

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: **Reutilització de materials compòsits d'altres sectors pel reforç de bigues de formigó**

Document: Memòria

Alumne: Queralt Beringues Serra

Tutor: Cristina Barris Peña
Cotutor: Norbert Blanco Villaverde
Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial
Àrea: MMCTE-EC / EM

Convocatòria (mes/any): Setembre 2023

Índex

1	Introducció	6
1.1	Antecedents	6
1.2	Objecte	6
1.3	Especificacions i abast	6
2	Metodologia general	7
3	Els materials compostos	8
3.1	Definició, tipus i propietats	8
3.2	Laminats i teoria de laminats	9
3.3	Caracterització de materials compostos	12
4	Context històric i actual dels materials compostos	13
4.1	Orígens, evolució i estat actual	13
4.2	Els materials compostos al final de la seva vida útil	14
5	Implicació del treball en l'actualitat ambiental	15
6	Materials compostos en la construcció	17
6.1	Utilitat i importància	17
6.2	Tipus de falla	19
7	Caracterització del material reciclat	20
7.1	Estudi microscòpic del material	20
7.2	Anàlisi de l'estudi microscòpic	21
7.3	Assaigs a tracció	24
7.4	Aplicació de la teoria de laminats	27
8	Anàlisi estructural a flexió d'una biga reforçada amb materials compostos	28

8.1	Metodologia de l'anàlisi estructural a flexió	28
8.2	Estudi paramètric	32
8.2.1	Resultats per la biga de tipus 1	35
8.2.2	Comparacions de les bigues i conclusions de l'estudi	40
8.2.3	Aplicació de FRP de mòdul elàstic molt baix	42
9	Aplicació de l'estudi paramètric	43
9.1	Aplicació als laminats caracteritzats	43
9.2	Aplicació a altres possibles laminats	44
10	Conclusions	46
11	Relació de documents	48
12	Glossari	51

Annexes

Annex A. Resultats de la microscòpia pel laminat de 8 mm.

Annex B. Taules i gràfiques de l'estudi paramètric.

- B.1 Biga d'edificació de 200 × 350 mm.
- B.2 Biga d'edificació de 300 × 450 mm.
- B.3 Biga d'edificació de 400 × 600 mm.
- B.4 Biga de laboratori de 100 × 180 mm.
- B.5 Llosa de 1000 × 180 mm.

Índex de figures

1	Tipus de distribució de les fibres en materials compostos.	9
2	Laminat no simètric a l'esquerra i simètric a la dreta.	10
3	Laminat no balancejat a l'esquerra i balancejat a la dreta.	10
4	Tipus de proves per caracteritzar compòsits.	12

5	Piràmide jeràrquica de residus.	15
6	Objectius de desenvolupament sostenible [16].	16
7	Icona de la ODS 12. Producció i consum responsables. [17]	16
8	Reforç extern d'una biga amb una placa d'acer. Font: Hermite et al. [19].	17
9	Esquema d'una biga reforçada amb (a) EBR i (b) NSM.	18
10	Falles per adherència entre el FRP i el formigó.	19
11	Exemple de falla de FRP per delaminació.	20
12	Microscòpia de la segona capa del laminat de 4 mm.	21
13	Resultat de la imatge de la capa 2 del laminat de 4 mm després de l'aplicació de l'adaptative thresholding.	21
14	Fons i fibra de la capa 2 del laminat de 4 mm.	22
15	Resultat de la imatge de la capa 2 del laminat de 4 mm segmentada.	22
16	Esquema per al càlcul de l'angle de les fibres d'una capa d'un laminat.	23
17	Fotografia d'una proveta amb plaques d'alumini als extrems.	24
18	Gràfic del comportament tensió-deformació de les provetes assajades.	25
19	Exemples de fallada durant els assaigs a tracció.	26
20	Diagrama de blocs de l'obtenció de les propietats d'un laminat qualsevol a partir de la informació del material.	27
21	Diagrama de blocs del procés d'utilització de la teoria de laminats.	28
22	Esquema de la biga amb càrregues aplicades i els reforços.	29
23	Anàlisi seccional de la biga fissurada.	29
24	Anàlisi seccional de la biga sense fissurar.	31
25	Anàlisi de secció fissurada i no fissurada de la biga.	31
26	Diagrama de moments d'una biga amb dues càrregues.	31
27	Corba càrrega-deformació de bigues amb diferents mètodes de falla.	32
28	Representació gràfica de la diferència de resultats dels tres tipus de test.	33
29	Gràfic del comportament d'una biga de 200 × 350 mm reforçada amb FRP de diferents mòduls elàstics (en MPa).	36

