mu_p \left(-\frac{dv_z}{dr} \right)$$

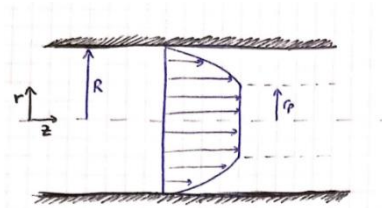


Figura 64. Representació del perfil velocitat de Bingham en una canonada vist de perfil

Com es pot observar en el perfil de velocitats del material tenim dos trams diferenciats. El tram que va des de $r=0$ fins a $r=r_p$, el qual s'anomenarà flux de tap, i el tram que va des de $r=r_p$ fins a $r=R$, el qual s'anomenarà flux fins a paret.

Es considera que el flux és permanent, ja que el temps que passa en la mànega normalment no supera els dos minuts. Per altra banda, es menyspreen els efectes de la tixotropia i de la reacció d'hydratació. A més, també es considera que el flux és incompressible, unidimensional, que es troba completament desenvolupat en la mànega de secció circular i que la seva velocitat de deformació és negativa, ja que a mesura que augmenta el radi (r) la velocitat del fluid (v_z) disminueix a l'apropar-se a la paret, sent $v_z = v_{z,max}$ quan $r=r_p$ i $v_z = 0$ quan $r=R$.

Tal com s'ha comentat quan l'esforç aplicat al material (τ) és molt inferior a l'esforç de tap (τ_p) el valor de la velocitat de deformació és nul ($-\frac{dv_z}{dr} = 0$).

En aquestes condicions i sabent la geometria del conducte podem determinar el perfil de velocitats que tindrà al material en fluir. Aquest estarà dividit en els dos trams esmentats:

- **Perfil de velocitats del flux fins a la paret**

El flux de paret es compleix en el tram $r_p < r < R$ on les velocitats en els límits de tram són $v_{z,R} = 0$ i $v_{z,r_p} = v_z$. Per trobar el perfil de velocitats integrem l'equació diferencial de Bingham amb els valors límits de radi i de velocitat esmentats.

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_p + \mu_p \left(-\frac{dv_z}{dr} \right) \\ -dv_z &= \frac{1}{\mu_p} (\tau - \tau_p) dr \\ \int_{v_z}^0 -dv_z &= \frac{1}{\mu_p} \int_r^R (\tau - \tau_p) dr \\ v_z &= \frac{1}{\mu_p} \int_r^R (\tau - \tau_p) dr \end{aligned}$$

L'esforç de tap τ_p és una constant, però l'esforç del fluid τ depèn del radi, tal com indica l'expressió obtinguda en l'equació de quantitat de moviment calculada.

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\Delta p}{L} = \frac{2}{r} \tau \\ \tau &= \frac{r \Delta p}{2 L} \end{aligned}$$

Se substitueix l'expressió de l'esforç (τ) en l'expressió de la velocitat (v_z).

$$v_z = \frac{1}{\mu_p} \int_r^R \left(\frac{r \Delta p}{2L} - \tau_p \right) dr$$

$$v_z = \frac{\Delta p}{4\mu_p L} (R^2 - r^2) - \frac{\tau_p}{\mu_p} (R - r)$$

- **Perfil de velocitats del flux de tap**

El flux de tap es compleix en el tram $0 < r < r_p$ on les velocitats en els límits de tram són constants i coincideixen amb el valor màxim del perfil de velocitats anterior quan $r = r_p$. Aquesta velocitat s'anomenarà $v_{z,p}$.

$$v_{z,p} = \frac{\Delta p}{4\mu_p L} (R^2 - r_p^2) - \frac{\tau_p}{\mu_p} (R - r_p)$$

El valor de l'expressió del radi de tap (r_p) es pot extreure amb l'expressió de Bingham i l'expressió obtinguda en l'equació de la quantitat de moviment.

$$\tau = \tau_p + \mu_p(0) \quad 0 < r < r_p \quad (\text{equació de Bingham})$$

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{2}{r} \tau \quad (\text{expressió resultant de la quantitat de moviment})$$

$$r_p = \frac{2L}{\Delta p} \tau_p$$

Se substitueix l'expressió del radi de tap (r_p) en l'expressió de la velocitat del flux de tap i s'obté el seu valor definit:

$$v_{z,p} = \frac{\Delta p}{4\mu_p L} R^2 - \frac{\tau_p}{\mu_p} R + \left(\frac{L\tau_p^2}{\mu_p \Delta p} \right)$$

- **Expressió del caudal**

El cabal no és més que la integral de la velocitat del fluid pel diferencial de superfície.

$$Q = \int v_z dS$$

A continuació, s'han de substituir els dos perfils de velocitats trobats i el seu corresponent diferencial de superfície. Per determinar el diferencial de superfície del tram de la paret i tap cal fixar-se en la forma del perfil de velocitats.

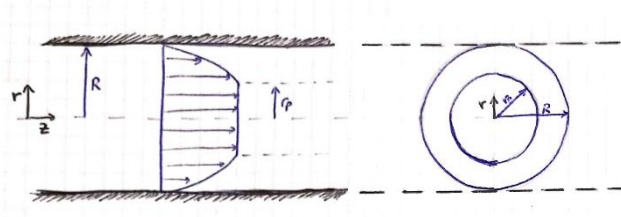


Figura 65. Representació gràfica del perfil de velocitat del flux de Bingham en una canonada vist de perfil i de front

Superfície del tram fins a la paret: $dS = 2\pi r dr$ $r_p < r < R$

Superfície del tram de tap: $S_p = \pi r_p^2$ $0 < r < r_p$

Per tant, l'expressió del cabal quedaria de la següent manera:

$$Q = Q_p + Q_w = \int_0^{r_p} v_{z,p} dS_p + \int_{r_p}^R v_z dS$$

$$Q = \left[\frac{\Delta p}{4\mu_p L} R^2 - \frac{\tau_p}{\mu_p} R + \left(\frac{L\tau_p^2}{\Delta p} \right) \right] \pi r_p^2 + \int_{r_p}^R \left[\frac{\Delta p}{4\mu_p L} (R^2 - r^2) - \frac{\tau_p}{\mu_p} (R - r) \right] 2\pi r dr$$

○ **Cabal del flux de tap:**

$$Q_p = \left[\frac{\Delta p}{4\mu_p L} R^2 - \frac{\tau_p}{\mu_p} R + \left(\frac{L\tau_p^2}{\Delta p} \right) \right] \pi r_p^2$$

$$Q_p = \frac{\Delta p \pi}{4\mu_p L} \left(\frac{L\tau_p}{\Delta p} \right)^2 R^2 - \frac{\tau_p \pi}{\mu_p} \left(\frac{L\tau_p}{\Delta p} \right)^2 R + \frac{L\tau_p^2 \pi}{\Delta p} \left(\frac{L\tau_p}{\Delta p} \right)^2$$

○ **Cabal del flux fins a la paret:**

$$Q_w = \int_{r_p}^R \left[\frac{\Delta p}{4\mu_p L} (R^2 - r^2) - \frac{\tau_p}{\mu_p} (R - r) \right] 2\pi r dr$$

$$Q_w = \frac{2\pi\Delta p}{4\mu_p L} \left[R^2 \frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_{r_p}^R - \frac{\tau_p \pi}{\mu_p} \left[R \frac{r^2}{2} - \frac{r^3}{3} \right]_{r_p}^R$$

$$Q_w = \frac{\pi\Delta p}{8\mu_p L} [2R^2 r^2 - r^4]_{r_p}^R - \frac{\tau_p \pi}{3\mu_p} [3Rr^2 - 2r^3]_{r_p}^R$$

$$Q_w = \frac{\pi\Delta p}{8\mu_p L} [2R^2 r^2 - r^4]_{r_p}^R - \frac{\tau_p \pi}{3\mu_p} [3Rr^2 - 2r^3]_{r_p}^R$$

$$Q_w = \frac{\pi\Delta p}{8\mu_p L} (R^4 - 2R^2 r_p^2 + r_p^4) - \frac{\tau_p \pi}{3\mu_p} (-R^3 + 3Rr_p^2 - 2r_p^3)$$

$$Q_w = \frac{\pi\Delta p}{8\mu_p L} \left(R^4 - 2 \left(\frac{L\tau_p}{\Delta p} \right)^2 R^2 + \left(\frac{L\tau_p}{\Delta p} \right)^4 \right) - \frac{\tau_p \pi}{3\mu_p} \left(-R^3 + 3R \left(\frac{L\tau_p}{\Delta p} \right)^2 - 2 \left(\frac{L\tau_p}{\Delta p} \right)^3 \right)$$

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

Fem el sumatori dels dos cabals i per obtenir l'expressió final del cabal en funció de la diferència de pressió:

$$Q = Q_p + Q_w = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \mu_p L} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2 \tau_p L}{R \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2 \tau_p L}{R \Delta p} \right)^4 \right]$$

Tal com es pot observar, l'expressió del cabal només depèn de la variació de la pressió, ja que la resta de paràmetres com la viscositat plàstica del material (μ_p), l'esforç de fluïdesa o de tap (τ_p) i els paràmetres geomètrics són constants.

Per obtenir el valor de viscositat i esforç de tap s'haurà de realitzar un sistema de dues equacions i dues incògnites. Aquí es coneixeran tots els paràmetres geomètrics de la canonada i de forma experimental els valors de pressió i caudal.

Pel que fa a la pressió, s'obtindrà el valor a partir d'un baròmetre col·locat a l'entrada de la mànega i el caudal es calcularà seguint la següent expressió:

$$Q = \frac{V}{t} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

On V és el volum que surt per la mànega i t el temps que triga a sortir aquest volum.

5.3.2.3. Metodologia de la prova

Per tal d'extreure els valors de pressió i caudal es realitzarà una prova on es calcularà el caudal que surt per la mànega en relació amb la pressió i amb la velocitat de rotació del rotor.

Per fer-ho, s'utilitzaran dues mescles de Tector 3D Build amb diferent dosificació d'aigua. Per reduir la fricció entre el material i la mànega s'usa un lubricant el qual ajuda sobretot a l'inici de la prova, ja que és quan el material està més segregat. El morter passarà per la bomba i la mànega, en posició totalment horitzontal, fins arriba a un cubell de 8L. Es calcula el temps que triga a omplir-lo variant la velocitat del rotor i, per tant, modificant la pressió exercida per la bomba en l'entrada de la mànega.

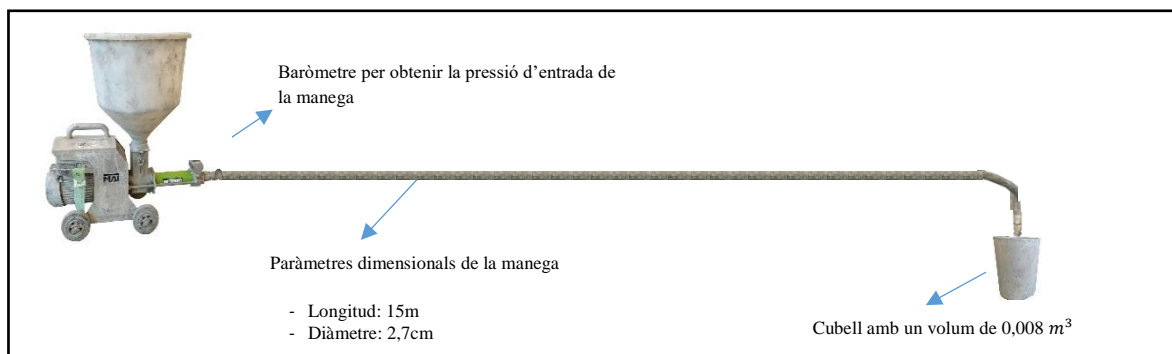


Figura 66. Representació gràfica de la prova d'extrudibilitat

5.3.3. Prova de qualitat d'extrusió

5.3.3.1. Objectiu

L'objectiu d'aquesta prova és determinar, segons les diferents velocitats d'impressió, la qualitat d'extrusió d'una mescla de Tector 3D Build amb una dosificació d'aigua determinada.

5.3.3.2. Metodologia de la prova

La prova consisteix a utilitzar la impressora per realitzar una capa variant la velocitat del seu moviment i mesurant la seva deformació en comparació amb els paràmetres programats. D'aquesta manera, podem determinar la velocitat òptima perquè la capa d'impressió sigui la que es vulgui sense tenir en compte el pes d'una capa superior que la pot deformar.

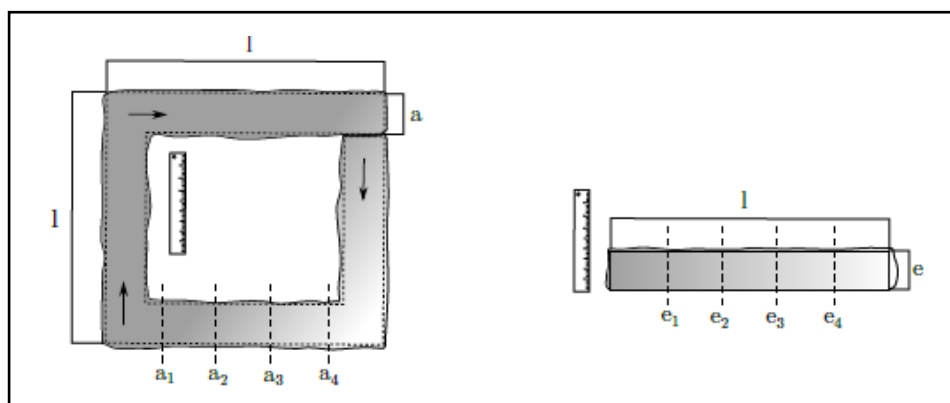


Figura 67. Representació de la prova de qualitat d'extrusió de la capa impresa [9]

5.3.4. Prova de temps obert

5.3.4.1. Objectiu

L'objectiu d'aquesta prova és determinar el temps mínim que necessita una capa d'una mescla de Tector 3D Build amb una dosificació d'aigua determinada per suportar el pes d'una altra capa a sobre sense patir cap deformació. A través d'aquest temps és possible determinar la velocitat mínima que hauria de tenir la impressora a l'hora d'extrudir el material perquè la capa tingui prou consistència i pugui suportar el pes d'una capa superior sense que dificulti l'adhesió amb aquesta.

5.3.4.2. Metodologia de la prova

La prova consisteix a utilitzar la impressora per realitzar dues capes, una sobre l'altra, a la velocitat d'impressió que s'ha determinat en la prova de qualitat d'extrusió. La idea és repetir aquesta metodologia amb diferents intervals de temps entre capa i mesurar la deformació que pateix la primera capa impresa.

