

TFG

Estudi: Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Títol: Desenvolupament d'un prototip d'ancoratge polimèric per el reforç d'elements de formigó amb materials compostos

Document: Memòria i annexos

Alumne: Guillermo Pérez Barnés

Tutor: Ines Ferrer Real i Cristina Barris

Departament: EMCI

Àrea: Enginyeria dels processos de fabricació i Enginyeria de la Construcció

Convocatòria (mes/any): /2021

ÍNDEX DE CONTINGUTS

Índex de continguts	i
Índex de FIGURES	ii
Índex de TAULES	iv
1 Introducció	6
1.1 Antecedents.....	6
1.2 Objecte	6
1.3 Abast i especificacions.....	7
1.4 Peticionari.....	7
1.5 Pressupost.....	7
2 Estructures de formigó reforçades amb frp i ancoratges	8
2.1 Adherència entre l'frp i el formigó.....	10
2.2 Longitud efectiva en la unió frp-formigó	13
2.3 Tipus d'ancoratges per al reforç d'estructures de formigó armat amb frp	14
2.4 Resum propietats ancoratges	16
3 Fabricació additiva	18
3.1 Sectors d'aplicació: construcció	18
4 Metodologia del projecte	20
A) Prova d'adherència entre el laminat d'FRP i la placa d'acer	21
B) Prova d'adherència entre el laminat FRP i l'ancoratge de plàstic	21
C) Prova d'adherència entre placa d'acer i l'ancoratge de plàstic.....	21
5 Disseny d'un muntatge experimental (PART 1).....	24
6 Disseny conceptual d'ancoratges (PART 2).....	26
6.1 Materials possibles pels ancoratges	27
6.2 Fabricació de Prototips	28
6.3 Ancoratge Final.....	30
7 Resultats experimentals.....	32
7.1 Experiments al buit: sense ancoratge	32
7.1.1 Experiment amb laminat d'acer	32
7.1.2 Experiment amb laminat de plàstic	42
7.2 Experiments amb laminat d'acer i ancoratge	53
7.2.1 MAA1	55
7.2.2 MAA2	58

7.3	Resultats Finals i Comparació	60
8	Conclusions	65
9	Relació de documents	66
10	Referències.....	67
ANNEX A	Preparació de les mostres	68
ANNEX B	Fabricació additiva.....	75
ANNEX C	Dades experimentals.....	82

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1.	Reforços NSM i EBR.....	9
Figura 2.	A) Cisallament B) Tracció (Castello, 2021)	10
Figura 3.	Fallida de les interfases (Gil, 2014)	11
Figura 4.	Modes de falla per desenganxament del reforç FRP (Gil, 2014).....	12
Figura 5.	Assaig d'una biga a tres punts (Gil, 2014)	13
Figura 6.	Assaig de "single-shear" per a un espècimen de formigó reforçat amb EBR FRP.	13
Figura 7.	Distribució d'esforços entre laminat i formigó	14
Figura 8.	Ancoratge HB-FRP vista general i vista col·locat (Wu & Huang, 2008)	15
Figura 9.	π -ancoratge (Mostafa & Razaqpur, 2013)	15
Figura 10.	A) U-ancoratge B) Col·locació del U-ancoratge (Moshiri & Czaderski, 2020)	16
Figura 11.	Disseny conceptual d'ancoratges	22
Figura 12.	Diagrama de flux del mètode del projecte.....	23
Figura 13.	Plànols del muntatge experimental.....	25
Figura 14.	Maquina MTS INSIGHT.....	25
Figura 15.	Primer plànol ancoratge	29
Figura 16.	Ancoratge 3D	30
Figura 17.	Disseny final ancoratges PLA.....	31
Figura 18.	Disseny final ancoratges ABS	31
Figura 19.	Disseny final del muntatge amb acer i ancoratge	31
Figura 20	Muntatge d'acer al buit. (MAB)	32
Figura 21.	Plànol MAB1	34
Figura 22.	Col·locació del muntatge a la maquina d'assaig	34
Figura 23.	Gràfica de comparació de mostres MAB1	35
Figura 24.	Trencament del MAB1.....	36
Figura 25.	Plànols MAB2.....	37

Figura 26. Preparació i col·locació final del MAB2.....	37
Figura 27. Gràfica de comparació de mostres MAB2	38
Figura 28. Trencament del MAB2.....	39
Figura 29. Plànols MAB3.....	40
Figura 30. Preparació final MAB3.....	40
Figura 31. Gràfic de comparació de mostres MAB3	41
Figura 32. Trencament MAB 3	42
Figura 33. Excel d'hipòtesi de materials	43
Figura 34. Excel hipòtesi de Tensió Última.....	44
Figura 35 Muntatge de Plàstic al Buit. (MPB)	44
Figura 36. Plànols MPB1	46
Figura 37. Preparació final MPB1	46
Figura 38. Gràfic de comparació de mostres MPB1	47
Figura 39. Trencament MPB1	48
Figura 40. Plànols MPB2.....	48
Figura 41. Preparació final MPB2.....	49
Figura 42. Gràfic de comparació de mostres MPB2	49
Figura 43. Trencament MPB2	50
Figura 44. Plànols MPB3.....	51
Figura 45. Preparació final MPB3.....	51
Figura 46. Gràfic de comparació de mostres MPB3	52
Figura 47. Trencament MPB3	53
Figura 48 Muntatge d'acer amb ancoratge. (MAA)	54
Figura 49. Plànols MAA1	55
Figura 50. Preparació final MAA1	56
Figura 51. Gràfic de comparació de mostres MAA1	56
Figura 52. Trencament MAA1	57
Figura 53. Plànols MAA2.....	58
Figura 54. Preparació final MAA2.....	58
Figura 55. Gràfic de comparació de mostres MAA2	59
Figura 56. Trencament MAA2	60
Figura 57. Comparació punt màx entre MAB2 i MAB3	61
Figura 58. Marcar MAB1	69
Figura 59. Preparació Epoxi	70
Figura 60. Fixació de la resina al MAB1	70
Figura 61. Preparació zona adherència MAB2	71
Figura 62. Muntatge final MAB2	71

Figura 63. Muntatge final MAB3	72
Figura 64. Muntatge final MPB1	72
Figura 65. Muntatge final MPB2	73
Figura 66. Muntatge final MPB3	73
Figura 67. Muntatge final MAA1	74
Figura 68. Muntatge final MAA2	74
Figura 69. Aplicació de forces de ruptura respecta l'orientació	76
Figura 70. Components d'una impressora 3D	77
Figura 71. Orientació d'impressió	78
Figura 72. Altura de capa	78
Figura 73. Ompliment.....	79
Figura 74. Patró d'impressió.....	79

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1: Comparació de propietats mecàniques de formigó, acer i FRP (TERUEL, 2017)	8
Taula 2. Resum propietats ancoratges	17
Taula 3. Resum de tots els assajos	20
Taula 4. Proposta de disseny d'ancoratges	27
Taula 5. Propietats materials 3D	28
Taula 6. Resum dels diferents MAB	33
Taula 7. Resultats MAB1	35
Taula 8. Resultats MAB2	38
Taula 9. Resultats MAB3	41
Taula 10. Resum dels diferents MPB	45
Taula 11. Resultats MPB1	47
Taula 12. Resultats MPB2	50
Taula 13. Resultats MPB3	52
Taula 14. Resum dels diferents MAA	54
Taula 15. Resultats MAA1	57
Taula 16. Resultats MAA2	59
Taula 17. Comparació laminat d'acer i PLA i dimensions 125 i 80	62
Taula 18. Comparació del laminat d'acer al buit i ancoratges	63

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Actualment, per a la construcció de grans estructures com podrien ser edificis, ponts o naus es fa servir el formigó armat com a material principal, ja que resulta molt versàtil i té una relació prestacions/preu molt atractiva. Les estructures de formigó armat suporten tant la seva pròpia estructura, com agents externs tals com càrregues permanents, de manteniment, neu, o vent. Amb el temps, les estructures poden patir algun tipus de deteriorament o canvi d'ús que poden provocar una necessitat de reforç estructural.

Avui en dia és comunament acceptat l'ús de materials compostos de fibra contínua (Fibre Reinforced Polymers, FRP) com a reforç estructural d'estructures existents de formigó armat. Els FRP presenten unes elevades prestacions mecàniques, com per exemple resistència o rigidesa, i un pes molt petit, fent-los molt atractius com a reforç.

Les tècniques de reforç més utilitzades amb FRP són l'EBR (Externally Bonded Reinforcement), consistent en enganxar la làmina o teixit d'FRP a la cara traccionada de l'element amb un adhesiu, habitualment resina epoxi, i el NSM (Near-Surface Mounted), on el reforç s'inserta en una regata prèviament executada a la cara traccionada. Ambdues tècniques, però sobretot l'EBR, pateixen problemes d'adherència, obtenint sovint fallades prematures per desenganxament del laminat del substrat de formigó. Per tal d'intentar solucionar aquesta problemàtica, es proposa l'ús d'ancoratges entre l'FRP i el formigó.

Els ancoratges s'encarregaran de fer una funció de subjecció per tal d'evitar que l'FRP no es desenganxi prematurament del formigó. En l'actualitat hi ha una manca de codis, normes i procediments de disseny racionals, estandarditzats i confiables que en garanteixen el disseny òptim per tal d'aguantar més càrrega.

Fins al moment, els ancoratges metàl·lics són els que s'han començat a implementar. No obstant, aquests presenten certs problemes com pot ser la corrosió o la conductivitat elèctrica. És per això que cal investigar sobre l'ús de materials més lleugers i resistents a agents externs. En aquest sentit, una solució òptima seria l'ús de plàstics a partir de la fabricació additiva.

La fabricació additiva d'aquests materials engloba un conjunt de tecnologies amb diferents mètodes de fabricació i gran varietat de materials que permetrien la possibilitat de reduir els costos de fabricació, a part, permet tenir un disseny més flexible i fàcil de personalitzar o redissenyar, ja que està tot dissenyat amb ordinador.

1.2 Objecte

L'objecte principal d'aquest estudi és analitzar la viabilitat d'obtenir ancoratges de material polimèric i/o compostos creats a partir de fabricació additiva i validar-los mitjançant la creació d'un muntatge experimental que simulés un assaig real però amb simplificacions. I així poder valorar l'adherència d'aquest material polimèric amb l'epoxi.

1.3 Abast i especificacions

El projecte inclourà un estudi detallat de la problemàtica de l'adherència amb l'epoxi, així com un estudi preliminar del tipus d'ancoratges actuals (forma, dimensions i materials) per tal de tenir una visió global de com són els ancoratges que s'estan utilitzant actualment.

Això servirà com a base per a proposar uns nous dissenys alternatius d'ancoratges. A partir de les tècniques de fabricació additiva, es seleccionarà l'estratègia d'impressió més òptima i el material que millor es pugui adaptar per realitzar la contribució.

La creació d'un nou disseny experimental per tal de poder fer assajos que permetin comprovar l'adherència dels materials i la incorporació dels nous dissenys d'ancoratges.

Finalment, es realitzarà una campanya experimental, dividida en dues etapes; i els experiments, en primer lloc, es realitzaran al buit per tal de comprovar l'adherència dels materials: un amb base d'acer i un altre amb base de plàstic, i seguidament amb el nou ancoratge per tal de quantificar la contribució de l'ancoratge.

1.4 Peticionari

L'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona ha encarregat el Treball Final de Grau. En particular, la petició sorgeix de les àrees de coneixement d'Enginyeria de la Construcció i d'Enginyeria de Fabricació del departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial.

1.5 Pressupost

El resum de pressupost serà CINQUANTA SET EUROS AMB DOS CÈNTIMS...57,02€ dels materials de tot el projecte.

2 ESTRUCTURES DE FORMIGÓ REFORÇADES AMB FRP I ANCORATGES

Una estructura de formigó armat es dissenya per a condicions acceptables de resistència (estats límits últims) i deformació (estats límits de servei); però poden sorgir situacions que ocasionin canvis en l'ús de l'estructura, com per exemple: un augment de càrregues no considerades en el disseny original durant l'execució o la seva vida útil. Tot això pot afectar i fer disminuir la capacitat de resistència de l'estructura.

Per tal d'intentar evitar aquesta disminució s'utilitza el procés de recuperació estructural denominat "reforç", consistent bàsicament en la modificació de les característiques d'una estructura, amb la introducció de reforços en alguns elements o en gairebé tota l'estructura, per tal que això impliqui un augment en les capacitats de l'estructura major a l'original.

Un element estructural sotmès a flexió pot ser reforçat mitjançant:

- Addició de plaques metàl·liques a la cara traccionada: Aquesta tècnica de reforç és la més tradicional per tal de disminuir els esforços de l'estructura. És la més pesada, ja que la incorporació de plaques de metàl·liques fa que s'augmenti molt el pes de l'estructura. I a part, és la menys efectiva de les tècniques.
- Addició de làmines o teixits de polímers reforçats amb fibra. El material normalment més utilitzat seria l'FRP amb fibres de carboni. L'FRP es pot trobar col·locat exterior (EBR) que es un laminat in situ que reforça a flexió, tallant o confinament o inserta en una regata (NSM) que es un laminat de FRP prefabricat o barra de petit diàmetre.

Per tant, es pot tenir diferents maneres de reforçar una estructura, però un dels reforços més habituals i és comunament acceptat per al reforç d'estructures de formigó són els elements de polímers reforçats amb fibra de carboni (FRP). Les principals aplicacions serien a flexió i/o tallant de bigues i confinament de columnes de formigó armat, reforç a flexió de lloses i dissipador de l'energia i millora de la capacitat de deformació. (TERUEL, 2017)

L'ús de reforços amb materials compostos de fibra contínua (Fibre Reinforced Polymers, FRP) presenta unes elevades prestacions mecàniques. Els FRP amb fibra de carboni (CFRP) són els més emprats per a aquesta tècnica de reforç, per tenir unes propietats mecàniques molt atractives. (veure Taula 1)

Material	Mòdul elàstic (GPa)	Resistència a compressió (MPa)	Resistència a tracció (MPa)	Densitat(kg/m ³)
Formigó	20-40	25-75	1-3	2400
Acer	200-210	500-690	500-690	7800
Fibra de carboni	100-200	-	1500-3000	1750-1950

Taula 1: Comparació de propietats mecàniques de formigó, acer i FRP (TERUEL, 2017)

El baix pes dels FRP fa que la seva manipulació i instal·lació siguin significativament més fàcils que la solució equivalent amb acer. Això és particularment important quan s'aplica el reforç en zones de difícil accés, on és necessària la manipulació manual o amb sistemes de càrrega molt lleugers.

Els materials, fibres i resines, tenen una alta durabilitat i requereixen molt poc manteniment. Si en servei resulten danyats, és relativament fàcil reparar-los afegint una nova capa. L'ús de FRP no comporta significativament l'increment de pes de l'estructura ni de les dimensions de l'element.

Respecte a la forma de fer els reforços podem trobar dues tècniques diferents com s'ha comentat anteriorment; NSM (Near Surface Mounted Reinforcement) o EBR (Externally Bonded Reinforcement).

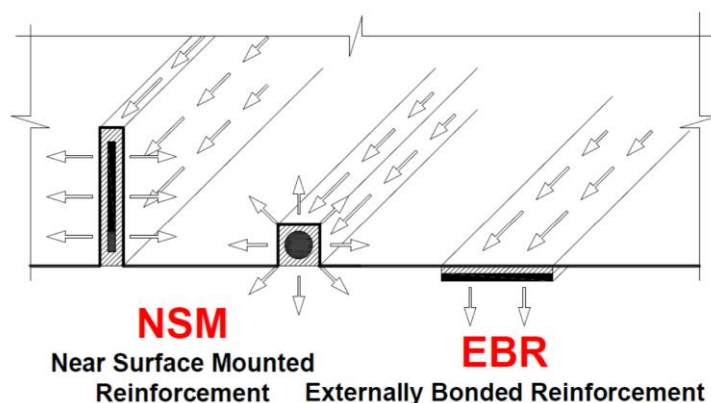


Figura 1. Reforços NSM i EBR

La tècnica EBR (FRP reforçat exterior) s'utilitza per al reforç a flexió i tallant en bigues i per al confinament en columnes de formigó armat. Consisteix en la unió externa d'elements prefabricats (làmines), en estructures que tenen propietats mecàniques compromeses, tal com es mostra a la Figura 1. Per un altre banda, la tècnica NSM (reforç muntat a la superfície) té com a objectiu reforçar estructures de formigó armat mitjançant la inserció de fibres de carboni a les ranures realitzades a la coberta del reforç. Aquesta tècnica permet augmentar la capacitat de mobilització resident de FRP i augmentar la protecció del material resistent a accions externes, així com augmentar la durabilitat del reforç. El mètode d'execució consisteix en obrir ranures en la direcció a reforçar i amb una amplada suficient perquè la fibra quedi confinada a l'interior de la ranura, que s'omple d'adhesiu epoxi. Les ranures del formigó solen tenir una amplada que oscil·la entre 3 i 5 mm i una profunditat entre 12 i 15 mm. La tècnica de NSM es pot observar a la Figura 1.

Pel que fa els inconvenients, els reforços FRP tenen un alt cost dels materials. Tanmateix, és un problema d'economia d'escala. A major ús, major producció i reducció de costos. A més, segons el tipus de projecte, el cost pot ser molt similar en comparació amb l'acer, sobretot si es té en compte el cicle de vida a llarg termini i s'inclouen els costos de manteniment.

Una dels desavantatges de cara als clients és la poca experiència d'aplicacions i la qualificació dels operadors que han de dur a terme els treballs. Les solucions amb materials prefabricats redueixen de forma dràstica els riscos sobre els treballadors ja que només es manipula l'adhesiu i no la confecció de tota la peça. Un altre seria la falta de normativa actual en aquest àmbit de la construcció. Ja que no hi ha normes clares a l'hora de l'aplicació del FRP, com tampoc quina seria la millor manera d'aplicació o quina seria la millor percentual de la seva incorporació. I una de les desavantatges a nivell estructural es el seu desenganxament prematur del substrat de formigó.

Encara que l'FRP incrementa significativament la capacitat de càrrega última de bigues de formigó, el laminat es pot desenganxar o pot arrencar superficialment el formigó. Això és degut al fet que els laminats que estan adherits en superfície es poden trobar que en algun punt tinguin una fallida mecànica. Per exemple, a flexió es pot trobar que les làmines només s'apliquen a la superfície de tracció i les falles per desenganxament poden limitar la completa utilització de la capacitat de flexió de les bigues.

2.1 ADHERÈNCIA ENTRE L'FRP I EL FORMIGÓ

En una biga reforçada a flexió, els modes de falla derivats del desenganxament de la làmina d'FRP es consideren prematurs, ja que no s'ha esgotat la capacitat última de cap material (formigó, acer o FRP).

L'adherència es pot definir com la capacitat de transferir una força procedent d'un adherent a través d'un adhesiu a un altre material adherent. De fet l'adherència serà major quan major sigui l'energia mecànica que pot absorbir la unió adhesiva. (Castello, 2021). L'adherència es pot quantificar per la màxima força que es pot aplicar a la unió adhesiva. Es distingeixen de dos mètodes normalitzats:

- De cisallament: quan s'aplica una força paral·lela al pla de la unió adhesiva, també conegut per mode II.
- De tracció: quan la força aplicada és perpendicular al pla de la unió adhesiva, també conegut per mode I.

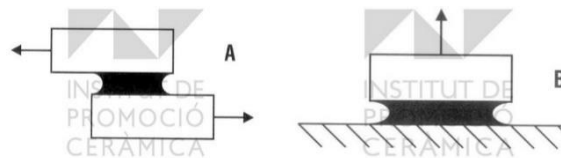


Figura 2. A) Cisallament B) Tracció (Castello, 2021)

Les teories que justifiquen l'adherència des de diferents perspectives són:

- Adherència per acoblament mecànic entre els materials i la cinètica de penetració en els porós de l'adherència per part de l'adhesiu.
- Adherència per la capacitat humectant de l'adhesiu
- Teoria de la difusió, quan el fenomen de l'adherència ve acompanyat d'una dissolució de l'adherent en l'adhesiu, entre la interfície de ambos materials
- Adherència per interaccions àcid-base en la interfície de ambos materials
- Adherència per formació d'enllaços covalents en la interfície.

Aquesta adherència pot portar a col·lapse. Com els desenganxaments en zones localitzades, que provocaria una reducció en la resistència de l'adherència entre el formigó i l'FRP. Per elles soles no podrien arribar a provocar tota la fallida però si una propagació per tota l'adherència i unes càrregues elevades que l'FRP no pot arribar a administrar.

Aquesta unió d'adherent està formada per tres materials; formigó, resina epoxi i FRP. Per definir l'adherència, sé de parlar de la resina epoxi. Que és un polímer orgànic termoestable que

s'endureix quan es barreja amb un agent catalitzador. Les resines epoxídiques són un tipus d'adhesius anomenats estructurals o d'enginyeria. Aquests adhesius s'utilitzen en la construcció. Ja que té alta resistència tèrmica; la composició d'aquesta resina permet suporta temperatures prolongades des de 45 °C i fins a 70 °C. A part, té una gran resistència a la corrosió; ja que es uns dels recobriments que suporta una exposició més prolongada a agents químics corrosius.

Per analitzar aquest tipus de falla per adherència, es poden distingir 3 tipus:

a) Falla de les interfases

La fallida per desenganxament entre el formigó i l'FRP es pot duna per diferents interfases.

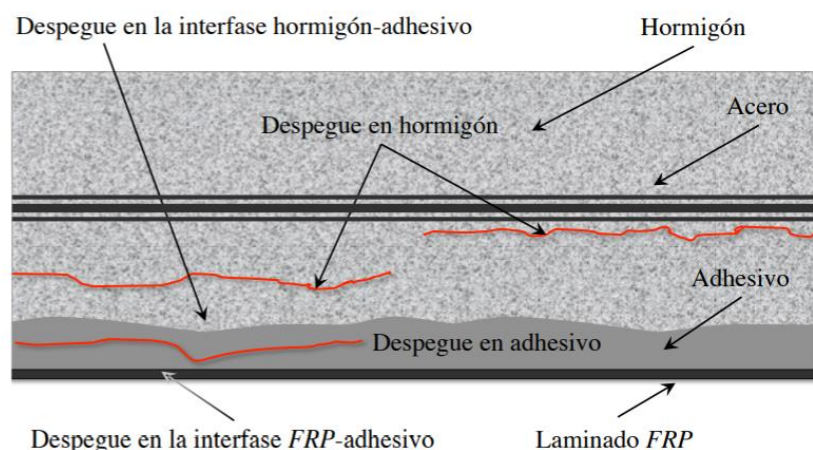


Figura 3. Fallida de les interfases (Gil, 2014)

Com es veu a la Figura 3 la falla per interfase por venir per:

1. Desenganxament en el formigó proper a la superfície o al llarg d'una capa dèbil. Això com la resistència a tracció i a tallant de l'adhesiu (resina epoxi) sol ser més gran que la resistència a tracció i tallant del formigó, la fallida es produirà normalment en el formigó. En aquest cas una fina capa de formigó (uns pocs mil·límetres de gruix) romandrà en el reforç de FRP.
2. Desenganxament de l'adhesiu, fallida de cohesió. El desenganxament pot produir-se a través de l'adhesiu si la seva resistència cau per sota de la del formigó (per exemple, a altes temperatures o quan la resistència del formigó és inusualment alta).
3. Desenganxament en les interfases entre el formigó i adhesiu o entre adhesiu i FRP. Aquestes fallides es produiran només si no hi ha prou preparació de superfície durant el procés d'aplicació de l'FRP, perquè la resistència de cohesió de les resines epoxi és més baixa que la resistència d'adhesió.
4. Pèrdua d'adherència en el propi FRP (fallida interlaminar a tallant). Com l'FRP és en si mateix un material compost, la pèrdua d'adhesió podria produir-se també a l'interior FRP, per pèrdua d'unió entre les fibres i la resina.

b) Comportament de la unió amb adhesiu

El comportament de l'adhesiu entre el formigó i el reforç ve caracteritzat per la relació tallant-desplaçament (shear-slip). La transferència de l'esforç de tall es fa a costa d'una deformació en l'adhesiu i per tant, es produeix un lliscament relatiu entre l'FRP i el formigó.

c) Fallida per desenganxament del reforç FRP

Llavors depèn de com es produeixi el desenganxament d'aquest reforç de FRP i sobretot, del punt d'inici d'aquest, es poden identificar els següents mètodes de col·lapse per el desenganxament.

1. Desenganxament en la zona de no fissura
2. Desenganxament causat per esquerdes a flexió
3. Desenganxament causat per esquerdes a tallant
4. Desenganxament causat per imperfeccions en la superfície de formigó
5. Desenganxament per tallant en el extrem
6. Esquinçat del formigó per tallant

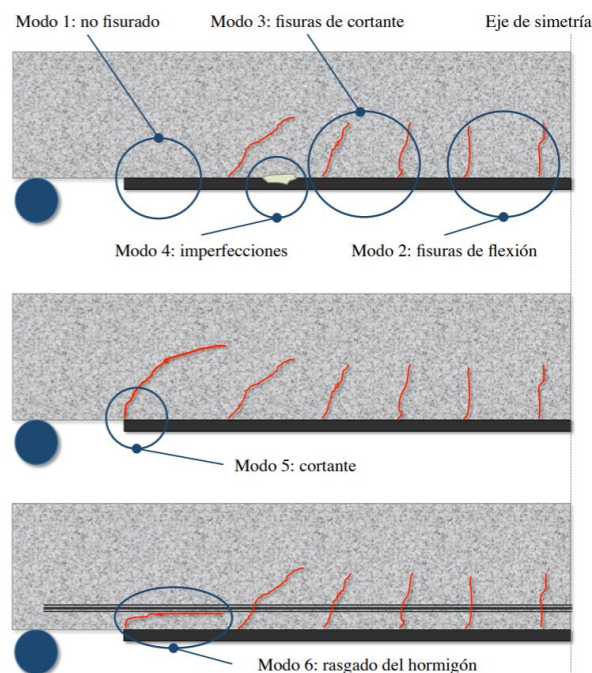


Figura 4. Modes de falla per desenganxament del reforç FRP (Gil, 2014)

Per acabar de definir la unió, sé de parlar de la resina epoxi. Que és un polímer orgànic termoestable que s'endureix quan es barreja amb un agent catalitzador. Les resines epoxídiques són un tipus d'adhesius anomenats estructurals o d'enginyeria. Aquests adhesius s'utilitzen en la construcció. Ja que té alta resistència tèrmica; la composició d'aquesta resina permet suporta temperatures prolongades des de 45 °C i fins a 70 °C. A part, té una gran resistència a la corrosió; ja que és uns dels recobriments que suporta una exposició més prolongada a agents químics corrosius.

Per tal de comprovar aquestes falles anteriorment mencionades, s'utilitzen diferents assajos enfocats a un caràcter més general i d'altres a forces concretes.

En caràcter més general, es troba l'assaig d'una biga a tres punts. Es col·loca la biga en horitzontal i es fixen dos suports als extrems i s'aplica una càrrega puntual en el centre. (Figura 5) Es col·loquen mesuradors de desplaçament lineal en els suports i en el centre de la biga per a determinar la relació càrrega-desplaçament en el punt de màxim desplaçament, el centre de la biga.

Aquest assaig és el que més es pot assimilar al cas real d'una biga, ja que intervenen tant les forces a tallant com a compressió.