30	Gràfic del comportament d'una biga de 200×350 mm reforçada amb FRP de diferents resistències (en MPa).	37
31	Gràfic del comportament d'una biga de 200×350 mm reforçada amb FRP de diferents àrees (en mm^2).	38
32	Gràfic per bigues de 200×350 mm de diferents resistències del formigó (en MPa) amb reforç de FRP i sense.	39
33	Comparació de les diferents variacions d'Ef.	40
34	Comparació de les diferents variacions d'Af.	42
35	Comparació de les diferents variacions d' f_c	42
36	Comparació l'efecte de reforç en una biga de dos materials compostos de diferent mòdul elàstic però mateix valor $Af \times Ef$	43
37	Comportament d'una biga amb les dimensions del laboratori sense reforç i reforçada amb els dos laminats caracteritzats en aquest treball.	44
38	Comportament d'una biga amb les dimensions d'edificació sense reforç i reforçada amb els dos laminats caracteritzats en aquest treball.	45
39	Secció d'una part de l'ala d'un avió de material compost.	45

Índex de taules

1	Resultats estudi d'Alabdulhady, M. et al. [24] pel reforç de bigues de formigó de diferents f_c	19
2	Resultats estudi d'Alabdulhady, M. et al. [24] per la reparació de bigues de formigó de diferents f_c	19
3	Informació extreta de la microscòpia del laminat de 4 mm	24
4	Mitjana de les mesures de gruix i amplada de les diferents provetes.	25
5	Propietats de cada una de les provetes assajades.	25
6	Propietats estipulades pel laminat de 4 mm.	27
7	Taula propietats elàstiques de cada laminat i del material.	28
8	Rang de propietats mecàniques i geomètriques cosiderades en l'estudi paramètric.	35
9	Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (P_y i el punt de ruptura (P_u).	36
10	Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).	37

11	Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (P_y) i el punt de ruptura (P_u).	38
12	Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).	38
13	Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (P_y) i el punt de ruptura (P_u).	39
14	Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (δ_y) i en el punt de ruptura (δ_u).	39
15	Propietats geomètriques i mecàniques de la biga de formigó del laboratori.	43

1 Introducció

1.1 Antecedents

En els últims anys, en el sector de la construcció, els FRP de matriu polimèrica o FRP (de l'anglès *Fiber Reinforced Polymers*) han resultat materials molt adequats per reforçar estructures de formigó armat. Per altra banda, en el sector aeronàutic es preveu que en les pròximes dues dècades es retiraran al voltant de 12000 avions amb un alt percentatge de FRP amb fibra de carboni o CFRP (de l'anglès *Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Conseqüentment, el sector es veurà obligat a considerar mètodes de disposició de FRP que surtin del desmantellament d'avions retirats. Aquest és un dels molts exemples en què s'han de considerar nous mètodes de disposició per a materials que han arribat al final de la seva vida útil per un sector en concret.

Veient que un material, amb unes propietats probablement excel·lents, ja que prové d'un sector que en general produeix materials d'alta qualitat, està actualment sent enterrat i inutilitzat mentre que en un altre sector, com és el de la construcció, utilitza un material molt semblant, el grup de recerca d'AMADE de la UdG va proposar un projecte per a reutilitzar aquest FRP provinent del sector aeronàutic com a reforç en estructures de formigó per a la construcció.

Un laminat reutilitzat difereix de la resta de laminats manufacturats principalment per la seva varietat de formes, així com per la incertesa de les seves propietats mecàniques i geometria. Quan es fabriquen laminats expressament pensats per tal de reforçar formigó, tenen les mides i les propietats que es necessiten en cada cas. En el cas de reusar-los s'ha d'ajustar l'aplicació a les mides i característiques que ja existeixen.

1.2 Objecte

L'objectiu d'aquest treball de final de grau és caracteritzar un material compost reutilitzat desconegut i buscar-ne les millors aplicacions com a reforç d'estructures de formigó en el sector de la construcció. El procediment del treball es desenvoluparà de manera que es faciliti la reutilització d'un futur laminat procedent d'un sector diferent del de la construcció, com és el cas del material del projecte d'AMADE del sector aeronàutic.

1.3 Especificacions i abast

A través d'aquest treball es pretenen aconseguir els paràmetres òptims per tal de reciclar un material compost desconegut que ja no té utilitat en el sector del qual prové, per reforçar bigues de formigó. Així

mateix, es pretenen obtenir les pautes, tan automatitzades com sigui possible, per fer el mateix amb un futur material procedent d'un sector diferent del de la construcció (com podria ser el sector automobilístic o la construcció naval).

2 Metodologia general

En primer lloc, es durà a terme un estudi de les propietats mecàniques del material reciclat a través d'un estudi microscòpic i tot seguit es realitzarà un assaig a tracció [1]. També es farà un codi amb Python per tal d'automatitzar el processament de les imatges de l'estudi microscòpic, per futures aplicacions. A partir de les dades que s'obtinguin d'aquí es podrà caracteritzar el material i utilitzant la teoria de laminats obtenir-ne propietats per laminats del mateix material però de diferents mides.