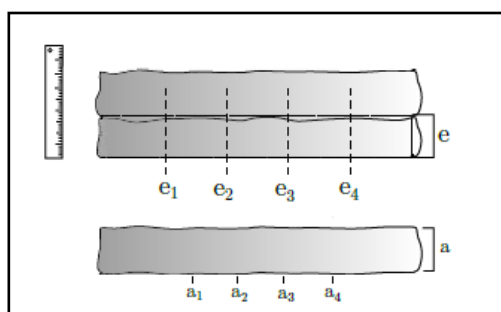


Figura 68. Representació de la prova de temps obert [9]

5.3.5. Prova d'edificabilitat

5.3.5.1. Objectiu

L'objectiu d'aquesta prova és determinar d'una mescla de Tector 3D Build amb una dosificació d'aigua específica la capacitat d'edificabilitat que presenta. Aquesta propietat serà útil a l'hora de construir peces per poder conèixer quin és el límit d'altura de construcció aproximat per la velocitat d'impressió calculada en la prova de temps obert. D'aquesta manera és possible determinar quines són les capes que més es deformen i en quina capa la peça pot col·lapsar.

5.3.5.2. Metodologia de la prova

La prova consisteix a utilitzar la impressora per realitzar un mur amb un nombre de capes definit. En la velocitat d'impressió de capa utilitzada es podrà determinar la deformació de les capes mentre s'imprimeixen i si la peça arriba a col·lapsar.

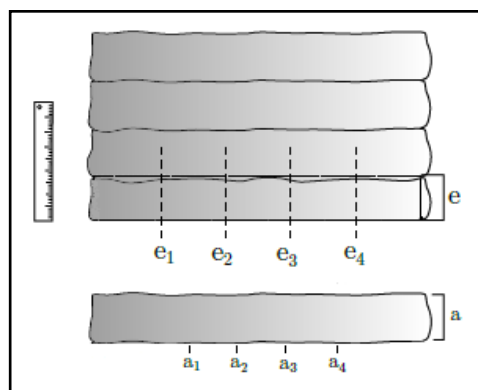


Figura 69. Representació de la prova d'edificabilitat [9]

6. Anàlisi dels resultats experimentals

6.1. Introducció

L'objectiu d'aquest apartat és analitzar els resultats obtinguts en els assajos descrits en l'apartat 5.

Per fer-ho, s'exposaran els resultats de cada prova esmentant la metodologia de mescla utilitzada i les dosificacions d'aigua i additius per, posteriorment, fer les gràfiques corresponents que ajudaran a la interpretació dels resultats.

6.2. Resultats prova de treballabilitat

6.2.1. Prova en cubell de 28L i utilització de Con d'Abrams o mesurador de plasticitat

Les primeres proves s'han realitzat utilitzant les dues primeres metodologies descrites en l'apartat 5.3.1.3.2 *Metodologia de la prova de treballabilitat*.

El primer objectiu és observar com es comporta la mescla amb el pas del temps variant la relació aigua/ciment i mantenint constants altres variables que poden modificar el seu comportament, com és la metodologia de la mescla. Aquesta correspon a la primera descrita en l'apartat 5.3.1.3.1 *Metodologia de la mescla*. A més, també es vol verificar si la prova utilitzant la segona metodologia compleix la hipòtesi esmentada en l'apartat 5.3.1.3.2 *Metodologia de la prova de treballabilitat* i si cal realitzar les següents proves amb la tercera metodologia.

6.2.1.1. Variació dosificació d'aigua

A continuació, es mostren els resultats obtinguts de diferents mostres realitzades al laboratori utilitzant les dues eines de mesura de consistència, el con d'Abrams i el mesurador de plasticitat. Les mostres de material s'han pres cada 15 minuts deixant la mescla reposar en un cubell de 28L durant un temps aproximat de 1h-1:15h.

Les condicions de temperatura i d'humitat del lloc de treball són les ambientals. Pel que fa a la temperatura, aquesta s'ha mantingut entre els 11-15 °C i la mitjana d'humitat no supera l'1% en els mesos en què s'han fet les proves. Aquestes condicions són també aplicables a qualsevol altra prova duta a terme en el present treball.

Relació aigua ciment	Mesures del assentament amb el con d'Abrams (cm)						Mesures amb el mesurador de plasticitat					
	Temps en repòs (min)						Temps en repòs (min)					
	0	15	30	45	60	75	0	15	30	45	60	75
0,15	6				3		5,5				3	
0,16	7	6,8	8	8,2			7	7	8	8		
0,17	12	10,5	10	10			11	11	10,5	9	9,5	7
0,18	12	11,5	10	10			12	12	10,5	10		
0,2	21				14		20	20	15	14	13	

Taula 11. Resultats de la prova de treballabilitat, utilitzant la metodologia de prova 1 i 2 i variant la dosificació d'aigua

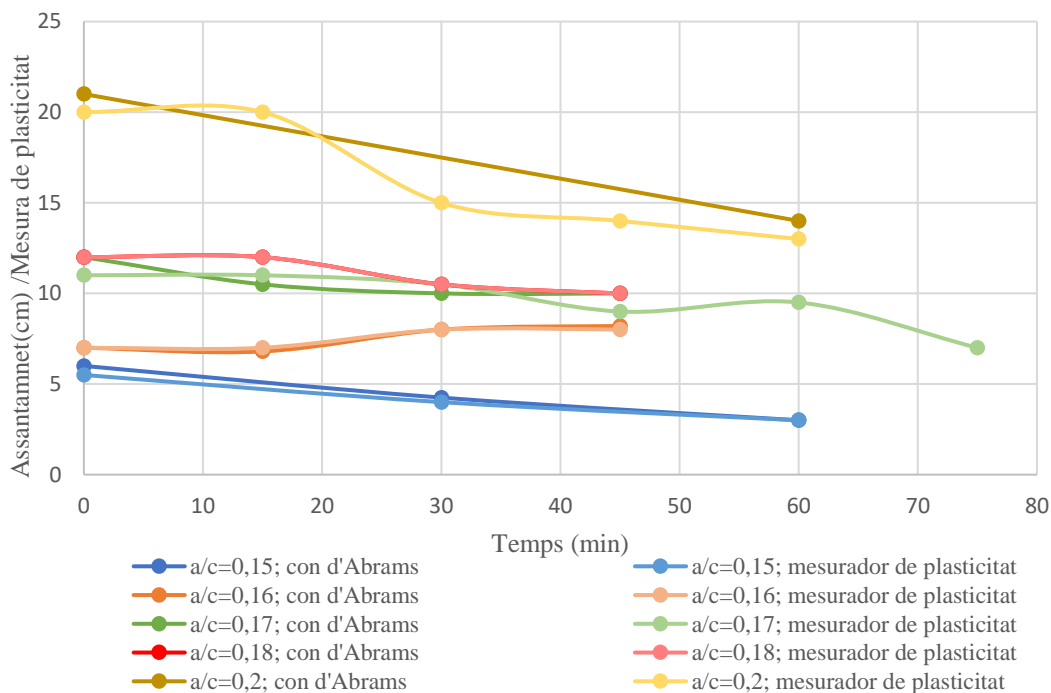


Figura 70. Representació de les dades obtingudes de la prova de treballabilitat utilitzant la metodologia de prova 1 i 2 variant la dosificació d'aigua

La primera observació que es pot extreure dels resultats és que les dues proves tant la del con d'Abrams com la del mesurador de plasticitat donen valors similars. Per tant, a partir d'aquests valors extrets les proves només es duran a terme amb el mesurador de plasticitat, ja que presenta més avantatges que el con d'Abrams com són el temps i facilitat de mesura i la no pèrdua de material.

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

La segona conclusió que s'extreu és que a mesura que augmentem la dosificació d'aigua la consistència inicial és més líquida. A través dels resultats es pot observar que la consistència més líquida es basa en una relació d'aigua/ciment de 0,2 amb un valor de 20 en les proves de plasticitat, en canvi, la més seca presenta una relació d'aigua/ciment de 0,15 amb un valor d'entre 6-5,5.

Pel que fa al seu comportament, al llarg del temps s'observa que les dosificacions extremes tenen un pendent negativa més pronunciada que fa que es redueixi, més ràpidament, la seva consistència. En canvi, les dosificacions que es troben entre els dos valors extrems no tenen una variació tan pronunciada i, fins i tot, en alguns casos, es mantenen durant diversos minuts en una consistència constant.

Com a conclusió final s'extreu que les evolucions de les plasticitats més interessants són les de les mescles amb una relació d'aigua/ciment de 0,16; 0,17; i 0,18, ja que es mantenen més constants al pas del temps i això facilita el seu control.

La mescla amb una relació d'aigua/ciment de 0,15 es descarta, ja que la seva consistència inicial és massa seca i en una hora arriba a un valor amb el qual no es pot treballar. A més, hi ha el perill que la capa extrudida amb aquesta consistència presenti esquerdes i que es produeixin taps en la mànega. Per altra banda, també es descarta la mescla amb una relació d'aigua/ciment de 0,2, ja que la seva consistència inicial és molt líquida. Aquest aspecte no és del tot negatiu, perquè presenta menys impediments al pas pel sistema de subministrament i d'extrusió. Tot i això, triga massa a arribar a una consistència raonable per mantenir les dimensions de capa i, a més, si per equivocació s'afegeix una mica més d'aigua hi ha perill que el material se segregui i això no interessa.

A continuació, es tornaran a fer proves només amb dosificacions d'aigua de 0,16; 0,17; i 0,18 i utilitzant només el mesurador de plasticitat.

Relació aigua ciment	Mesures amb el mesurador de plasticitat				
	Temps en repòs (min)				
	0	15	30	45	60
0,16	9	8,5	7,5	6	
0,16	10	9	7	6,5	
0,16	9	7	6	5,5	
0,17	11	7	8	7	6
0,17	11	8	8	8	7
0,18	20	12	13	10	9
0,18	15	13	14	12	12

Taula 12. Resultats de la prova de treballabilitat, utilitzant la metodologia de prova 1 i variant la dosificació d'aigua només en una relació aigua/ciment 0,16; 0,17 i 0,18.

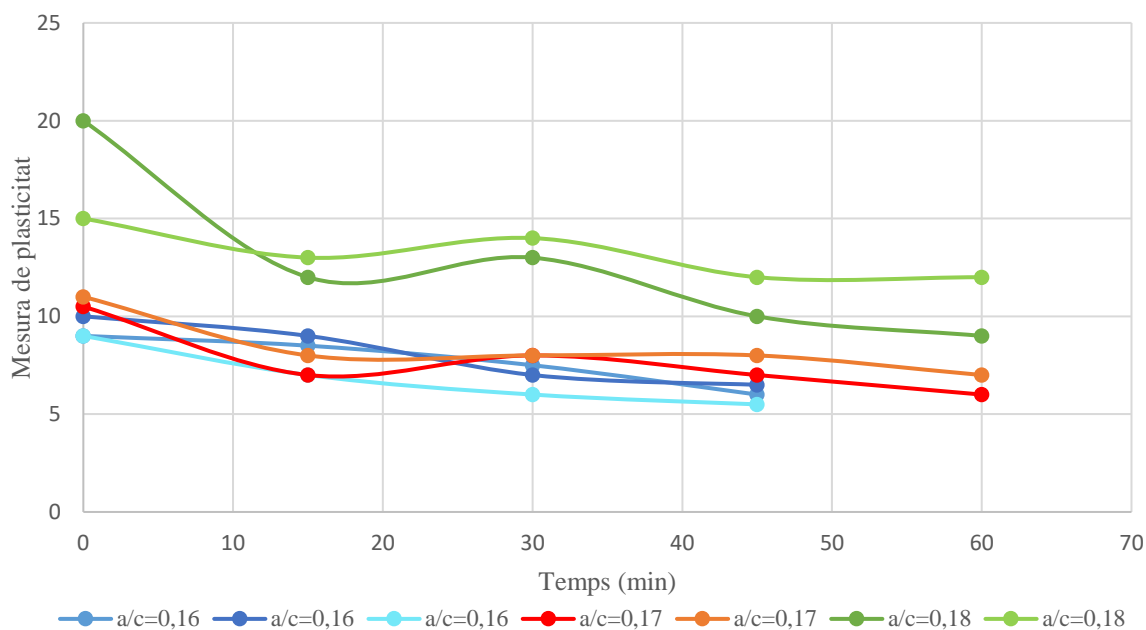


Figura 71. Representació gràfica de les dades obtingudes en la segona prova de treballabilitat, utilitzant la metodologia 1 i variant la dosificació d'aigua només en una relació aigua/ciment 0,16;0,17 i 0,18.

Es pot observar que el comportament és similar als resultats anteriors. La relació que presenta una consistència més líquida és la de més dosificació i viceversa. Tot i això, les dosificacions de 0,16 i 0,17 presenten un comportament més similar que la de 0,18 la qual està sempre en valors de plasticitat entre 20 i 10. Per altra banda, les dues altres consistències es troben en valors que oscil·len entre 10 i 6.

6.2.1.2. Inconvenients trobats en la metodologia de la prova

La prova realitzada mostra valors de plasticitat que evolucionen de forma esperada. Durant el pas del temps la mescla tendeix a perdre plasticitat i a ser cada vegada més viscosa. Tot i això, en algunes mostres, sobretot les que compten amb una consistència més líquida, tot i que els valors tendeixen a disminuir presenten un comportament oscil·latori, és a dir, que l'evolució de la consistència en el temps va pujant i baixant de valor amb una tendència decreixent. Aquest comportament inusual pot ser a causa d'haver fet la prova amb el mesurador de plasticitat on se li aplica un esforç de cisalla a un material que es reaprofitar per mesurar el seu valor de consistència cada 15 min. D'aquesta manera es corrobora la hipòtesi esmentada a l'apartat 5.3.1.3.2. *Metodologia de la prova treballabilitat*, concretament, en la metodologia de prova 2.

El material ha de presentar, teòricament, un comportament tixotropic. Per tant, aquest esforç fa que el material no perdi la seva plasticitat de forma natural, és a dir, sense la presència de cap esforç, ja que per a consistències líquides l'esforç de cisalla és prou per frenar l'evolució de pèrdua de plasticitat del material.

Tot i que els valors són acceptables, aquest inconvenient indueix a replantejar-se si el comportament de les mescles més líquides s'ha mesurat correctament. Per aquest motiu, s'ha dissenyat una tercera prova de treballabilitat descrita en l'apartat 5.3.1.3.2 *Metodologia de la prova de treballabilitat*.

6.2.2. Prova en 6 cubells de 8L i utilització de mesurador de plasticitat

Per mitjà d'aquesta metodologia s'han realitzat quatre proves. Les primeres tres tenen la intenció d'observar tres variables que poden modificar el comportament de la mescla mentre que la darrera es tracta d'una comparació amb altres mescles de ciment que permetran observar la diferència de comportament al pas del temps.

6.2.2.1. Modificació de la metodologia de mescla i verificació de la tercera metodologia de treballabilitat

L'objectiu de la prova és observar si la modificació de la metodologia de mescla modifica la seva consistència mantenint constant la seva dosificació d'aigua. Per altra banda, també es pretén comprovar que la nova metodologia de prova presenta menys errors que les proves anteriors.

Per aquesta prova s'ha decidit utilitzar una relació d'aigua/ciment de 0,17, ja que és una de les relacions d'aigua/ciment seleccionades com a dosificacions correctes.