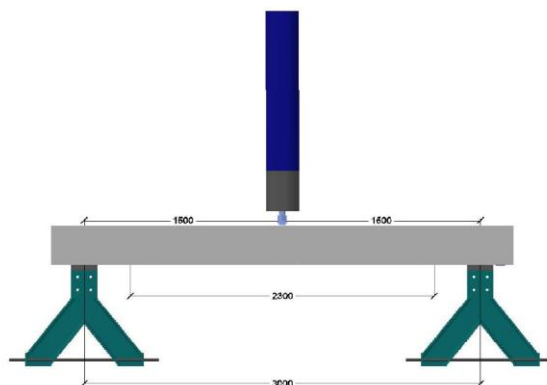


Figura 5. Assaig d'una biga a tres punts (Gil, 2014)

Per tal de simplificar aquest assaig, ja que té un cost elevat de fer i una inversió de temps elevada es realitza un altre assaig, l'anomenat single-shear o pull-out test. Aquest assaig consisteix en una simplificació de l'assaig general, ja que es concentra en l'estudi només de l'adherència entre el formigó i l'FRP, que han estat units per l'epoxi. L'estudi es realitza amb el control per desplaçament del FRP respecte el formigó, i s'arriba a la fallada, que típicament és per desenganxament del FRP.

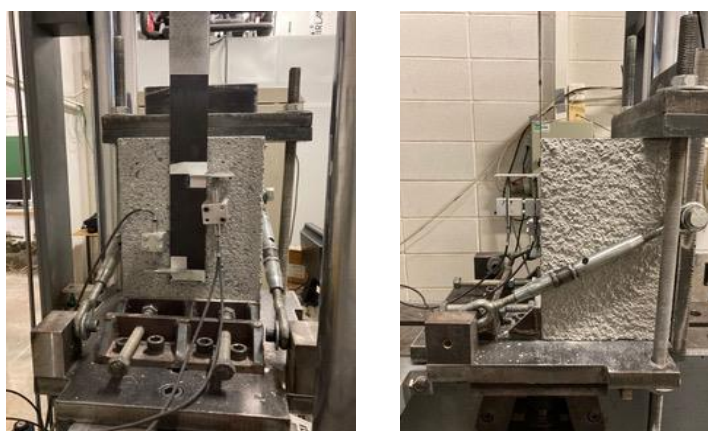


Figura 6. Assaig de "single-shear" per a un espècimen de formigó reforçat amb EBR FRP.

2.2 LONGITUD EFECTIVA EN LA UNIÓN FRP-FORMIGÓ

Per intentar solucionar totes les fallides d'adherència comentades en aquest punt, es decideix la introducció d'un element anomenat ancoratge. L'ancoratge es un element majoritàriament fet d'acer, i la seva funció principal es endarrerir el desenganxament del FRP del formigó per així evitar el major números de fallides.

Perquè sigui eficaç la introducció d'aquest ancoratge s'haurà de comprovar la longitud efectiva (l_b) de la unió FRP-formigó. La longitud efectiva es pot trobar a partir d'un assaig

d'adherència, on es troba la força màxima d'adherència abans del desenganxament. Per tant, l_e ve definida com a longitud mínima de la unió que assegura la màxima transmissió d'esforços d'adherència, i es defineix segons l'equació 1.

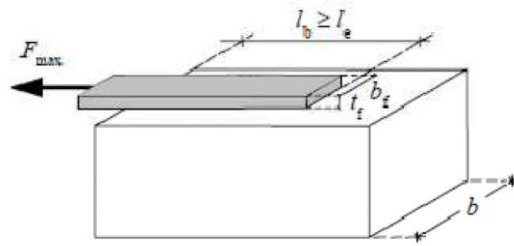


Figura 7. Distribució d'esforços entre laminat i formigó

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

l_e = Longitud òptima d'ancoratge en mm

E_f = Mòdul d'elasticitat normal a la direcció de la força en N/mm^2

t_f = L'espessor del compost fibroreforçat en mm

f_{ctm} = La resistència mitja a tracció del formigó que constitueix el suport en N

I així poder arribar a determinar la longitud mínima efectiva per la integració d'un ancoratge.

2.3 TIPUS D'ANCORATGES PER AL REFORÇ D'ESTRUCTURES DE FORMIGÓ ARMAT AMB FRP

L'ús d'ancoratges pot resultar una estratègia adequada per evitar el desprendiment prematur de l'FRP. No obstant, en l'actualitat, hi ha una manca de codis, normes i procediments de disseny racionals, estandarditzats i confiables que garanteixin el seu disseny.

Es poden trobar 3 tipus d'ancoratges diferenciats a partir de la literatura i articles llegit (Wu & Huang, 2008), (Smith & Scott T. Kalfat, 2013), (Mostafa & Razaqpur, 2013) i (Moshiri & Czaderski, 2020) per aquest projecte: A, B i C

A. ANCORATGE DE PLATINA (HYBRID BONDING /HB-FRP)

L'ancoratge HB-FRP està conformat per una platina d'acer, que acostuma a tenir forma rectangular que incorpora dos forats per tal que passin els cargols que fixen la platina amb el reforç FRP al formigó (com es pot observar en la Figura 8). Un aspecte important seria el material utilitzat, en aquest cas aquest ancoratge és acer, les propietats més importants són la confortabilitat i durabilitat, resistència a la tracció i la seva bona resistència a la fluència, bona conductivitat tèrmica, i, per als acers inoxidables, la resistència a la corrosió.

Respecte a l'estudi analitzat (Wu & Huang, 2008) en referència a les dimensions més habituals, la platina faria uns $70 \times 30 \times 5$ mm i el cargol uns 4mm de diàmetre amb 32 mm de llarg. En l'aspecte més tècnic podem destacar una densitat $\rho = 7.7 \div 8.1$ [kg/dm^3], un mòdul d'elasticitat E

=190÷210 [GPa] i una resistència a tracció: 340-480 MPa. I l'últim a destacar seria el muntatge, que es faria de manera que un extrem de l'ancoratge s'insereix en un orifici pretrepat anteriorment en el formigó i la longitud de l'ancoratge estreny tot l'FRP per tal de fixar posteriorment l'altre extrem de l'ancoratge amb un altre cargol.

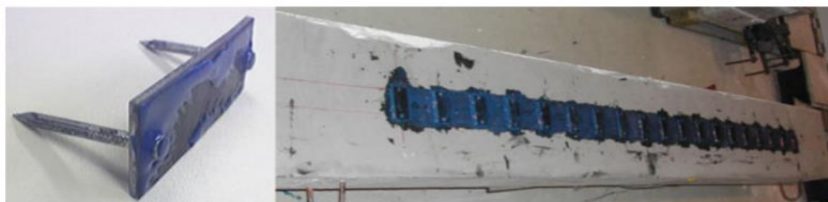


Figura 8. Ancoratge HB-FRP vista general i vista col·locat (Wu & Huang, 2008)

B. PI-ANCORATGE (π-ANCHOR)

El π-ancoratge està conformat per una única peça massissa en forma de pi com indica el seu propi nom. Per tal de subjectar l'FRP al formigó, la part del mitja de l'ancoratge pressionarà aquestes dues parts, les dos "l" s'introduiran en els orificis prèviament taladrats al formigó. I la part superior sobrant de la platina servirà a l'ancoratge per tenir una millor subjecció. (Figura 9)

Respecte a l'estudi analitzat (Mostafa & Razaqpur, 2013) les dimensions particulars d'aquest ancoratge són; la part rectangular farà uns 200x50x3 mm, mentre que les "l" faran 10mm de diàmetre i 90mm de llarg separats entre ells 100mm. Pel que fa el material, aquest ancoratge segons les especificacions del fabricant es de "Wabo MBrace unidireccional Teixit CF 130" i "Grafil 34-700 Carboni Remolc de fibra". D'on es pot destacar una alta resistència amb relació al seu pes, una excel·lent resistència a la deformació retardada, extremadament durable, fàcil d'instal·lar i baix impacte estètic. En l'aspecte més tècnic podem dir que tenim un gruix nominal de 0,165 mm / capa, una resistència a la tracció entre 3800 MPa i 4890 MPa i un mòdul de tracció entre 227 000 Mpa i 234 000 MPa. Perquè l'ancoratge funcioni de manera efectiva, cal que ho facin les tires laminades col·locades entre les potes de l'ancoratge i el cap de l'ancoratge al laminat i la superfície de formigó que hi ha a sota. A més, els ancoratges han d'estar pràcticament espaiats uniformement la longitud del laminat, inclosa la regió de constant moment. Un espaiat de 200 mm entre cada ancoratge es va trobar satisfactòria.



Figura 9. π-ancoratge (Mostafa & Razaqpur, 2013)

C. U-ANCORATGE

El U-ancoratge és bàsicament un peça allargada amb secció transversal circular amb dos doblegaments de 90 graus. Com es pot observar a la Figura 10. En comparació als dos anteriors ancoratges, la part central no té material extra que sobresurt pels costats, té el mateix diàmetre per tot l'ancoratge.

Referent a les mides de l'ancoratge que s'han pogut analitzar en l'estudi (Moshiri & Czaderski, 2020) són; 145mm a la part central, 100mm als dos extrems i un gruix de 2,8mm. El material d'aquest ancoratge l'acer igual que l'A. Com sé destacat anteriorment, les propietats més importants són la confortabilitat i durabilitat, resistència a la tracció i la seva bona resistència a la fluència, bona conductivitat tèrmica, i, per als acers inoxidables, la resistència a la corrosió. En l'aspecte més tècnic podem destacar una densitat $\rho = 7.7 \div 8.1 \text{ [kg/dm}^3\text{]}$, un mòdul d'elasticitat $E = 190 \div 210 \text{ [GPa]}$ i una resistència a Tracció: 340-480 Mpa. I el funcionament bàsic per aplicar aquest ancoratge es, injectar un morter d'injecció de dos components a base de resina Epoxi (Anomenat ResEP-16) en els orificis perforats prèviament al formigó i s'aplicarà en una petita àrea en la part superior de la tira de FRP. Els ancoratges de FRP en forma d' U es munten llavors de manera que les seves potes estiguessin dins dels orificis farcits d'epoxi. Els orificis tenen 100 mm de profunditat i 14 mm de diàmetre. Figura 10B.



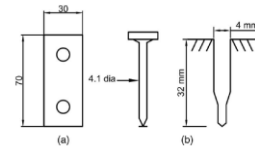
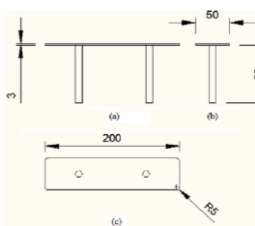
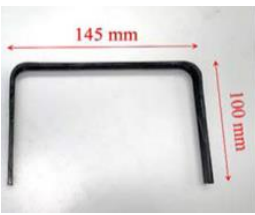
B.



Figura 10. A) U-ancoratge B) Col·locació del U-ancoratge (Moshiri & Czaderski, 2020)

2.4 RESUM PROPIETATS ANCORATGES

La Taula 2 mostra un resum de totes les propietats exposades en l'apartat 2.3 per tal de visualitzar més ràpidament les diferències entre els 3 ancoratges abans comentats. El més important a destacar seria la diferència de geometries aplicades, ja que visualment poden ser semblants els models, cadascuna està dissenyada per tal subjectar de manera idònia l'FRP i evitar el seu desenganxament prematur. Com el model HB o el π amb la part de la platina que tingui més contacte amb l'FRP o com l'U amb una subjecció centrada amb una col·locació de molts ancoratges per tot l'FRP. Pel que fa referència als materials tant l'acer com el Wabo MBrace tenen característiques bastant semblants per a l'ús que se'ls dona.

Ancoratge	Material	Propietats mecàniques: resistència tracció, tallant, etc....	Altres propietats	Geometria	Dimensions
HB-FRP	ACER	<ul style="list-style-type: none"> -densitat $\rho = 7.7 \div 8.1$ [kg/dm³] -modulo de elasticitat $E = 190 \div 210$ [GPa] -Relació de Poisson $\nu = 0.27 \div 0.30$ -Conductivitat tèrmica $\alpha = 11.2 \div 48.3$ [W/mK] -Expansió tèrmica $a = 9 \div 27$ [10⁻⁶ / K] -Resistència a Tracció: 340-480 Mpa 	<p>Les propietats de l'acer més importants són la confortabilitat i durabilitat, resistència a la tracció i la seva bona resistència a la fluència, bona conductivitat tèrmica, i, per als acers inoxidables, la resistència a la corrosió.</p>	<p>Conformat per dos parts; la platina, que te forma rectangular i amb dos forats al costat per tal, que passin els cargols que son la segona part del ancoratge</p>	
π-ANCHOR	Wabo MBrace unidireccional Teixit CF 130" i "Grafil 34-700 Carboni Remolc de fibra"	<p>Gruix nominal 0,165 mm / capa</p> <p>Resistència a la tracció 3800 MPa 4890 MPa</p> <p>Mòdul de tracció 227 000 MPa 234 000 MPa</p> <p>Allargament a la ruptura 1,67% 2,0%</p>	<p>Alta resistència amb relació al seu pes.</p> <p>Excel·lent resistència a la deformació retardada</p> <p>Extremadament durable</p> <p>Fàcil d'instal·lar</p> <p>Baix impacte estètic</p>	<p>Conformat per una única peça massissa en forma de pi com indica el seu propi nom.</p>	
U-ANCORATGE	ACER	<ul style="list-style-type: none"> -densitat $\rho = 7.7 \div 8.1$ [kg/dm³] -modulo de elasticitat $E = 190 \div 210$ [GPa] -Relació de Poisson $\nu = 0.27 \div 0.30$ -Conductivitat tèrmica $\alpha = 11.2 \div 48.3$ [W/mK] -Expansió tèrmica $a = 9 \div 27$ [10⁻⁶ / K] 	<p>Les propietats de l'acer més importants són la confortabilitat i durabilitat, resistència a la tracció i la seva bona resistència a la fluència, bona conductivitat tèrmica, i, per als acers inoxidables, la resistència a la corrosió.</p>	<p>Aquest ancoratge es bàsicament un peça allargada amb secció transversal circular amb dos doblegaments de 90 graus</p>	

Taula 2. Resum propietats ancoratges

3 FABRICACIÓ ADDITIVA

La fabricació additiva s'utilitzarà en aquest projecte en la part de disseny de nous ancoratges. Com s'ha comentat a l'apartat 2.3 actualment, la majoria d'ancoratges estan fabricats amb acer, per les bones característiques que dona aquest material, però no obstant no s'ha comprovat encara molt específicament si els materials polimèrics podrien arribar a desenvolupar la mateixa funció tenint unes característiques inferiors en aquest cas a l'acer. Per això és un dels punts importants d'estudi d'aquest projecte.

El funcionament de la impressió 3D es basa en el procés de fabricació additiva mitjançant el qual, un cable d'un material polimèric o algun derivat està en estat fos i juntament amb el moviment del capçal d'impressió modelen la peça en tres dimensions, anteriorment dissenyat en un programa de modelització com podria ser SolidWorks. Aquest procés es fa mitjançant la superposició de diferents capes successives del material fins a arribar a l'obtenció de la peça final. Per explicar més en detall tots els paràmetres d'impressió, les forces aplicades respecte a l'orientació i el funcionament bàsic d'una impressió 3D es pot trobar a l'annex B.

3.1 Sectors d'aplicació: construcció

La fabricació additiva ofereix una major llibertat de disseny, la productivitat en el lloc de treball i redueix als costos de producció. No només es pot produir pràcticament qualsevol forma, sinó que els objectes poden ser creats amb diversos materials per augmentar la seva resistència de qualsevol superfície de l'objecte que serà sotmès a altes càrregues. Això ofereix als dissenyadors noves opcions per a l'optimització dels components. A més, l'automatització que ofereix la fabricació additiva la fa especialment adequada per a projectes de construcció en entorns hostils, com a àrees afectades per la radiació atòmica.

Els processos de fabricació additiva són una tecnologia estàndard en moltes àrees de la fabricació de productes. Els components impresos no només acceleren la construcció de prototips en desenvolupament, sinó que també s'utilitzen cada vegada més en productes finals com automòbils i aeronaus. En la indústria de la construcció, les empreses més innovadores utilitzen processos de fabricació additiva per a la producció automatitzada de prototips il·lustratius a escala.

En la producció d'edificis reals, la mida particular dels components i les condicions econòmiques associades plantegen un desafiament particular. Per això, universitats i empreses de tot el món estan portant a terme investigacions sobre nous materials, màquines i processos per tal de proporcionar una base per al seu ús en la indústria de l'arquitectura, l'enginyeria i la construcció (AEC). Actualment, Investigadors de l'American Chemical Society (ACS) ja estan amb investigacions d'un material de construcció sostenible fabricat amb sòl local. Per tal de produir infraestructures sostenibles i la reparació d'edificis, ponts i carreteres en deteriorament. Bàsicament, unes de les primeres investigacions per tal de produir cases i petites estructures amb fabricació additiva. Per beneficiar-se al màxim de les possibilitats que ofereix la fabricació additiva en projectes de construcció, es necessita un flux de treball digital àmpliament automatitzat. Les dades geomètriques i materials complexos s'han de representar amb precisió i transferir fàcilment a l'equip de fabricació que es va a utilitzar.

Les impressores 3D requereixen ordres específiques per fabricar peces que es deriven del model geomètric de la peça per tal de crear la ruta de l'eina i altres instruccions que la impressora 3D necessita. Per tant, l'ús d'un programa d'enginyeria civil que pugui crear models precisos i

complexos, així com intercanviar dades de forma fiable i en un format utilitzable, és fonamental per garantir que la fabricació d'additiu tingui èxit. La fabricació additiva en el sector de la construcció ofereix una gran llibertat de disseny i àmplies possibilitats d'automatització. No obstant això, sense un mètode de planificació digital com la metodologia BIM (Building Information Modeling) i la solució de programari adequada, aquests beneficis serien difícils d'obtenir. A mesura que el mètode de fabricació additiva es torni més popular al sector AEC, aquests requisits seran més importants. (Nemetschek, 2021)

4 METODOLOGIA DEL PROJECTE

La metodologia del projecte es divideix en dues parts. En la part 1 es definirà un sistema experimental que permeti l'assaig d'ancoratges i comprovació de l'adherència, mentre que en la part 2 es proposaran nous dissenys d'ancoratges. A continuació s'explica cada una d'elles amb més detall.

PART 1: Definir un sistema experimental que permeti l'assaig d'ancoratges i comprovació de l'adherència:

Primer es dissenya un nou muntatge experimental, ja que el l'assaig habitual (single shear o pullout test, explicat en l'apartat 2.1 i mostrat a la Figura 6), implica un extens temps de preparació (formigonat del bloc, curat del formigó, aplicació d'un tractament superficial, aplicació de la resina i FRP, i curat de la resina), a més d'un cost econòmic elevat. La novetat i al mateix temps incertesa de fer els ancoratges amb fabricació additiva, provoca que resulti interessant plantejar un sistema d'assaig més senzill, econòmic i flexible que permeti realitzar una àmplia varietat de proves amb una implicació de temps i cost més adient, que utilitzant un sistema de proves de construcció real. A part, aquests nou muntatges permetrà la comprovació de l'adherència dels materials. (Apartat 4.1). En el nou muntatge es realitzà un canvi de base de formigó a acer, que fa simplifica molt l'assaig. A part, es realitza una reducció de les mides que implicarà no conèixer quina és la força d'adherència que es pot esperar ni la longitud eficaç de l'ancoratge. Totes les simplificacions del nou disseny es troben detallades al capítol 5.

Un cop dissenyat el nou muntatge per fer els assaigs, es realitzaran 3 campanyes experimentals: a) Prova d'adherència entre el laminat d'FRP i la placa d'acer, b) Prova d'adherència entre el laminat FRP i l'ancoratge de plàstic, i c) Prova d'adherència entre la placa d'acer i l'ancoratge de plàstic (Figura 12). Per a cada campanya experimental es duran a terme entre tres i cinc assaigs, i aquests estan agrupats segons si es fan sense ancoratge (al buit) o amb ancoratge. En la Taula 3 es mostra de manera resumida tot els assajos que es faran.

	Base/Dimensions	Base/Dimensions	Base/Dimensions
Prova d'adherència entre el laminat d'FRP i la placa d'acer	Base d'acer amb mides: 125x50x3 mm	Base d'acer amb mides: 125x15x3 mm	Base d'acer amb mides: 80x15x3 mm
Prova d'adherència entre el laminat FRP i l'ancoratge de plàstic	Base de PLA amb mides: 125x15x13 mm	Base de PLA amb mides: 80x15x13 mm	Base de ABS amb mides: 125x15x11 mm
Prova d'adherència entre la placa d'acer i l'ancoratge de plàstic	Base d'acer amb mides: 125x15x3 mm. Ancoratge d'ABS	Base d'acer amb mides: 125x15x3 mm. Ancoratge de PLA	

Taula 3. Resum de tots els assajos

1. Experiment al buit: sense ancoratge

A) Prova d'adherència entre el laminat d'FRP i la placa d'acer

El primer experiment a realitzar serà amb laminat d'acer com a base unit amb epoxi a una làmina de FRP. Aquest primer servirà com a inici per a obtenir uns primers valors de quina seria l'adherència bàsica que es pot tenir entre l'FRP, l'acer i la resina epoxi. I saber la força en kN que pot aguantar tot el conjunt abans que es produeixi el desenganxament. S'anomena al buit, ja que la unió d'acer i FRP a partir de l'adhesiu serà única sense res que ajudi a l'adherència.

B) Prova d'adherència entre el laminat FRP i l'ancoratge de plàstic

El segon experiment, seria substituir aquesta làmina d'acer per una base de làmina d'un material de plàstic. Ja que primerament no tenim valors referents a quina seria l'adherència que podria tenir una làmina de plàstic amb l'FRP i l'epoxi. Ens permetrà saber fins a quin punt un plàstic és menys resistent a aquest esforç que l'acer. I tenir la diferència de l'adherència sobre el mateix muntatge d'un laminat d'acer i un de plàstic imprès en 3D. I així tenir unes dades que ens ajudaran a l'hora de realitzar l'ancoratge. Tot l'experiment es realitzaria igual que l'anterior però amb aquest laminat nou. Per seleccionar el material adient per realitzar això també s'estudiarà, el seu límit elàstic, manera d'impressió, adherència amb l'epoxi, per tal de seleccionar un material que s'aproximi a les capacitats de l'acer.

2. Experiment amb ancoratge

C) Prova d'adherència entre placa d'acer i l'ancoratge de plàstic

El tercer experiment, consistirà en realitzar-lo amb el laminat d'acer fer el mateix muntatge que l'experiment A però afegint l'ancoratge. Amb aquest experiment i el més característic es pretén que ens indiqui si el nou disseny de l'ancoratge serveix per enrederir el desenganxament del FRP. A partir de les dades del primer experiment i les obtingudes en aquest, compararem fins a quin punt l'element de l'ancoratge pot influir en l'adherència de tot el conjunt.

PART 2: Proposar nous dissenys d'ancoratges:

En paral·lel amb les tasques de l'apartat 1, es comença a dissenyar noves propostes d'ancoratges que es puguin adaptar a les noves mides del muntatge experimental i que puguin aportar unes forces d'adherència suficients per endarrerir el desenganxament de l'FRP del suport d'acer.

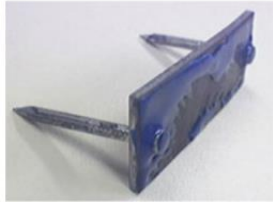
El disseny conceptual d'ancoratge és la integració de tots els coneixement adquirits a partir dels estudis explicats en l'apartat 2 del projecte i la seva combinació amb la fabricació additiva exposada en l'apartat 3 i annex B d'aquest projecte.

El disseny consistirà en crear, mitjançant SolidWorks 3D, diferents geometries d'ancoratges basades en la bibliografia revisada a la Taula 2.

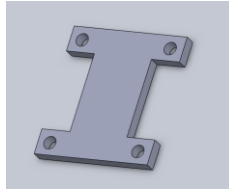
Desenvolupament d'un prototip d'ancoratge polimèric per el reforç d'elements de formigó amb materials compostos

Un cop fet el disseny es faria l'estudi dels paràmetres determinats de fer la seva impressió en 3D. Per exemple, paràmetres d'impressió, material 3D o temperatures d'impressió. I la seva impressió a posteriori. Tots els paràmetres utilitzats estan explicats en l'annex B.

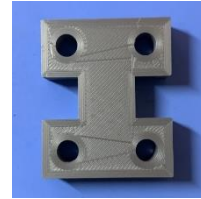
I per últim la integració del nou disseny d'ancoratge en el nou muntatge experimental per comprovar la seva aportació.



Ancoratge metàl·lic



Ancoratge en SolidWorks



Ancoratge en impressió 3D

Figura 11. Disseny conceptual d'ancoratges

Per tal de resumir la metodologia s'ha procedit a realitzar un diagrama del mètode Figura 12. Es pot observar les dues parts en què es divideix el mètode de projecte. A la part esquerra la creació d'un nou muntatge experimental i a posteriori els 3 experiments; amb les seves respectives fletxes de retrocés per si l'experiment s'hagués de repetir o canviar les mides o gruixos. I a la part dreta tot el que és l'estudi dels ancoratges, la creació 3D, la impressió i el disseny final adaptat el nou muntatge.

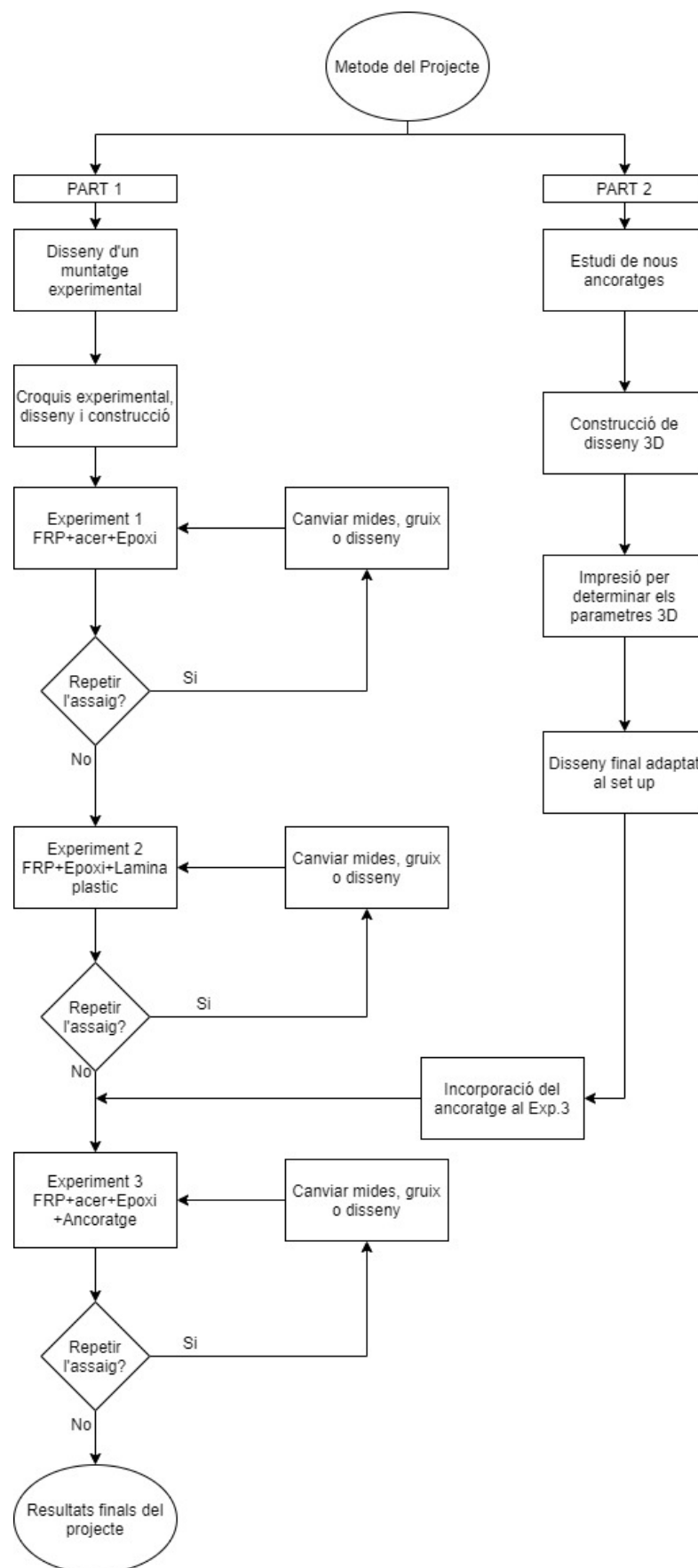


Figura 12. Diagrama de flux del mètode del projecte

5 DISSENY D'UN MUNTATGE EXPERIMENTAL (PART 1)

En aquest projecte s'ha optat per realitzar simplificacions en l'assaig d'adherència tipus "single-shear" amb l'element formigó per tal de recrear-lo a petita escala, per tal de poder obtenir dades de l'adherència entre els elements i la incorporació dels nous dissenys d'ancoratges i comprovar si serien òptims (Figura 13).