En segon lloc, es durà a terme un estudi paramètric per tal de saber en quines condicions (pel que fa a propietats i seccions d'una biga de formigó) surt més a compte aplicar cada laminat segons les seves propietats; en el cas de voler reciclar el material desconegut d'aquest projecte, el material procedent del sector aeronàutic del projecte d'AMADE o un altre material alternatiu que es pugui voler reciclar d'algun altre sector.

Finalment, es tindran en compte les conclusions de l'estudi paramètric realitzat per reforçar de la millor manera possible bigues de formigó amb els laminats estudiats i s'extrauran conclusions de l'aplicació idònia per cada un dels laminats caracteritzats.

3 Els materials compostos

3.1 Definició, tipus i propietats

Els materials compostos han existit durant segles, però a mitjan segle XX els requisits exigents de les indústries del sector aeroespacial i de defensa, en cerca de materials resistents i poc densos, van desencadenar una acceleració en l'avenç de la recerca de noves tecnologies i materials. A mesura que va incrementant el coneixement en la ciència i la tecnologia dels materials compostos i que es progressa en l'àmbit de la informàtica, el processament i la caracterització de materials, es van desenvolupant nous materials i tecnologies per fabricar-los [2].

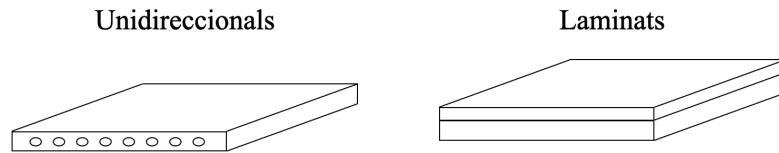
Un material compost és aquell que combina dos o més components o fases que tenen propietats físiques o químiques diferents. Els components d'un material compost estan distribuïts en arquitectures complexes de manera que una o més fases discontinues es troben incloses dins d'una altra. La fase interna (que és la que proporciona rigidesa i resistència) s'anomena *reforç* o *fibres* mentre que l'externa (que proporciona una bona adhesió entre fibres) és la *matriu*.

Generalment, quan els materials es troben en forma de fibra són més resistents i rígids que en format de bloc. Això és degut a que quan es troba en format de fibra té menys defectes microscòpics que podrien resultar en inicis de fissures i, per tant, en la fallada del material. Tot i això, les fibres de manera individual són difícils de controlar i de transformar en components útils; és per això que s'utilitza la matriu, per mantenir-les separades de les fibres adjacents i fer que sigui més fàcil treballar amb el conjunt del material [3].

D'entre tots els tipus de materials compostos en podem distingir dos grans grups segons el seu reforç; en primer lloc els que estan reforçats a base de fibres i, en segon lloc, de partícules. Per aquest treball en concret es tractaran els que es reforcen amb fibra. Aquests es poden separar en dos grans grups segons la continuïtat de les seves fibres: en fibres contínues llargues o en retalls discontinus de fibres. Tal com es mostra a la Figura 1 també se'n pot diferenciar la distribució de les fibres; en unidireccionals o laminats, que es tractaran més endavant, en el cas de fibres contínues i orientació aleatòria i unidireccional pel que fa a les fibres discontinues. Un laminat és una agrupació de làmines amb diferents orientacions de reforç i/o material.

La matriu és el material que aguanta, separa i protegeix les fibres. A més a més, també fa que es pugui transferir la càrrega cap a totes les fibres i alhora es pugui redistribuir en el cas que una de les fibres es trenqui. Normalment, tenen una baixa densitat i una menor resistència i rigidesa que les fibres. Les matrius més utilitzades són les matrius ceràmiques (que també inclouen les de carboni i vidre), les metàl·liques i les polimèriques. Les de matriu polimèrica són les més comunes i les més econòmiques i són les que es tractaran en aquest treball. Els polímers ofereixen unes propietats mecàniques relativament elevades, són fàcils de processar i tenen una densitat molt baixa.

Compòsits de fibres contínues



Compòsits de fibres discontinúes

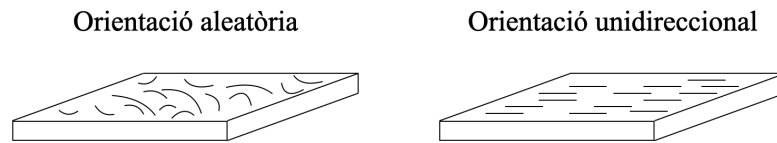


Figura 1: Tipus de distribució de les fibres en materials compostos.

Dins els materials compostos de matriu polimèrica o FRP (de l'anglès *Fiber Reinforced Polymer*) es poden diferenciar diferents grups segons el tipus de reforç. Els reforços més utilitzats durant les últimes dècades són els de fibra d'aramida (AFRP), fibra de carboni (CFRP), de vidre (GFRP) i de basalt (BFRP). D'entre tots aquests compòsits reforçats, el CFRP ha destacat en molts àmbits gràcies a la seva resistència, durabilitat i baix pes. De fet, és el compòsit més emprat en sectors tant exigents com l'aeroespacial, aeronàutic, vehicles esportius i d'alta gama, etc.