Metodologia de mescla	Mesures amb el mesurador de plasticitat						
	Temps en repòs (min)						
	0	10	20	30	40	50	60
1	12	10	7	6	6	5,5	4
2	14	10,5	11	10	10	9	9

Taula 13. Resultats de la prova de treballabilitat utilitzant la metodologia de la prova 3 i variant la metodologia de la mescla

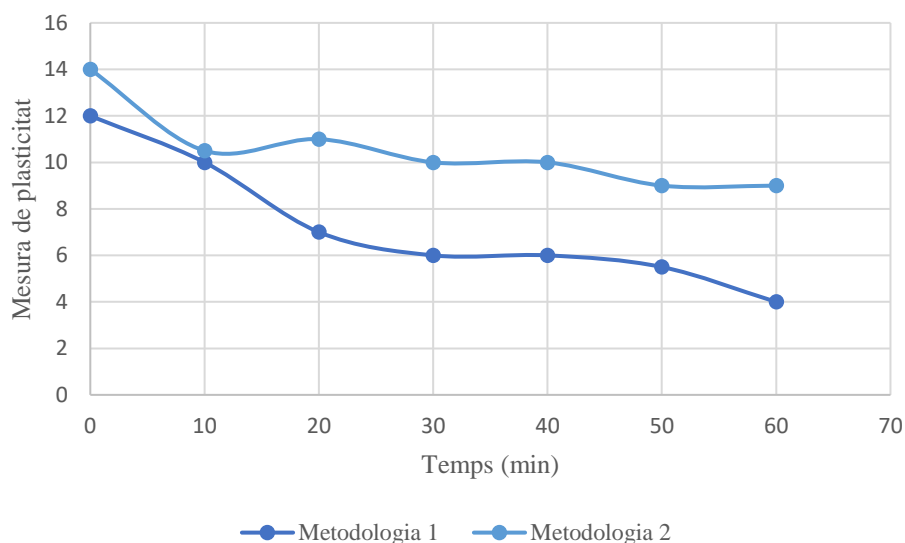


Figura 72. Representació gràfica de les dades obtingudes a la prova de treballabilitat utilitzant la metodologia de la prova 3 i variant la metodologia de la mescla

Com es pot observar, els valors resultants no oscil·len tant com en la prova anterior. Tot i això, encara que cada valor no presenta cap esforç anterior, sinó que han estat en repòs durant el temps determinat, els valors amb més plasticitat encara mostren variacions de pujada i baixada d'aquesta. Per tant, amb la prova realitzada reduïm l'error del valor de les mostres més líquides, però aquest encara es troba present a causa, possiblement, d'errors en la utilització de l'instrument o la falta de precisió d'aquest.

Pel que fa a les metodologies de mescla, aquesta fa variar el comportament de la barreja quan reposa en els cubells. La primera metodologia utilitzada fa que la mescla adquireixi, més ràpidament, una consistència menys líquida respecte a la segona metodologia. Una possible explicació per a aquest fenomen és el seu temps de barreja. Per una banda, en la primera metodologia la duració no supera els 3-4 min mentre que en l'altre mètode la mescla és barrejada durant més temps, concretament, fins a 6 min. Això fa que el nombre d'unions de partícules que es trenquen, formades quan es barregen amb aigua, sigui més elevat.

6.2.2.2. Remesclar la mescla

L'objectiu de la prova és observar si remesclant la mescla un cop aquesta ha estat reposant una hora es pot obtenir una mescla amb la mateixa consistència que la inicial i que es comporti de forma similar quan es deixa tornar a reposar durant una hora. Segons la teoria descrita en l'apartat 4.2.1 *Treballabilitat* la mescla no podrà recuperar les condicions inicials a causa de la formació d'enllaços permanents entre partícules.

Aquesta prova permetrà conèixer de forma experimental si a l'hora d'imprimir es pot mantenir la mescla feta en repòs i remesclar-se posteriorment per poder utilitzar-la.

Per la prova s'ha decidit usar una relació d'aigua/ciment de 0,17, així com a la prova anterior. La metodologia de mescla emprada és la segona, ja que aquesta és la metodologia que manté el material més estona amb una consistència més líquida i, per tant, pot estar més temps en repòs.

Reposos de la mescla	Prova amb el mesurador de plasticitat						
	Temps en repòs (min)						
	0	10	20	30	40	50	60
Primer repòs	14	11	11	11	10,5	10	9
Segon repòs	20	16	14	10	8,5	6	5
Tercer repòs	20	10	5,5	3	2,5	0	0

Taula 14. Resultats de la prova de treballabilitat de tres reposos amb la mateixa mescla utilitzant la metodologia de la prova 3, una relació d'aigua/ciment de 0,17 i metodologia de la mescla 2.

Remescles	Prova amb el mesurador de plasticitat	
	Temps en repòs (min)	
	0	8
Remescla 1	9	20
Remescla 2	5	20

Taula 15. Resultats de la consistència de la mescla a l'inici i al final de la barreja utilitzant la metodologia de la mescla 2 i una relació d'aigua/ciment de 0,17.

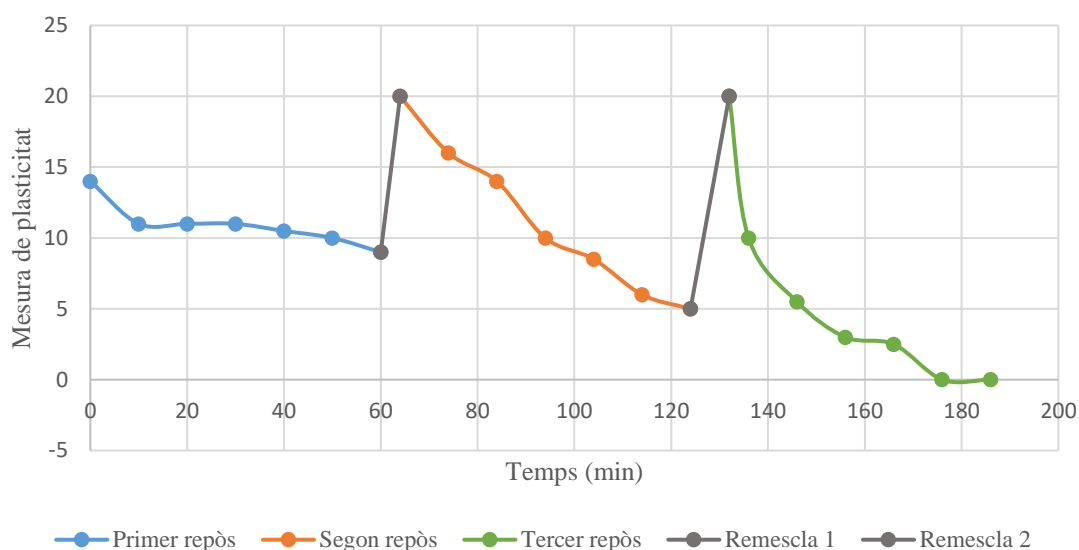


Figura 73. Representació gràfica de les dades obtingudes de la prova de treballabilitat de tres repòs amb la mateixa mescla utilitzant la metodologia de la prova 3, una relació d'aigua/ciment de 0,17 i metodologia de la mescla 2.

Durant el primer repòs, la mescla presenta un comportament similar al que s'ha observat en la segona metodologia de mescla de l'apartat 6.2.2.1 *Modificació de la metodologia de la mescla*. La consistència de la mescla és cada vegada menys líquida, així i tot, el canvi no és molt pronunciat. D'aquesta manera, la consistència evoluciona de 14 fins a 9.

Un cop ha passat una hora, es junta tot el material dels cubells de 8L i es barreja la mescla una altra vegada utilitzant la segona metodologia de mescla igual que a l'inici de la prova. Així, s'obté una mescla molt líquida amb una consistència inicial superior a la mescla obtinguda en la primera barreja amb un valor de 20. Tot i això, a diferència de l'anterior repòs a la mescla li és més fàcil arribar a consistències menys líquides i d'aquesta manera passar d'una consistència de 20 fins a 5 en una hora. El procediment torna a repetir-se i s'aconsegueix un comportament similar al segon repòs, tot i que aquest és més pronunciat.

Com a conclusió es pot extreure que al material li és més complicat mantenir una consistència líquida al pas del temps tot i que es torni a barrejar la mescla. El motiu principal d'aquest comportament és la generació d'enllaços permanents entre les partícules de ciment. La presència d'aquests enllaços fa que el comportament del segon i tercer repòs sigui diferent del primer corroborant la teoria PFI descrita a l'apartat 4.2.1 *Treballabilitat*. La teoria descriu que, independentment de la propietat tixotòpica del material, si el morter es deixa prou temps en repòs perquè formi enllaços permanents no serà possible tornar a obtenir la mateixa evolució de consistència al pas del temps. A més, a mesura que transcorre el temps l'etapa de fraguat de la reacció d'hidratació que és l'origen del canvi d'estat del material està més pròxima.

6.2.2.3. Utilització d'additius

L'objectiu de la prova és observar si afegint una quantitat específica d'accelerant es pot aconseguir que la mescla en repòs obtingui una consistència menys líquida més ràpidament que amb la mateixa dosificació d'aigua utilitzada en les proves anteriors.

Per a la prova, s'ha decidit utilitzar una relació d'aigua de 0,17 i la mateixa metodologia de mescla utilitzada en la prova anterior. La quantitat d'accelerant afegida a la mescla ha sigut l'estipulada pel fabricant, concretament 1/8 del pes específic del material. Com que les mescles es fan usant sacs de 25 Kg la quantitat afegida d'accelerant ha sigut de 50 ml.

Tipus de mescla		Prova amb el mesurador de plasticitat						
		Temps en repòs (min)						
		0	10	20	30	40	50	60
Mescla	sense	14	11	11	11	10,5	10	9
Mescla	amb	16	12	11	10	9,5	9	9

Taula 16. Resultats de la prova de treballabilitat utilitzant la metodologia de la prova 3, una relació d'aigua/ciment de 0,17, metodologia de la mescla 2 i utilitzant accelerant

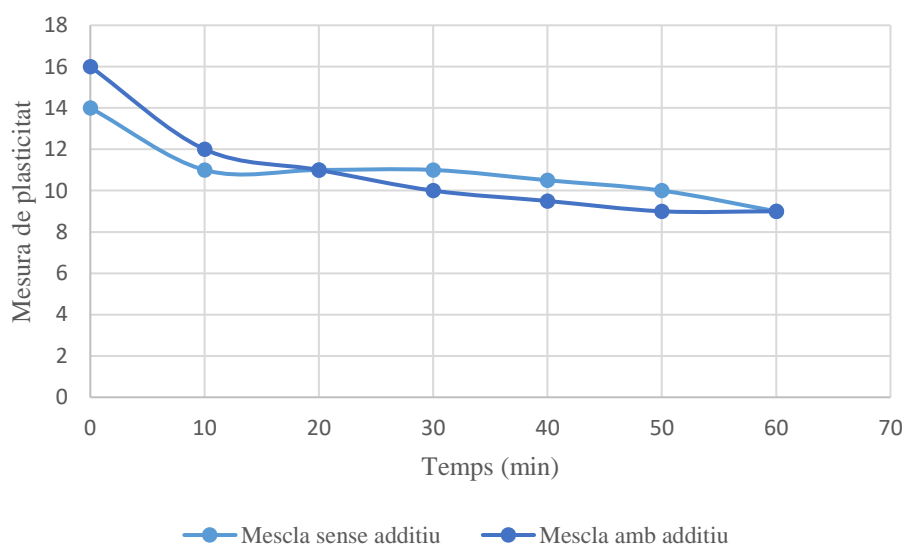


Figura 74. Representació gràfica de les dades obtingudes de la prova de treballabilitat utilitzant la metodologia de la prova 3, una relació d'aigua/ciment de 0,17, metodologia de la mescla 2 i utilitzant accelerant

Es pot observar que l'addició d'una quantitat de 50ml d'accelerant per 25Kg de morter Tector no presenta un canvi significatiu en el comportament del repòs del material durant una hora. S'hauria de comprovar si afegir una quantitat superior d'accelerant comporta un canvi en el seu comportament. Aquesta pot ser una informació útil per saber si es pot utilitzar l'additiu en la punta d'extrusió.

6.2.2.4. Comparació amb altres mesclades de ciment

En aquesta prova es vol observar el comportament en repòs de la mescla de ciment en estudi, el Tector 3D Build, i altres mesclades de ciment que no estan dissenyades per imprimir. Suposadament, el morter Tector ha de presentar les millors propietats de treballabilitat per imprimir. Així i tot, resulta interessant veure si pot haver-hi una altra mescla en el mercat que compti amb unes característiques de treballabilitat que es podrien fer servir també per la impressió 3D.

En totes les mesclades s'ha utilitzat la metodologia de la mescla 1, excepte en la mescla de formigó sec Fiasa HS-20 on s'ha necessitat l'ajuda d'una formigonera a causa de les dimensions del seu gra. A més, en el cas d'aquest material s'ha realitzat la prova de treballabilitat amb el con d'Abrams per aquest mateix motiu.

Per fer la barreja s'han utilitzat les dosificacions d'aigua estipulades pel fabricant, excepte en el cas del Tector 3D Build on s'ha utilitzat una relació d'aigua/ciment de 0,17, la mateixa que s'ha fet servir per fer les diferents proves. En cap cas s'ha emprat cap additiu ni addició en les mesclades.

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

Tipus de material	Prova amb el mesurador de plasticitat o con d'Abrams						
	Temps en repòs (min)						
	0	10	20	30	40	50	60
Tector 3D Build	12	10	7	6	6	5,5	4
Bikain R3	11	6,5	6	5	4	4	3
Formigó sec Fiasa HS-20	9	6	5	4	4,5	3,75	3
Pasta anivellant de paviment Axton	20	20	20	20	20	20	20
X Mesh M25 de Prodotti Speciali	7,5	6,5	5	4,5	5	4,5	4
Morter Nivoplant	7	6,5	5,75	5,5	4,5	4	3

Taula 17. Resultats de la prova de treballabilitat comparant diferents mescles de ciment utilitzant la metodologia de la prova 3 i la metodologia de la mescla 1

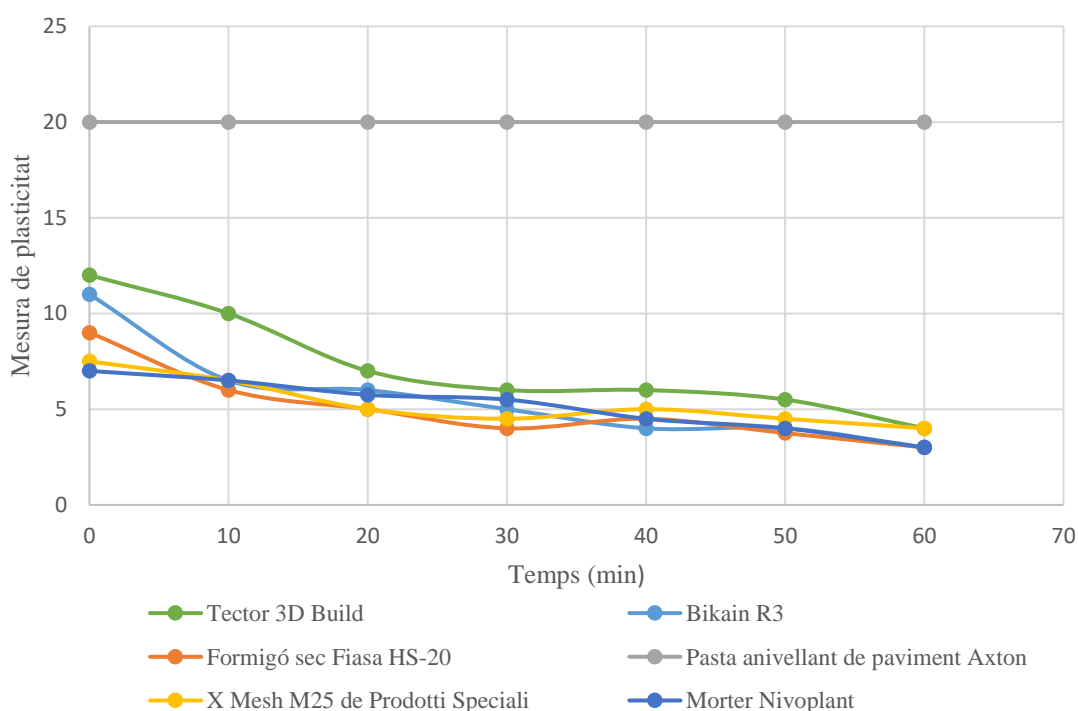


Figura 75. Representació gràfica de les dades obtingudes de la comparació de diferents mescles de ciment utilitzant la metodologia de la prova 3 i la metodologia de la mescla 1

Com es pot observar a simple vista, totes les mescles de ciment en repòs presenten una evolució similar de la seva consistència. Tot i això, la pasta anivellant no segueix aquest comportament, ja que el fet que estigui dissenyada per estendre's pel paviment fa que presenti una consistència molt líquida durant força temps. Això fa que aquest material no serveixi per imprimir.