En el disseny que es mostra en la Figura 13, les simplificacions que es plantegen respecte a l'assaig de "single-shear" explicat en l'apartat 2.1 són les següents:

A) Bloc de formigó per laminat d'acer

Es va optar per canviar el bloc de formigó per una làmina d'acer, encara que l'acer fos més resistent i no s'arribés a trencar com podria passar amb el formigó faria la funció d'una base resistent. El que sí que es modificaria seria l'aportació de l'adherència, ja que el material i el seu acabat són diferents.

B) Reducció de dimensions del FRP

L'FRP és la base d'aquest assaig per tal es va deixar igual, l'únic canvi van ser les seves dimensions, ja que el nou muntatge seria molt més petit, per tant les dimensions del FRP també es disminuirien fins a ser d'uns 125x10x1.4 mm.

Els elements que es mantenen iguals són:

C) Epoxi

Pel que fa a l'adhesiu, es va optar per utilitzar també el que s'utilitza en el muntatge de formigó ja que així ens donaria uns resultats molt més significatius per a l'estudi. Però òbviament, l'adherència seria diferent entre l'epoxi-formigó i epoxi-acer.

Els elements addicionals que es requereixen pel nou assaig:

D) Incorporació de sobregruixos

En l'assaig amb bloc de formigó s'ha comentat anteriorment que el bloc es quedaria fix per la bancada inferior mentre que la mordassa superior estira l'FRP. En el cas del nou muntatge simplificat, com la làmina d'acer i l'FRP tenen gruixos força diferents, i es requeria una alineació entre els dos centres d'aplicació de força, es va optar per afegir dos sobregruixos un de FRP en la part de l'acer i un sobregruix d'acer en la part del FRP per així tenir un muntatge que té el mateix gruix en el conjunt general. Així poder fer l'assaig de tot el muntatge en una màquina de tracció i que sigui possible el seu fixament.

E) Ancoratge metàl·lic per ancoratge 3D

La introducció d'un ancoratge amb impressió 3D és la gran raó d'aquesta simplificació. Actualment com se vist al punt 2 la majoria d'ancoratges són d'acer, per tant no tenim ninguna certesa de com reaccionaran els ancoratges impresos amb fabricació additiva. Si podran aguantar l'esforç, si cediran o si trencaran. I per tant, un bon punt d'inici seria comprovar com reaccionen aquest tipus d'ancoratge en aquest nou muntatge.

D'aquesta forma, el nou muntatge constarà de sis peces (Figura 13):

1. Laminar d'acer
2. Lamina de FRP
3. Sobregruix 1

4. Sobregruix 2
5. Epoxi
6. Ancoratge

Bàsicament, amb aquests sis elements el que es pretén seria, primer de tot, unir la làmina d'acer/plàstic amb l'FRP mitjançant l'Epoxi. Amb això voldríem simular la unió que es faria en una estructura real entre el formigó i l'FRP unit amb l'Epoxi. El que volem estudiar amb aquesta unió es primer veure el nivell d'adherència que té aquest junt per després intentar determinar quin ancoratge seria el més òptim per tal d'enrederir el màxim possible el desenganxament del FRP que es el problema bàsic que ens trobem.

Com es pot observar clarament a la Figura 13 així seria el muntatge experimental:

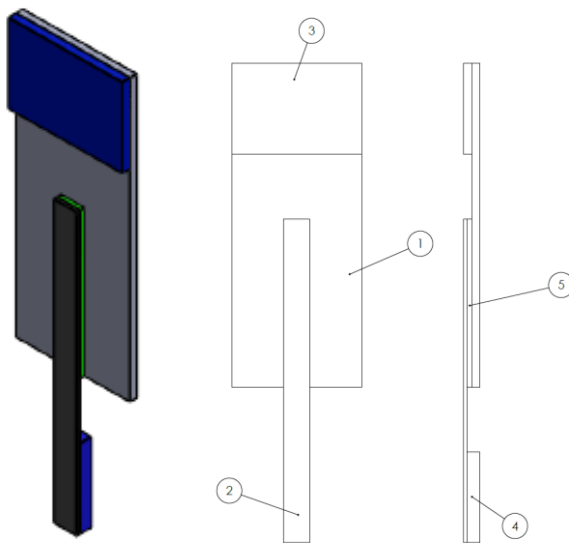


Figura 13. Plànols del muntatge experimental

L'assaig es realitzarà en una màquina de tracció " MTS INSIGHT" que es troba als laboratoris del grup de recerca AMADE, situats al Parc tecnològic de la Universitat de Girona. Aquesta màquina permet fer assaig a tracció amb gran facilitat i la precisió requerida. Té un sistema senzill que permet la integració del nou muntatge realitzat i amb el seu programa es pot extrapolar les dades de temps, allargament i força per així comprovar l'adherència i la contribució de l'ancoratge.

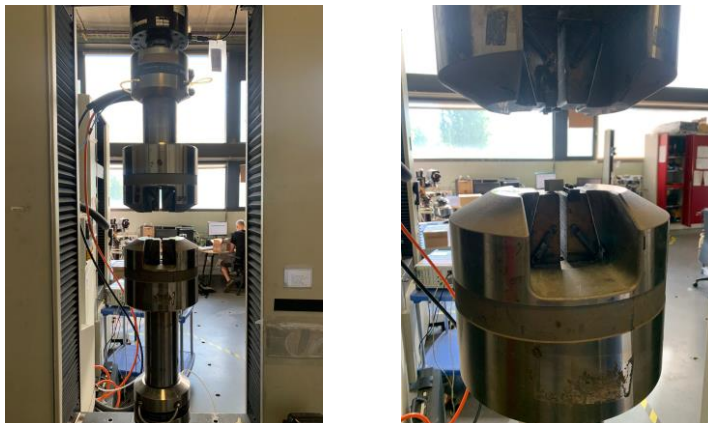


Figura 14. Màquina MTS INSIGHT

6 DISSENY CONCEPTUAL D'ANCORATGES (PART 2)

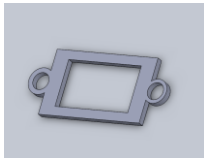
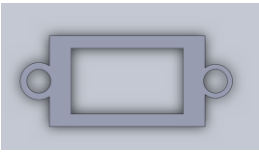
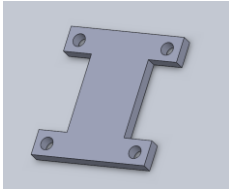
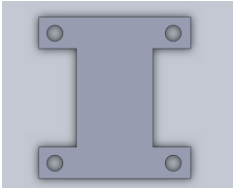

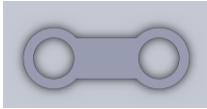
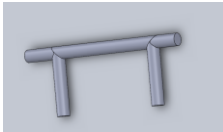
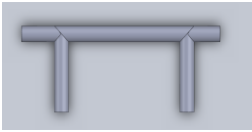
En l'apartat 2.3 i 2.4 s'ha fet una descripció i un resum dels ancoratges actuals. S'ha pogut veure els materials més habituals, la seva geometria més característica o les seves propietats mecàniques més importants. D'altra banda a l'apartat 3 i l'annex B també s'ha descrit tot el tema d'impressió 3D, la forma d'imprimir i els seus materials més característics.

Tenint en compte tots els punts abans comentats es poden separar en tres tipologies ben diferenciades: a) Disseny integral, b) Disseny de platina independent i c) Disseny tubular

- La primera tipologia de disseny integral seria l'opció 1,2 i 3 (Taula 4). La característica principal d'aquest tipus de disseny es que l'ancoratge està format per una sola peça. Te la part de la platina unida als cargols. I pretén tenir la major part de platina en contacte amb l'FRP.
- La segona tipologia de disseny de platina independent seria l'opció 4,5 i 6 (Taula 4). Aquest tipus de disseny d'ancoratges es caracteritzen per tenir la platina separada dels cargols. Es troben diferents formes de platina per tal de tenir el major contacte amb l'FRP. I després els forats per la col·locació dels cargols als laterals.
- La tercera tipologia de disseny tubular seria l'opció 7 (Taula 4). Aquest disseny d'ancoratge no esta compost per una platina sinó que es tracte d'un fil amb doblegats, on la part horitzontal faria com de platina i la part vertical simularia els cargols. És una única peça i seria semblant a la forma d'una grapa.

Tots aquests ancoratges i les seves mides estan dissenyats per una biga real de formigó. I per l'adherència a un FRP d'unes dimensions de 100x40x5 mm. Tot seguit, a la Taula 4 es pot observar les 7 opcions d'ancoratges proposats amb la seva descripció i mides.

Op 1: Anclaratge de platina i cargols en una sola peça, en forma de rombe per tal de tenir mes contacte amb l'FRP. Mides aprox: 50x50x10 mm		
Op 2 : Anclaratge de platina i cargols en una sola peça, semblant a l'opció 1 però en forma de cercle per tal de tenir mes contacte amb l'FRP. Mides aprox: radi 25x10 mm		
Op 3: Anclaratge de platina i cargols en una sola peça, però en aquest cas buidant la part central, perquè l'ancoratge fos mes lleuger i tingues menys massa. A part ,afegint 4 punts de fixació per tal d'aplicar per subjecció sobre l'FRP. Mides aprox : 65x45x10mm		

<p>Op 4: Anclatge de platina i cargols per separat. Aquesta es un altre opció per tal de que els cargols facin mes força de la platina i l'FRP contra l'acer. A part, també vuit en el interior per tal de alleugerar el pes de l'anclatge.</p> <p>Mides aprox: 60x40x10 mm x forats M8</p>		
<p>Op 5: Anclatge de platina i cargols per separat. Aquesta opció com l'anterior però en aquest cas modificant la forma i fent forma de I per tal de l'anclatge tingui mes contacte sobre l'FRP. I els cargols tinguin una zona que permeti fer be el cargolat</p> <p>Mides aprox: 45x55x10 mm</p>		
<p>Op 6: Anclatge de platina i cargols per separat. Aquesta es l'opció més senzilla per aquest estil d'anclatge. La base per dos cargols i una zona de contacte per l'FRP. Al ser tant senzill, i no tenir mola base amb contacte al FRP s'haurien de col·locar uns 3 o 4 ancoratges per tal d'aplicar una major força.</p> <p>Mides aprox: 50x15 forats M8</p>		
<p>Op 7: Anclatge de fil, aquest es l'anclatge mes diferent a la resta ja que es tracte d'un fil amb doblegats per tal de similar els cargols. Aquest estil d'anclatges també se'n mostrat abans però per el nostre assaig s'haurien de col·locar com a mínim uns 4 ja que normalment aquest estil d'anclatge s'apliquen en mes quantitat que la resta.</p> <p>Mides aprox: radi de 8 mm i 90x35</p>		

Taula 4. Proposta de disseny d'ancoratges

6.1 Materials possibles pels ancoratges

La fabricació additiva com se comentat en l'apartat 3 depèn de la forma de la figura i dels paràmetres d'impressió. Dins d'aquest paràmetres es troba el tipus de material aplicat per la impressió. Per tal de seleccionar un material idoni per la impressió del ancoratge s'observen les propietats mecàniques de la Taula 5. Per així acabar seleccionant un material que pugui adaptar-se bé a la forma del ancoratge, que no hi hagi problemes d'impressió i que no es trenqui en la realització de l'experiment. I per això les propietats d'aquests materials són les proporcionades pel fabricant de la marca del material que s'utilitzarà.

Material	Propietats mecàniques: resistència tracció, tallant, etc....	Altres propietats	Marca
nPeek	Tensile Modulus: 38000Mpa Tensile Strength Ultimate: 97Mpa Impact strength: 185 Kj/m2	Density: 1,31 gr/cm3 Diameter: 2,85 mm +/- 0,05 Roundness Deviation: Max 3%	3ntr
Carbon+	Tensile Modulus: 29000Mpa Tensile Strength Ultimate: 81.5Mpa Impact strength: 27.5 Kj/m2	Density: 1,07 gr/cm3 Diameter: - Roundness Deviation: Max 1,1%	3ntr
N-Power	Tensile Modulus: 9900Mpa Tensile Strength Ultimate: 47.1Mpa Impact strength: 107.8 Kj/m2	Density: 1,26 gr/cm3 Diameter: - Roundness Deviation: -	3ntr
ABS+	Tensile Modulus: 2700Mpa Tensile Strength Ultimate: -Mpa Impact strength: -Kj/m2	Density: 1,08 gr/cm3 Diameter: 1,75 mm +/- 0,05 Roundness Deviation: Max 10%	3ntr
PLA	Tensile Modulus: 23000Mpa Tensile Strength Ultimate: 35.9Mpa Impact strength: 16.2 Kj/m2	Density: 1,24 gr/cm3 Diameter: - Roundness Deviation: Max 2%	3ntr

Taula 5. Propietats materials 3D

I un cop analitzades les propietats del materials (Taula 5) es va optar per seleccionar el material de PLA i ABS. En primer lloc, el PLA ja que es un material molt barat per realitzar proves, la seva configuració dels paràmetres d'impressió es assequible i te unes propietats mecàniques estàndards per realitzar la funció d'ancoratge. I en segon lloc, el ABS ja que es un material mes car, amb una configuració dels paràmetres mes complexa, però que les seves propietats mecàniques millores bastant respecte el PLA.

6.2 Fabricació de Prototips

A partir, de les mesures proposades per el nou muntatge (apartat 5) per tal de fer l'assaig amb ancoratge i de les diferents propostes anterior de geometries d'ancoratge(com s'observa a la Taula 4). Es va començar a dissenyar els primers prototips d'ancoratge i la impressió en fabricació additiva.

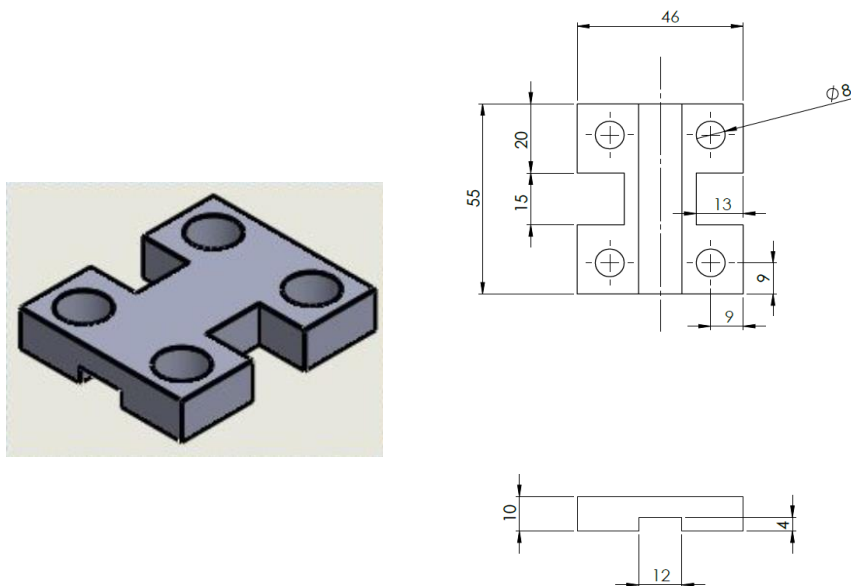


Figura 15. Primer plànol ancoratge

En primer lloc, es va definir un geometria que fos diferent de les que es troben en aquest moment en el mercat però que fos adequada a l'hora d'endarrerir el desenganxar del FRP. Es va valorar diversos aspectes. El primer els 4 punts que té per tal de fixar l'ancoratge a l'acer i així realitzar força. En segon lloc, la part de contacte de l'ancoratge amb l'FRP ja que tenia molta paret de contacte i això ajudaria també a que tinguéssim més adherència entre els materials. I finalment la versatilitat que té aquest disseny, ja que podem canviar els paràmetres de la llargada com l'amplada dels quadrats que envolten els forats, per tal d'adaptar-ho a els diferents problemes que hi pugués haver.

Després de definir la geometria i tenir el model geomètric en Solidworks, el següent pas era definir bé els paràmetres d'impressió per tal de realitzar els primer prototips. El material seleccionat per aquest primer prototips es PLA, ja que es un material fàcil d'imprimir, més barat que la resta de materials i servir per tenir un primer contacte amb la impressió 3D. Els paràmetres més importants que vam definir a l'hora d'imprimir van ser:

- Direcció d'impressió: 45°
- Gruix de capa: 0.08mm
- Perímetre: 1.6 mm i en ZigZag
- Infill: 40%
- Velocitat d'impressió: 50mm/s i 150mm/s de desplaçament

Aquest serien entre d'altres alguns paràmetres que vam definir a l'hora de realitzar la impressió. Un cop fet això es configura l'impressor per tal de que realitzi la impressió i es deixa un temps aproximat d'un 8h. Un cop passat aquest temps obtenim els ancoratges com es mostren a la Figura 16.

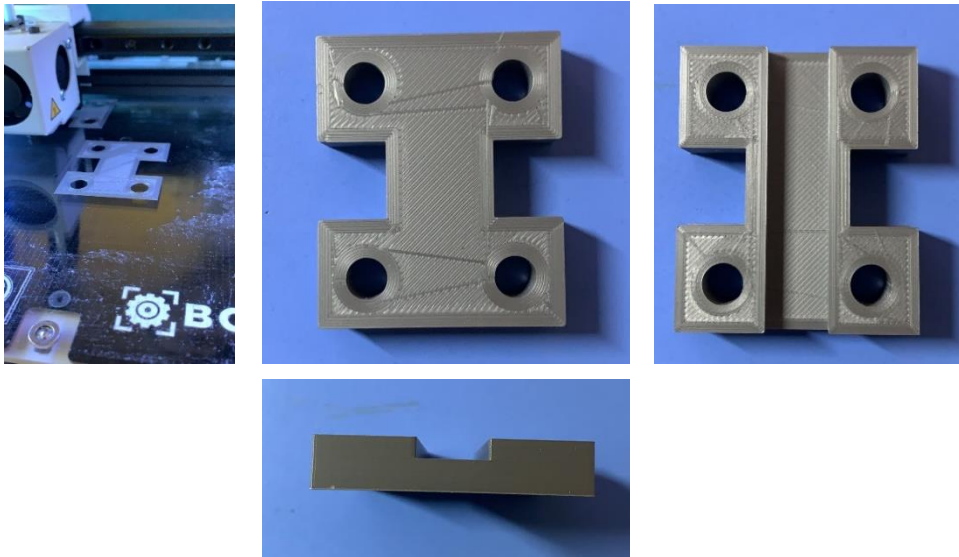


Figura 16. Anclatge 3D

Com podem observar a la Figura 16 es veu molt identificat tot els paràmetres abans comentat; la inclinació de 45° , el perímetre de recobriment i el gruix de capa.

6.3 Anclatge Final

Un cop valorat els primer prototips d'ancoratge, i comprovant que els paràmetres d'impressió són els adequats i no hi ha problemes d'impressió es va dissenyar l'ancoratge final per tal d'adaptar-se a les mides del muntatge d'acer final. Com sé comentat anteriorment, es van dissenyar una sèrie d'ancoratges amb el material PLA i un altra sèrie d'ancoratges amb ABS. Com es pot observar a la Figura 17 i Figura 18.

La unió dels dos ancoratges amb el muntatge d'acer i FRP permet per tant, tenir el muntatge d'acer amb ancoratge per fer els assajos. Per tal, de produir una tensió entre els dos ancoratges i l'acer amb l'FRP, com es pot observar a la Figura 19 es va deixar 2 mm de marge per quan s'introduïssin els cargols i es tensarem produís pressió al muntatge. I com es pot observar a la Figura 17 i Figura 18 el disseny final de les dues parts de l'ancoratge amb el material de PLA i ABS. Amb la part central diferent ja que un part central (la de mides més reduïdes) s'adapta a les mides del FRP amb un marge 1 mm i l'altre part central (a mides majors) s'adapta amb un marge 1 mm a l'acer. Com s'observa en el muntatge final de la Figura 19.



Figura 17. Disseny final ancoratges PLA

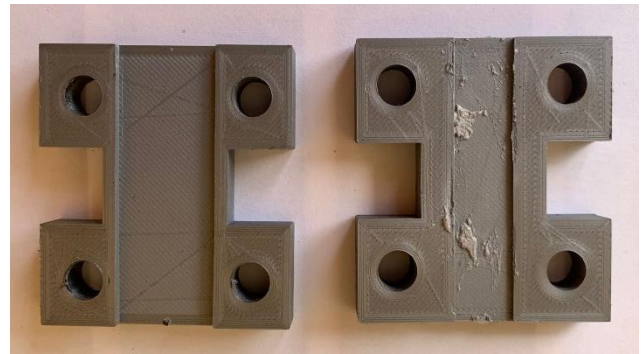
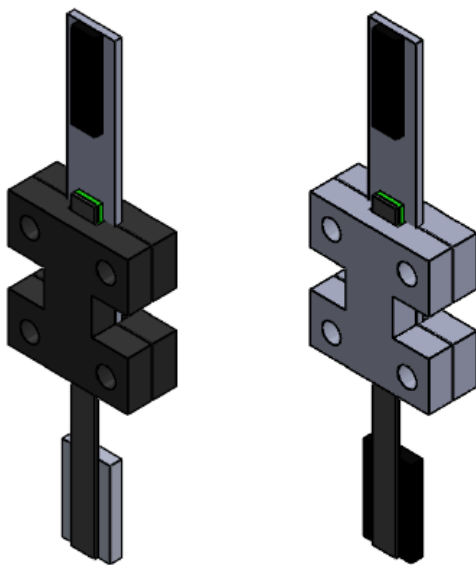
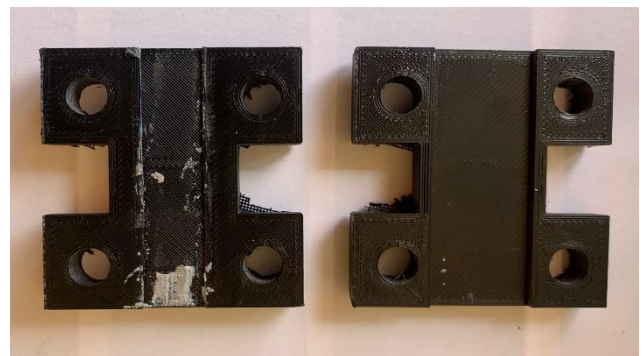


Figura 18. Disseny final ancoratges ABS



MAA1)

MAA2)

Figura 19. Disseny final del muntatge amb acer i ancoratge

7 RESULTATS EXPERIMENTALS

En aquest apartat s'exposaran totes les dades obtingudes de les diferents campanyes experimentals exposades als capítols anteriors. Per a cada campanya, es detallarà una taula resum de les diferents mides i paràmetres de cada muntatge.

Per tal d'acotar la lectura s'utilitzaran acrònims següents:

MAB: Muntatge d'acer al buit, per referir-nos a la prova d'adherència entre el laminat d'FRP i la placa d'acer

MPB: Muntatge de plàstic al buit, per referir-nos a la prova d'adherència entre el laminat FRP i l'ancoratge de plàstic

MAA: Muntatge d'acer amb ancoratge, per referir-nos a la prova d'adherència entre la placa d'acer i l'ancoratge de plàstic

7.1 Experiments al buit: sense ancoratge

7.1.1 Experiment amb laminat d'acer

En aquesta fase s'han fet tres tipus de muntatge diferents, detallats a la Figura 20.

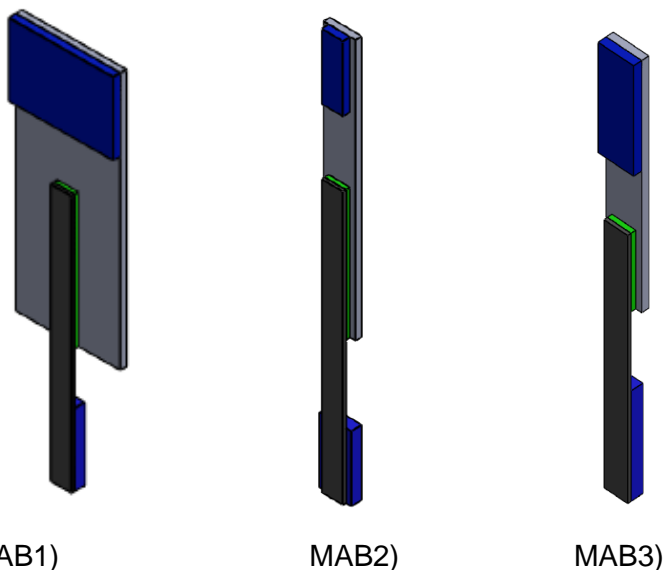


Figura 20 Muntatge d'acer al buit. (MAB)

La Taula 6 mostra un resum dels tres MAB, amb les dimensions de cada element del muntatge, el tipus d'acer i la preparació del muntatge, per observar de forma resumida la diferència entre cadascun d'ells.

	1 (MAB1)	2 (MAB2)	3 (MAB3)
Laminat d'acer (dimensions en mm)	125x15x3	125x15x3	80x15x3
Tipus d'acer	F-211(barra calibrada)	F-112(acer dolç)	F-112(acer dolç)
Laminat de FRP (dimensions en mm)	125x10x1.4	125x10x1.4	80x10x1.4
Sobreguix 1 (dimensions en mm)	35x15x3.4	35x10x3.4	35x10x3.4
Sobreguix 2 (dimensions en mm)	35x10x3.4	35x15x3.4	35x15x3.4
Unió	Epoxi	Epoxi	Epoxi
Preparació	Neteja amb acetona la zona d'adherència	Neteja amb acetona, sabó, aigua i llimar la zona d'adherència	Neteja amb acetona, sabó, aigua i llimar la zona d'adherència

Taula 6. Resum dels diferents MAB

A continuació es detalla cada uns dels muntatges, amb un plànol final del muntatge, una gràfica de comparació de les mostres, una taula amb les dades numèriques dels resultats i els punts importants a destacar dels resultats.