3.2 Laminats i teoria de laminats

Una làmina (també anomenada capa o en anglès *ply* o *layer*) és la combinació en forma de capa, generalment amb un gruix molt petit (d'entre 40 i 300 micres) que combina una matriu polimèrica reforçada amb fibra, que pot ser curta amb direcció aleatòria, llarga i continua en una sola direcció (unidireccional) o en forma de teixit amb varies orientacions (multidireccional). Una làmina tindrà diferents propietats segons la quantitat de fibra o l'orientació en què aquesta es trobi. Com a simplificació per l'anàlisi de les làmines, generalment, es modelen com si tinguessin una única capa de fibres al llarg del seu gruix, és a dir, es considera que la seva composició és homogènia amb unes propietats equivalents a tota la seva superfície i gruix. Es considera un material equivalent a nivell de mesoescala sense analitzar la seva configuració microscòpica. No obstant, cal destacar que aquesta representació és un model simplificat i no reflecteix la distribució real de les fibres. Donat que el gruix de les làmines sol ser molt limitat i que les propietats de la matriu són molt baixes comparades amb les del reforç, el més habitual és agrupar un conjunt de làmines amb diferents orientacions, el que s'anomena laminat.

Un laminat és una disposició de làmines apilades, ordenades en una seqüència determinada i reforçades

amb fibres en diferents direccions també específiques per tal d'aconseguir un resultat concret [4]. Les làmines individuals es fixen entre elles a través d'un procediment de curat. La resposta mecànica del laminat és diferent de les làmines individuals i depèn de les làmines que el formen, però també de l'ordre en què estan apilades. Un laminat sol tenir entre 4 i 40 capes, però poden arribar a tenir-ne més de 100. En el cas del material d'aquest projecte en té al voltant de 40. Tot i saber que es tracta d'un laminat, la varietat en microestructures, definida per la quantitat i l'orientació de la fibra de reforç, i la seva conseqüència a les seves propietats mecàniques fa que sigui determinant saber-ne les característiques microestructurals per entendre'n i predir-ne el comportament. Aquesta relació entre microestructura i propietats s'anomena mesomecànica.

El terme "mesomecànica" té com a objectiu descriure una àrea de recerca que relaciona la microestructura dels materials amb les seves propietats. Aquest concepte té com a principi fonamental desenvolupar metodologies que guiïn la creació de materials amb; per un costat, la microestructura desitjada i, per altre costat, predir els seus comportaments microscòpics i macroscòpics [5].

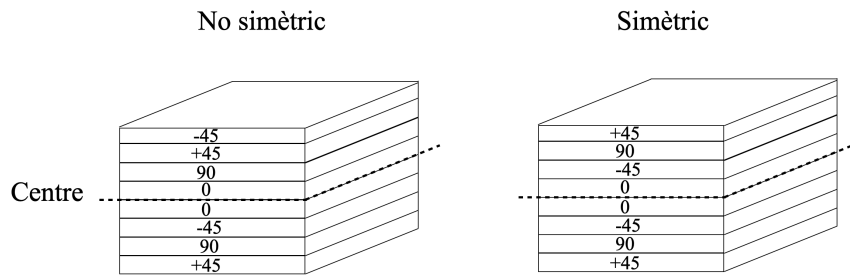


Figura 2: Laminat no simètric a l'esquerra i simètric a la dreta.

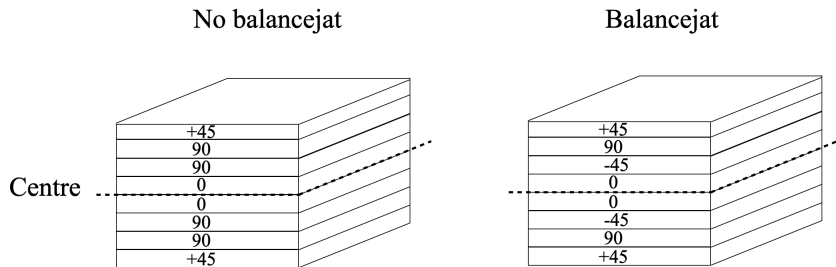


Figura 3: Laminat no balancejat a l'esquerra i balancejat a la dreta.

La teoria de laminats determina que mitjançant la informació de cada una de les capes d'un laminat, com ara l'angle, el gruix i el tipus de material, és possible estimar les propietats del conjunt global del laminat [6]. Aquesta teoria pot ser útil en casos com el del material d'aquest projecte, en què existeixen laminats de diferents gruixos i, per tant, amb diferent nombre de capes. Mitjançant assaigs amb una mostra determinada és possible obtenir les propietats del material i, a partir d'aquí, predir les propietats elàstiques de la resta de laminats amb un diferent nombre de capes.