Pel que fa al formigó sec, es pot afirmar que, segons les proves de treballabilitat, presenta una evolució de la plasticitat similar a la del Tector. Tot i això, l'elevada mida del gra dels àrids provoca que el sistema d'impressió no sigui capaç d'imprimir amb aquest material. Per tant, s'haurien de fer proves amb un sistema d'impressió diferent del proporcionat per la universitat per veure si es pot imprimir amb aquest material.

La resta de materials, segons aquestes proves, tot i que no estan dissenyats per imprimir-se, es podrien utilitzar per fer assajos d'impressió i comprovar d'aquesta manera si aquests són capaços de construir peces de forma additiva.

6.3. Resultats prova d'extrudibilitat

Per fer la prova s'ha seguit la metodologia descrita en l'apartat 5.3.2. *Prova d'extrudibilitat*. Aquesta s'ha realitzat amb dues mescles de Tector 3D Build i amb una relació d'aigua/ciment de 0,17 i 0,16. Pel que fa a la metodologia de mescla, s'ha utilitzat la primera descrita en l'apartat 5.3.1.3.1 *Metodologia de la mescla*, la qual consisteix a barrejar la barreja durant aproximadament 3-4 min.

Els resultats de les proves obtinguts de les dues mescles es poden observar en la següent taula:

Relació aigua/ciment	Velocitat del rotor de la bomba (rpm)	Pressió en la entrada de la mànega (bar)	Temps per omplir el cubell (s)	Cabal que circula per la mànega (m^3/s)	Cabal que circula per la mànega (l/min)
0,17	1000	8	275	$2,9 \cdot 10^{-5}$	1,74
	2000	10	175	$4,57 \cdot 10^{-5}$	2,742
	3000	12	100	$8,00 \cdot 10^{-5}$	4,8
	4000	13	77	$1,00 \cdot 10^{-4}$	6
	5000	14	66	$1,21 \cdot 10^{-4}$	7,26
	6000	15	55	$1,45 \cdot 10^{-4}$	8,7
	7000	15,5	52	$1,53 \cdot 10^{-4}$	9,18
	8000	15,5	52	$1,53 \cdot 10^{-4}$	9,18
	9000	15,5	51	$1,56 \cdot 10^{-4}$	9,36
0,16	1000	8	295	$2,71 \cdot 10^{-5}$	1,626
	2000	12	180	$4,00 \cdot 10^{-5}$	2,4
	3000	14	145	$5,51 \cdot 10^{-5}$	3,306
	4000	15,5	126	$6,35 \cdot 10^{-5}$	3,81
	5000	16	120	$6,67 \cdot 10^{-5}$	4,002
	6000	18	100	$8,00 \cdot 10^{-5}$	4,8

Taula 18. Resultats de la prova d'extrudibilitat de dues mescles amb una relació d'aigua/ciment de 0,17 i 0,16.

A partir de les dades extretes podem elaborar una gràfica sobre la relació existent entre la pressió d'entrada a la mànega i el cabal de material que circula per la mànega en les dues relacions d'aigua/ciment.

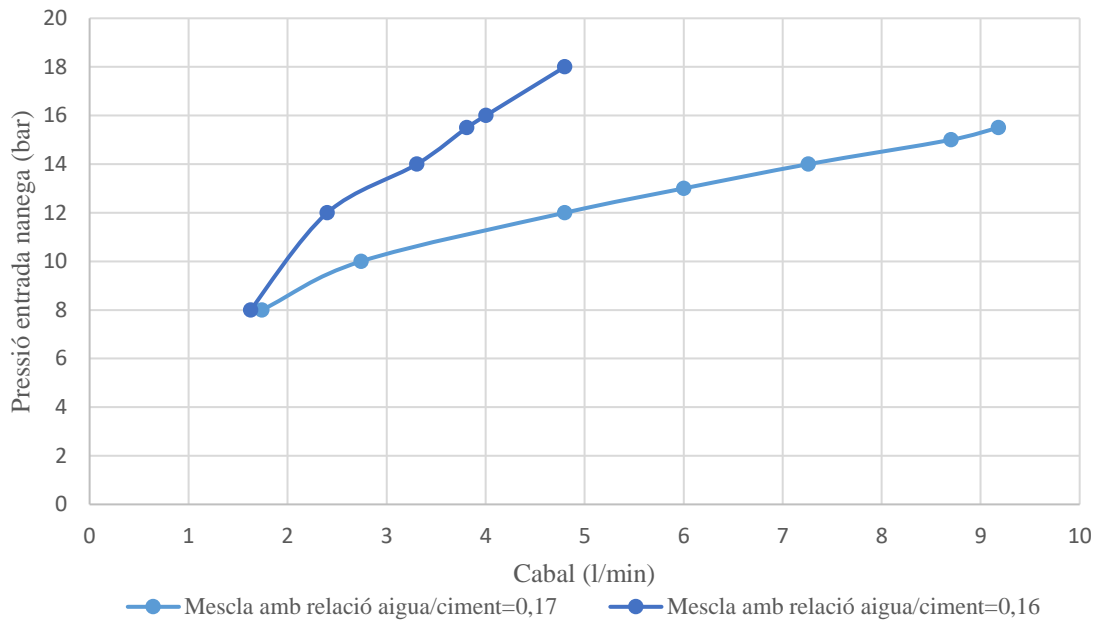


Figura 76. Representació gràfica de la prova d'extrudibilitat de dues mesclures amb una relació d'aigua/ciment de 0,17 i 0,16.

Com es pot veure en els resultats obtinguts, en augmentar la pressió de la bomba també augmenta el cabal que circula per la mànega. L'evolució depèn clarament de la dosificació d'aigua que afegim a la mescla, és a dir, el cabal que circularà per la mànega contra més aigua tingui serà major amb menys pressió de la bomba. Per tant, les mesclures més aquoses tenen menys dificultat per circular per la mànega.

També es pot observar a simple vista que les dues corbes segueixen un comportament aproximadament rectilini i que no tallen en el punt (0,0). Per tant, la hipòtesi inicial on es plantejava que el material tenia un comportament similar a un fluid Bingham es compleix. Tot i això, els primers valors de les dues mesclures són els que sembla que no compleixin aquest comportament lineal.

Per verificar que el model de comportament de fluid proposat és correcte s'utilitzarà l'expressió que relaciona el cabal amb la diferència de pressió calculada en l'apartat 5.3.2.2.3.2 *Estudi del flux de Bingham*. D'aquesta manera, es podrà elaborar una gràfica sobre el comportament teòric que haurien de tenir les dues mesclures. Primer, es verificarà el comportament de la mescla amb una relació d'aigua/ciment de 0,17 i, seguidament, la de 0,16.

6.3.1. Cas d'una mescla amb relació d'aigua/ciment de 0,17

Per obtenir l'expressió que relacioni el cabal i la pressió sense variables que desconeguem substituïm dos punts experimentals en l'expressió del cabal trobada en l'apartat 5.3.2.2.3.2 *Estudi del flux de Bingham*. D'aquesta manera, es poden aconseguir els valors de la viscositat i de l'esforç de fluïdesa els quals es consideren constants en tota la prova i, per tant, no varien al llarg del temps.

Els punts experimentals escollits en el cas de la mescla de 0,17 són els valors obtinguts amb una pressió de 12 i 13 bars. Aquesta elecció s'ha fet, principalment, perquè durant la prova la mescla ja ha desenvolupat i estabilitzat el seu flux. Per altra banda, un altre dels motius que han induït a aquesta decisió ha estat el fet que els primers valors de les gràfiques experimentals de les dues mesclures sembla que no compleixin correctament el model lineal de Bingham.

El primer pas és trobar els valors de viscositat i d'esforç de fluïdesa. Per fer-ho se substitueixen els valors geomètrics de la mànega i els valors experimentals, tant els del cabal com els de la diferència de pressió que s'han escollit. D'aquesta manera, es pot crear un sistema de dues equacions amb dues incògnites.

Els paràmetres geomètrics de la mànega, el cabal i la diferència de pressió utilitzats són els següents:

- Radi de la mànega: $R=0,0135$ m
- Llargada de la mànega: $L=15$ m
- Cas 1: $Q = 0,00008$ m³ ; $\Delta p = |P_{atm} - P_0| = |101325 - 12 \cdot 10^5| = 1098675$ Pa
- Cas 2: $Q = 0,0001$ m³ ; $\Delta p = |P_{atm} - P_0| = |101325 - 13 \cdot 10^5| = 1198675$ Pa

Se substitueixen en l'expressió del cabal els diferents valors i s'obté el sistema d'equacions següent:

$$Q = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \mu_p L} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2 \tau_p L}{R \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2 \tau_p L}{R \Delta p} \right)^4 \right]$$

$$\mu_p = 11,9422 \cdot (1 - 0,0026969 \tau_p + 5,57894 \cdot 10^{-12} \tau_p^4)$$

$$\mu_p = 10,4233 \cdot (1 - 0,0024719 \tau_p + 3,93752 \cdot 10^{-12} \tau_p^4)$$

Es resol el sistema d'equacions i s'obté la següent expressió:

$$2,454 \cdot 10^{-12} \tau_p^4 - 0,00061796 \tau_p + 0,145718 = 0$$

L'equació presenta quatre solucions. Dues d'aquestes són imaginàries, ja que es descarten com a solucions vàlides per trobar el model. Per altra banda, les altres dues solucions són reals i, per tant, es poden considerar vàlides. Aquestes són les següents:

$$\tau_1 = 514,87 \text{ Pa} \quad \text{i} \quad \tau_2 = 251,75 \text{ Pa}$$

Com a esforç de fluïdesa s'escull el valor més petit dels resultats obtinguts. Per saber quin dels dos valors és correcte s'han realitzat els càlculs finals amb ambdós valors. El valor que s'aproxima millor a un model de Bingham és el valor més petit. Per mitjà d'aquest valor d'esforç es pot aconseguir la viscositat plàstica de la mescla.

$$\mu_p = 11,9422 \cdot (1 - 0,0026969 \cdot 251,75 + 5,57894 \cdot 10^{-12} \cdot (251,75)^4) = 4,1018 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Els valors de viscositat plàstica i d'esforç de fluïdesa de la mescla són:

$$\tau_p = 251,75 \text{ Pa} \quad \text{i} \quad \mu_p = 4,1018 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Per mitjà dels valors de viscositat i d'esforç de fluïdesa, es defineix l'expressió del cabal i es pot obtenir una corba teòrica del comportament del fluid segons la pressió d'entrada i el cabal que circula per la mànega. Aquesta es compararà amb la corba assolida de forma experimental i, d'aquesta manera, es valorarà la validesa del model i del valor tant de viscositat com de l'esforç de fluïdesa obtinguts.

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

Pressió en la entrada de la mànega (bar)	Cabal experimental que circula per la mànega (l/min)	Cabal teòric que circula per la mànega (l/min)	Error absolut (%)
8	1,74	0,6162	64,6
10	2,742	2,52	8,09
12	4,8	4,8	0
13	6	6	0
14	7,26	7,24	0,27
15	8,7	8,55	1,72
15,5	9,18	9,10	0,87

Taula 19. Comparació dels resultats teòrics i experimentals del cabal amb una relació d'aigua/ciment de 0,17

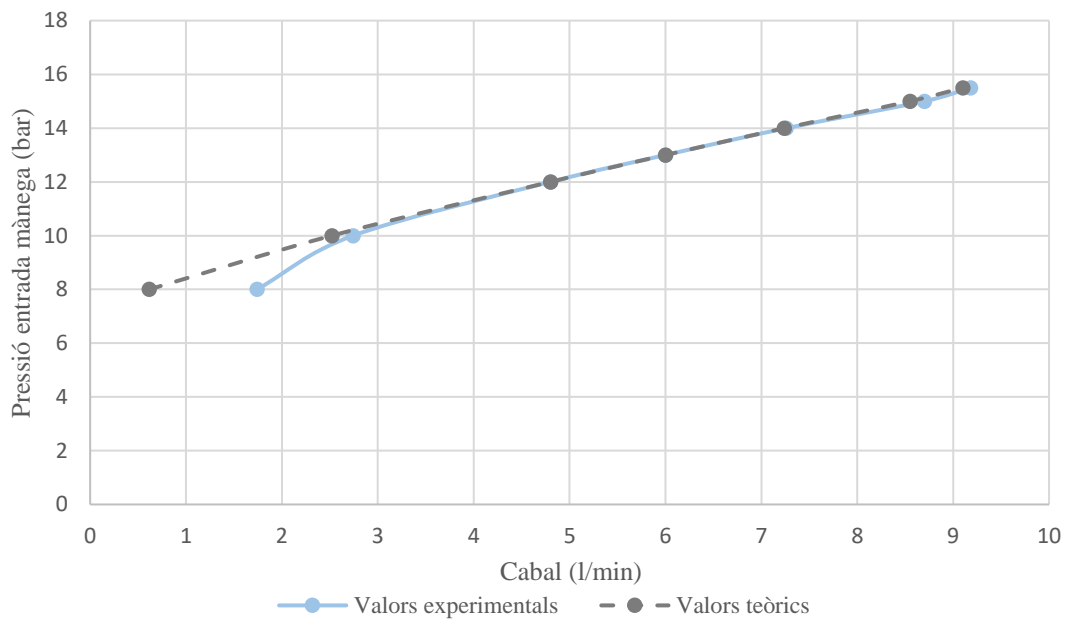


Figura 77. Representació gràfica de la comparació dels resultats teòrics i experimentals del cabal amb una relació d'aigua/ciment de 0,17

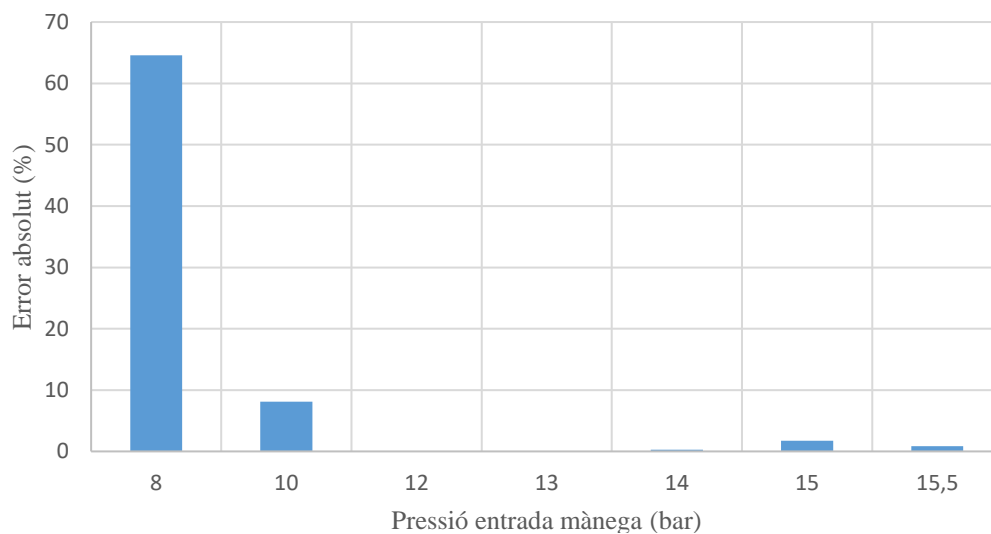


Figura 78. Representació gràfica de l'error absolut més entre els resultats teòrics i experimentals del cabal amb una relació d'aigua/ciment de 0,17

Com es pot veure en els gràfics, el model teòric de Bingham és vàlid a partir de pressions superiors a 10 bars. En canvi, pel que fa a pressions més baixes, es pot veure que aquest model no es compleix i això fa que l'error entre els valors experimentals i els teòrics sigui massa gran.