7.1.1.1 MAB 1

Es va realitzar un primer muntatge amb unes mesures determinades i amb la preparació determinada a la Taula 6, per tal de trobar uns resultats experimentals que s'indiquessin les forces que pot suportar aquesta unió sense ancoratge.

El plànol final del primer MAB es mostra a la Figura 21 on les cotes estan expressades en mm:

Desenvolupament d'un prototip d'ancoratge polimèric per el reforç d'elements de formigó amb materials compostos

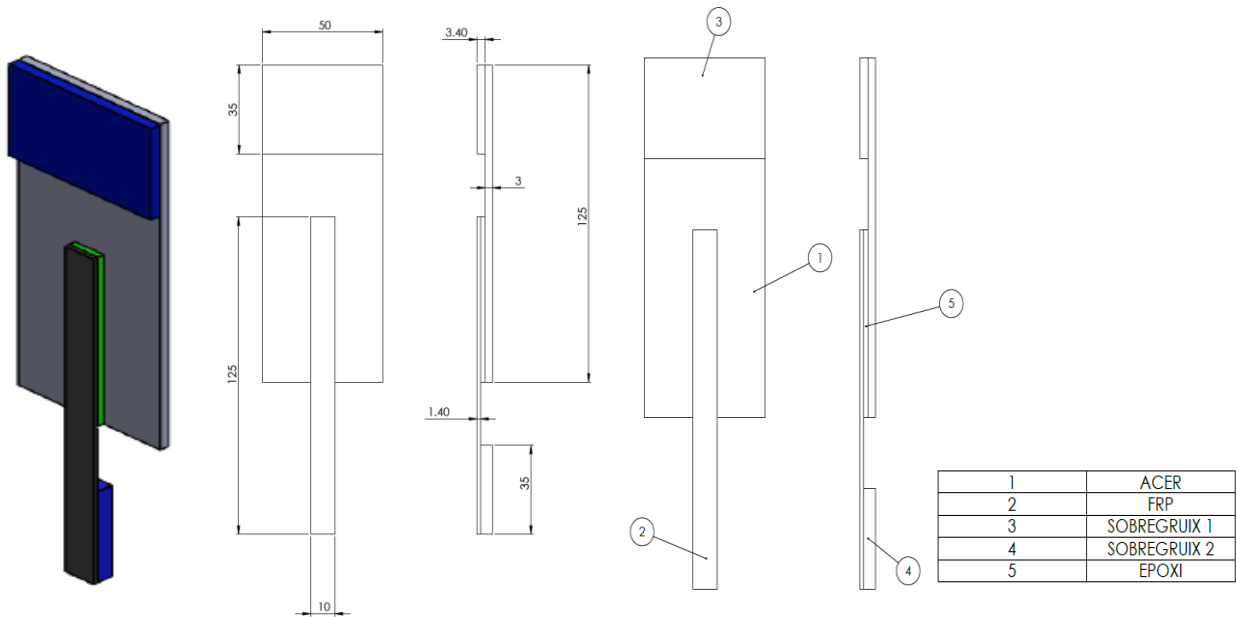


Figura 21. Plànol MAB1

A l'Annex C es troben tots els resultats experimentals obtinguts amb detall. Un cop feta tota la preparació del MAB 1, es calibra la maquina de tracció en aquest cas es va utilitzar la disponible en el Parc Tecnològic per assajar aquestes 5 mostres per tal de trobar els primers valors que ens indiquessin l'adherència entre aquests tres materials.



Figura 22. Col·locació del muntatge a la maquina d'assaig

Amb les dades obtingudes després de realitzar les 5 mostres (Dades completes annex C) de temps(s), allargament (mm) i força(N) s'obté els següents gràfics de les mostres:

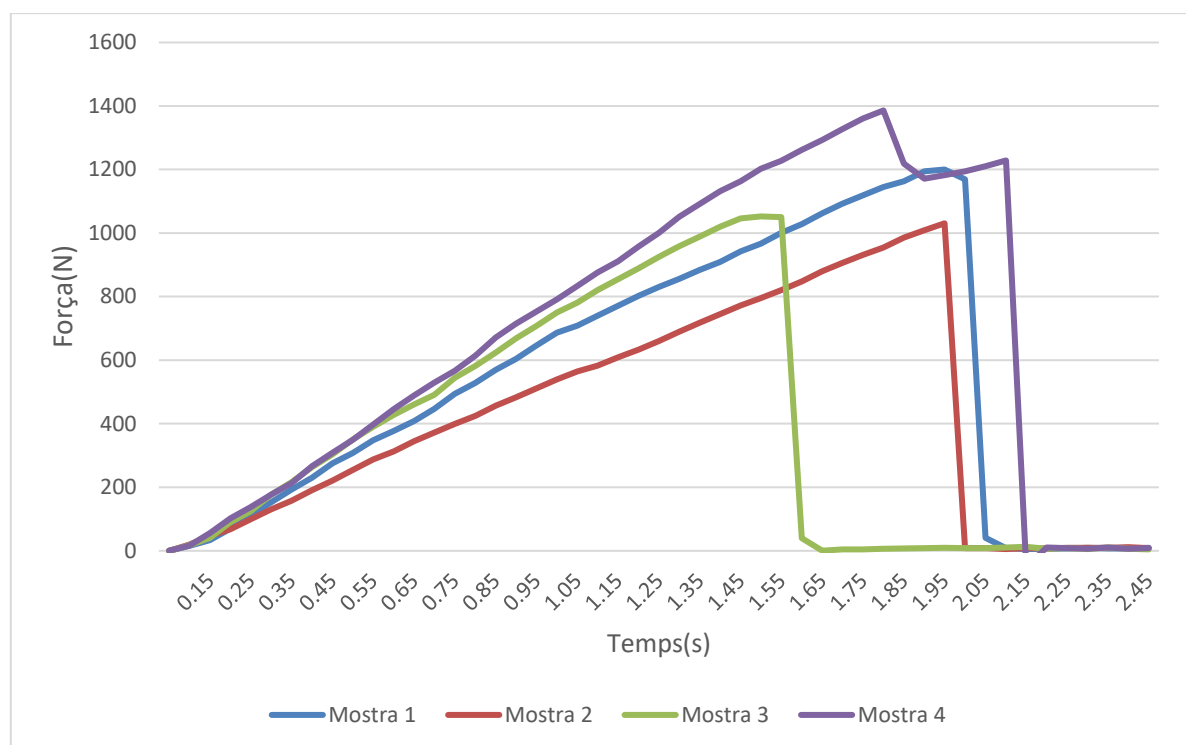


Figura 23. Gràfica de comparació de mostres MAB1

	Fmax (N)	Temps (S)	Allargament (mm)
Mostra 1	1200,17	1,95	0,061
Mostra 2	1030,88	1,95	0,061
Mostra 3	1052,55	1,50	0,046
Mostra 4	1386,01	1,80	0,056
Mitjanes i Desviació	Fmax mitj: 1167,40 Desv: 164,01	Tmitj: 1,80 Desv: 0,21	All mitj: 0,056 Desv: 0,007

Taula 7. Resultats MAB1

La mostra 5 no es va poder fer assajar ja que l'epoxi no s'havia adherit bé i es va trencar abans de ser assajada.

Dels assaigs realitzats es van poder extreure les següents conclusions:

- En primer lloc, a partir de les dades obtingudes en els gràfics es pot comprovar que amb aquest tipus de muntatge, mesures i tipus de preparació, la força mitjana de trencament és d'uns 1160 N. Per tant, aquest valor serveix com base de partida per tal d'observar quina seria l'adherència entre aquests tres elements, per tal d'introduir a posterior l'ancoratge.

- En segon lloc, els valors de força mitjana obtinguda en aquesta primera campanya són relativament baixos. Això s'atribueix a la forma de preparar les mostres: es pot comprovar que només netejar amb acetona la part de l'acer on s'hi adhereix l'epoxi no és suficient per aconseguir una bona adherència entre els materials, ja que si no està ben neta el nivell d'adherència disminueix en gran mesura. Per tant, per el següents assajos es netejarà millor la zona i fins i tot es llimarà per tal que l'adherència sigui major.
- Degut a això trobem que el mètode de falla ve donat per la interfase entre el laminat d'acer i l'epoxi, ja que no han tingut una bona unió i no és el resultat que es vol estudiar, ja que en la majoria de casos i com se comentat en l'apartat 2 la interfase que falla és entre l'FRP i l'epoxi. Això es pot observar en les corbes amb diferents pendents en la Figura 23. Com el control és per desplaçament i el desplaçament i temps són totalment lineals això indica que la rigidesa de la unió és lleugerament diferent entre provetes.
- En tercer lloc, es qüestiona si les mides del muntatge, que s'havien dissenyat per a la posterior col·locació de l'ancoratge, són les més adients, ja que s'observa que gran part de la placa metàl·lica contribueix molt poc a l'assaig. Les dimensions que en primera instància s'havien dissenyat resulten ser molt grans i es planteja reduir-ne el valor.
- En quart lloc, a destacar també tindriem que l'allargament mitja abans del trencament ha estat de 0,056 mm i sobre un temps d'1,8 segons. I com es pot observar clarament a la gràfica anterior (Figura 23) es troba una tendència lineal que va augmentant progressivament fins que tenim el trencament i baixa de cop.
- Amb totes aquestes conclusions hem dissenyat un nou set up per tal de tornar a fer els assajos i veure si aquest valor de 1160N és vàlid per a treballar.



Figura 24. Trencament del MAB1

7.1.1.2 MAB 2

A partir de les conclusions que es van extreure del muntatge d'acer al buit 1, es van modificar les mesures del segon muntatge i la seva preparació.

Primerament, pel que fa referència a les mesures, es va eliminar l'espai sobrant de l'acer que estava destinat a l'ancoratge i per tant, es van reduir les mides de l'acer. A part, es va canviar el tipus d'acer que va a passar de ser un F-211 (barra calibrada) a un F-112 (acer dolç).

La forma i mides finals es poden observar en Figura 25:

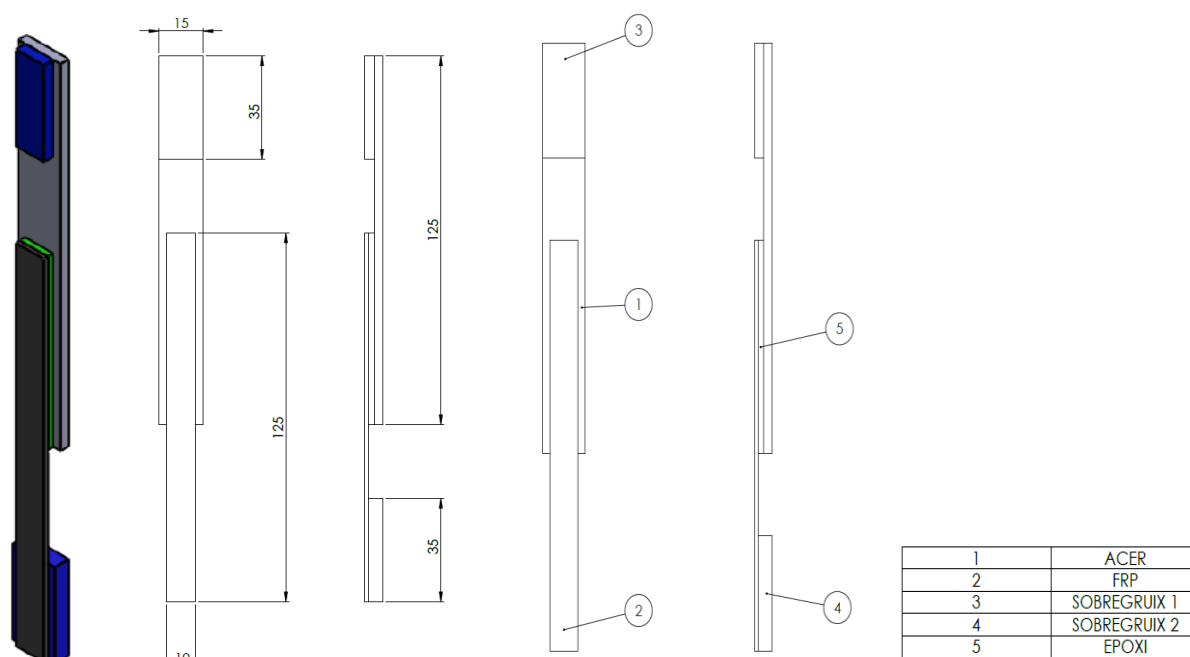


Figura 25. Plànols MAB2



Figura 26. Preparació i col·locació final del MAB2

Un cop feta tota la preparació del MAB 2, es fica apunt la maquina de tracció que es va utilitzar la disponible en el Parc Tecnològic, la mateixa que en el primer experiment per tal d'assajar aquestes 5 mostres i veure si els canvis incorporats han beneficiat a l'adherència.

Amb les dades obtingudes després de realitzar les 5 mostres de temps(s), allargament (mm) i força(N) obtenim els següents gràfics de les mostres:

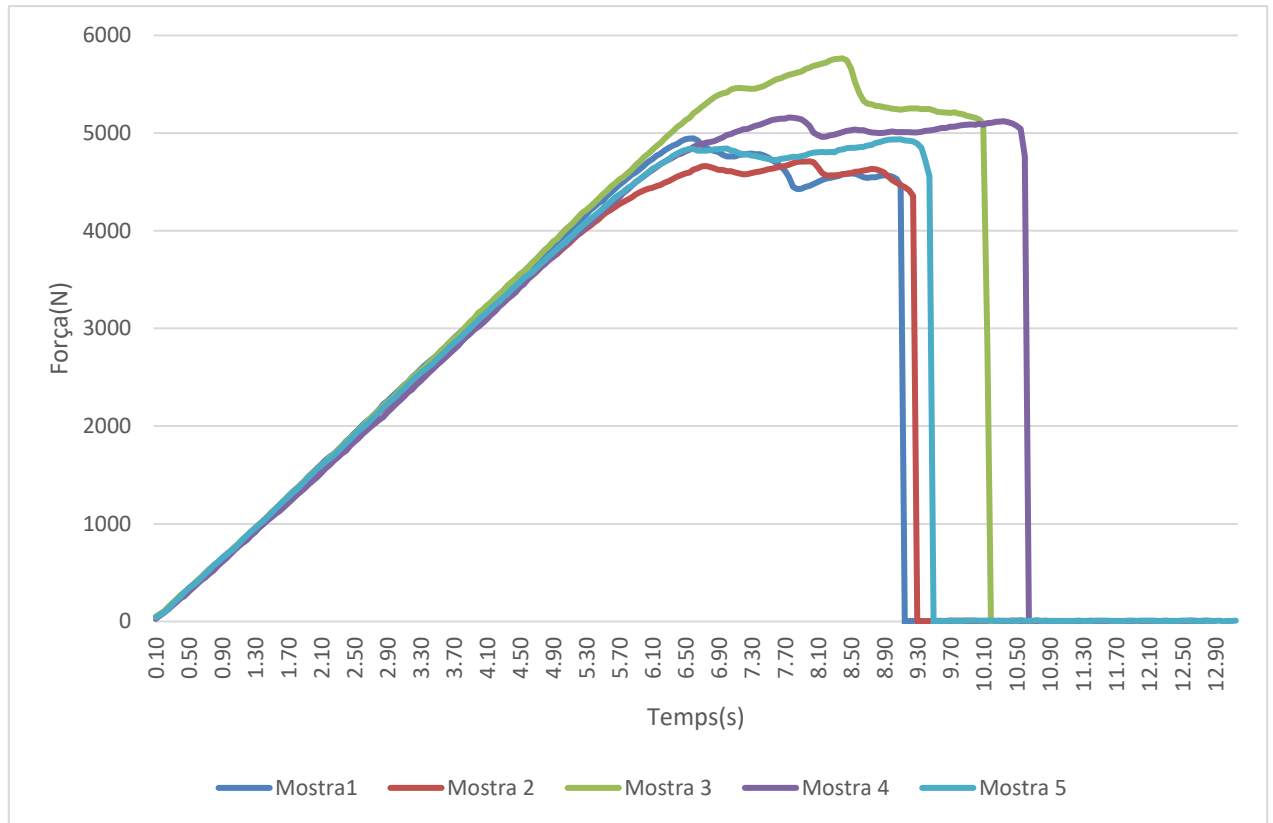


Figura 27. Gràfica de comparació de mostres MAB2

	Fmax (N)	Temps (S)	Allargament (mm)
Mostra 1	4945,80	6,60	0,216
Mostra 2	4711,02	8,00	0,263
Mostra 3	5765,65	8,40	0,275
Mostra 4	5159,65	7,75	0,254
Mostra 5	4936,66	9,10	0,299
Mitjanes i Desviació	Fmax mitj: 5103,76 Desv: 402,60	T mitj: 7,97 Desv: 0,92	All mitj: 0,261 Desv: 0,030

Taula 8. Resultats MAB2

Amb aquestes dades es poden obtenir diferents conclusions:

- En la preparació de les mostres s'ha pogut comprovar que fer una bona preparació de la zona afecta molt al resultat final, ja que si només es neteja amb acetona la part de l'acer que s'hi fica l'epoxi no és suficient. Però si fem la preparació de sabó, acetona, llimar, sabó i acetona, que és com s'ha fet la preparació per a aquest segon assaig, els resultats de

nivell màxim de força han augmentat un 400%. (En l'annex A es pot veure amb detall la preparació de les mostres).

- En segon lloc, les dimensions del muntatge, a partir de l'assaig 1 es va reduir les mides del muntatge, ja que es feia l'assaig al buit sense ancoratge, amb aquest segon assaig el que sé pogut comprovar, que amb aquesta disminució ajuda per tal que el muntatge es més pràctic a l'hora de fer l'assaig i l'estalvi de material és important, ja que es vol centrar sobretot en l'àrea d'adherència.
- En tercer lloc, a partir de les dades obtingudes en els gràfics es pot comprovar que amb aquest tipus de muntatge, mesures i tipus de preparació, la força mitjana de trencament ha sigut al voltant de 5100 N. Gairebé 5 cops més que al primer assaig.
- Es pot observar amb claredat a la Figura 27 de comparació de les 5 mostres es pot veure unes línies de tendència molt semblant entre elles amb aquesta diferència de la força màxima que varia entre l'interval de 4500N-5500N. El pendent per tant són molt similars i això indica una molt bona relació de la rigidesa entre les provetes.
- L'allargament mitjà abans del trencament ha estat de 0,260 mm, en un temps de 8,2 segons. Com es pot observar clarament a la Figura 27 anterior es té una tendència lineal que va augmentar progressivament fins que tenim el trencament i baixa de cop.
- Com es pot veure a la Figura 28, el mode de falla de gairebé totes les provetes, marcat amb un quadrat blau, és una combinació d'un desenganxament de l'epoxi de l'acer, trobant-se en l'FRP. És un fenomen que es troba en menor o major mesura a totes les mostres assajades. A partir del muntatge 3 podrem contrastar aquesta hipòtesi.



Figura 28. Trencament del MAB2

7.1.1.3 MAB3

A partir del MAB 2, es va realitzar encara una simplificació més en el disseny del muntatge, es va reduir l'àrea d'adherència per comprovar com podria afectar això a l'assaig i si variaria molt la força màxima respecta les dades obtingudes del MAB 1 i MAB 2.

La forma i mides finals del tercer muntatge es poden observar en la Figura 29:

Desenvolupament d'un prototip d'ancoratge polimèric per el reforç d'elements de formigó amb materials compostos

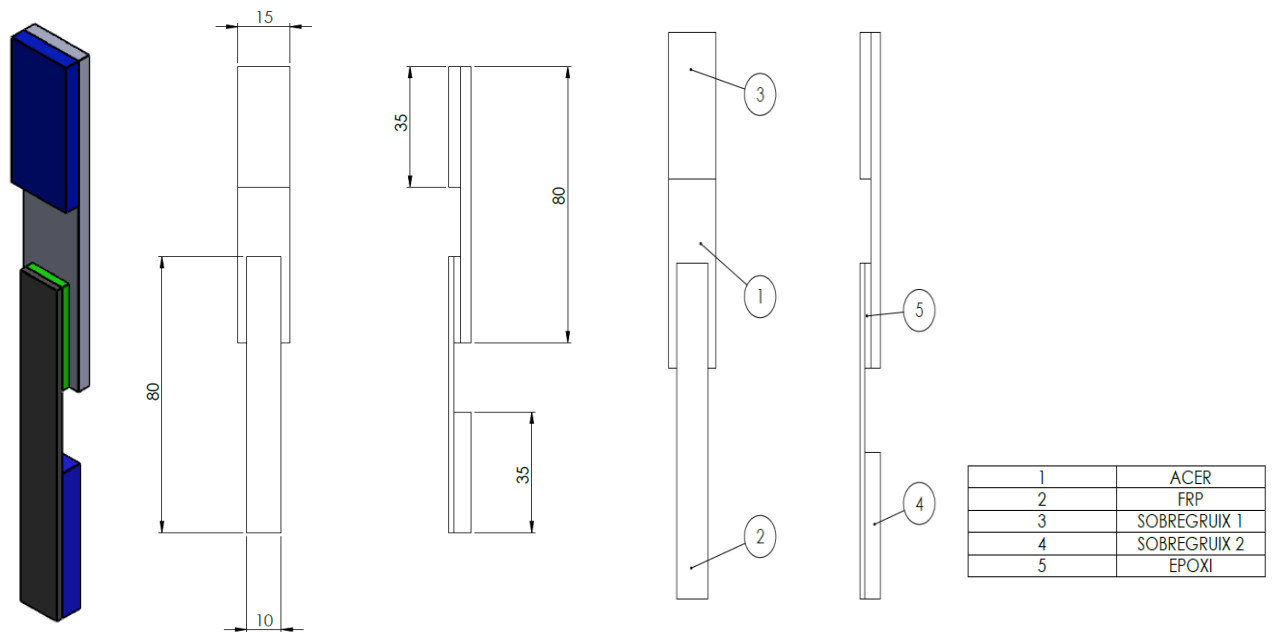


Figura 29. Plànols MAB3

Preparació final de les 5 mostres:



Figura 30. Preparació final MAB3

Amb les dades obtingudes després de realitzar les 5 mostres de temps(s), allargament (mm) i força(N) obtenim els següents gràfics de les mostres:

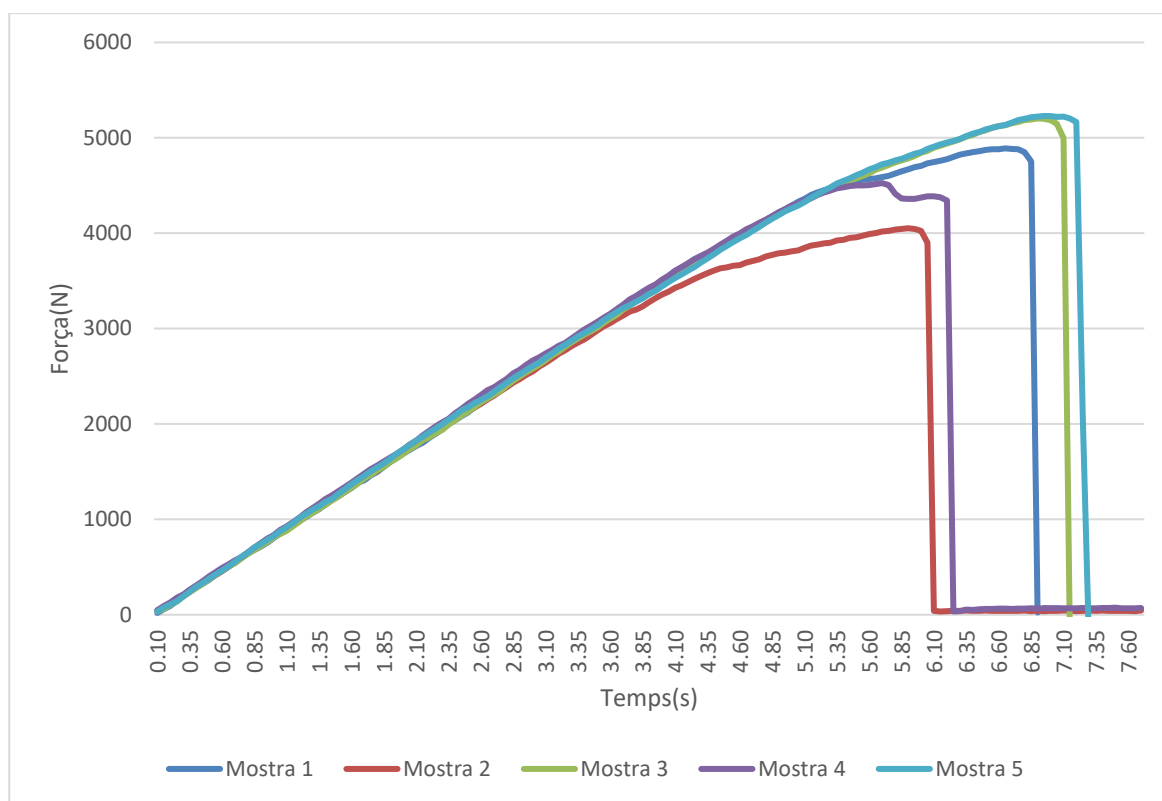


Figura 31. Gràfic de comparació de mostres MAB3

	Fmax (N)	Temps (S)	Allargament (mm)
Mostra 1	4889,67	6,65	0,218
Mostra 2	4052,01	5,90	0,193
Mostra 3	5203,57	6,90	0,266
Mostra 4	4525,62	5,70	0,186
Mostra 5	5228,95	7,00	0,230
Mitjanes i Desviació	Fmax mitj: 4779,96 Desv:496,91	T mitj: 6,43 Desv:0,59	All mitj: 0,219 Desv: 0,032

Taula 9. Resultats MAB3

Les conclusions que se n'extreuen són les següents:

- Els resultats experimentals d'aquest assaig són molt semblants als obtinguts al MAB 2. Com s'ha comentat, només es varia l'àrea d'adherència que en aquest cas és molt més petita que al MAB 2. Malgrat que la força màxima suportada per la unió és lleugerament inferior que al MAB 2 (de l'ordre d'uns 400 N respecte uns 5000 N) , on s'observa un canvi de tendència

rellevant en comparació amb el MAB 2 és en l'allargament obtingut. En el MAB 2 s'ha obtingut una mitjana de 0,26 mm d'allargament mentre que en el MAB 3 es té 0,2 mm. D'igual manera amb el temps en el MAB 2 es té un temps de 8,2 s i en el MAB 3 es té un temps mitja de 6,3 s. Aquests dos paràmetres (temps i allargament) indiquen que possiblement en el cas de MAB 3, la longitud enganxada es trobava per sota la longitud efectiva, mentre que en el cas de MAB 2, la longitud enganxada era superior a la longitud efectiva (ja que un cop arribada a la càrrega màxima, la unió aguanta aquesta càrrega engrandint l'allargament fins que s'arriba a la ruptura).