Materials de gruixos reduïts, com és el cas de la majoria dels laminats i en concret del material d'aquest projecte, es poden considerar bidimensionals o de tensió plana, considerant que les tensions en les direccions

paral·leles a la membrana son significativament petites [7]. Aquest concepte simplifica l'anàlisi del comportament del material. Els materials es poden classificar, segons la simetria en els seus plans en tres categories principals: isotròpics, anisotròpics o ortotròpics. Dins dels materials ortotròpics, que tenen tres plans de simetria, existeixen els transversalment isotròpics. Aquests, a part de tenir tres plans de simetria, un dels seus plans és tractat com a isotròpic, és a dir, un pla que te la mateixa resposta, independentment de la direcció, davant una tensió. Aquest és el cas d'un material compost reforçat amb fibres unidireccionals contínues, amb totes les fibres alineades [8], en aquest cas el pla isotròpic és el pla perpendicular a la direcció del reforç.

Per tal de determinar la matriu de rigidesa (la matriu que relaciona la tensió i la deformació unitària) d'un material transversalment isotròpic en tensió plana només son necessàries 4 constants independents (E_{11} , el mòdul elàstic en la direcció del reforç; E_{22} , el mòdul elàstic en la direcció perpendicular a la del reforç; ν_{12} , el coeficient de Poisson en el pla de la làmina i G_{12} , el mòdul tallant en el pla). Aquesta matriu de rigidesa pren la forma de l'Equació (1) [9].

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matriu de rigidesa esmentada correspon només a la matriu de rigidesa d'una capa a 0° . Per totes les capes que no tenen les seves fibres orientades a 0° , anomenades làmines off-axis, cal fer una transformació de les propietats i de la matriu de rigidesa, fent servir la matriu de transformació de l'Equació (2), on l'angle θ és l'angle de l'orientació del reforç respecte de la referència del laminat. A partir d'aquesta matriu i seguint l'Equació (3) es poden trobar les matrius de rigidesa de cada làmina sense que depenguin de la direcció de les fibres (que pot ser diferent a cada làmina). En aquesta Equació (3) el paràmetre k indica el número d'ordre de la capa dins del laminat.

$$\mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cos \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\overline{Q}_k = T_k \times Q_k \times (T_k^{-1})^t \quad (3)$$

Finalment, per tal de trobar la matriu de rigidesa del laminat, cal sumar totes les Q_k tal com indica l'Equació (4) on t_k és el gruix de cada capa i h el gruix total del laminat. A partir d'aquí, igualant cada terme de la matriu amb els de l'Equació (1) es poden extreure les propietats equivalents del laminat que poden ser útils per càlculs numèrics dels compòsits aplicats a estructures reals.

$$Q_{lam} = \sum \frac{t_k}{h} \overline{Q}_k \quad (4)$$

Així doncs, a partir de la teoria de laminats es poden obtenir les propietats d'un conjunt de capes (és a dir, d'un laminat) a partir de la informació de la microestructura i de les propietats físiques del mateix material.

Totes aquestes afirmacions, tant la teoria de laminats com la matriu de rigidesa Q només són vàlides pel comportament en el pla, no per fora del pla o flexió.

3.3 Caracterització de materials compostos

La caracterització d'un material és un procés en el qual es determinen les seves propietats físiques i mecàniques. L'esquema de la Figura 4 mostra els dos tipus de proves que es poden fer per saber diferents classes de propietats; proves destructives i no destructives, que, tal com indica la paraula, diferencien les proves en què es malmet l'exemplar i les que no. La caracterització de les propietats mecàniques de materials compostos utilitzant mitjans mecànics és un pas important abans d'utilitzar els compòsits per diverses aplicacions. Es poden fer nombrosos assajos, mecànics, electrònics, químics i tèrmics depenent de la finalitat i les propietats que es necessitin estudiar. Un dels experiments mecànics més comuns és l'assaig a tracció, un assaig que permet aclarir les característiques mecàniques més bàsiques [10].