Per tant, els valors de viscositat plàstica i esforç de fluïdesa només es compleixen per aquest rang de pressions.

6.3.2. Cas d'una mescla amb relació d'aigua/ciment de 0,16

Se segueix el mateix procediment utilitzat en la mescla amb una relació d'aigua/ciment de 0,17 amb l'objectiu de calcular la viscositat plàstica i esforç de fluïdesa de la mescla i comprovar la validesa del model teòric.

Els paràmetres geomètrics de la mànega, cabal i diferència de pressió utilitzats són els següents:

- Radi de la mànega: $R=0,0135$ m
- Llargada de la mànega: $L=15$ m
- Cas 1: $Q = 0,0000551$ m³; $\Delta p = |P_{atm} - P_0| = |101325 - 14 \cdot 10^5| = 1298675$ Pa
- Cas 2: $Q = 0,0000635$ m³; $\Delta p = |P_{atm} - P_0| = |101325 - 15,5 \cdot 10^5| = 1448675$ Pa

Se substitueixen en l'expressió del cabal els diferents valors i s'obté el sistema d'equacions següent:

$$Q = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \mu_p L} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2 \tau_p L}{R \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2 \tau_p L}{R \Delta p} \right)^4 \right]$$

$$\mu_p = 20,4952 \cdot (1 - 0,00228153 \tau_p + 2,85777 \cdot 10^{-12} \tau_p^4)$$

$$\mu_p = 19,8381 \cdot (1 - 0,00204529 \tau_p + 1,84563 \cdot 10^{-12} \tau_p^4)$$

Es resol el sistema d'equacions i s'obté la següent expressió:

$$1,1068 \cdot 10^{-12} \tau_p^4 - 0,0003142 \tau_p + 0,033123 = 0$$

L'equació presenta quatre solucions. Dues d'aquestes són imaginàries, ja que es descarten com a solucions vàlides per trobar el model. Per altra banda, les altres dues solucions són reals i, per tant, es poden considerar vàlides. Aquestes són les següents:

$$\tau_1 = 617,46 \text{ Pa} \quad \text{i} \quad \tau_2 = 105,86 \text{ Pa}$$

S'escull com a esforç de fluïdesa el valor més petit fent servir el mateix raonament que en el cas de l'anterior mescla. Amb aquest valor d'esforç podem obtenir la viscositat plàstica de la barreja.

$$\mu = 20,4952 \cdot (1 - 0,00228153 \cdot 105,86 + 2,85777 \cdot 10^{-12} \cdot 105,86^4) = 15,5475 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Els valors de viscositat plàstica i esforç de fluïdesa de la mescla són:

$$\tau = 105,86 \text{ Pa} \quad \text{i} \quad \mu = 15,5475 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Per mitjà dels valors de viscositat i esforç de fluïdesa es defineix l'expressió del cabal i es pot obtenir una corba teòrica del comportament del fluid segons la pressió d'entrada i el cabal que circula per la mànega. Aquesta es compararà amb la corba aconseguida de forma experimental i es valorarà la validesa del model. A més, de la del valor de viscositat i l'esforç de fluïdesa obtinguts.

Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per a la seva impressió 3D

Pressió en l'entrada de la mànega (bar)	Cabal experimental que circula per la mànega (l/min)	Cabal teòric que circula per la mànega (l/min)	Error absolut (%)
8	1,626	1,380	15,13
12	2,400	2,580	7,50
14	3,306	3,306	0,00
15,5	3,810	3,809	0,02
16	4,002	3,978	0,60
18	4,800	4,680	0,03

Taula 20. Comparació dels resultats teòrics i experimentals del cabal amb una relació d'aigua/ciment de 0,16

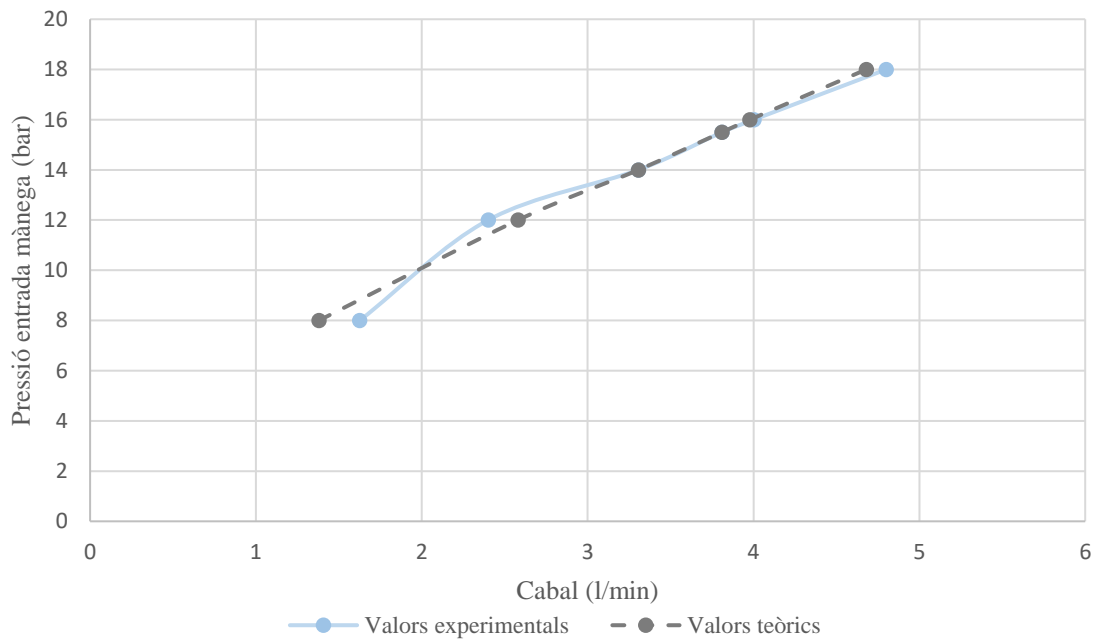


Figura 79. Representació gràfica de la comparació dels resultats teòrics i experimentals del cabal amb una relació d'aigua/ciment de 0,16

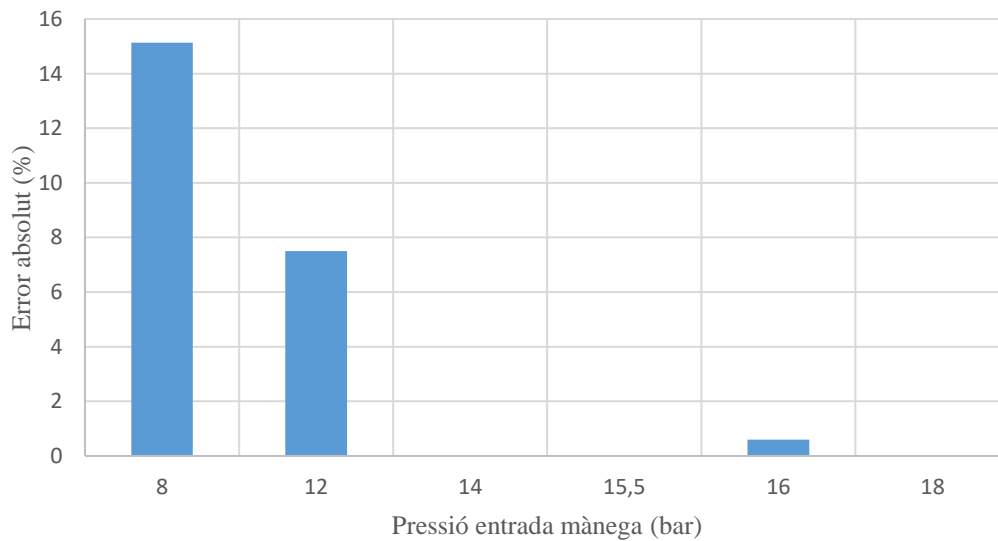


Figura 80. Representació gràfica del error absolut comès entre els resultats teòrics i experimentals del cabal amb una relació d'aigua/ciment de 0,16

Com es pot veure en els gràfics, el model teòric de Bingham és vàlid a partir de pressions superiors a 12,5 bars aproximadament. En canvi, pel que fa a pressions més baixes, es pot veure que aquest model no es compleix i això fa que l'error entre els valors experimentals i els teòrics sigui massa gran.

Per tant, els valors de viscositat plàstica i esforç de fluïdesa només es compleixen per aquest rang de pressions.

6.4. Resultats prova de qualitat d'extrusió

Seguint la metodologia de la prova descrita en l'apartat 5.3.3. *Prova de qualitat* s'ha fet una capa amb la impressora 3D Cons i s'han mesurat les seves dimensions per tal d'observar la deformació de la capa a diferents velocitats de la màquina d'impressió.

El material utilitzat és el Tector 3D Build amb una relació d'aigua/ciment de 0,16. L'elecció d'aquesta dosificació d'aigua es basa en la facilitat d'obtenció d'una major consistència en menys temps que la dosificació de 0,17. És cert que, tal com s'ha vist en la prova d'extrudibilitat, contra menys aigua tingui la composició de la mescla més dificultats presentarà aquesta per circular. Tot i això, en la prova de qualitat d'extrusió s'han fet servir velocitats baixes de la bomba, les quals, segons els valors experimentals de la prova d'extrudibilitat, fan que la mescla presenti unes dificultats similars a circular pel sistema. Per tant, per millorar la consistència de capa s'ha escollit aquesta relació d'aigua/ciment.

En la prova s'han realitzat tres impressions cada una a diferents velocitats de la impressora, però amb una velocitat del rotor de la bomba constant de 1000 rpm.

El disseny de cadascuna de les capes ha sigut el mateix. Aquest presenta una forma i unes dimensions com les que es poden observar a la figura 81. La capa té un gruix de 10 mm, una amplada de 40 mm i una llargada d'1 m. A més, presenta una curvatura en els extrems amb un radi de 45 mm.

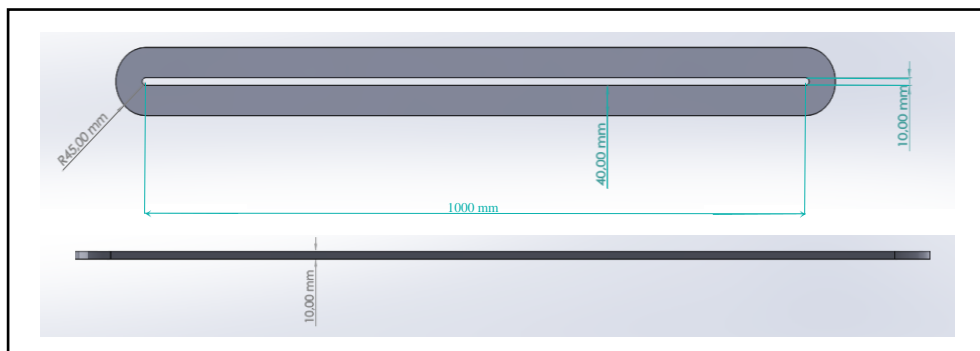
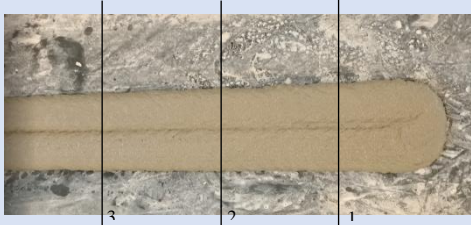

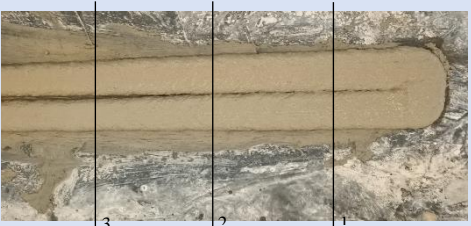



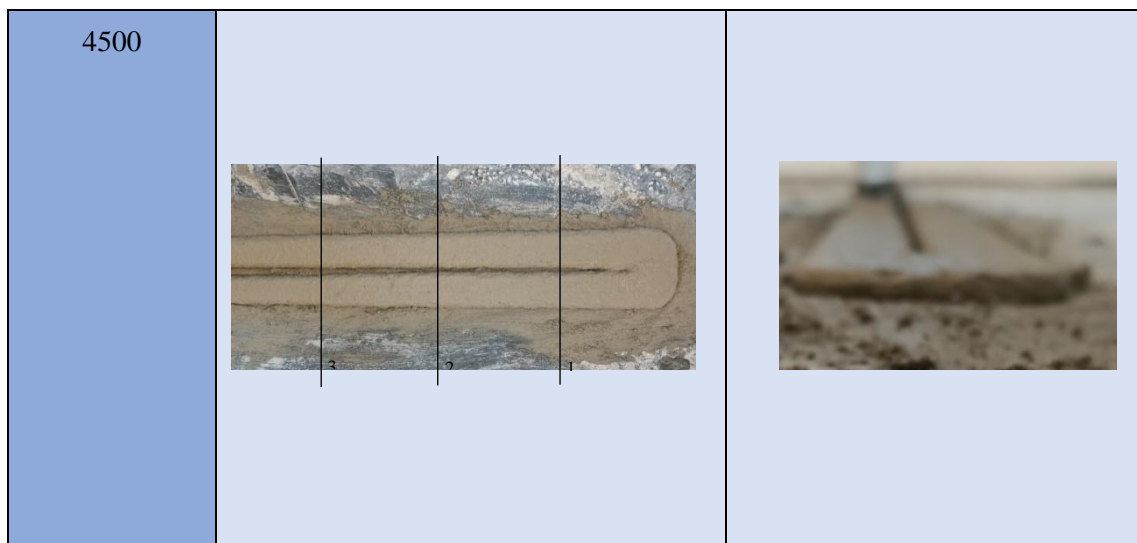
Figura 81. Perfil i planta de la peça a extrudir per fer la prova de qualitat d'extrusió

Pel que fa a les mesures, es realitzarà una mesura de la llargada de la capa sense tenir en compte la corba de l'extrem. Una mesura del radi de la curvatura i tres mesures d'amplada i gruix de capa les quals se situaran a una distància entre elles de 15 cm aproximadament. Aquestes es fan per observar el canvi d'amplada i el gruix de la capa al llarg d'aquesta.