- En referència al mode de falla, en aquestes mostres també es troba la petita àrea desenganxada de l'acer i adherida en l'FRP tal com passava igual amb les mostres del MAB 2 (veure Figura 32)



Figura 32. Trencament MAB 3

7.1.2 Experiment amb laminat de plàstic

En aquesta segona es realitza el mateix procediment que a la campanya 1 però canviant el laminat d'acer per plàstic. S'ha realitzat un estudi dels materials més característics; PLA, ABS, nPower, Carbon+ i nPeek per tal de seleccionar quin material en fabricació additiva serà el més òptim per tal de substituir el laminat d'acer. Per fer això, es va realitzar un Excel (Figura 33) per tal de valorar quin seria el material més òptim.

Memòria i annexos - RESULTATS EXPERIMENTALS

	min	max	
Força a suportar	21000	33000	N
	costat	gruix	
Seccio original	50	3	mm
Area	150	mm2	
Tensible Ultima original	220	Mpa	
Material	Carbon+		
Tensible Ultima	105	Mpa	
Area min	200,000	mm2	
Area max	314,286	mm2	
Hipotesi nova seccio			
gruix	5	costat	62,857 mm
gruix	6	costat	52,381 mm
gruix	8	costat	39,286 mm
gruix	10	costat	31,429 mm
gruix	12	costat	26,190 mm
Material	PLA		
Tensible Ultima	35,9	Mpa	
Area min	160,603	mm2	
Area max	192,724	mm2	
Hipotesi nova seccio			
gruix	5	costat	38,545 mm
gruix	6	costat	32,121 mm
gruix	8	costat	24,090 mm
gruix	10	costat	19,272 mm
gruix	13	costat	14,825 mm
Material	nPower		
Tensible Ultima	43,2	Mpa	
Area min	486,111	mm2	
Area max	763,889	mm2	
Hipotesi nova seccio			
gruix	5	costat	152,778 mm
gruix	6	costat	127,315 mm
gruix	8	costat	95,486 mm
gruix	10	costat	76,389 mm
gruix	12	costat	63,657 mm
Material	nPeek		
Tensible Ultima	97	Mpa	
Area min	216,495	mm2	
Area max	340,206	mm2	
Hipotesi nova seccio			
gruix	5	costat	68,041 mm
gruix	6	costat	56,701 mm
gruix	8	costat	42,526 mm
gruix	10	costat	34,021 mm
gruix	12	costat	28,351 mm
Material	ABS		
Tensible Ultima	47	Mpa	
Area min	122,673	mm2	
Area max	147,208	mm2	
Hipotesi nova seccio			
gruix	5	costat	29,442 mm
gruix	6	costat	24,535 mm
gruix	8	costat	18,401 mm
gruix	10	costat	14,721 mm
gruix	15	costat	9,814 mm

Figura 33. Excel d'hipòtesis de materials

Aquestes taules bàsicament es va realitzar per saber quina seria la diferència de mides entre el laminat d'acer i el laminat en fabricació additiva. Ja que si es fabrica els dos laminats de la mateixa mida, ens donarien resultats molt diferents, ja que la força que pot aguantar depèn de l'àrea i de la tensió última. Llavors pot sorgir el problema que si dissenyéssim el laminat de fabricació additiva de la mateixa mesura a l'hora de fer l'assaig es podria trencar abans pel laminat que per l'adherència amb l'FRP que és el que volem estudiar pel projecte.

Per tant, vam agafar les dades de la tensió última dels 5 materials dels quals podem imprimir que són; el nPower, el Carbon+, el nPeek, el ABS i el PLA per tal de fer hipòtesis de quina hauria de ser l'àrea del laminat per tal que pogués assumir els esforços a què es sotmetran. Es va aplicar la fórmula de $F_{max}/Tensió\ Últim$ per trobar l'àrea màxima a suportar i a partir d'aquesta àrea, variem el gruix que tindria el laminat de 5mm a un gruix d'entre 12-15 mm que es un gruix òptim per tal que es poguessin imprimir, ja que si augmentem aquest gruix d'impressió pot dur problema. La mida del costat lateral es manté en 15mm per assimilar-ho als primers experiments. I el tercer valor que falta seria la llargada que aquest paràmetre també serà igual a l'experiment 1 (120 mm).

D'altra banda, també es va realitzar hipòtesis per tal, d'introduir unes mides X i Y i veure així quina seria la Tensió Última que hauria de tenir aquell material per tal d'aguantar els esforços a l'hora de l'assaig.

	min	max	
Força a suportar	21000	33000	N
Seccio canviada	80	5	mm
Area	400	mm ²	
Tensible Ultima canviada	82,5	Mpa	

Figura 34. Excel hipòtesi de Tensió Última

Un cop fet aquest estudi dels materials es va decidir que l'òptim per imprimir, que aguantaria els esforços i que tindria una bona adherència amb l'Epoxi seria realitzar els experiments amb laminat d'ABS i de PLA. Ja que els seus gruixos finals estarien entre 12-15mm i podrien aguantar bé els esforços i la tècnica d'impressió d'aquest material es podria realitzar sense problemes d'impressió.

Per tant, es va decidir realitzar 3 assajos, dos amb la llargada de 125mm un per cada material de plàstic (PLA i ABS) i un altre assaig amb la llargada de 80mm (amb PLA) i el gruix característic de cada material perquè pogués aguantar els esforços. Per tal de veure les diferències entre ells es pot observar en la Figura 35.

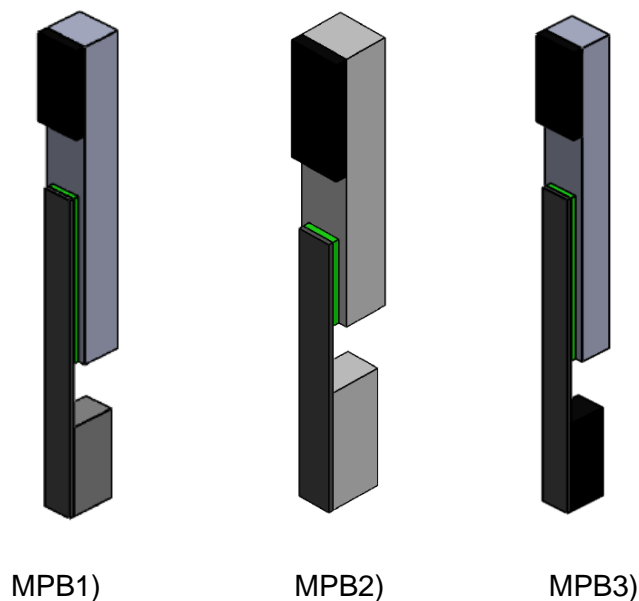


Figura 35 Muntatge de Plàstic al Buit. (MPB)

La Taula 10 mostra un resum dels tres MPB, amb les dimensions de cada element del muntatge, el tipus de plàstic utilitzat i la preparació del muntatge. Per observar de forma resumida la diferencia entre cadascun d'ells.

	1 (MPB1)	2 (MAP2)	3 (MPB3)
Laminat de plàstic (dimensions en mm)	125x15x13	80x15x13	125x15x11
Tipus de plàstic	PLA	PLA	ABS
Laminat de FRP (dimensions en mm)	125x10x1.4	80x10x1.4	125x10x1.4
Sobreguix 1 (dimensions en mm)	30x10x1.4	30x10x1.4	30x10x1.4
Sobreguix 2 (dimensions en mm)	30x15x13	30x15x13	30x15x11
Unió	Epoxi	Epoxi	Epoxi
Preparació	Neteja amb acetona, sabó i aigua la zona d'adherència	Neteja amb acetona, sabó i aigua la zona d'adherència	Neteja amb acetona, sabó i aigua la zona d'adherència

Taula 10. Resum dels diferents MPB

7.1.2.1 MPB 1

Per tal de provar l'adherència del PLA amb l'acer mitjançant resina epoxi, es va realitzar el mateix assaig que el MAB2 però fent el canvi del laminat d'acer per el laminat amb PLA.

La forma i mides finals del primer muntatge amb PLA es poden observar en la Figura 36:

Desenvolupament d'un prototip d'ancoratge polimèric per el reforç d'elements de formigó amb materials compostos

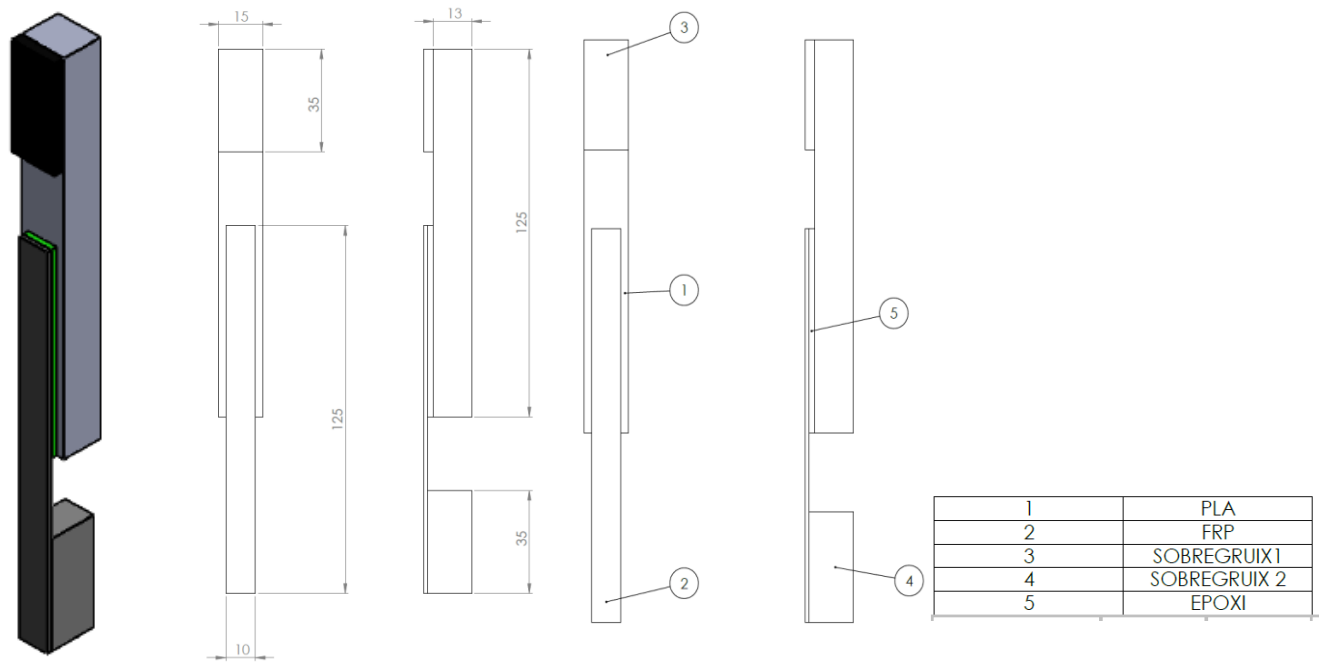


Figura 36. Plànols MPB1

La preparació final de les 3 mostres es pot observar a la Figura 36.



Figura 37. Preparació final MPB1

Amb les dades obtingudes després de realitzar les 3 mostres de temps(s), allargament (mm) i força(N) obtenim els següents gràfics de les mostres:

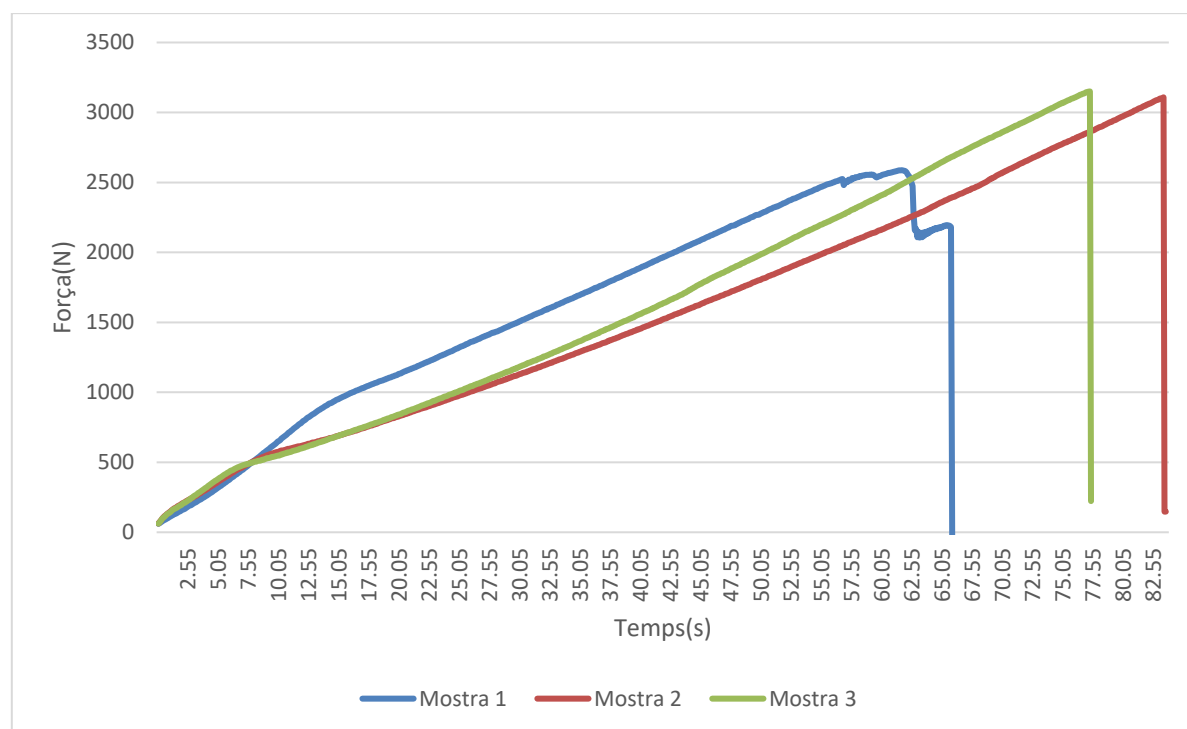


Figura 38.Gràfic de comparació de mostres MPB1

	Fmax (N)	Temps (s)	Allargament (mm)
Mostra 1	2587,15	61,75	2,05
Mostra 2	3107,90	83,55	2,78
Mostra 3	3150,19	77,35	2,58
Mitjanes i	Fmax mitj: 2948,41	T mitj: 74,22	All mitj: 2,47
Desviació	Desv:313,58	Desv:11,23	Desv:0,38

Taula 11.Resultats MPB1

Les conclusions que se n'extreuen són les següents:

- En la preparació de les mostres com el material de base és plàstic només s'ha aplicat neteja amb sabó i acetona a la zona d'adherència determinada. No s'ha fet el llimat, ja que al ser material de plàstic podria arribar a trencar-se. (En l'annex A es pot veure en detall la preparació de les mostres).
- En referència a les mides; es manté igual la llargada de 125mm i l'amplada de 15mm que el MAB 2, però com s'ha comentat a la introducció del capítol el gruix varia per tal d'aguantar els esforços a tracció. En aquest cas perquè aguantés el laminat el gruix és de 13mm
- A partir, de la realització de l'experiment sé obtingut que aquest material de plàstic, amb aquest disseny i preparació, la força mitjana de trencament a sigut de 2948 N. Gairebé la meitat que el mateix experiment amb laminat d'acer. Amb això es pot observar que l'adherència entre l'epoxi, FRP i plàstic ABS es menor que entre l'epoxi, FRP i acer.

- Pel que fa l'allargament sí que es pot destacar un augment considerable respecte el MAB2, ja que en aquest cas és té un allargament de 2,47mm de mitjana respecta els 0,26 que és produïda amb el laminat d'acer. I pel que fa al temps, tenim també un augment fins a 74,22 segons de mitjana. Aquestes dues dades d'allargament i temps se'n vist incrementades, ja que en aquest experiment la base es un laminat de plàstic i el que permet això es que la base a l'hora suportar esforços es dilati, ja que no te tanta rigidesa com el laminat d'acer. Per això s'obté aquest augment de temps i allargament.
- I en últim lloc, es pot destacar que en el trencament tot l'epoxi s'ha quedat en el laminat de plàstic. I no observem una petita àrea com en el MAB2 o MAB3. I que per tant, el trencament a sigut entre la interfase de l'FRP i l'epoxi.



Figura 39. Trencament MPB1

7.1.2.2 MPB 2

Per tal de provar l'adherència del PLA es va realitzar el mateix assaig que el MAB3 però fent el canvi del laminat d'acer per el laminat amb PLA. I per realitzar la comparació entre el MPB1 i si el canvi d'allargament de 125 mm a 80mm com afecta al muntatge.

La forma i mides finals del primer muntatge amb PLA es poden observar en la Figura 40:

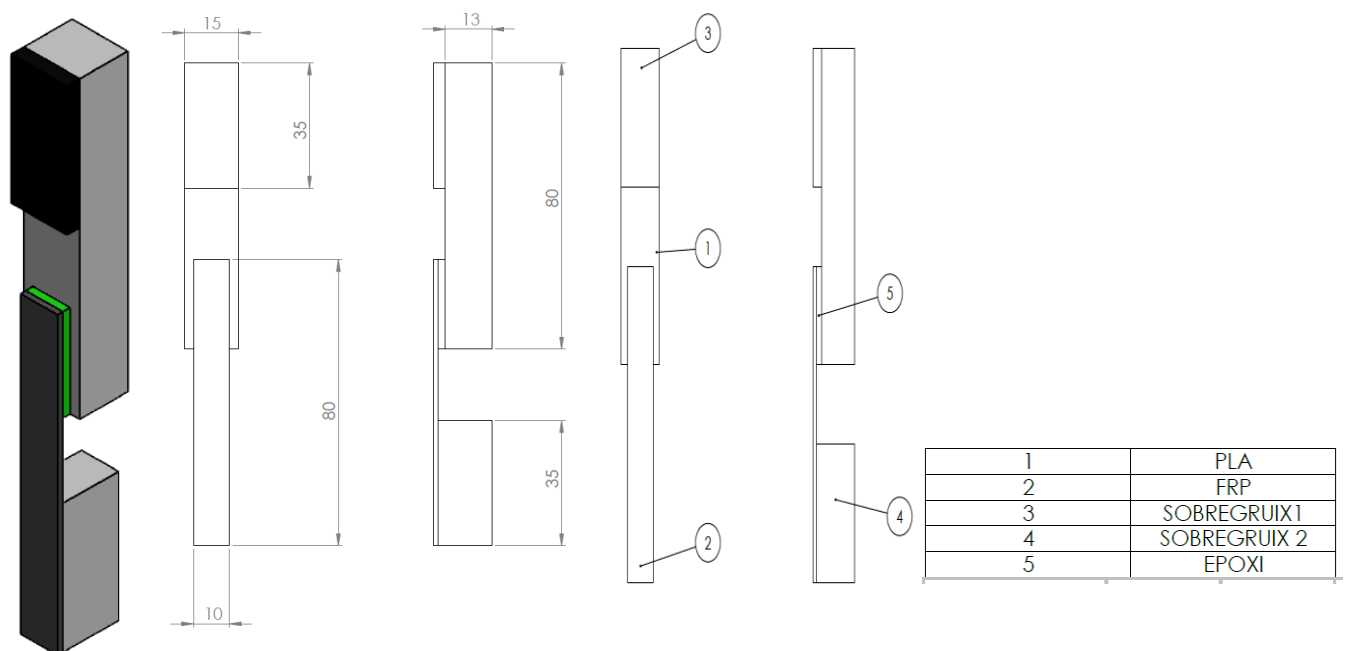


Figura 40. Plànols MPB2

Preparació final de les 3 mostres:

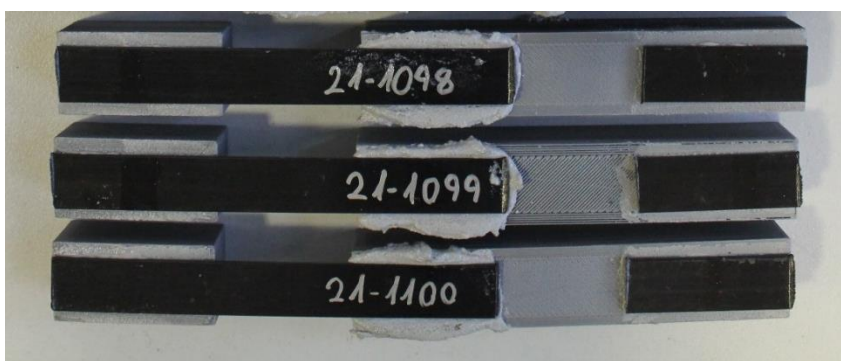


Figura 41. Preparació final MPB2

Amb les dades obtingudes després de realitzar les 3 mostres de temps(s), allargament (mm) i força(N) obtenim els següents gràfics de les mostres:

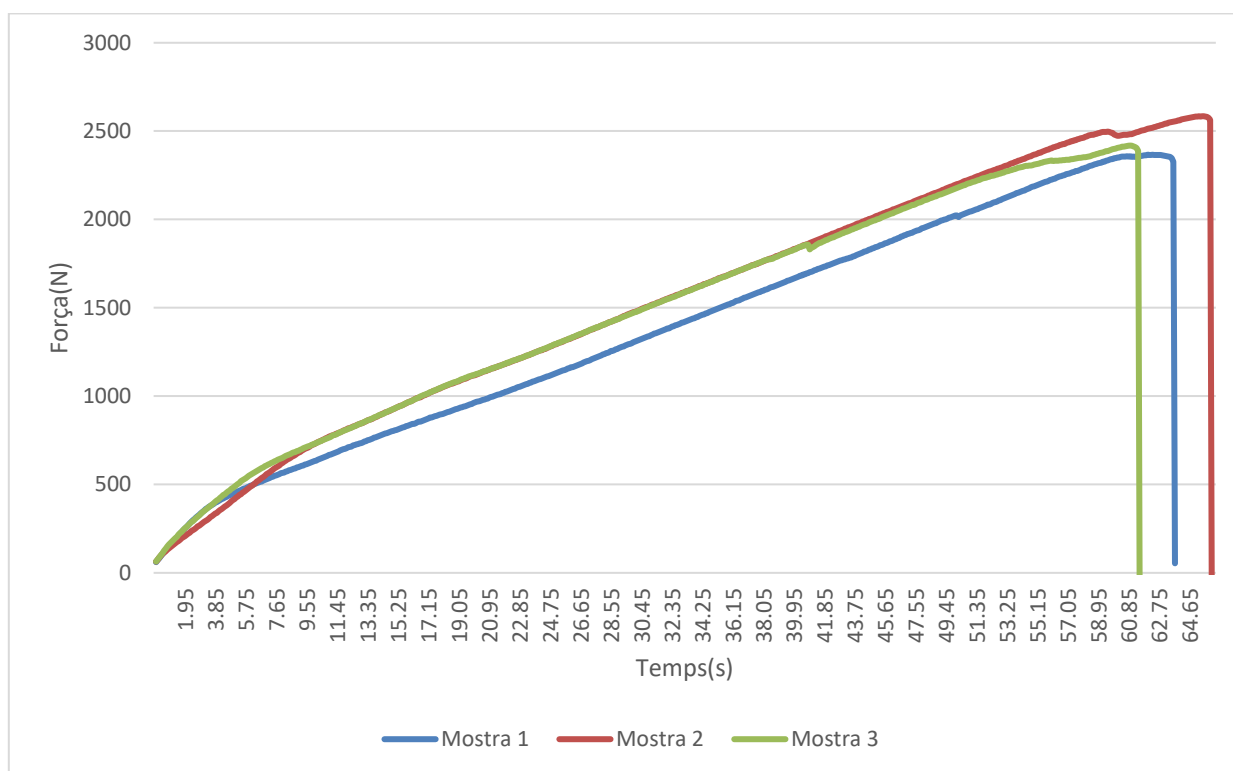


Figura 42. Gràfic de comparació de mostres MPB2

	Fmax (N)	Temps (S)	Allargament (mm)
Mostra 1	2366,35	62,35	2,08
Mostra 2	2584,08	62,25	2,17
Mostra 3	2418,04	60,95	2,03

Mitjanes i	Fmax mitj: 2456,16	T mitj: 61,85	All mitj: 2,09
Desviació	Desv: 113,76	Desv: 0,78	Desv:0,07

Taula 12.Resultats MPB2

Amb aquestes dades es poden obtenir diferents conclusions:

- La preparació de les mostres s'ha realitzat igual que el MPB1, és a dir, només s'ha aplicat una neteja amb sabó i acetona a la zona d'adherència determinada. No s'ha realitzat el llimat, ja que al ser de plàstic podria arribar a trencar-se. (En l'annex A es pot veure en detall la preparació de les mostres).
- En referència a les mides; ha variat la llargada, que ha passat de 125 mm a 80 mm per tal que així la zona d'adherència també canvi de 60 mm a 25 mm. L'amplada es manté a 15 mm, però com ja sé comentat en el MPB1, el gruix varia respecte a l'assaig amb base d'acer i, com en el primer cas de MPB, el gruix es de 13 mm.
- A partir, de la realització de l'experiment s'ha obtingut que aquest material de plàstic, amb aquest disseny i preparació, la força mitjana de trencament ha sigut de 2456,16 N, pràcticament la meitat que el mateix experiment amb laminat d'acer. Amb això es pot observar que l'adherència entre l'epoxi, FRP i plàstic ABS és menor que entre l'epoxi, FRP i acer.
- En comparació amb el MPB1 veiem que el MPB2 aguanta uns 500 N menys, la mateixa relació que entre el MAB2 i MAB3
- Pel que fa a l'allargament sí que es pot destacar un augment considerable respecte el MAB3, ja que en aquest cas tenim un allargament de 2,09 mm de mitjana respecta els 0,22 que és produïda amb el laminat d'acer. Pel que fa al temps, tenim també un augment fins a 61,85 segons de mitjana. Aquestes dues dades d'allargament i temps s'han vist incrementades igual que amb el primer experiment amb laminat de plàstic. Com s'ha comentat és degut a la rigidesa i la dilatació del laminat de plàstic que permet arribar a aquests valors.
- En últim lloc, es pot destacar que en el trencament sí que es produeix una àrea d'adherència com la que s'havia pogut observar en el MAB2 i MAB3. En aquests assajos hi ha una àrea d'epoxi que es queda en l'FRP i, per tant, el trencament es produeix per la interfase entre l'epoxi i la làmina de plàstic, contrari a l'experiment MPB1, que no s'ha produït aquest fenomen.

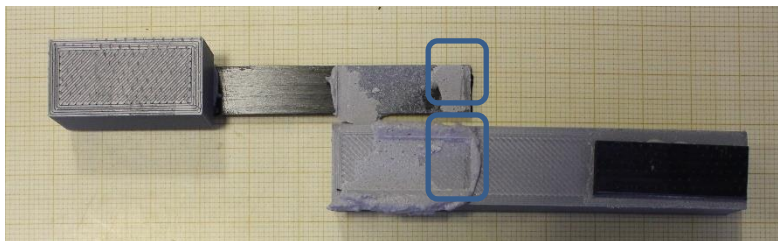


Figura 43. Trencament MPB2

7.1.2.3 MPB 3

Per tal de provar l'adherència del ABS es va realitzar el mateix assaig que el MAB2 i que el MPB1 però amb un laminat de ABS com a base. Així es va poder obtenir la comparativa amb l'altre assaig amb PLA i, a més a més, poder comparar amb el laminat d'acer.

La forma i mides finals del primer muntatge amb ABS es poden observar en la Figura 44.