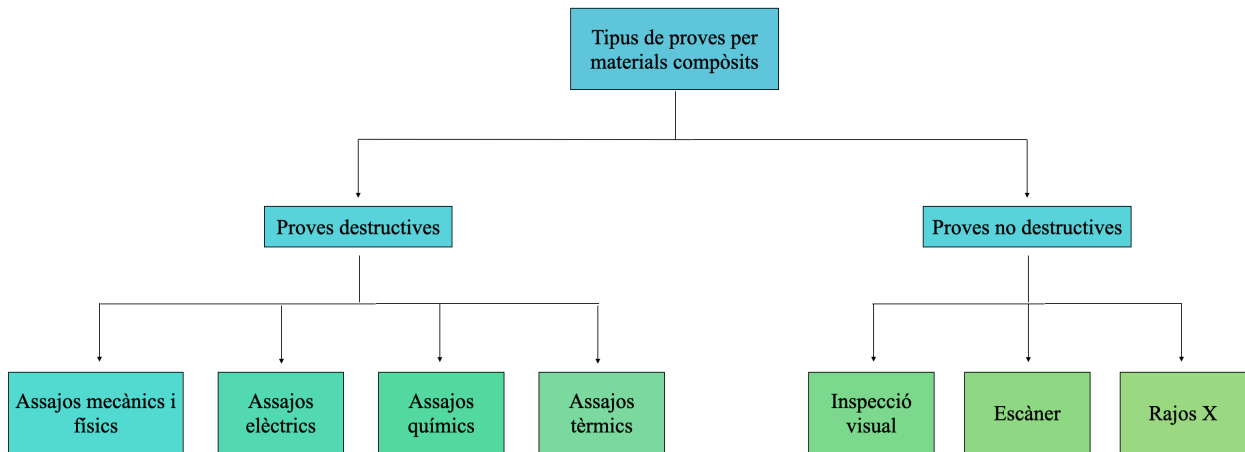


Figura 4: Tipus de proves per caracteritzar compòsits.

L'assaig a tracció permet obtenir el mòdul elàstic del material en la direcció en què s'assaja així com el seu límit elàstic de tensió i deformació i la seva resistència. Els resultats d'aquest assaig, com es veurà més endavant en el treball, possibiliten entendre com es comporta el material sota la influència de tensions i permeten adquirir informació sobre el seu comportament en aplicacions del món real. A més a més, assajant

un material a tracció es pot comprovar la qualitat del material i, per exemple en el cas dels laminats, observar si arriba a la ruptura de cop amb totes les fibres o unes fibres, en unes orientacions determinades, fallen abans que les altres. A més a més, en el cas dels laminats, aquest assaig passa a ser molt interessant degut a que les propietats que se'n poden extreure es poden relacionar fàcilment, seguint la teoria de laminats explicada anteriorment, amb les propietats d'una sola làmina o capa.

En el cas de les necessitats d'aquest estudi és útil saber-ne la composició estructural, i per això també és interessant fixar-se en les proves no destructives de la Figura 4. Tant la inspecció visual, com l'escàner i els rajos X permeten estudiar-ne la microestructura. Com s'ha explicat anteriorment, el material compost d'aquest projecte es tracta d'un material del qual es desconeixen per complet les propietats. A més a més, existeixen diferents gruixos del material, dels quals no se sap si tenen estructures semblants o són completament diferents. Entendre'n la microestructura permet, a partir de la teoria de laminats explicada anteriorment, relacionar-ne les propietats i no haver d'assajar cada una de les mostres de gruixos diferents. Degut a les dimensions de les fibres és necessari l'ús d'un microscopi per entendre i conèixer la microestructura d'un material compost. Així es pot identificar la direcció de les fibres així com la seva mida, la mida de les capes i qualsevol irregularitat al llarg del gruix del laminat.

4 Context històric i actual dels materials compostos

4.1 Orígens, evolució i estat actual

Tot i que els materials compostos existeixen des de fa molts segles, no es conserva cap registre que documenti de manera precisa quan es van començar a utilitzar. Algunes de les primeres mostres que es tenen avui en dia de la seva utilització son de l'antic Egipte, en què, per exemple, utilitzaven palla mesclada en fang per reforçar els maons. Més tard, cap al 1200 DC, els mongols van inventar el primer arc compost, a partir d'una combinació de fusta, ossos i cola animal. Aquests arcs eren extremadament precisos i va ser l'arma més poderosa fins a la invenció de la pólvora. Així mateix, a l'època medieval es recobrien les espases i armadures per afegir-hi resistència i les espases dels samurais es creaven mitjançant un compost format de diverses làmines. Tots aquests i molts d'altres son exemples de materials compostos manufacturats que s'han anat utilitzant al llarg dels anys com a mètode de reforç en diferents àmbits i regions del món [3].

Tot i així, els materials compostos com els coneixem avui en dia, no van arribar fins que va aparèixer el plàstic. Fins aleshores els únics aglutinants i coles provenien de resines animals o vegetals. A principis del 1900 van aparèixer plàstics com el polièster, el vinil o el poliestirè i van superar exponencialment el rendiment a les resines naturals. Tot i això, no va ser fins al 1935 que Owens Corning va introduir la primera fibra de vidre que combinada amb un polímer crea una estructura extremadament forta i lleugera. Aquest va ser el començament dels FRP [11]. Més endavant, durant la Segona Guerra Mundial, quan els enginyers es van

adonar del poc pes, l'alta resistència i la resistència a la corrosió dels FRP, els van començar a fer servir per aviació militar. A més a més, en ambients marins utilitzaven fibra de vidre que era transparent als radars. A partir d'aquí i fins a dia d'avui, els materials compostos s'han anat introduint en molts altres àmbits, però principalment en el sector de l'automoció, aeronàutic i d'energies renovables, ja que en els tres casos es necessiten materials lleugers i altament resistents. També es poden trobar en l'àmbit quotidià en, per exemple infraestructures elèctriques, aïllants o en línies elèctriques o fins i tot en el sector de l'esport, en pals d'hoquei i raquetes de tenis.