Els resultats obtinguts en la prova es recopilen en la següent taula:

**Estudi sobre la dosificació de mescles de ciment per
a la seva impressió 3D**

VELOCITAT DEL MOTOR DE LA IMPRESSORA (RPM)	DIMENSIONS DE LA CAPA IMPRESA							
	Gruix (mm)			Amplada (mm)			Llargada (mm)	Radi corba (mm)
	E1	E2	E3	A1	A2	A3		
3000	10	10	10	50	45	40	1000	70
3900	10	10	10	40	38	33	1000	50
4500	10	10	10	35	35	28	1000	57
VELOCITAT DEL MOTOR DE LA IMPRESSORA (RPM)	IMATGES DE LES CAPES							
	Planta				Perfil			
3000								
3900								



Taula 21. Resultats de la prova de qualitat d'extrusió

Per analitzar l'error comès, en cada cas s'ha calculat l'error absolut de cadascuna de les capes. Aquest es pot observar en la taula següent:

VELOCITAT DEL MOTOR DE LA IMPRESSORA (RPM)	ERROR ABSOLUT DE LES DIMENSIONS DE LA CAPA IMPRESA							
	Error absolut gruix			Error absolut amplada			Error absolut llargada	Error absolut radi corba
	E1	E2	E3	A1	A2	A3		
3000	0%	0%	0%	25%	13%	0%	0%	56%
3900	0%	0%	0%	0%	5%	18%	0%	11%
4500	0%	0%	0%	13%	13%	30%	0%	27%

Taula 22. Error comès en la prova de qualitat d'extrusió

Com es pot observar la capa amb menys errors es produeix quan la velocitat del motor de la impressora és de 3900 rpm.

Pel que fa a la velocitat de 3000 rpm, el cabal que surt per l'extrusor és massa elevat respecte a la velocitat de moviment de la impressora i això provoca que les dimensions siguin més grans que les que s'han programat. En canvi, en el cas de 4500 rpm succeeix tot el contrari, el cabal que surt per l'extrusor és massa baix respecte a la velocitat de la impressora, el que provoca que les dimensions siguin més petites que les que s'han programat.

Per tant, la velocitat de 3900 rpm és la que s'utilitzarà per realitzar les proves de temps obert i d'edificabilitat.

6.5. Resultats prova de temps obert

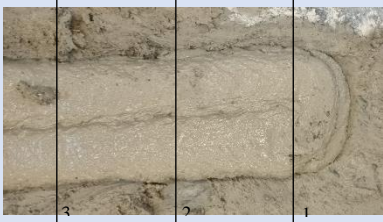

Seguint la metodologia de la prova descrita en l'apartat 5.3.4. *Prova de temps obert* es calcularà el temps que necessita una capa per aguantar el pes d'una altra a sobre.

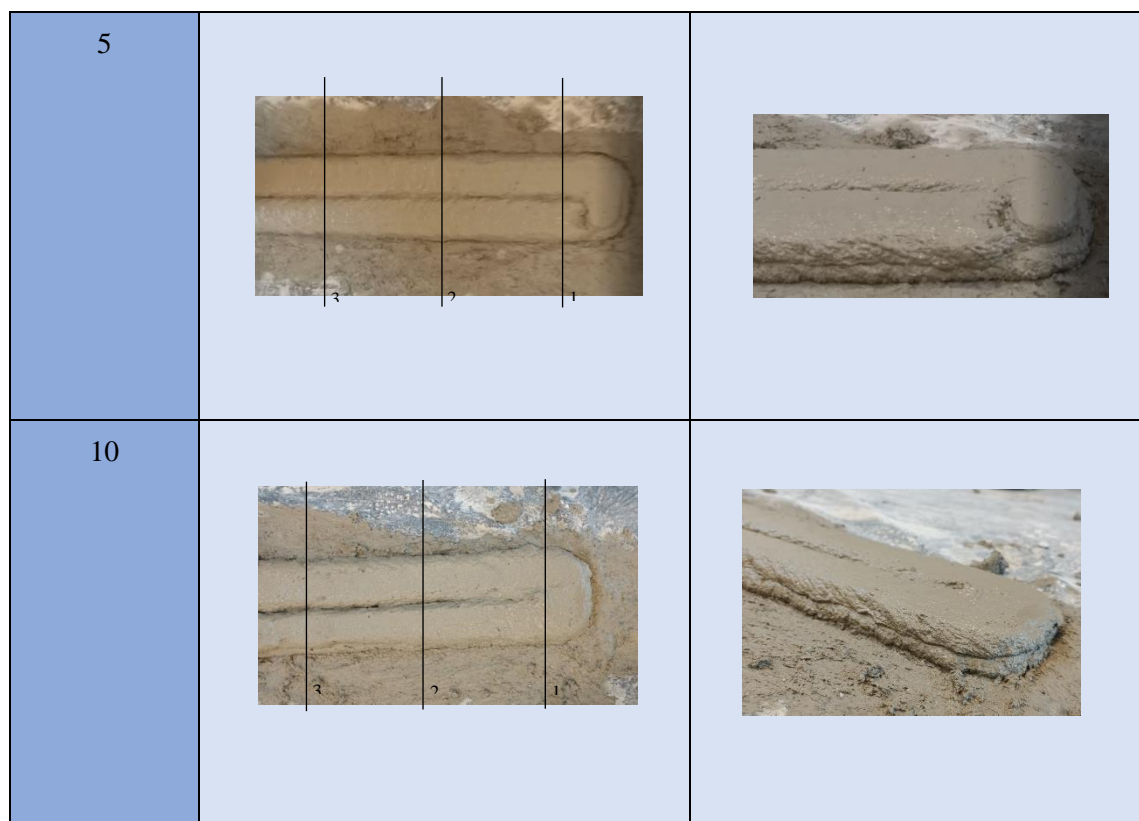
En aquesta prova s'utilitza el mateix material i dosificació d'aigua que en la prova anterior on s'observa la qualitat d'extrusió. Pel que fa a la velocitat del rotor de la bomba, aquest és constant en tota la prova amb un valor de 1000 rpm. Per altra banda, s'ha decidit que la velocitat del motor d'impressió fos de 3900 rpm, ja que és la velocitat que ha donat menys error en l'anterior prova.

En la prova s'han realitzat les mateixes mesures que en la prova anterior de la capa inicial (llargada de capa, radi de curvatura de l'extrem, tres mesures de l'amplada i gruix de capa amb la mateixa distància entre mesures).

L'objectiu és observar si la velocitat de la capa determinada en la prova anterior és suficient perquè aquesta suporti el pes d'una altra a sobre o si bé aquesta s'ha de reduir. Per aquest motiu s'imprimiran dues capes amb aquesta velocitat i amb un interval de capa entre aquestes.

Els resultats obtinguts es recullen en la següent taula:

INTERVAL DE TEMPS ENTRE CAPA (S)	DIMENSIONS DE LA PRIMERA CAPA IMPRESA							
	Gruix (mm)			Amplada (mm)			Llargada (mm)	Radi corba (mm)
	E1	E2	E3	A1	A2	A3		
0	9	9	9	50	48	47	1000	60
5	10	10	10	44	43	42	1000	54
10	10	10	10	43	42	42	1000	50
INTERVAL DE TEMPS ENTRE CAPA (S)	IMATGES DE LES CAPES							
	Planta				Perfil			
0								



Taula 23. Resultats de la prova de temps obert

Per analitzar l'error comès en cada cas s'ha calculat l'error absolut en cadascuna de les capes. Aquest es pot observar a la taula següent:

Interval de temps entre capa (s)	Error absolut de les dimensions de la primera capa impresa							
	Error absolut gruix			Error absolut amplada (%)			Error absolut llargada (%)	Error absolut radi corba (%)
	E1	E2	E3	A1	A2	A3		
0	10%	10%	10%	25%	20%	17,5%	0%	33,3%
5	0%	0%	0%	10%	7,5%	5%	0%	20%
10	0%	0%	0%	7,5%	5%	5%	0%	11,1%

Taula 23. Error comès en la prova de temps obert

Tal com es pot observar, contra més temps es deixa que la capa s'assenti, menys deformació pateix aquesta en suportar una altra a sobre seu. L'interval de temps que provoca menys deformació a la primera capa és quan passen 10s després que aquesta s'hagi extrudit. Així i tot, s'ha vist que al cap de 5s les dimensions deformades són prou acceptables per a considerar aquest interval de temps

vàlid. Per tant, si amb la velocitat de motor d'impressió de 3900 rpm el temps entre capa i capa és 32s a aquest se li han d'afegir 5s més, ja que és aquest el temps mínim entre capa, concretament, 37s. Seguint les fórmules esposades en l'apartat 4.2.4.1. *Limitació d'edificabilitat per falta de resistència de la capa* podem determinar la velocitat d'impressió mínima en la qual la capa pot no presentar cap deformació, o bé, si és el cas que la presenta aquesta és mínima.

Per calcular la velocitat és necessari saber la densitat del material, l'altura de la capa i la longitud d'aquesta.

En el cas proposat amb les condicions descrites anteriorment s'obtenen els següents valors:

- Densitat: $\rho = 1875 \text{ Kg/m}^3$
- Longitud de la capa: 2282,7 mm
- Espessor de la capa: 10 mm

S'apliquen les fórmules de l'apartat 4.2.4.1. *Limitació de edificabilitat per falta de resistència de la capa* i, d'aquesta manera, s'obté la velocitat màxima.

$$A_{\text{tix}} = \frac{\rho gh}{\sqrt{3} \cdot t_{h,\text{min}}} = \frac{1875 \cdot 9,81 \cdot 0,01}{\sqrt{3} \cdot 37} = 2,87 \text{ Pa/s}$$
$$V < \frac{\sqrt{3}LA_{\text{tix}}}{\rho gh} = \frac{\sqrt{3} \cdot 2,28 \cdot 2,87}{1875 \cdot 9,81 \cdot 0,01} = 0,0616 \text{ m/s}$$

La velocitat màxima per mantenir una estabilitat dimensional en aquesta peça és de 0,0616 m/s i això correspon a uns 3384 rpm del motor de la impressora. Per altres peces s'hauria de tornar a calcular modificant la longitud de capa i, d'aquesta manera, es podria saber aproximadament la velocitat de capa màxima d'impressió.

Pel que fa al temps màxim que ha de passar entre capa i capa per no perjudicar la adherència entre capes s'utilitzarà l'expressió presentada en l'apartat 4.2.4.2. *Limitació d'edificabilitat per falta d'adherència entre capes*.

$$t_{h,\text{max}} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho gh)^2}{12} + \left(\frac{2\mu V}{h}\right)^2}}{A_{\text{tix}}} = \frac{\sqrt{\frac{(1875 \cdot 9,81 \cdot 0,01)^2}{12} + \left(\frac{2 \cdot 15,5475 \cdot 0,0616}{0,01}\right)^2}}{2,87} = 196,68\text{s}$$

Aquest valor de temps màxim obtingut és molt orientatiu, ja que els valors de velocitat mínima d'extrusió i el valor A_{tix} no són exactes. Això és a causa, principalment, que el temps mínim de deformació d'una capa és difícil de determinar i depèn de la persona que realitza la prova. A més, aquest valor depèn de la viscositat del material el qual cal recordar que segons les proves d'extrudibilitat no és vàlid per a pressions inferiors a uns 12 bars, aproximadament. Tot i això, cal tenir en compte que en aquesta prova la mànega no està estirada a terra, sinó que es troba a certa alçada. Aquest fet provoca que per a velocitats baixes de la bomba la pressió d'entrada de la mànega pugui arribar als 12 bars o, fins i tot, superar-los. Per tant, es pot considerar que el valor de la viscositat que s'ha utilitzat és correcte.

6.6. Resultats de la prova d'edificabilitat

Seguint la metodologia de la prova descrita en l'apartat 5.3.5. *Prova d'edificabilitat* es vol observar la capacitat que té el material per construir una peça de diverses alçades de capa.

En aquesta prova s'utilitza el mateix material i dosificació d'aigua que en les dues proves anteriors on s'analitza la qualitat d'extrusió i el temps obert. Pel que fa a la velocitat del rotor de la bomba, aquest és constant en tota la prova, té un valor de 1000 rpm i la seva velocitat del motor d'impressió s'ha decidit que fos de 3400 rpm, ja que s'ha respectat el valor màxim de velocitat obtingut en la prova anterior.

En la prova s'han realitzat les mateixes mesures que en la prova anterior de la capa inicial i de la resta de capes menys la llargada de capa i el radi de curvatura. Del gruix i de l'amplada de capa només s'ha fet una mesura i no tres, com s'ha fet a les proves anteriors. L'objectiu és observar si amb la velocitat de capa determinada la impressora és capaç d'imprimir una peça de 7 capes d'altura.

NÚMERO DE CAPA (S)	DIMENSIONS DE LA PRIMERA CAPA IMPRESA		
	Gruix (mm)	Amplada (mm)	Col·lapse peça (si/no)
1	6	45	NO
2	8	44	NO
3	8,6	46	NO
4	8,6	44	NO
5	9,3	43	NO
6	10	43	NO
7	10	42	NO
IMATGES DE LES CAPES			
Planta		Perfil	
			

Taula 24. Resultats de la prova d'edificabilitat

Les capes inicials són les que es deformen més en comparació amb les capes finals tant en el gruix com en l'amplada de capa. Tot i això, la peça no ha col·lapsat amb un total de 7 capes d'altura de 10 mm de gruix, és a dir, 7 cm d'altura.

7. Selecció de dosificació i metodologia de mescla del material Tector 3D Build

Per seleccionar la dosificació òptima tant d'aigua com d'additiu i decidir la metodologia de mescla del morter d'estudi, el Tector 3D Build, en aquest apartat es valoraran les dosificacions i metodologies que han obtingut millors resultats a l'hora de realitzar la impressió.