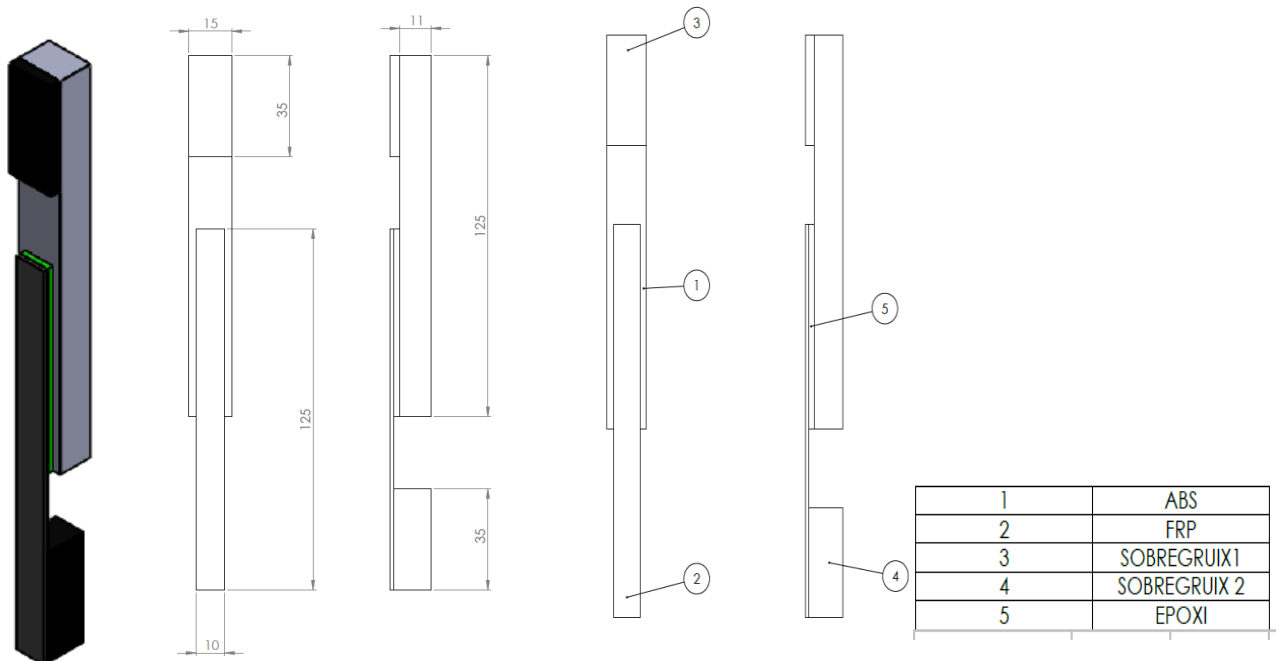


Figura 44. Plànols MPB3

Preparació final de les 3 mostres:



Figura 45. Preparació final MPB3

Amb les dades obtingudes després de realitzar les 3 mostres de temps(s), allargament (mm) i força(N) obtenim els següents gràfics de les mostres:

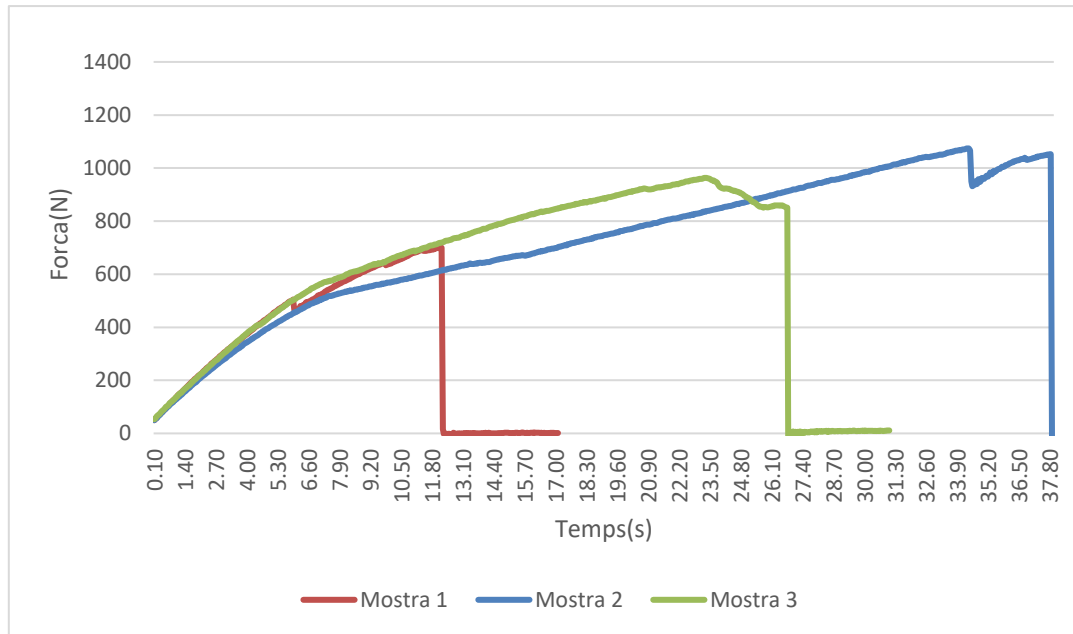


Figura 46.Gràfic de comparació de mostres MPB3

	Fmax (N)	Temps (S)	Allargament (mm)
Mostra 1	700,40	12,15	0,40
Mostra 2	1074,04	34,35	1,14
Mostra 3	963,11	23,35	0,776
Mitjanes i	Fmax Mitj: 912,51	T mitj: 23,28	All mitj: 0,772
Desviació	Desv: 191,89	Desv: 11,10	Desv: 0,370

Taula 13.Resultats MPB3

Amb aquestes dades es poden obtenir diferents conclusions:

- En preparar les mostres, com el material de base és plàstic, només s'ha aplicat neteja amb sabó i acetona a la zona d'adherència determinada. No s'ha fet el llimat, ja que al ser material de plàstic podria arribar a trencar-se igual que en el MPB1 i MPB2 (En l'annex A es pot veure en detall la preparació de les mostres).
- En referència a les mides; es manté igual la llargada de 125mm i l'amplada de 15mm però, com s'ha comentat a la introducció del capítol, el gruix varia per tal d'aguantar els esforços a tracció. En aquest cas, perquè aguantés el laminat, el gruix és de 11mm. Ja que l'ABS té una tensió límit major que el PLA, tindrà un gruix menor.
- A partir, de la realització de l'experiment s'ha obtingut que aquest material de plàstic, amb aquest disseny i preparació, la força mitjana de trencament ha sigut de 912,51 N però, com s'observa a la Taula 13, la Fmax de cada mostra varia molt. Hi ha una diferencia de 370N entre la min i la màx i, amb comparació amb el laminat de plàstic amb PLA, una diferencia de 2000N menys amb aquest muntatge.

- Pel que fa l'allargament; s'observa una disminució considerable respecte el MPB1, ja que el ABS té de mitjana 0,722 mm respecte els 2,47 mm que tenia el mateix muntatge amb PLA. Obtenim però més allargament que el muntatge amb làmina d'acer amb un valor de 0,26 mm.
- Pel que fa el temps, igual que la F_{max} i l'allargament, disminueix bastant respecte el MPB1. En aquest cas el temps mitjà és de 23,28 segons respecte el 74,22 del MPB1.
- Es pot observar només numèricament que l'adherència d'epoxi, FRP i laminat de PLA és molt millor que la d'epoxi, FRP i laminat d'ABS.
- En últim lloc, es pot destacar que en el trencament tot l'epoxi s'ha quedat en l'FRP. Per tant, el trencament ve produït per la interfase de l'epoxi i el laminat de plàstic d'ABS, com ve caracteritzat per les dades obtingudes, dades com les que s'observen en la Figura 46: poc lineals entre elles i que no segueixen cap línia de tendència, molt irregulars.



Figura 47. Trencament MPB3

7.2 Experiments amb laminat d'acer i ancoratge

Amb tota la informació obtinguda, es realitzen els últims experiments amb la introducció de l'ancoratge dissenyat anteriorment en l'apartat 6. Es realitzarà el mateix muntatge que el MAB2, però aquest cop amb l'ancoratge. Aquest ancoratge s'ha imprès amb dos tipus de materials diferents: les primeres 3 mostres seran d'ABS i les altres 3 seran amb PLA. S'anomenarà muntatge d'acer amb ancoratge (MAA). Les diferències entre ells es poden observar en la Taula 14.

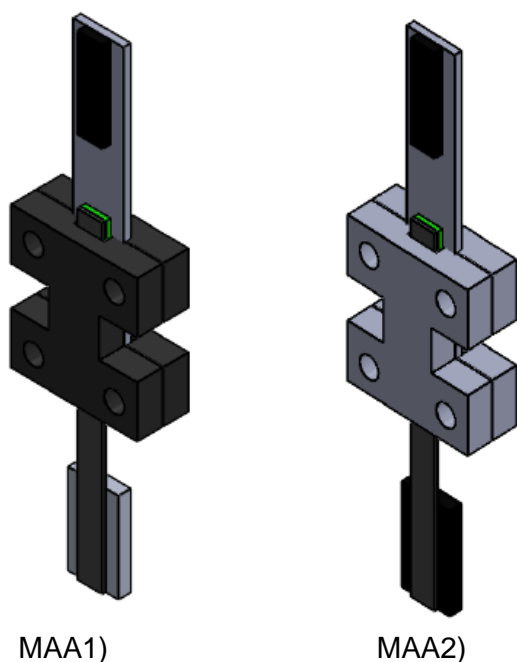


Figura 48 Muntatge d'acer amb ancoratge. (MAA)

La Taula 14 mostra un resum dels dos MAA amb les dimensions de cada element del muntatge, el tipus d'acer utilitzat, la preparació del muntatge i el material de l'ancoratge per tal observar de forma resumida la diferència entre cadascun d'ells.

	1 (MAA1)	2 (MAA2)
Laminat d'acer (dimensions en mm)	125x20x3	125x20x3
Tipus d'acer	F-112(acer dolç)	F-112(acer dolç)
Laminat de FRP (dimensions en mm)	125x10x1.4	125x10x1.4
Sobregruix 1 (dimensions en mm)	35x20x3.4	35x10x3.4
Sobregruix 2 (dimensions en mm)	35x10x3.4	35x20x3.4
Material ancoratge	ABS	PLA
Unió	Epoxi	Epoxi
Preparació	Neteja amb acetona, sabó, aigua i llimar la zona d'adherència	Neteja amb acetona, sabó, aigua i llimar la zona d'adherència

Taula 14. Resum dels diferents MAA

7.2.1 MAA1

En aquest primer muntatge es provarà la introducció del disseny de l'ancoratge amb ABS sobre el MAB2, es comprovarà si es pot endarrerir el desenganxament del laminat de FRP i es compararà amb el mateix ancoratge però dissenyat amb PLA.

La forma i mides finals del primer muntatge amb l'ancoratge de ABS es poden observar en la Figura 49.

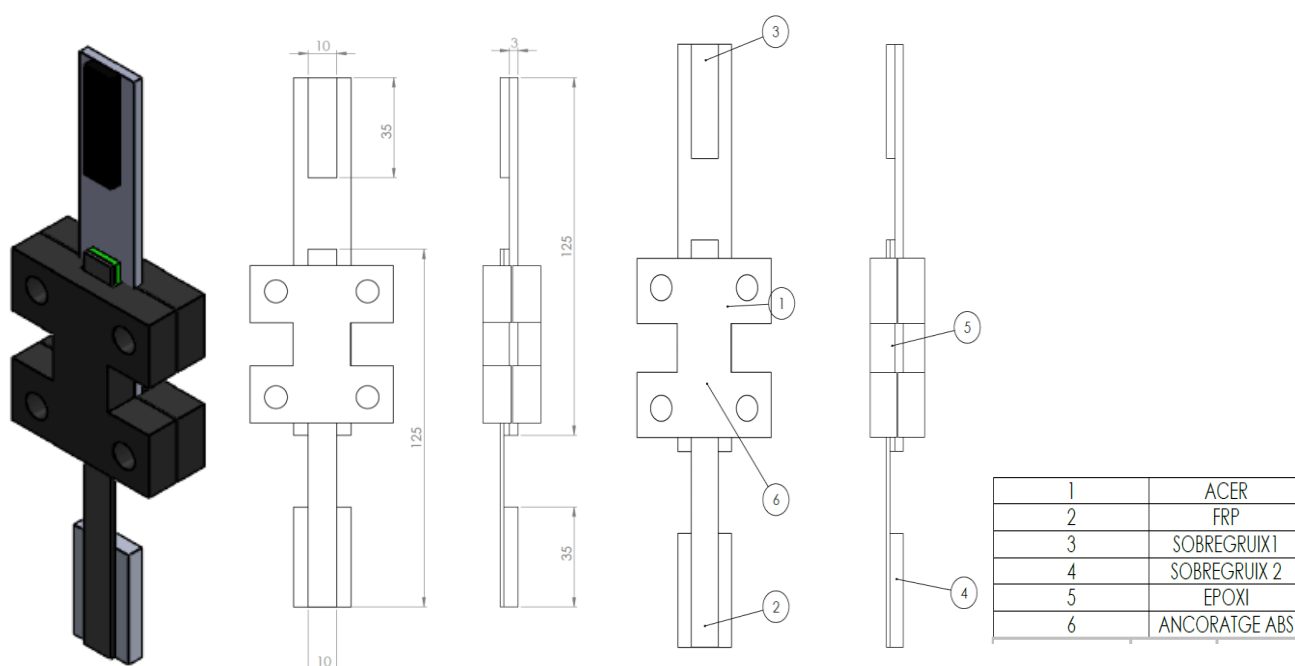


Figura 49. Plànols MAA1

Preparació final de les 3 mostres:

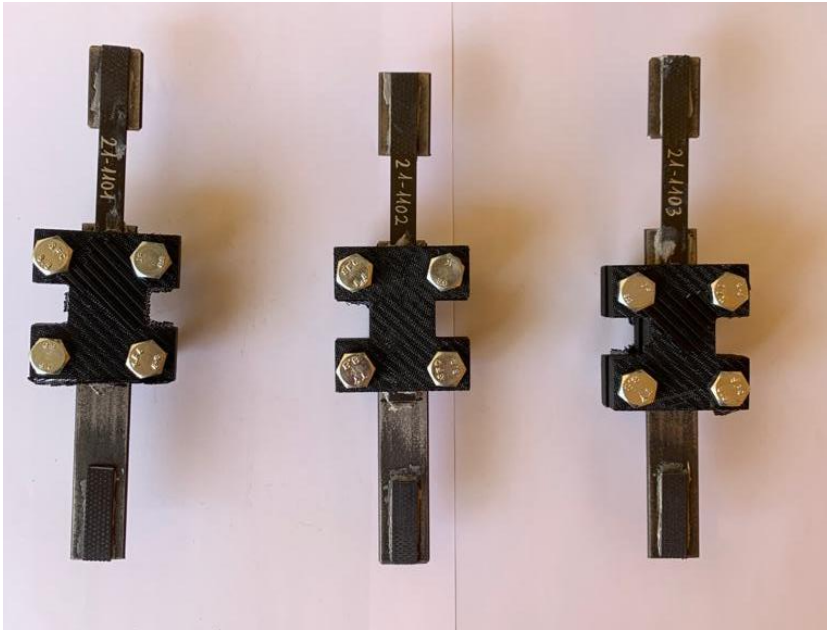


Figura 50.Preparació final MAA1

Amb les dades obtingudes després de realitzar les 3 mostres de temps(s), allargament (mm) i força(N) obtenim els següents gràfics de les mostres:

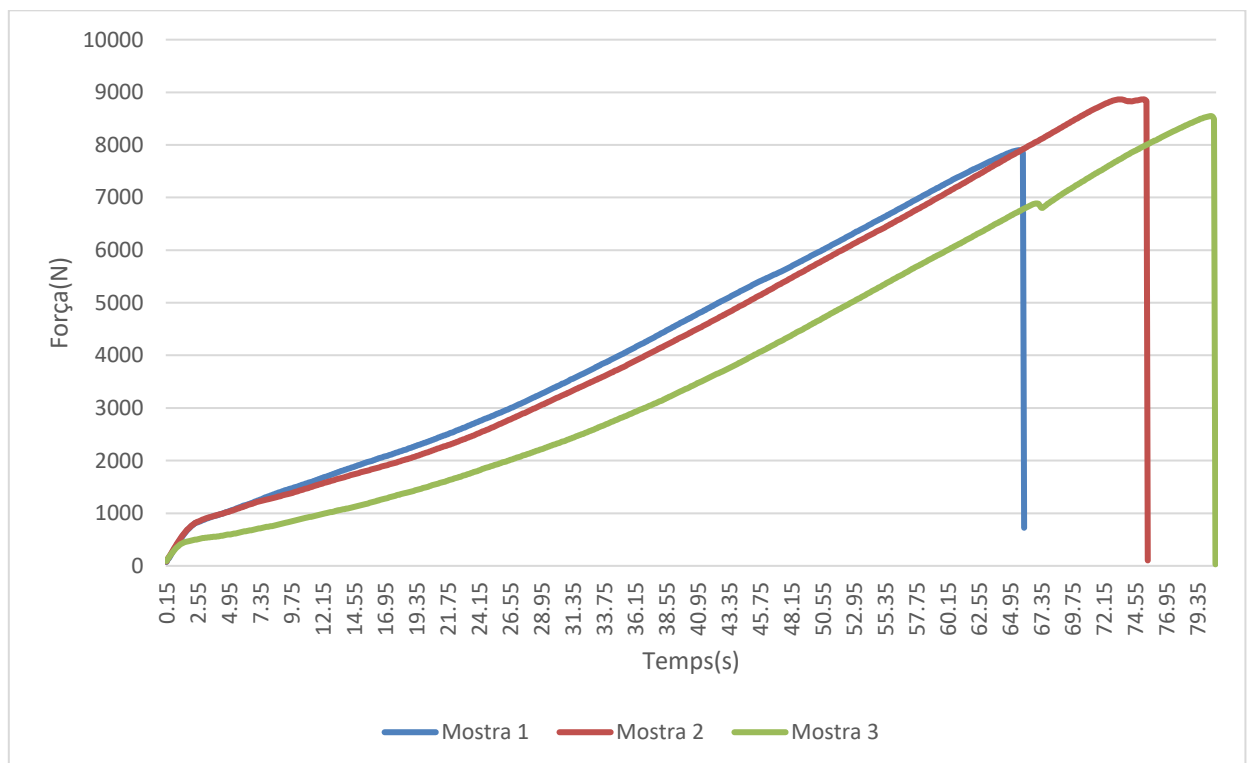


Figura 51.Gràfic de comparació de mostres MAA1

	Fmax (N)	Temps (S)	Allargament (mm)
Mostra 1	7900,63	65,65	2,19
Mostra 2	8866,37	75,25	2,51
Mostra 3	8548,00	80,45	2,68
Mitjanes i Desviació	Fmax mitj: 8438,33 Desv: 492,12	T mitj: 73,78 Desv: 7,51	All mitj: 2,46 Desv: 0,25

Taula 15.Resultats MAA1

Amb aquestes dades es poden obtenir diferents conclusions:

- La preparació de les mostres es pot classificar en dues parts. La primera part és la preparació de la base, que es realitza de la mateixa manera que el MAB2: es neteja amb sabó i acetona l'àrea d'adherència, tot seguit es lima aquesta part i es torna a netejar amb sabó i acetona. Un cop l'epoxi estigui sec es realitza la segona part, la col·locació de l'ancoratge: es neteja amb sabó i acetona la part de l'ancoratge que estarà amb contacte amb l'FRP per tal d'introduir epoxi en aquella àrea i s'introdueixen els quatre cargols i les quatre femelles per tal d'anar pressionant l'ancoratge fins que quedi un paquet amb la base d'acer, tal com s'observa a la Figura 50.
- Amb la realització d'aquest experiment s'ha obtingut una força màxima mitjana de 8438 N. Si es compara aquesta força amb la força màxima mitjana del MAB 2 que és de 5103 N, es pot observar un increment del 39,5% o 3335 N. Per tant, la incorporació de l'ancoratge ajuda molt a l'endarreriment del desenganxament entre l'FRP i el laminat d'acer.
- En referència al temps, es pot observar un increment important, ja que el temps mitjà és de 73,78 segons, mentre que amb el MAB2 és de 7,97 segons. Per tant, l'ancoratge també fa la funció de què la unió trigui molt més a desenganxar-se i, per tant, acabi aguantant més força tal com s'ha pogut comprovar.
- En l'allargament també es pot observar un increment important respecte el MAB2, ja que ha passat de 0,219 a 2,46 mm. Aquest increment va relacionat amb l'increment de la força màxima i del temps.
- Per últim, es pot destacar que aquest ancoratge amb ABS, d'igual manera que el MPB3, o sigui, les mostres amb base de plàstic ABS, proporcionen resultats molt variants entre ells, ja que, com es pot comprovar en la Figura 51, al principi segueixen una línia de tendència semblant, però a l'hora de la força màxima, tenen resultats amb bastant diferència.

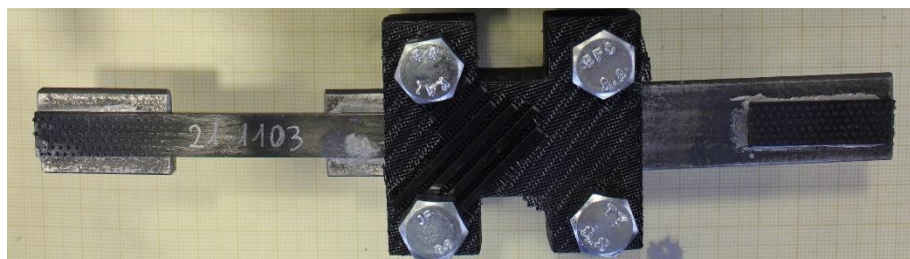


Figura 52. Trencament MAA1

7.2.2 MAA2

En aquest segon muntatge es provarà la introducció del disseny de l'ancoratge amb PLA sobre el MAB2, es comprovarà si es pot endarrerir el desenganxament del laminat de FRP i es compararà amb el MAA1.

La forma i mides finals del primer muntatge amb l'ancoratge de PLA es poden observar en la Figura 53:

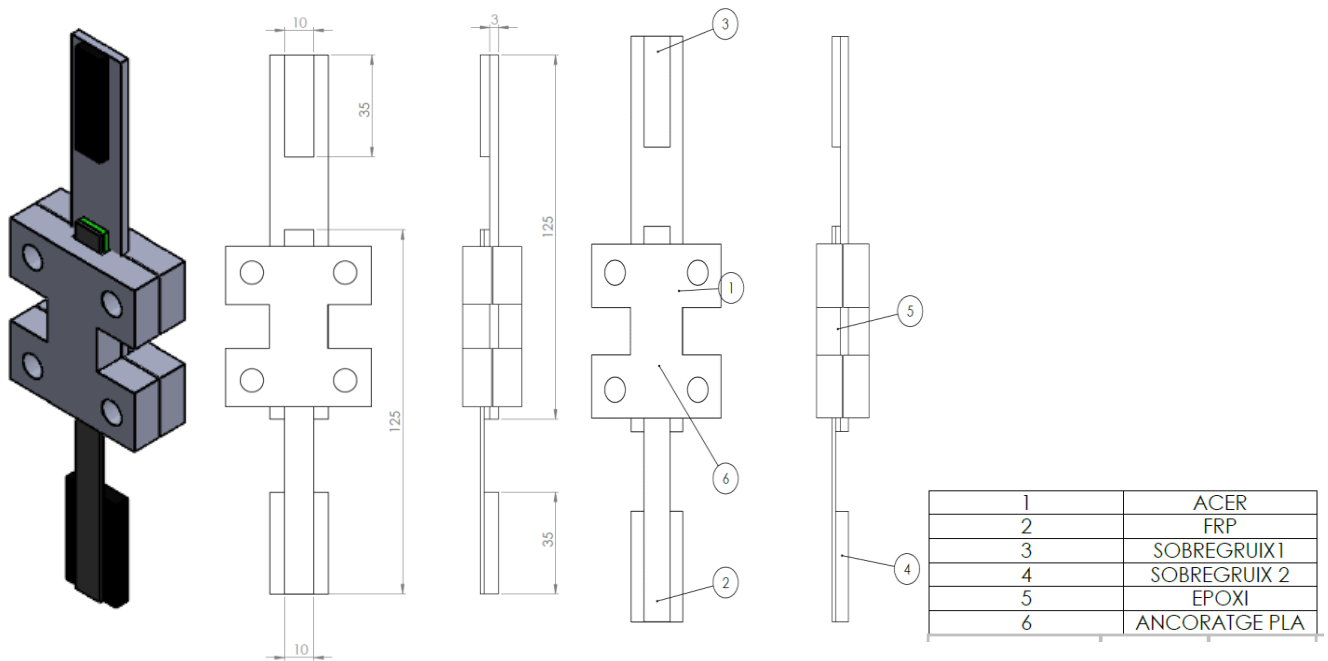


Figura 53. Plànols MAA2

Preparació final de les 3 mostres:

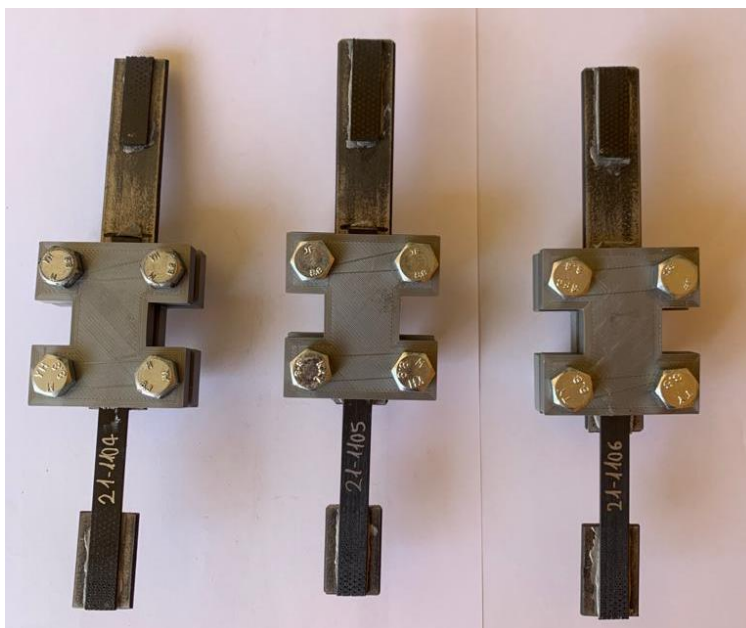


Figura 54. Preparació final MAA2

Amb les dades obtingudes després de realitzar les 3 mostres de temps(s), allargament (mm) i força(N) obtenim els següents gràfics de les mostres:

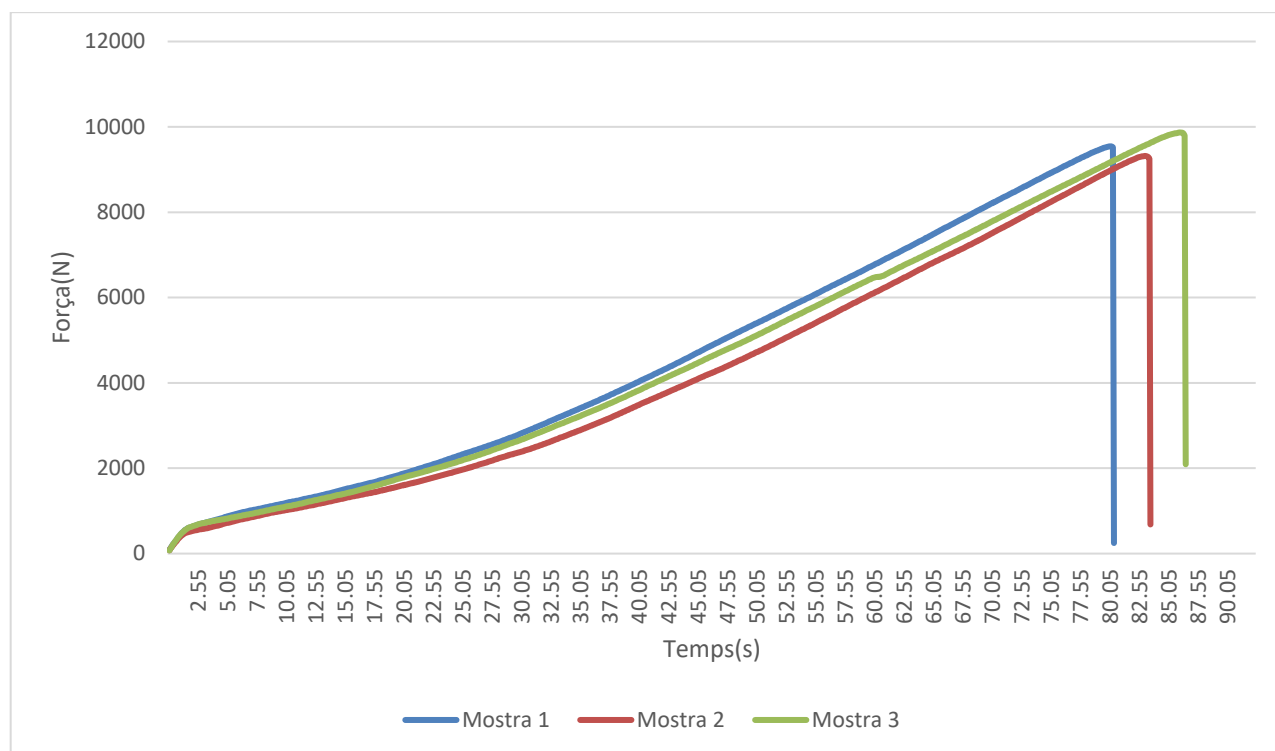


Figura 55.Gràfic de comparació de mostres MAA2

	Fmax (N)	Temps (S)	Allargament (mm)
Mostra 1	9542,45	80,05	2,67
Mostra 2	9317,97	83,05	2,77
Mostra 3	9869,14	86,05	2,87
Mitjanes i Desviació	Fmax mitj: 9576,52 Desv: 277,16	T mitj:83,05 Desv: 3	All mitj: 2,77 Desv: 0,10

Taula 16.Resultats MAA2

Amb aquestes dades es poden obtenir diferents conclusions:

- La preparació de les mostres és idèntica a la del MAA1. La primera part és la preparació de la base, que és realitzar de la mateixa manera que el MAB2, i un cop l'epoxi estigui sec es realitza la segona part, la col·locació de l'ancoratge. Es neteja amb sabó i acetona la part de l'ancoratge que estarà amb contacte amb l'FRP per tal d'introduir epoxi en aquella àrea i s'introdueixen els quatre cargols i les quatre femelles per tal d'anar pressionant l'ancoratge fins que quedi un paquet amb la base d'acer tal com s'observa a la Figura 54.