D'entre els materials compostos de matriu polimèrica es poden diferenciar, segons la seva fabricació, entre els de matriu termoestable i termoplàstica. Aquest treball tracta els de matriu termoestable degut a que són actualment els més utilitzats, ja que són els que han estat més desenvolupats i són més assequibles d'obtenir. Tot i els seus avantatges, el principal desafiament dels materials compostos de matriu polimèrica termoestable és la seva dificultat per separar-ne els components i que puguin ser reciclats eficientment. Això canvia en el cas de la matriu termoplàstica, que permet que la fibra i la matriu es puguin separar.

4.2 Els materials compostos al final de la seva vida útil

Actualment, hi ha estàndards de gestió molt estrictes pel que fa als residus de FRP. En el passat, l'abocament i la cremació de compòsits era la principal eina per gestionar-los, però cap d'aquests mètodes és respectuós pel medi ambient. L'única resposta lògica a l'ús extensiu de compostos polimèrics a les indústries és buscant mètodes de gestió de residus [12].

A la Figura 5 es mostra la piràmide jeràrquica de residus, un conjunt de prioritats establertes per l'EU per valorar l'ús eficient de recursos [13]. L'opció predilecta és la de dalt de tot de la piràmide, en què es prevenen els residus i va fins a la pitjor opció que és la disposició de residus com s'ha fet en un passat pròxim davant el desconeixement d'alternatives de reciclatge o reutilització.

Lluny de ser comercialitzades, s'han investigat i desenvolupat moltes tecnologies pel reciclatge dels materials compostos, principalment de tres categories: reciclatge mecànic, tèrmic i químic. El reciclatge mecànic consisteix en triturar i separar el material compost en diferents parts que continguin principalment resina o principalment fibra. Aquesta tecnologia requereix molta energia i els materials reciclats poden no ser tan bons com els nous. El reciclatge tèrmic consisteix en escalfar el material a altes temperatures per separar les fibres de la matriu. En aquest cas la qualitat del material també pot disminuir. Finalment, el reciclatge químic utilitza dissolvents orgànics i inorgànics per separar-ne els components [14]. Tot i tots els seus avantatges, aquestes tècniques encara tenen problemes, com ara l'heterogeneïtat, la qualitat del material reciclat i els costos de reciclatge [15].

Totes aquestes tecnologies es troben a la quarta posició de la piràmide jeràrquica de residus, això és degut



Figura 5: Piràmide jeràrquica de residus.

als recursos que s'han d'invertir per tal de dur-ho a terme fan que no sigui del tot sostenible.

Els materials compostos tenen una baixa capacitat d'absorció d'humitat i una destacable estabilitat dimensional, rigidesa, força i resistència a la corrosió que, juntament amb les seves propietats mecàniques, fan que l'economia circular sigui una bona opció. Avui en dia es continuen buscant aplicacions i mètodes de reciclatge i reutilització per aprofitar aquests materials de qualitats profitoses. Al final, la millor opció en el cas dels materials compostos és buscar opcions de reutilització, ja que de moment no s'han trobat alternatives per prevenir-los ni maneres de reduir-ne els residus. És per això que en els últims anys s'han estat buscant propostes com la d'aquest projecte en que no és necessari cap tractament tèrmic ni químic per tal de fer que l'ús dels materials compostos no sigui tan insostenible i perjudicial per al medi ambient.

5 Implicació del treball en l'actualitat ambiental

A mesura que va creixent la consciència sobre la necessitat de preservar el medi ambient i promoure un desenvolupament sostenible, han aparegut els 17 Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS) i l'Agenda 2030. La llista d'objectius es pot veure a la Figura 6. Aquests objectius abasten dimensions socials, econòmiques i ambientals d'interès global. En aquest context, la investigació i l'aplicació de solucions innovadores així com la recerca que fomenti un futur més sostenible prenen un paper fonamental.

Aquest treball té com a principal objectiu abordar l'Objectiu de Desenvolupament Sostenible número 12 (ODS 12, Figura 7). L'ODS 12 (Garantitzar modalitats de consum i producció sostenibles.) busca promoure la gestió sostenible i l'ús eficient dels recursos naturals, reduir la generació de residus i el desaprofitament d'aliments, així com fomentar la gestió ecològica racional dels productes químics [17]. Actualment, la petjada



Figura 6: Objectius de desenvolupament sostenible [16].

material està creixent tan de pressa que separa la població i el creixement econòmic.