Les proves de treballabilitat del material han demostrat que la consistència del material depèn de la variació, de la quantitat d'aigua i de la metodologia de mescla. Tot i això, afegir una quantitat d'accelerant estipulada pel seu fabricant durant la barreja de la mescla no afecta la seva consistència en l'etapa d'estat fresc. Per altra banda, cal tenir en compte que es pot donar el cas en què afegint més quantitat la consistència varii la qual cosa fa que hi hagi el risc que la reacció entri en l'etapa de fraguat el qual no interessa a l'inici del procés. Així i tot, això sí que pot ser interessant en la punta de l'extrusor de la impressora.

Metodologia de mescla

La metodologia de mescla més adient per la impressió s'ha decidit que és la primera metodologia descrita en l'apartat 5.3.1.3.1. *Metodologia de mescla*. Els motius de la seva elecció són, principalment, dos: la velocitat del procés i la consistència resultant després de la barreja.

Pel que fa a la velocitat de procés, es pot veure clarament si es comparen les dues metodologies de barreja proposades. La primera té una duració aproximada d'entre 3-4 min mentre que la segona és de 8 min. La velocitat del procés de mescla és important a l'hora d'imprimir, ja que actualment el subministrament de material a la bomba és manual. Això provoca que depenent de la velocitat d'impressió no doni temps a subministrar el material i existeixi el risc d'haver d'aturar el procés d'impressió.

Pel que fa a la consistència resultant, després de la barreja amb la primera metodologia s'obtenen mescles menys líquides que amb la segona metodologia. Aquest fet és causat, principalment, pel temps de mescla. Les duracions elevades de barreja fan que es trenquin més enllaços entre els grans de ciment aconseguint una mescla més líquida. Tot i que, a simple vista pot semblar més interessant aquesta segona metodologia, ja que facilitaria el transport de material per la mànega d'extrusió, el principal inconvenient que té és que el material resultant triga més temps a arribar a consistències aptes per construir una capa. Cal destacar que el material ha de tenir una consistència d'entre 8-7 mínims en l'assaig de plasticitat. Tal com s'indica en les proves d'extrudibilitat, les consistències de les mescles obtingudes, tant en la primera com en la segona metodologia, no presenten problemes de circulació de material a través del sistema de subministrament quan les velocitats de la bomba no són molt altes. Per tant, el sistema d'extrusió no és una limitació.

Variació de la quantitat d'aigua

Pel que fa a la dosificació d'aigua, les relacions d'aigua/ciment que han donat millors resultats són les de 0,17 i 0,16. Tot i això, seguint les conclusions extretes en la metodologia de mescla la millor és una relació d'aigua/ciment de 0,16, ja que aquesta triga menys temps a arribar a consistències de capa més adients per imprimir. Per tant, les proves de temps obert, de qualitat d'impressió i d'edificabilitat realitzades amb aquesta dosificació donen uns resultats correctes. Tot i això, seria necessari que una vegada impresa la capa la seva consistència final augmentés més ràpidament, per tal d'aconseguir construir peces de diverses capes sense molta deformació. Aquest problema es pot millorar afegint altes dosis d'accelerant en la punta d'extrusió, no obstant això, s'han de dur a terme proves per poder verificar la seva validesa.

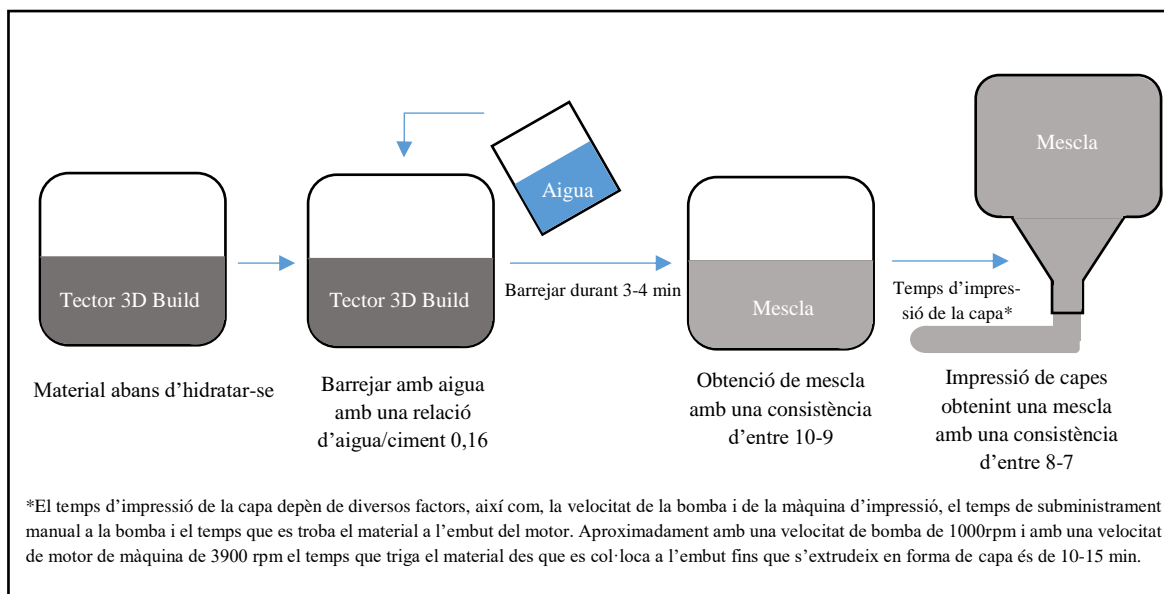


Figura 82. Procés de barreja determinat segons els experiments realitzats de les diferents propietats essencials del material d'impressió 3D

8. Resum del pressupost i/o estudi de viabilitat econòmica

En aquest apartat es mostra l'estimació del pressupost d'aquest estudi. La inversió ha sigut possible gràcies al departament de Resistència de materials de l'ESEIAAT i de la col·laboració de l'empresa de construcció Lafarge Holcim.

El cost total calculat és de **8.749,02€**.

Per veure el desglossament del pressupost total, es pot consultar el document anomenat "Pressupost" que es troba adjunt aquest estudi.

9. Anàlisi i valoració de les implicacions ambientals i socials

Com s'ha esmentat en aquest treball, concretament en l'apartat 2.2.5 *Beneficis de la impressió 3D en la construcció*, la impressió 3D en la construcció presenta prou avantatges ambientals i socials de construcció per a poder postular aquesta tecnologia com una de les vies successores dels mètodes tradicionals.

Implicacions ambientals

L'impacte ambiental de l'actual indústria de la construcció és un tema problemàtic i controvertit que cada vegada és més qüestionat per la nostra societat a causa dels actuals moviments socials per millorar el medi ambient. Una de les solucions més viables que ajuden a reduir significativament l'impacte mediambiental és la tecnologia additiva o construccions capa a capa utilitzant impressores 3D.

El principal avantatge que presenta respecte als mètodes tradicionals és la reducció de la utilització de material per la fabricació. El desaprofitament de material és inferior als mètodes tradicionals, ja que s'usa el material necessari per fabricar la peça. Això implica un menor impacte mediambiental pel fet que no es rebutja un material difícil de reciclar com és el formigó i perquè d'aquesta manera també s'està aconseguint reduir la seva producció.

Tot i això, a més de modificar la metodologia de fabricació on clarament la fabricació additiva és una via més sostenible que l'actual, és necessari recercar altres materials que puguin suplir la funció del formigó, ja que aquest presenta dificultats a l'hora de reciclar.

Implicacions socials

Pel que fa a les implicacions socials, la fabricació additiva aplicada en la construcció millora clarament en la velocitat dels processos i en l'adaptabilitat d'aquests. D'aquesta manera és possible construir qualsevol peça o edificació només canviant la programació de la impressora mentre que amb els mètodes tradicionals s'ha de redissenyar i construir els encofrats o motlles. Aquest aspecte fa possible la creació d'habitatges a gran velocitat podent fins i tot construir-los en un sol dia, la qual cosa resulta impossible en la construcció tradicional. A més, les formes que es poden crear en una impressora són il·limitades el que no succeeix amb els mètodes tradicionals. Un altre avantatge important és la reducció de costos de construcció a causa de la utilització de menys material.

Aquest estudi està enfocat en fer un estudi del material trobant una dosificació d'aigua òptima per controlar-lo durant tot el procés perquè realitzi una correcta impressió. L'estudi té la intenció de potenciar l'ús d'aquesta tecnologia fent estudis de materials viables d'ús per millorar les seves prestacions en un futur.

10. Conclusions

Aquest estudi s'ha realitzat amb l'objectiu de determinar la dosificació d'aigua i d'algun additiu a més de la metodologia de mescla perquè el formigó compleixi correctament el procés d'impressió. El material ha de ser prou fluid per circular sense problemes pel sistema de subministrament i extrusió i a la vegada ha d'arribar a una consistència suficient per poder ser per capes.

A partir dels resultats de les diferents proves experimentals realitzades podem extreure les següents conclusions:

Proves de treballabilitat

- Metodologies de prova dissenyades:
 - En les dues primeres metodologies descrites el temps de repòs del material es realitza en un mateix cubell de 28L utilitzant els instruments del con d'Abrams i el mesurador de plasticitat per la mesura. D'aquestes proves s'extreu que els resultats obtinguts són molt similars, sent el mesurador de plasticitat una millor opció a causa de la rapidesa i facilitat d'obtenció del valor de consistència.
 - La tercera metodologia tenia la intenció de millorar la segona metodologia de prova evitant el cisallament del material en els primers valors. El resultat és que el cisallament provoca una petita desviació dels primers valors quan el material es troba més líquid, el que fa que la tercera metodologia de prova sigui més correcte.
- Metodologies de mescla:
 - Les dues metodologies de mescla provoquen evolucions de comportament de treballabilitat diferents amb la mateixa dosificació d'aigua. La duració de barreja provoca que en temps elevats s'aconsegueixin mescles més líquides que triguen més temps en arribar a consistències que presentin algun esforç a fluir, és a dir, una plasticitat d'entre 5-6. Mentre que, per altra banda, en duracions de mescla més ràpides s'obtenen mescles amb consistències més seques les quals tenen més facilitat per arribar a aquests rangs de plasticitat.

- Dosificació d'aigua en la mescla de ciment:
 - El material es comporta com un formigó convencional. Si les quantitats d'aigua són elevades s'obtenen mescles amb consistències més líquides que poden arribar a segregar, mentre que en les dosificacions més baixes s'obtenen mescles més seques. Pel material d'estudi les relacions d'aigua ciment que presenten una evolució de treballabilitat òptima són de 0,17 i 0,16.
- Tornar a barrejar la mescla:
 - Tornar a barrejar una mescla que ha estat reposant durant una hora provoca dos canvis en la seva treballabilitat. El primer és que s'aconsegueix la mateixa consistència que a l'inici del primer repòs. El segon és que l'evolució de la treballabilitat de més fluida a més seca és més ràpida que al primer repòs. Aquesta velocitat de canvi de consistència va incrementant a mesura que es torna a barrejar la mescla. L'explicació d'aquest succés es deu a la formació d'enllaços permanents entre els grans de ciment i l'aproximació a l'inici del procés de fraguat del ciment.
- Utilització d'accelerant en la mescla:
 - Afegir a la mescla de morter la quantitat d'accelerant estipulada pel fabricant no presenta cap variació de l'evolució de la treballabilitat de la mescla quan es troba en repòs a diferència de si no l'afegim.
- Comparació del Tector 3D Build amb altres mescles de ciment:
 - A part de la pasta anivellant, la resta de mescles presenten una evolució de la treballabilitat similar a la del Tector 3D Build quan estan en repòs. Per tant, poden ser materials viables per la impressió 3D si no presenten limitacions de la mida del gra del sistema d'impressió.

Prova d'extrudibilitat

El model de Bingham proposat com a model de comportament del material d'estudi presenta certa semblança al comportament experimental del material per cert rang de valors de pressió. Els càlculs realitzats de la de viscositat i de l'esforç de fluïdesa en aquest apartat són vàlids si ens trobem dins d'aquest interval de pressions. El model és vàlid quan la pressió d'entrada és elevada i falla en les pressions més baixes. L'error de desviament del model pot ser causat per dues raons:

La primera és la utilització de lubricant en la mànega. La seva utilització pot causar que al morter en les primeres mesures, quan el valor de la pressió d'entrada és més baix, li sigui més fàcil circular per la mànega que al comportament teòric del model de Bingham. Això produeix la desviació obtinguda de forma experimental. A mesura que es duen a terme les altres mesures, en les quals s'augmenta la pressió d'entrada de la mànega, disminueix la presència de lubricant en les parets, ja que el material el va arrossegant cap a fora de la mànega i això provoca un apropament al model teòric de Bingham.

Una altra possible explicació de la desviació del model teòric del fluid és que el material segueixi un comportament de Bingham, però no de caràcter lineal, és a dir, que el comportament tingui una forma corbada i això faci que aquest no es comporti com el model teòric descrit.

Prova de qualitat d'extrusió

En la prova es realitzen tres capes de morter Tector 3D Build amb una relació d'aigua/ciment de 0,16 a tres velocitats d'impressió.

La capa que presenta menys errors dimensionals és produïda quan la velocitat del motor de la impressora és de 3900 rpm. En el cas de la velocitat de 3000 rpm, el cabal que surt per l'extrusor és massa elevat per la velocitat de moviment de la impressora el que provoca que les dimensions siguin més grans que les esperades. En canvi, en el cas de 4500 rpm succeeix tot el contrari, el cabal que surt per l'extrusor és massa baix per la velocitat de la impressora i això provoca que les dimensions siguin més petites que les esperades.

Prova de temps obert

En la prova es realitzen tres mostres de dues capes una sobre l'altre de morter Tector 3D Build amb una relació d'aigua/ciment de 0,16 a una velocitat d'impressió de 3900 rpm i modificant l'interval de temps entre capa de 0s, 5s i 10s.

S'observa que el temps de capa mínim per una bona adhesió i conservació dimensional de la capa inferior és de 37s. Això correspon a una velocitat d'impressió de 0,0616 m/s el que seria una velocitat de motor d'impressió de 3384 rpm aproximadament en el cas de les dimensions de la capa de prova.

També es calcula el valor del temps màxim de temps obert de la capa perquè aquesta presenti dificultats d'adhesió amb altres capes. Aquest valor s'ha determinat segons els valors de viscositat trobats en la prova d'extrudibilitat, el valor de velocitat mínima de capa i les dimensions de capa de la prova donant com a valor 196,68s.

Prova d'edificabilitat

En la prova es realitzen set capes apilades de morter Tector 3D Build amb una relació d'aigua/ciment de 0,16 a una velocitat d'impressió de 3400 rpm per observar si l'estructura col·lapsa o no. El resultat és que la peça es manté a peu dret, però les capes inferiors es deformen a causa del pes de les superiors arribant a disminuir el gruix de l'última capa de 10 a 6 mm.