- Amb la realització d'aquest experiment s'ha obtingut una força màxima mitjana de 9576,52 N. Si es compara aquesta força amb la força màxima mitjana del MAB 2 que és de 5103 N, es pot observar un increment del 46,71% o 4473,52 N, i respecte a l'altre ancoratge d'ABS també hem tingut increment, en aquest cas d'11,89% o 1138,52 N. Per tant, la incorporació de l'ancoratge ajuda molt a l'endarreriment del desenganxament entre l'FRP i el laminat d'acer, i l'ancoratge de PLA aguanta gairebé un 12% més que el d'ABS.
- En referència al temps, es pot observar un increment important, ja que el temps mitjà és de 83,05 segons, mentre que amb el MAB2 és de 7,97 segons. Per tant, l'ancoratge també fa la funció de què la unió trigui molt més en desenganxar-se i, per tant, acabi aguantant més força tal com s'ha pogut comprovar; i comparant amb l'ancoratge d'ABS, obtenim que el PLA aguanta 9,27 segons més.
- En l'allargament també es pot observar un increment important respecte el MAB2 i respecta al MAA1, ja que ha passat de 0,219 a 2,77 mm i de 2,46 a 2,77 mm respectivament. Aquest increment va relacionat amb l'increment de la força màxima i del temps.

Per últim, es pot destacar que l'ancoratge amb PLA té una línia de tendència més regular que el MAA1, com també es va poder observar en el MPB1 i MPB2.

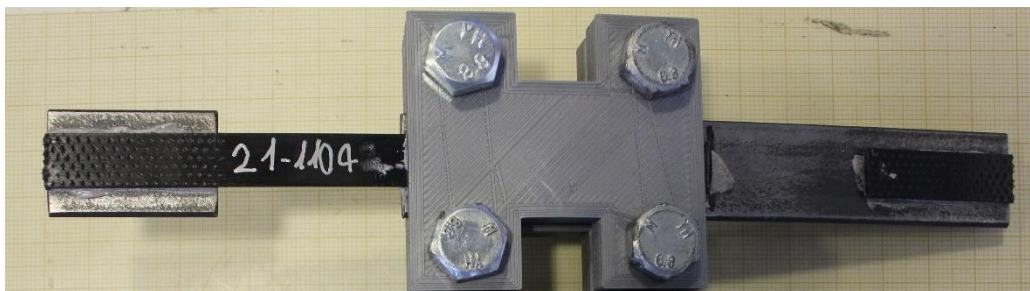


Figura 56. Trencament MAA2

7.3 Resultats Finals i Comparació

COMPARACIO ENTRE MAB

Per analitzar els resultats del MAB, es pot fer una comparativa global dels tres assajos fets. El primer punt a comentar seria la preparació de les mostres. S'ha comprovat que la bona preparació és molt important, ja que pot implicar la reducció de la força màxima. (Annex A, preparació de les mostres). El segon punt important a destacar seria el trencament de les mostres, sobretot la dels MAB2 i MAB3. Com s'ha comentat anteriorment a l'anàlisi individual, trobem una àrea comuna de desenganxament tant en el MAB2 com en el MAB3. Això és la fallida de la interfase entre l'FRP i l'adhesiu. En un cas real podríem trobar que la base de formigó tingués fallida per interfase amb l'adhesiu, en el nostre experiment això no pot passar, ja que l'acer és un material tan resistent que mai tindrem la fallida per aquest punt. Per tant, com es veu a la Figura 32, una àrea d'adhesiu no es queda a l'acer sinó que es desenganxa i queda fixada al FRP. Aquesta mateixa àrea també succeeix al MAB2, per tant, podem determinar que el trencament d'aquesta àrea implica el punt màxim de força a l'hora de l'assaig. Aquest fet explica que tant el MAB2 i MAB3 tinguin unes forces màximes molt semblants. El tercer punt important a destacar i relacionat amb l'anterior seria

l'àrea d'adherència. La gran diferència entre el MAB2 i el MAB3 és la seva àrea d'adherència; una és de 80 mm (MAB2) i l'altre de 25 mm (MAB3) i això implica la diferència de l'allargament i el temps. En el MAB2 hi ha més àrea d'adherència quan la mostra arriba al punt màxim de trencament; com té més àrea, l'esforç es distribueix per tota l'àrea que intenta assimilar-lo abans de trencar, mentre que en el MAB3 un cop arribat a l'esforç màxim, com no té més àrea que pugui assimilar aquest esforç, trenca just a l'instant en què arriba a l'esforç màxim. Com es pot comprovar clarament a la Figura 57, el MAB2 segueix un temps després d'arribar al seu pic màxim, mentre que el MAB3, un cop arribat, trenca i no es manté en el temps.

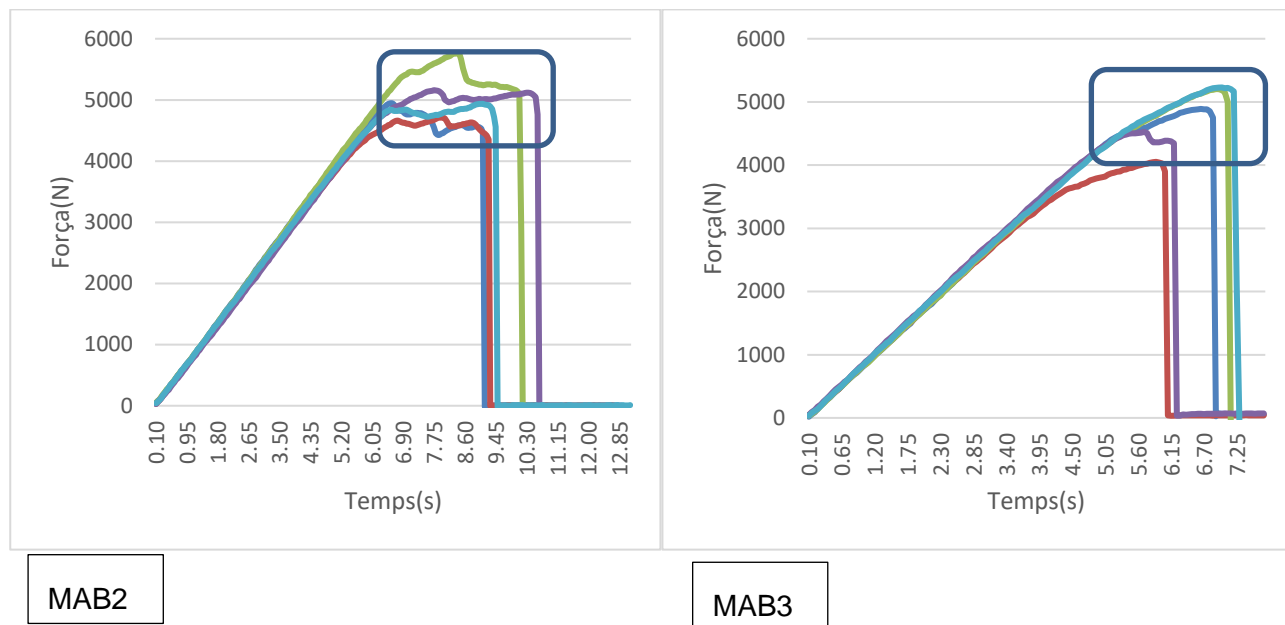


Figura 57. Comparació punt màx entre MAB2 i MAB3

COMPARACIÓ ENTRE LAMINAT DE 125, ACER,ABS,PLA

S'han realitzat tres assajos amb un laminat de 125 mm de llarg i 15 mm d'amplada, però amb tres materials de base diferents: acer, ABS i PLA. En primer lloc, s'ha pogut observar que el laminat d'acer aguanta una força màxima mitjana de 5103,76 N, seguit del laminat amb PLA que aguanta 2984,41 N de força màxima mitjana i per últim el laminat d'ABS que aguanta una força màxima mitjana de 912,51 N. Amb aquestes dades s'obté que el laminat d'acer, per les seves propietats mecàniques i d'adherència, aguanta molt més que els laminats de plàstic però, que el plàstic PLA, que és un material barat i amb pobres propietats mecàniques, té una adherència bastant bona amb l'epoxi i l'FRP, ja que només disminueix un 40% la força màxima respecte el laminat d'acer. L'ABS, és pot concloure, que no té una bona adherència i, per tant, no pot suportar una força màxima gaire gran, ja que aguanta un 82,12% menys que el laminat d'acer. Per analitzar aquesta adherència s'ha observat quina era la interfície de falla dels tres laminats per així veure perquè els laminats de plàstic han aguantat menys que el laminat d'acer. Pel laminat d'acer, com s'ha comentat a la comparació anterior, la seva interfase de fallida és sobretot entre l'FRP i l'epoxi, amb l'excepció d'una petita àrea de fallida entre l'acer i l'epoxi que és la que marca la força màxima (Figura 28). En el laminat de PLA, com es pot observar en la Figura 39, tota la interfase de fallida és entre l'FRP i l'epoxi. Això comporta que el plàstic de PLA tingui molt bona adherència amb l'epoxi, millor que amb l'FRP, tal com s'ha comprovat. Per el laminat d'ABS, com es veu a la Figura 47, la

interfase de fallida és entre el laminat d'ABS i l'epoxi. Aquest plàstic s'ha comprovat que no té una bona adherència amb l'epoxi i, per tant, aquesta interfase de trencament pot suportar una força baixa. L'últim fet a destacar d'aquesta triple comparació dels laminats de 125mm seria l'allargament i el temps abans de trencar. Com ja s'ha comentat, el laminat d'acer és el que pot aguantar la major força, però al mateix temps, és el que té l'allargament menor. El laminat d'acer, de mitjana, s'allarga 0,261 mm, mentre que el laminat de PLA té un allargament de 2,47 mm i el d'ABS de 0,772 mm. Això també passa amb el temps: mentre que el laminat d'acer aguanta 7,97 segons abans de trencar, el laminat de PLA aguanta 74,22 segons, gairebé deu cops més, i el laminat d'ABS 23,28 segons, casi quatre cops més. Això es dona ja que, amb el laminat de plàstic, el muntatge es pot deformar més, i la base, al ser de plàstic, permet estirar-se amb facilitat. En canvi, el laminat d'acer, al ser un material amb més rigidesa, no permet aquesta deformació del muntatge i té un menor allargament.

COMPARACIÓ ENTRE LAMINAT DE 125 DE PLA/80 PLA i ACER 125/ACER 80

Un altre assaig realitzat, i en el qual es poden extreure conclusions, és entre el laminat de PLA de 125 mm de llarg i entre el de 80 mm de llarg. En primer lloc, destacar la força mitjana màxima de cada muntatge: mentre que el PLA de 125 es va obtenir 2948,41 N de força màxima mitjana, el laminat de PLA de 80 mm de llarg va obtenir 2456,16 N, per tant, només hi ha una diferència d'aproximadament 500N entre un muntatge i l'altre. Això es pot assimilar molt a la comparació entre el laminat d'acer de 125mm i el de 80 mm, pels quals també s'ha obtingut una diferència de 500N, tal com s'ha comentat en la primera comparació. Això corrobora la hipòtesi que s'havia comentat d'una àrea determinada que marca quina serà la força màxima, a la qual si després s'hi s'afegeix més àrea d'adherència aporta temps i allargament però no aporta gairebé força màxima. En aquest cas es pot comprovar com el laminat de 125 mm, el temps i l'allargament són de 74,22 i 2,47 respectivament mentre que el laminat de 80 mm és de 61,85 i 2,09 respectivament. Un temps i un allargament menor respecta el laminat de 125 mm, per tant, entre aquesta comparació i amb les mateixes dimensions però amb un laminat d'acer, es pot comprovar que les conclusions finals que s'obtenen arriben al mateix punt; que hi ha una àrea efectiva que marca la força màxima a la qual arribarà l'assaig i, després, l'increment d'àrea d'adherència aporta un increment sobretot de temps i allargament. Per tal de fer un resum dels percentatges de disminució i mostrar que els comportaments són similars, tant sigui laminat d'acer o de PLA, s'ha construït la Taula 17.

Acer 125	Fmax mitj: 5103,76	T mitj: 7,97	All mitj: 0,261
Acer 80	Fmax mitj: 4779,96	T mitj: 6,43	All mitj: 0,219
Diferencia dism%:	Fmax mitj: 6,34%	T mitj: 19,32%	All mitj: 16,09%
PLA 125	Fmax mitj: 2948,41	T mitj: 74,22	All mitj: 2,47
PLA 80	Fmax mitj: 2456,16	T mitj: 61,85	All mitj: 2,09
Diferencia dism%:	Fmax mitj: 16,70%	T mitj: 16,67%	All mitj: 15,38%

Taula 17. Comparació laminat d'acer i PLA i dimensions 125 i 80

COMPARACIÓ ENTRE ANCORATGE ABS I PLA

Els últims assajos realitzats van ser del muntatge amb laminat d'acer amb ancoratge. Aquest ancoratge es va dissenyar amb dos materials diferents: un amb PLA i l'altre amb ABS i es poden obtenir conclusions depenent del material amb què es va realitzar l'ancoratge. Primerament, en referència a la força màxima amb l'ancoratge d'ABS, es va arribar a obtenir una força màxima mitjana de 8438,33 N, mentre que amb l'ancoratge de PLA, es van obtenir 9576,52 N de força màxima mitjana. Per tant, trobem que l'ancoratge de PLA va obtenir 1138,19 N més que l'ancoratge d'ABS. Això es pot entendre amb els resultats que es van obtenir del MAB2 i MAB3 on es va obtenir clarament una major resistència i adherència del PLA sobre l'ABS i, en format ancoratge, també segueix la mateixa tendència. En referència al temps mitjà i l'allargament mitjà es pot destacar també la millor adaptació del PLA sobre l'ABS. L'ancoratge de PLA ha obtingut un temps mitjà de 83,05 segons i un allargament mitjà de 2,77mm, mentre que l'ancoratge d'ABS ha obtingut un temps mitjà de 73,78 segons i un allargament de 2,46 mm. Com es pot comprovar, les dades de l'ancoratge d'ABS, són menors respecte de les de l'ancoratge de PLA. L'última observació important a destacar seria la desviació de les mostres d'ABS i PLA: mentre que les mostres de PLA han obtingut una desviació de 277,16 N en la força màxima mitjana, la desviació de l'ABS ha sigut de 492,12 N, gairebé el doble de desviació. Això ajuda a corroborar que l'ancoratge de PLA s'adapta millor sobre el muntatge que no el d'ABS.

COMPARACIÓ ENTRE ANCORATGE I AL BUIT

Per finalitzar les comparacions s'analitzarà quin ha sigut el benefici de la incorporació de l'ancoratge respecte el muntatge d'acer al buit inicial. Per comentar els resultats numèricament es farà a partir de la Taula 18.

ACER AL BUIT	Fmax mitj:5103,76	T mitj: 7,97	All mitj: 0,261
ANCORATGE ABS	Fmax mitj: 8438,33	T mitj: 73,78	All mitj: 2,46
ANCORATGE PLA	Fmax mitj: 9576,52	T mitj:83,05	All mitj: 2,77

Taula 18. Comparació del laminat d'acer al buit i ancoratges

En la comparació anterior, ja s'ha pogut destacar que l'ancoratge de PLA havia obtingut millors resultats que l'ancoratge d'ABS, però si ara es realitza respecte el laminat d'acer, s'obtenen uns increments dels resultats molt positius. En primer lloc, destacar l'increment d'un 65,33% de la força màxima mitjana amb la incorporació de l'ancoratge d'ABS i un increment 87,64% de la força màxima mitjana amb la incorporació de l'ancoratge de PLA. Per tant, es pot destacar que el nou disseny de l'ancoratge realitzat en el projecte, la zona efectiva de l'ancoratge i la seva incorporació han ajudat al muntatge d'acer a què pugui suportar gairebé el doble de força màxima. Respecte el temps mitjà i l'allargament mitjà, el benefici de la incorporació de l'ancoratge és excel·lent. El temps mitjà amb l'ancoratge d'ABS augmenta un 825,72%, i amb l'ancoratge de PLA ha augmentat un 942,03%. L'allargament amb l'ancoratge d'ABS ha augmentat un 842,52%, i amb l'ancoratge de PLA ha augmentat un 961,30%. Aquests són uns percentatges d'increment que confirmen que la incorporació de l'ancoratge beneficia tots els aspectes del muntatge i fa endarrerir sobretot el

Desenvolupament d'un prototip d'ancoratge polimèric per el reforç d'elements de formigó amb materials compostos

desenganxament entre l'FRP i l'epoxi, el qual és uns dels problemes bàsics que es volien estudiar en el projecte. A part, destacar que l'ancoratge tant de PLA com d'ABS han aguantat els esforços als quals han estat sotmesos i no hi han petit cap trencament o estrip entre les capes (uns dels problemes que s'han destacat en l'annex B de fabricació additiva).

8 CONCLUSIONS

L'objecte principal d'aquest estudi és analitzar la viabilitat d'obtenir ancoratges de material polimèric i/o compostos creats a partir de fabricació additiva i validar-los mitjançant la creació d'un muntatge experimental que simuli un assaig amb simplificacions. D'aquesta forma es podrà valorar l'adherència d'aquest material polimèric amb l'epoxi.

Un cop realitzat l'estudi, en primer lloc, es pot destacar el bon funcionament del muntatge experimental amb les simplificacions realitzades i explicades en el capítol 5. És important destacar la incorporació dels sobregruixos emprats per tal que tot el conjunt tingués el mateix gruix i la màquina d'assaig pogués treballar ben alineada. Aquest fet ha ajudat al fet que els assajos es poguessin realitzar sense cap problema.

Un altre punt a destacar és l'estudi de la geometria òptima i l'estudi dels paràmetres d'impressió 3D per la creació del nou ancoratge. Per tal de crear-lo, s'han estudiat els ancoratges actuals com s'ha comentat en el capítol 2 i s'ha observat la importància de la longitud òptima per tal de tenir més contacte amb l'FRP. D'altra banda, quant a l'estudi dels paràmetres 3D per la seva impressió, com que aquest ancoratge s'ha realitzat amb dues versions diferents de materials, s'han hagut d'estudiar quins serien els paràmetres òptims per la seva impressió i, després, els paràmetres òptims per la forma de l'ancoratge. Es destaca sobretot la importància dels paràmetres de la velocitat d'impressió, altura de capa i temperatura d'extrusió.

Un cop realitzats tots els assajos com s'ha destacat en l'apartat 7.3 de comparacions; s'ha pogut comprovar, en primer lloc, la diferència entre les dimensions dels muntatges; destacar una àrea efectiva que marca la força màxima que podrà suportar l'assaig i, després, l'àrea sobrant que marcarà el temps i allargament que aguantarà el muntatge. En segon lloc, destacar la diferència entre la base d'acer o una base de plàstic. La base en laminat d'acer pot aguantar gairebé el doble de força màxima mitjana que la base de plàstic en canvi, el laminat de plàstic, al tenir unes propietats materials diferents a l'acer, permetre deformar-se més i no ser tan rígid, fa que el seu temps i allargament a l'hora de realitzar l'assaig sigui deu cops major. En referència a l'adherència, destacar sobretot el material de PLA que arriba a tenir un mètode de falla semblant a l'acer. La interfase que falla és entre l'FRP i l'epoxi, per tant, s'observa que la base de plàstic de PLA amb l'epoxi té bona adherència, en canvi, el laminat d'ABS, que en principi té millors propietats que el PLA i és més car, té la interfase de fallida entre l'epoxi i la base de plàstic, destacant així una mala adherència d'aquest material.

Per últim a destacar, l'objectiu principal de l'estudi, que és la comprovació del nou ancoratge dissenyat amb materials de plàstic, i tant per l'ancoratge imprès amb ABS com l'ancoratge imprès amb PLA, s'han obtingut uns resultats molt bons respecte a els assaigs en buit. Destacar sobretot l'ancoratge amb PLA, que ha aconseguit un augment del doble de la força màxima mitjana respecte al muntatge en buit, i un augment de deu cops del temps i l'allargament. A més a més, l'ancoratge ha aguantat els esforços i no ha patit cap mena de desperfecte.

Els objectius marcats, per tant, s'han pogut aconseguir amb èxit. Cal destacar també la dificultat de l'estudi a l'hora d'integrar dos camps tan diferents com l'enginyeria de fabricació i l'enginyeria de la construcció. A més a més, aquest projecte pot ser un inici per seguir estudiant la integració a la construcció d'ancoratges dissenyats amb materials de plàstic.

9 RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present projecte consta dels següents documents:

Document n.1: Memòria i annexos

Volum I: Memòria

Volum II: Annexos

Document n.2: Plànols

Document n.3: Pressupost

10 REFERÈNCIAS

- Alafaghani, A., & Qattawi, A. (2018). Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method. *Journal of Manufacturing Processes*, 11.
- Avellí, F. G. (2019). *Estudi per determinar la quantitat de reforç de fibra contínua en peces per extrusió de filament*. Girona: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial.
- Castello, D. d. (10 de 5 de 2021). *Institut de promoció ceràmica*. Obtenido de http://www.ipc.org.es/guia_colocacion/info_tec_colocacion/mat_agarre/adherencia.html
- Gil, L. (2014). El refuerzo de estructuras de hormigón con laminados de FRP. 29.
- Hombrados, D. P. (2018). *Millora de les propietats mecàniques d'un material compòsit d'impressió 3D*. Girona: Enginyeria Mecànica i Construcció Industrial.
- Kalfat, R., & Gadd, J. (2018). An efficiency framework for anchorage devices used to enhance the performance of FRP strengthened RC members. *Construction and Building Materials*, 22.
- Mariano. (3 de 4 de 2021). *Tecnología de los Plásticos*. Obtenido de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/polieter-eter-cetona-peek.html>
- Moshiri, N., & Czaderski, C. (2020). Flexural strengthening of RC slabs with nonprestressed and prestressed CFRP strips using EBROG method. *Composites Part B*, 14.
- Mostafa, A., & Razaqpur, G. (2013). CFRP Anchor for Preventing Premature Debonding of Externally Bonded FRP Laminates from Concrete. 10.
- Nemetschek, A. g. (2 de 5 de 2021). *ALLPLAN*. Obtenido de <https://blog.allplan.com/es/fabricacion-aditiva-en-el-sector-aec>
- Razaqpur, A. G., & Cameron, R. (2020). Strengthening of RC beams with externally bonded and anchored thick CFRP laminate. *Composite Structures*, 12.
- Smith, R. A.-M., & Scott T.Kalfat, R. (2013). Anchorage Devices Used to Improve the Performance of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with FRP Composites: State-of-the-Art Review. 14.
- TERUEL, I. N. (2017). *PROCEDIMIENTO DE REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CON MATERIALES CFRP*. VALPARAISO: UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA.
- Ucelay, J. C. (2010). *ESTUDI DE L'ANCORATGE DE CFRP EN EL REFORÇ D'ESTRUCTURES DE FORMIGÓ*. Terrassa: Enginyeria Industrial.
- Wu, Y.-F., & Huang, Y. (2008). Hybrid Bonding of FRP to Reinforced Concrete Structures. 8.

ANNEX A

PREPARACIÓ DE LES MOSTRES

En aquest Annex A s'explicarà tota la preparació del assajos per tal de que sigues possible la seva experimentació:

MAB 1

- 1- Primer de tot es van marcar les mesures d'on s'hauria de col·locar l'FRP en l'acer tal com havíem fixat en els plànols
- 2- En segon lloc es va decidir en aquest primer experiment no deixar cants vius en l'FRP per això es va fixar uns petits trossos de cinta aïllant a la punta en contacte amb l'acer i just on finalitzava la unió entre l'FRP i l'acer.
- 3- Tot seguit es va netejar la part on fariem l'adherència de l'acer, l'FRP i l'Epoxi amb acetona per tal de netejar-la i treure les impureses que pogués tenir.