11. Ampliació de l'estudi

L'estudi ha assolit els objectius principals plantejats a l'inici determinant la dosificació d'aigua i metodologia de mescla més adient perquè el material presenti les menors dificultats en cada part del procés d'impressió. Tot i això, s'hauria de dur a terme una ampliació de l'estudi per tal de millorar aspectes durant el procés. Algunes de les recomanacions són:

- Millorar el sistema de subministrament de material de la bomba
- Fer un major estudi del comportament de la mescla de ciment quan s'afegeix additiu augmentant les dosis. La finalitat és observar si l'additiu és capaç de millorar la capacitat d'edificabilitat del material afegint-lo a la punta de l'extrusor, ja que en els estudis duts a terme s'ha observat com la prova de qualitat d'extrudibilitat i la prova de temps obert han donat bons resultats de dimensió de capa, però quan s'augmenta el pes de les capes inferiors aquestes es deformen i això pot causar el col·lapse de la peça en formes més complexes.
- Fer proves d'impressió amb alguna mescla de ciment que ha resultat apta en les comparacions de treballabilitat amb el Tector 3D Build.

12. Referències

- [1] *¿Qué es la fabricación aditiva? Aplicaciones, tecnologías y ventajas*. Bitbaf: 2021 [en línia] [Consulta: 01-03-2022]. Disponible a: e
- [2] *Impresoras 3D*. Frax3D: 2015 [en línia] [Consulta: 01-03-2022]. Disponible a: <https://www.frax3d.com/impresora-3d>
- [3] *Sistemas de fabricación aditiva en prevención de riesgos laborales*. Femeval: 2019 [en línia] [Consulta: 02-03-2022]. Disponible a: <https://www.femeval.es/dam/jcr:aa78cfcc-5068-4abd-8999-9c6c1d201e4d/GUIA-FABRICACION-ADITIVA.pdf>
- [4] Daniel Delgado Camacho. Applications of additive manufacturing in the construction industry-A forward-looking review, *Automation in construction*, vol 89, p.101-119, 2018. [en línia] [Consulta: 08-03-2022]. Disponible a: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>
- [5] Blas Molero. *Procesos de fabricación aditiva* [en línia] [Consulta: 09-03-2022]. Disponible a: <https://generativedesignpro.wordpress.com/2018/05/12/procesos-de-fabricacion-aditiva-am/>
- [6] *Estereolitografía*. Wikipedia: 2022 [en línia] [Consulta: 09-03-2022]. Disponible a: <https://es.wikipedia.org/wiki/Estereolitograf%C3%ADa>
- [7] Peng Wu; Jun Wang; Xiangyu Wang. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in construction*, vol 68, p.21-31, 2016. [en línia] [Consulta: 09-03-2022]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580516300681>
- [8] Guamán-Rivera, R.; Martínez-Rocamora, A.; García-Alvarado, R.; Muñoz-Sanguinetti, C.; González-Böhme, L.F.; Auat-Cheein. Recent development and challenges of 3D-Printed construction: A review of research front, *Buildings* 2022, 12, 229. [en línia] [Consulta: 09-03-2022]. Disponible a: <https://doi.org/10.3390/buildings12020229>
- [9] Hugo Ignacio. *Estudi de las características del hormigón para su uso en una máquina d'impresión: selección de propiedades, ensayos experimentales y diseño de mezcla*. 2018. [en línia] [Consulta: 12-03-2022]. Disponible a: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/153009/Estudio-de-las-caracter%C3%ADsticas-del-hormig%C3%B3n-para-su-uso-en-una-m%C3%A1quina-de-impresi%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [10] *Elaboración de contornos*. Hisour arte cultural e historia. [en línia] [Consulta: 12-03-2022]. Disponible a: <https://www.hisour.com/es/contour-crafting-40687/>
- [11] *Una colònia en marte*. Seed, 2018. [en línia] [Consulta: 14-03-2022]. Disponible a: <https://www.studioseed.net/blog/software-blog/sustainability/una-colonia-en-marte/>
- [12] Bing Lua,B, Yiwei Wena,B, Minyang LiaYe Qiana, Kah Fai Leonga, Ming Jen Tana, Shunji Qiana,B. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*, vol 207, p. 477-490, 2019. [en línia] [Consulta: 12-03-2022]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819304404>

- [13] S. Lim , R.A. Buswell, T.T. Le, S.A. Austin, A.G.F. Gibb, T. Thorpe. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, vol 21, p. 262–268, 2012. [en línia] [Consulta: 14-03-2022]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580511001221>
- [14] IJCIET, International Journal of Civil Engineering and Technology, *3D Concrete Printing: Machine and Mix Design*. Vol. 6, Art. 6, Junio 2015, p. 14-22 [en línia] [Consulta: 14-03-2022]. Disponible a : https://www.researchgate.net/publication/280488795_3D_Concrete_Printing_Machine_and_Mix_Design
- [15] *BOD2-Specifications*. Cobod. [en línia] [Consulta: 14-03-2022] Disponible a: <http://cobod.com/>
- [16] Xtreme habitats Institute. *Research and feasibility study on 3D printed homes in rural Alaska*. [en línia] [Consulta: 14-03-2022]. Disponible a: <https://www.coursehero.com/file/144330342/3D-Printed-Home-Feasibility-Study-FINAL-2021-AHFC-Brandedpdf/>
- [17] *3D Printer*. Apis Cor. [en línia] [Consulta: 14-03-2022]. Disponible a: <http://apis-cor.com/>
- [18] TT Le, SA Austin, S. Lim, RA Buswell, R. Law, AGF Gibb, T. Thorpe. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 42, pp. 558–566, 2012. [en línia] [Consulta: 14-03-2022]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884611003255>
- [19] *3D Printing. D-shape*. [en línia] [Consulta: 16-03-2022]. Disponible a: <https://d-shape.com/>
- [20] *Shanska aims to commercialize 3D Printing with concrete*. Architect. [en línia] [Consulta: 13-03-2022]. Disponible a: https://www.architectmagazine.com/technology/skanska-aims-to-commercialize-3d-printing-with-concrete_o
- [21] *D-Shape: Una enorme impressora 3D*. Neoteo. [en línia] [Consulta: 13-03-2022]. Disponible a : <https://www.neoteo.com/d-shape-una-enorme-impresora-3d/>
- [22] Panda, B.; Mohamed, N.A.N.; Paul, S.C.; Singh, G.V.P.B.; Tan, M.J.; Šavija, B. The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete. *Materials* 2019, 12, 2149 [en línia] [Consulta: 25-03-2022]. Disponible a: https://www.mdpi.com/1996-1944/12/13/2149?type=check_update&version=1
- [23] *Cemento*. Quimica.es. [en línia] [Consulta: 25-03-2022]. Disponible a: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Cemento.html>.
- [24] Amparo Moragues Terrades. *Procesos de hidratación del cemento portland microestructura del hormigón*. [53]. ETSI Caminos, canales y puertos, universidad politecnica de Madrid. [en línia] [Consulta: 30-03-2022]. Disponible a : <http://prt2.uprm.edu/Microestructura.pdf>
- [25] *Química dels ciments: Ciment Portland*. [27]. Departament química de materials grau enginyeria civil, UPC. 2011. [en línia] [Consulta: 30-03-2022]. Disponible a : https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250109/2012/ciment_portland_1.pdf
- [26] 2.Ciment. (*Sense títol*). [en línia] [Consulta: 31-03-2022]. Disponible a : <https://upcommons.upc.edu/bitstream/2099.1/8329/8/07.pdf>

[27] Raquel Torres Remón. *Diseño de hormigón para impresión en 3D*. Departamento de la construcción y proyectos de ingeniería civil, UPC. [en línea] [Consulta: 31-03-2022] Disponible a: <https://riunet.upv.es/handle/10251/67255>

[28] *Tema 1. Conceptos básicos en construcción*. [17]. Teoría de estructuras y construcción industrial, UPC.

[29] *Lección 7. Hidratación del cemento portland*. Yumpu. [en línea] [Consulta: 10-04-2022]. Disponible a: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14336312/leccion-7-hidratacion-del-cemento-portland-1->

[30] Julian David Fonseca López, Sandra Díaz Bello. *Aspectos químicos y termodinámicos del cemento y el concreto*. Universidad Santo Tomás, ISBN: 9789585471719. [en línea] [Consulta: 15-04-2022]. Disponible a: <https://docplayer.es/208151120-Aspectos-quimicos-y-termodinamicos-del-cemento-y-el-concreto.html>

[31] Bruna Bueno Mariani. *Produção de clínquer portland com baixa emissão de CO₂ a partir da incorporação de minério não reagido (mnr) advindo da produção de tio₂*. Universidade federal da bahia escola politécnica. 2018. [en línea] [Consulta: 10-04-2022]. Disponible a: https://www.researchgate.net/publication/329327024_PRODUCAO_DE_CLINQUER_PORTLAND_COM_BAIXA_EMISSAO_DE_CO2_A_PARTIR_DA_INCORPORACAO_DE_MINERIO_NAO_REAGIDO_MNR_ADVINDO_DA_PRODUCAO_DE_TiO2

[33] María Anabela Gabalec. *Tiempo de fraguado del hormigón*. Universidad tecnológica nacional facultad regional la plata. [en línea] [Consulta: 20-04-2022]. Disponible a: <https://docplayer.es/180102-Tiempo-de-fraguado-del-hormigon.html>

[34] Capítulo 2. Estado del conocimiento. (*Sin título*). [en línea] [Consulta: 20-04-2022]. Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3327/26/06-Estado%20del%20conocimiento.pdf>

[35] Pablo Amilcar. *Reología del concreto*. Ingeniería del consejo departamental de Loreto del colegio de ingenieros de Perú. [en línea] [Consulta: 25-04-2022] Disponible a: <https://docplayer.es/43390620-Reologia-del-concreto-bach-pablo-amilcar-portugal-barriga.html>

[36] P.F.G. Banfill. *The rheology of fresh cement and concrete-a review*. Watt University, Edinburh, 2003. [en línea] [Consulta: 25-04-2022] Disponible a: https://www.researchgate.net/publication/255652324_The_rheology_of_fresh_cement_and_concrete-a_review

[37] Nicolas Roussel. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and concrete research*, vol 112, p. 76-85, 2018. [en línea] [Consulta: 26-04-2022]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000888461830070X>

[38] Jon Elvar Wallewick. Rheological properties of cement paste: Thisotropic behaviour and structural breakdown. *Cement and concrete research*, vol 39, p. 14-29, 2009. [en línea] [Consulta: 26-04-2022]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884608001919>

[39] S.A Austin; C.I Goodier; P.J Robins. Low volume wet-process sprayed concrete: pumping and spraying. *Materials and structures*, vol 38, p. 229-237, 2005. [en línea] [Consulta: 26-04-2022]. Disponible a: https://www.researchgate.net/publication/226805681_Low-volume_wet-process_sprayed_concrete_Pumping_and_spraying

- [40] Miguel Rodrigo Lopez. *Desarrollo de un dispositivo para la determinación de la aptitud del hormigón para el bombeo*. UPC, departamento de ingeniería de la construcción, 2011. [en línia] [Consulta: 27-04-2022]. Disponible a : <http://hdl.handle.net/2099.1/14363>
- [41] Bergemann, D., Klafszky, C. y Wirsching, J. (2004). *Concrete Technology for Concrete Pumps*. Putzmeister AG. Aichtal, Alemania. [en línia] [Consulta: 27-04-2022] Disponible a: http://www.tornokone.fi/wp-content/uploads/2017/05/BP_2158_EN.pdf
- [42] ACI Committee 304.2R. (1996). *Placing Concrete by Pumping Methods*. American Concrete Institute. [en línia] [Consulta: 27-04-2022]. Disponible a: http://dl.mycivil.ir/dozani/ACI/ACI%20304.2R-96%20R08%20Placing%20Concrete%20by%20Pumping%20Methods_MyCivil.ir.pdf
- [43] Delphine Marchon;Shiho Kawashima;Hela Bessaies-Bey;Sara Mantellato;Serina Ng. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and concrete research*, vol 112, p.96-110, 2018. [en línia] [Consulta: 30-04-2022]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884617314011>
- [44] Timothy Wangler, Ena Lloret, Lex Reiter, Norman Hack, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Mathias Bernhard, Benjamin Dillenburger, Jonas Buchli, Nicolas Roussel, Robert Flatt. Digital concrete: opportunities and challenges. *Rilem Tech Lett*, vol 1, p.67-75, 2016. [en línia] [Consulta: 01-05-2022]. Disponible a: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>
- [45] C.Escrib Pérez;L.Gil Espert. *Refuerzo a cortante de Vigas de Hormigón Armado con Tejidos y Matrices Base Cemento. Análisis y Comparativa*. UPC. [en línia] [Consulta: 05-05-2022]. Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/90403>
- [46] *Hormigon seco fiasa hs-25*. Fiasa Mix, S.A. [en línia] [Consulta: 05-05-2022]. Disponible a: http://www.fiasa.com/certificats_ce/morter/HS-25%20castella.pdf
- [47] *Pasta niveladora Axton plus interior-exterior 15mm 25Kg*. Leroy Merlin. [en línia] [Consulta: 05-05-2022]. Disponible a: <https://www.leroymerlin.es/fp/81928364/pasta-niveladora-axton-plus-interior-exterior-15mm-25-kg>
- [48] *Interempresas: Construcción materiales*. Mapei Nivoplan.[en línia] [Consulta: 05-05-2022]. Disponible a: <http://www.interempresas.net/Construccion/FeriaVirtual/Producto-Mortero-nivelador-Mapei-Nivoplan-147472.html>
- [49] *Slump cone set, galvanized steel*. Matest.[en línia] [Consulta: 06-05-2022]. Disponible a: <https://www.matest.com/es/producto/c182-kit-slump-cone-set>
- [50] *Steel rules*. Matest. [en línia] [Consulta: 06-05-2022]. Disponible a: <https://www.matest.com/es/producto/v176-01-steel-rules>
- [51] *Cinta mètrica*. Amazone. [en línia] [Consulta: 06-05-2022]. Disponible a: <https://www.amazon.com/-/es/Komelon-SL2925-Cinta-m%C3%A9trica-pies/dp/B01KA82ZN6>
- [52] Priyesh Mulye, Akash Gandhi, Seema Sapkale, Pratik Mahadik, Prof. Mrs. Rachel Gitty. *Experimental study on use of sugar cane bagasse ash in concrete by partially replacement with cement*. [en línia] [Consulta: 10-05-2022]. Disponible a : <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.39005>

[53] *Concreto*. Humboldt. [en línia] [Consulta: 10-05-2022]. Disponible a : <https://xdoc.mx/preview/hormigon-5e879abe642bc>

[54] *Contol y desarrollo de hormigones SA*. Ensayo cono de Abrams / Ensayo asentamiento del hormigón / Ensayo revenimiento del concreto. Youtube: 2020. [en línia] [Consulta: 10-05-2022]. Disponible a : <https://www.youtube.com/watch?v=Q3RcHgUzX3A>

[55] César García Andreu, José Miguel Saval Pérez, Francisco Baeza Brotons, Antonio José Tenza Abril. *Prácticas de Materiales de Construcción I.T.O.P – Práctica N° 11*. Universidad de Alicante. 2008. [en línia] [Consulta: 11-05-2022]. Disponible a : <https://docplayer.es/37315702-Practica-no-11-hormigones-i-introduccion-contenido.html>

[56] Matest. 2011. *Instruction manual “Plasticity meter”*.

[57] *Tector 3D Build*. Lafrage Holcim España. [en línia] [Consulta: 05-05-2022]. Disponible a: <https://www.lafargeholcim.es/mortero/tector-3D-Build-impresion-en-3D>