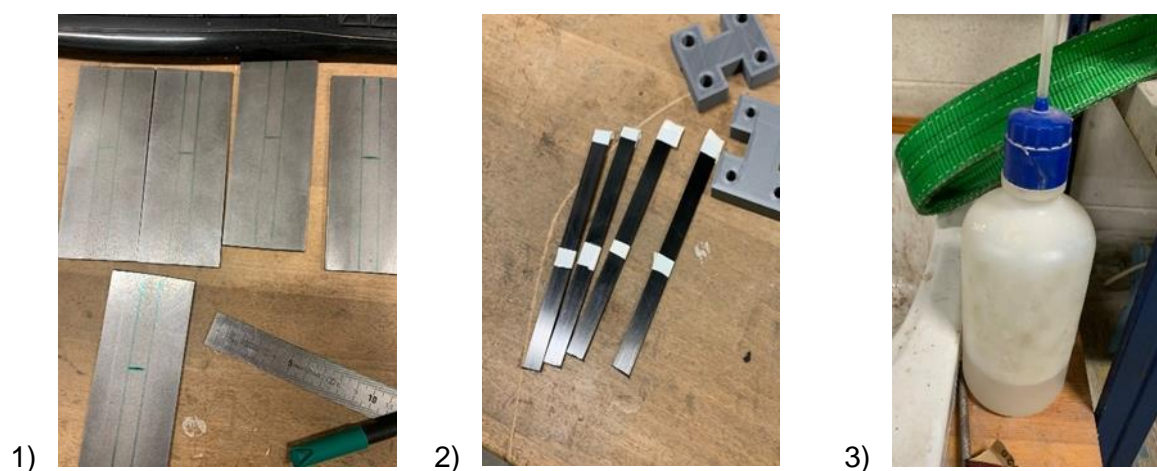


Figura 58. Marcar MAB1

- 4- I un cop fet tot això per tal de realitzar l'adherència, es va procedir a fer l'Epoxi:

L'Epoxi consisteix en barrejar una resina bicomponent en proporció 3:1 això vol dir posar tres cops mes el component A que el B, per exemple, vam ficar 51 g i 17g per un total de 68g. Això es així ja que sinó la resina es posa dura un cop emmagatzemada. Per tant es separa en dos component A i B i la proporció 3:1. Després d'això es barreja contínuament durant 3 minuts per tal que es faci bé l'Epoxi. Un cop passat aquest temps tenim 20 minuts per fer l'adherència abans que la resina es comenci a quedar seca.



Figura 59. Preparació Epoxi

- 5- I un cop tenim tot marcat i la resina preparada, només queda fer l'adherència, es col·loca la resina sobre la laminat d'acer i es fica a sobre l'Epoxi amb una mica de pressió per tal que quedi bé fixat.
- 6- Per últim això es deixarà reposar 10 dies per tal que fixi bé, i els taps en els extrems es col·locaran 24h abans de realitzar a l'assaig amb una resina diferent per tal que quedin ben fixats ja que aquesta part la única funció serà aguantar la força de les mordasses.
- 7- Un cop col·locat tot, marquem amb números cada laminat per tal de començar els 5 assajos.



Figura 60. Fixació de la resina al MAB1

MAB2

En el que fa referència al muntatge 2 se'n fet modificacions a l'hora de la preparació respecte al muntatge 1; en els 7 punts indicats en la preparació del primer muntatge se'n modifica el punt 2 i el punt 3.

- 1- Igual MAB1
- 2- En segon lloc es va decidir en aquest primer experiment no deixar cants vius en l'FRP, però ara per aquest nou set up se decidí enganxar tota la laminat de FRP amb els seus extrems, ja que se valorat que aquesta petita escala no podria modificar el resultat en gran mesura.
- 3- En tercer lloc, es el canvi més significatiu ja que anteriorment només vam aplicar acetona en poca quantitat per netejar la laminat d'acer. En aquest segon set up se fet:

- 1- Neteja de tota la laminat d'acer amb sabó i agua per tal de netejar-la tota.
- 2- Amb un drap netejar tota la laminat amb acetona.
- 3- Llimar amb una llima i paper de polir la zona on farem l'adherència del FRP, l'Epoxi i l'acer.
- 4- Tornar a netejar amb aigua i sabó la laminat i sobretot la zona llimada.
- 5- I tornar a netejar la zona llimada amb acetona i sacar-la.
- 6- Passar també un drap amb acetona a la laminat de FRP.



Figura 61. Preparació zona adherència MAB2

- 4- Igual MAB 1
- 5- Igual MAB 1
- 6- Igual MAB 1
- 7- Igual MAB 1



Figura 62. Muntatge final MAB2

MAB 3

Preparació igual al muntatge 2, nomes varia l'àrea d'adherència que en aquest cas a l'hora de marcar serà mes petita, però tota la preparació prèvia es igual.

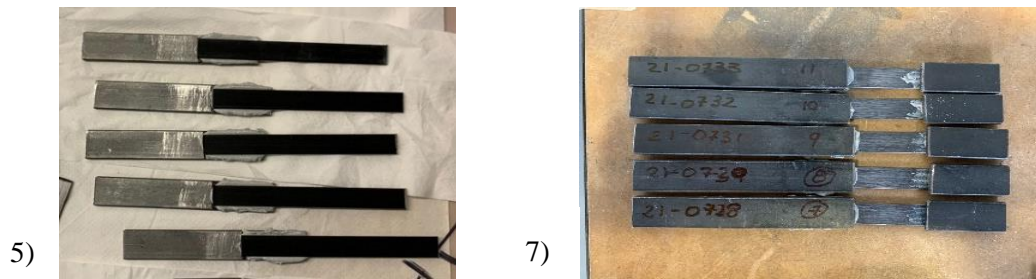


Figura 63. Muntatge final MAB3

MPB 1

La preparació del muntatge de plàstic, es similar a la preparació del MAB1 ja que la base al ser de plàstic no es pot llimar ni preparar, perquè sinó es podria trencar. Els passos que es van seguir són:

1. Es va marcar l'àrea d'adherència sobre la base de plàstic
2. Es va netejar la zona d'adherència i l'FRP amb aigua, sabó i una porció petita d'acetona
3. Es va preparar l'epoxi tal com s'indica en el MAB1
4. I a partir d'aquí, el mateix procediment que els anteriors muntatge, fixa l'FRP a la base de plàstic amb la resina epoxi. Deixa descansar 10 dies la unió, i 24h abans de l'assaig acabar de fixar els sobregruixos. (Ídem MAB1 i MAB2)

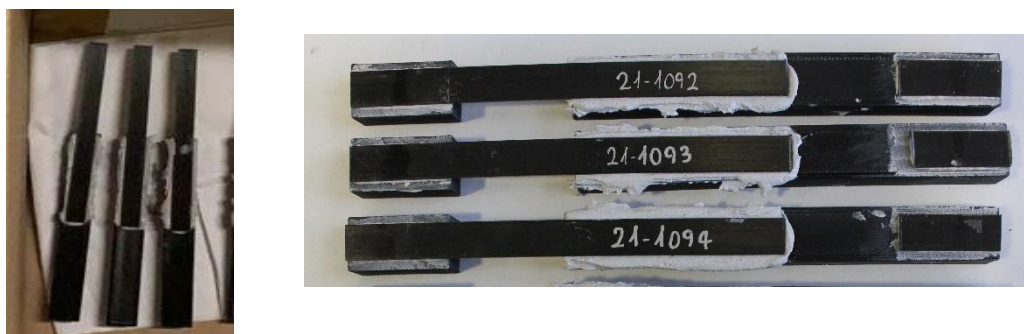


Figura 64. Muntatge final MPB1

MPB 2

La preparació del MPB 2 es exactament igual que el MPB1 l'únic que canvia es que la base es de PLA en diferencia de ABS com el MPB1. Però el procediment de muntatge es igual.



Figura 65. Muntatge final MPB2

MPB 3

La preparació del MPB 3 es exactament igual que el MPB1 i al MPB2 l'únic que canvia es que la base es de PLA en diferencia de ABS com el MPB1 i que al tenir unes mesures mes petites que el MPB2 l'àrea d'adherència es menor. Però el procediment de muntatge es igual.



Figura 66. Muntatge final MPB3

MAA 1

La preparació del MAA1 es compon de dues parts; en primer lloc la preparació del muntatge de FRP i acer, i en segon lloc, el muntatge de l'ancoratge. Els passos a seguir van ser:

1. La preparació del muntatge d'acer, FRP i epoxi. Aquest muntatge es realitzarà seguint exactament els mateixos passos que en el MAB2. Ja que se de recrear exactament les mateixes mostres. Els passos del 1 al 6 del MAB2 són els mateixos.
2. Un cop tenim la unió de les lamines d'acer amb l'FRP a partir de l'epoxi, es procedeix a la incorporació de l'ancoratge. L'ancoratge prèviament imprès tal com es comenta en l'apartat 6. Es fixarà al muntatge d'acer de la següent manera:
 - a) Primer es fixarà amb una petita quantitat de resina la part de contacte de l'ancoratge amb l'FRP.
 - b) Tot seguit des de l'altre banda s'encaixarà l'altre part de l'ancoratge amb la base d'acer.

Desenvolupament d'un prototip d'ancoratge polimèric per el reforç d'elements de formigó amb materials compostos

- c) I un cop fet això, es passaran els 4 cargols passants i les 4 femelles per a cadascun d'ells. I es fixaran fort per tal de crear una pressió en tot el conjunt.
3. Per últim es realitza l'adherència dels sobregruixos igual que en el MAB2.

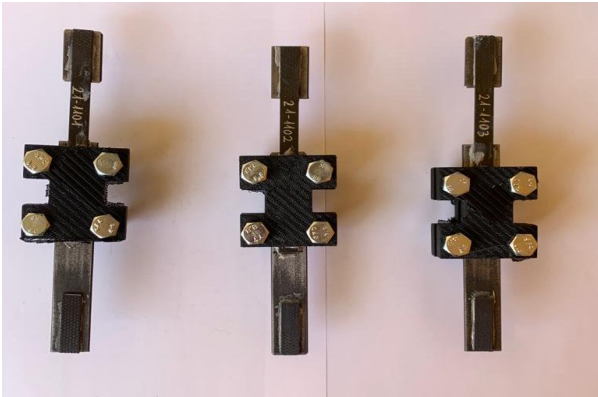


Figura 67. Muntatge final MAA1

MAA 2

La preparació del MAA 2 es exactament igual que el MAA1 l'únic que canvia es que l'ancoratge es de PLA en canvi de ser d'ABS com en el MAA1.

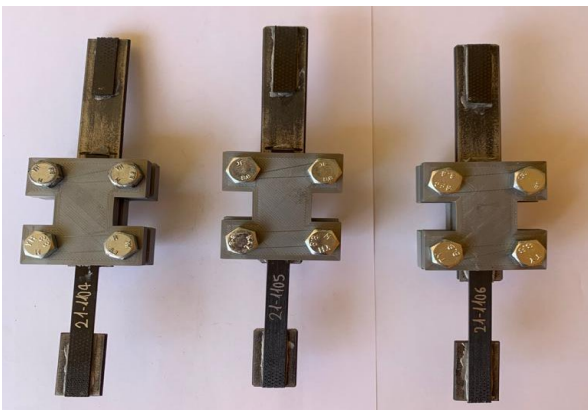


Figura 68. Muntatge final MAA2

ANNEX B

FABRICACIÓ ADDITIVA

En aquest annex B, s'explicarà amb més detall tot el funcionament de la impressió additiva i el paràmetres del procés.

Inicialment la impressió 3D es va utilitzar per a la fabricació de prototipatges ràpids, però avui en dia s'utilitza en sectors tant diversos com el mèdic, l'automoció, l'arquitectura, el tèxtil, entre molts d'altres. L'evolució de la tecnologia durant aquests últims anys, la baixada de preus de les impressores, la utilització de gran varietat de materials i la millora de la precisió, fan que aquest mètode de fabricació tingui un gran interès per la indústria i la societat en general. No obstant, tot i aquestes característiques, encara s'han de millorar diversos aspectes com la resistència i l'acabat superficial dels models impresos en 3D amb l'objectiu d'obtenir geometries de peces complexes i amb propietats mecàniques adients.

Aquesta tecnologia també comporta un seguit de limitacions que s'han de tenir en compte a l'hora de dissenyar una peça. Una de les restriccions principals de les peces impreses en 3D és que les seves propietats mecàniques són més baixes en relació amb altres tècniques de processat com la injecció convencional o la extrusió de plàstics; les quals es veuen afectades en gran mesura per la direcció en la qual s'extrudeixen els filaments, de la geometria de les capes i dels paràmetres de fabricació. Per aquest motiu, en l'actualitat existeix un gran interès empresarial per investigar la millora d'aquestes propietats mecàniques i així augmentar el seu ús en el sector industrial. En aquest sentit, una de les tècniques que pot millorar la resistència de les peces consisteix en un post processat mitjançant un tractament tèrmic.

Com he comentat una característica que podria ser limitant seria la direcció de fabricació. Ja que és un dels paràmetres més importants a l'hora de determinar les propietats mecàniques del material. Per aquest motiu, és important estudiar com influeix aquesta direcció en la resistència del material imprès.

A la Figura 69 es mostra l'aplicació d'una força en dues orientacions diferents i el tipus de ruptura que es produeix. Si la força s'estira perpendicularment a com estant orientades les fibres la ruptura serà més ràpid ja que es separaren la unió d'aquestes fibres. En canvi, si estirem en la mateixa direcció que estan orientades las fibres veiem que perquè hi haguí un trencament se'n de trencar les pròpies fibres i no la unió entre elles com comentàvem abans. Per tant, en aquest cas es millor orientar les fibres en la direcció de la força ja que el trencament de les pròpies fibres serà molt més difícil que succeeixi.

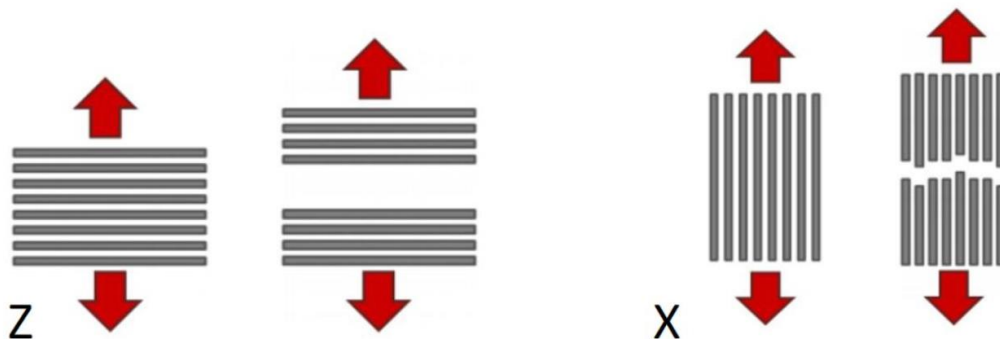


Figura 69. Aplicació de forces de ruptura respecte l'orientació

Actualment hi ha moltes variants de la impressió 3D, com són la de modelat per deposició fosa (FDM), també coneguda com *Fused Filament Fabrication (FFF)*, estereolitografia (SLA), fotopolimerització amb llum ultra violeta (SGC), sinteritzat selectiu amb làser (SLS), etc. En aquest treball realitzarem les impressions 3D amb la tecnologia FDM.

La tecnologia FDM particularment consisteix en que es fon un termoplàstic de forma controlada en un fusor i es va dipositant capa a capa per un extrusor fins a conformar la peça final. Les principals avantatges que trobem són; una gran flexibilitat i geometries complexes, ampla varietat de materials, útil per a prototips ràpids, procés altament automatitzat i reducció del temps de cicle. Per contra, trobem unes baixes propietats mecàniques, comportaments anisotròpics, acabat rugosos, poca precisió dimensional i baixa repetibilitat.

Amb tot el que he exposat de la impressió 3D i el procés de FDM podem veure a la Figura 70 com es l'esquema i els components d'una impressora 3D per procés FDM.

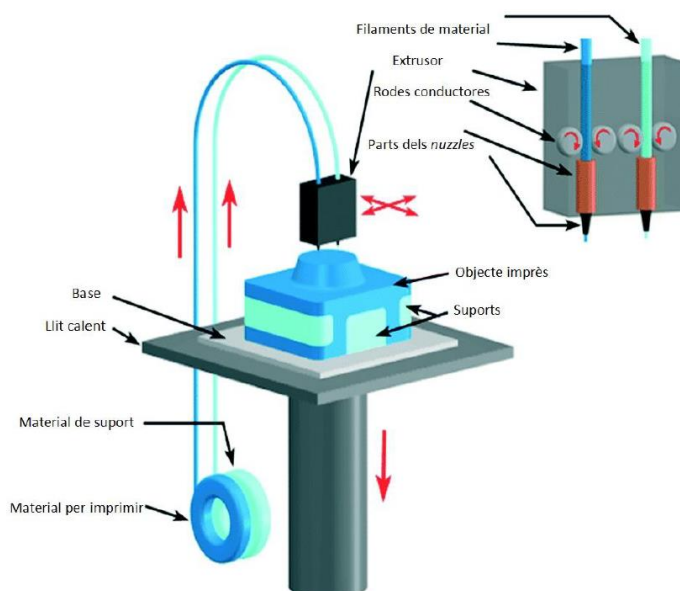


Figura 70. Components d'una impressora 3D

Es pot identificar clarament com pujaria el material per tal, de ser imprimint per els extrusors sobre la base i el lit calent de la impressora.

Paràmetres de procés

Per realitzar les nostres impressions dels ancoratges en 3D utilitzarem la impressora BCN Sigmax R19. Aquesta impressora pot imprimir materials tal com; PLA, NYLON, PET-G, ABS, TPU, PVA, Composites, i altres. A posteriori definirem alguns d'ells amb més detall. El funcionament de la màquina bàsicament, es l'explicat anteriorment en el punt 3.1. Però a part del funcionament de la impressora, el que em de tenir molt en compte a l'hora d'imprimir són també els paràmetres del procés d'impressió. Els més característics en tenim en compte són:

Orientació d'impressió: L'orientació d'impressió és un factor clau a tenir en compte abans de començar a imprimir un model. La col·locació de la peça respecte a la base de la impressora pot influir en l'acabat de l'objecte i en les seves propietats finals. D'aquest paràmetre dependrà si les capes del material s'imprimeixen en la direcció longitudinal de la força que s'aplicarà o bé en la direcció transversal.

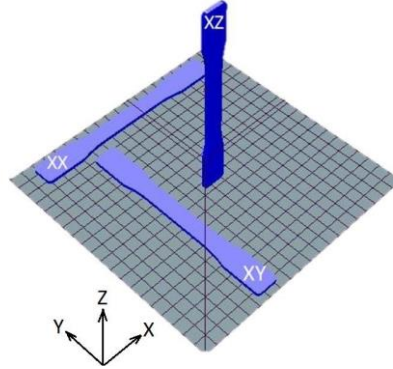


Figura 71. Orientació d'impressió

Altura de capa: L'altura de capa és el paràmetre principal que afecta la qualitat d'impressió i estableix el gruix de cada capa que s'imprimirà. Com menor sigui aquest gruix, s'aconseguirà una millor qualitat d'impressió, però sempre d'uns rangs perquè si l'altura de capa es molt petita també ens pot dur a problemes i com a conseqüència el temps total augmentarà significativament. En general els valors mitjans d'altura de capa són de 0.3, 0.2 o 0.1 mm tot i que a vegades es redueix el valor de la primera capa per obtenir una millor adherència amb la placa calefactora.

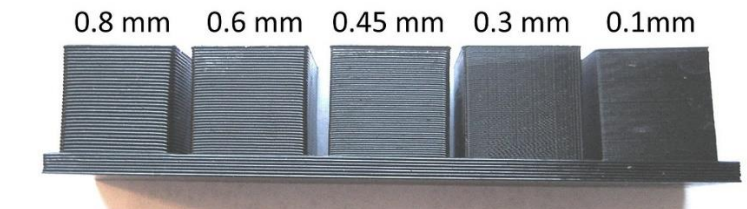


Figura 72. Altura de capa

Ompliment(infill): L'ompliment és un valor generalment representat en percentatge que mostra quant s'omplirà un model sòlid quan sigui imprès. Amb el software de laminació, l'usuari pot determinar aquest percentatge, així com el patró d'ompliment. Aquests dos paràmetres són importants a l'hora de determinar la densitat i les propietats mecàniques de la peça.

Normalment, no és necessari omplir completament el model, a menys que es desitgi la resistència màxima, especialment si també es vol estalviar en cost de material, pes i temps. Per aquest motiu la majoria de peces impreses en tecnologia FDM no solen ser del tot massisses i es fabriquen amb un *infill* entre el 30 i el 70%.

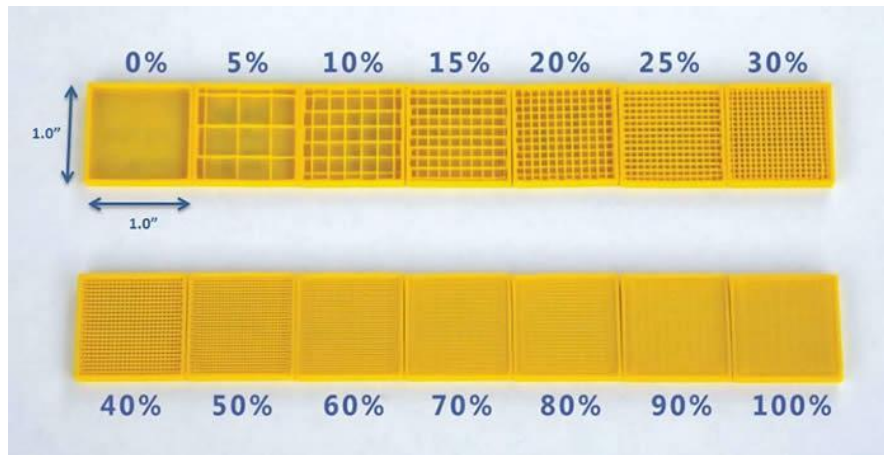


Figura 73. Ompliment

Perímetre: El perímetre el definirem com a nombre de perímetres que volem que faci la impressora, que conformarà la part exterior de la geometria de la peça, sense tenir en compte l'ompliment. Això ens afectarà a l'acabat exterior i a la resistència mecànica de la peça. Com tots els paràmetres mencionats; el numero de perímetres a fer a d'estar entre un rang que normalment sol ser entre 2 i 5 ja que si fiquéssim pot augmentar molt la massa i la densitat. Però amb un nombre òptim de perímetres farem que la peça tingui mes resistència.

Patró d'impressió: El patró d'impressió serà el tipus d'ompliment que nosaltres definirem per tal d'emplenar l'interior de la peça. Podem trobar patró d'impressió com el lineal, diagonal, hexagonal, triangular...entre d'altres. Els mes utilitzats a l'hora d'imprimir serien el lineal i el diagonal sobretot. Com es veu a la Figura 74 .

Es pot configurar el tipus d'ompliment per les capes superiors i inferiors, així com l'ompliment d'una capa solida cada cert nombre de capes de la peça, per tal d'aportar rigidesa a la peça.

També es pot modificar l'angle del patró d'impressió amb el que es realitzarà l'ompliment del model. Per defecte el programa imprimeix amb angles ortogonals entre capes i amb una inclinació de 45° o 90°.

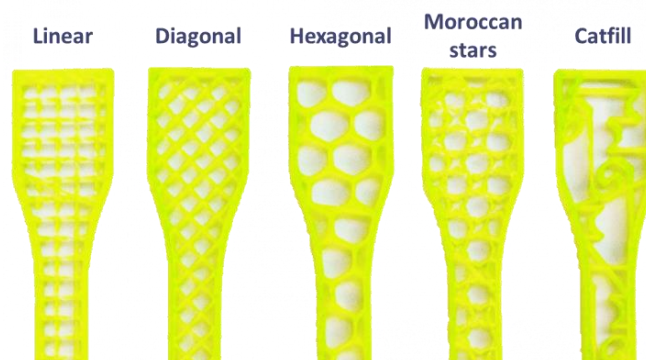


Figura 74. Patró d'impressió

Velocitat d'impressió: La velocitat d'impressió és la velocitat a la qual es mou el capçal extrusor mentre diposita el filament en el procés de fabricació del model 3D. Depenent de la peça a imprimir i del filament que s'utilitzi s'haurà de configurar una velocitat d'impressió o una altra. El factor directament relacionat amb aquest paràmetre és el temps total d'impressió de la peça, encara que també pot influenciar en l'acabat superficial i l'adhesió entre les capes.

En aquest paràmetre se de tenir molt en compte no configurar una velocitat d'impressió massa petita ja que podria causa problemes d'unió de capes i doblegament del filament provocat per la diferencia de temperatures. Però per contra, tampoc podem configurar una velocitat molt alta ja que això ens generaria vibracions a la màquina que pot repercutir en la precisió dimensional de la peça. Per tal d'obtenir un millor acabat superficial i una bona qualitat final de la peça es recomana disminuir el valor d'aquest paràmetre.

La velocitat d'impressió utilitzada normalment oscil·la entre els 30 i 65 mm/segon, depenent de la impressora, el material i la geometria de la peça.

Velocitat de moviment: La velocitat de moviment es la velocitat amb la qual es mou el capçal d'impressió sense extruir el filament. Aquesta velocitat pot ser més ràpida que durant l'extrusió i fins i tot el doble. Normalment no és necessari modificar aquest paràmetre i es recomana deixar el valor predeterminat pel fabricant de la impressora. Aquest paràmetre normalment oscil·la entre 90 i 150 mm/segon.

Altres paràmetres d'impressió: Em destacat els paràmetres mes importants però òbviament podem trobar molt mes. Però ja serien paràmetres mes avançats com modificació de l'estratègia de fabricació, la retracció del capçal, la col·locació de suports i altres paràmetres que venen per defecte en el software.

Paràmetres de Temperatura: En aquest apartat podem trobar dos temperatures bàsicament a tenir en compte a l'hora de la impressió la temperatura de l'extrusor i la temperatura del llit calent.

Temperatura de l'extrusor: La temperatura de l'extrusor es la temperatura a la que fon el material a l'hora de ser imprès. Aquesta temperatura depèn del material utilitzat i per això s'ha de consultar la fitxa tècnica del fabricant del filament. En general els rangs de temperatures proporcionats són bastant amplis i normalment s'ha d'anar ajustant aquest valor fins que la qualitat de la impressió sigui del tot correcta. Sinó podríem tenir problemes amb les propietats mecàniques, funcionals i estètiques. Com que si la temperatura fos massa baixa, el plàstic no flueixi adequadament a través de l'extrusor.

Temperatura del llit calent: El plàstic fos es diposita sobre una base llisa i polida. Aquesta base ha d'estar recoberta d'un material adherent perquè el model que s'està fabricant no es desprengui durant el procés d'impressió. En la majoria dels casos s'utilitzen laques, productes específics o cinta *Kapton*.

En la majoria d'impressores aquesta base es pot escalfar mitjançant una placa calefactora que es manté a una certa temperatura durant la impressió per prevenir que la peça s'aixequi o es

deformi de les puntes. Normalment la temperatura de la placa calefactora oscil·la entre els 70 i 120°C.

ANNEX C

DADES EXPERIMENTALS

Les dades experimentals es poden trobar penjades en l'enllaç o el QR, ja que es un volum de dades molt elevat :

https://drive.google.com/file/d/17fELxICcFKkyQX1gLEs-_bG1-vQM7avB/view?usp=sharing