Figura 7: Icona de la ODS 12. Producció i consum responsables. [17]

La Generalitat de Catalunya, d'acord amb aquests objectius s'ha marcat les seves fites per el 2030. En el marc d'aquestes fites, aquest treball aborda principalment els següents objectius [16]:

- Fita 12.2. Per a 2030, assolir la gestió sostenible i l'ús eficient dels recursos naturals.
 - Objectiu 625: Minimitzar el consum de recursos maximitzant la circularitat i allargar la vida del producte mitjançant la promoció de la reparació, la reutilització i la re-manufactura.
- Fita 12.5. Per a 2030, disminuir de manera substancial la generació de residus mitjançant polítiques de prevenció, reducció, reciclatge i reutilització.
 - Objectiu 643. Reduir els residus municipals destinats a dipòsit o a incineració almenys en un 50% a 2030 respecte el 2015.
 - Objectiu 644. Reduir els productes d'un sol ús.

Com s'ha explicat a la introducció d'aquest treball actualment les restes de FRP que arriben al fi de la seva vida són dipositades, amb aquest treball es proposa poder utilitzar aquests materials que es disposen

(643), allargant-los la vida (625) i així convertint els FRP en materials d'almenys més d'un sol ús (644). Aquest enfocament s'ajusta als principis de l'economia circular, on els materials es reutilitzen, reduint així l'impacte sobre els recursos naturals i minimitzant la generació de residus. D'una manera més subtil, aquest treball també encoratja a les empreses (en especial les grans, en aquest cas les aeronàutiques) a adoptar pràctiques sostenibles, com marca la Fita 12.6 de la Generalitat de Catalunya.

6 Materials compostos en la construcció

6.1 Utilitat i importància

El formigó és actualment un material molt utilitzat en la construcció a causa dels seus avantatges estructurals. La seva resistència a compressió i la seva durabilitat són dues de les seves millors propietats. Tot i això, té una baixa resistència a tracció i molt baixa ductilitat. Per superar aquesta limitació, el formigó es reforça amb armadures d'acer, combinació que es denomina formigó armat o RC (de l'anglès *reinforced concrete*). L'acer li proporciona una alta ductilitat i una resistència addicional a tracció que fa que les bigues siguin més duradores i que disminueixi la fragilitat de la biga [18].

El 1960 va aparèixer per primer cop la idea d'enganxar plaques d'acer a les bigues per tal de reforçar-les i així donar a l'estructura millors prestacions estructurals. S'enganxaven sota les bigues amb l'ajuda d'adhesius, tal com mostra la Figura 8 d'Hermite et al. [19], un dels primers estudis que va desencadenar el que ara es coneix com a EBR (de l'anglès *Externally Bonded Reinforcement*). L'EBR és una tècnica en què s'aplica una placa d'un material de reforç amb l'ajuda d'un adhesiu [20]. Un dels primers ponts en ser reforçat amb plaques d'acer fent servir la tècnica EBR va ser el 1980, el pont Gizenenbridge a Suïssa.

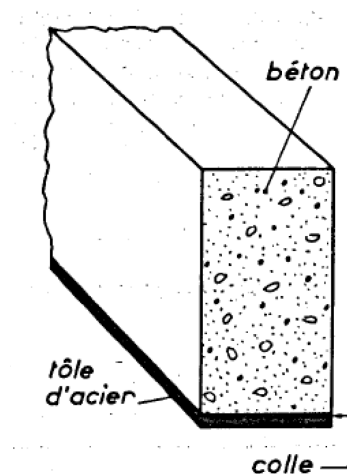


Figura 8: Reforç extern d'una biga amb una placa d'acer. Font: Hermite et al. [19].

Com s'ha explicat anteriorment, els CFRP destaquen degut a la seva resistència, durabilitat i baix pes.

A voltants del 1980, investigadors de la Empa van desenvolupar la idea d'utilitzar CFRP com a reforç enlloc de l'acer. El 1987 van publicar la viabilitat del CFRP com a reforç de bigues del sector de la construcció [21]. Tot i que l'interès general de l'estudi va ser gran, en un inici, degut a l'alt cost de les fibres de carboni se'n va desconfiar. Altres estudis amb propostes diferents van anar sorgint i al llarg dels anys s'ha anat confiant en la tècnica, tant amb CFRP com amb altres tipus de FRP, esmentats anteriorment [22]. Més endavant va aparèixer una altra tècnica anomenada NSM (de l'anglès *Near Surface Mounted*) que consisteix a inserir seccions més petites de FRP dins una regata a la base del formigó. Com demostren diversos estudis com ara el de Bilotta et al. [23], aquesta última tècnica ha resultat ser més efectiva pel fet que “els fenòmens del desenganxament són menys rellevants i, per tant, s'aprofita millor la resistència a tracció del FRP” i a més a més el material compost queda protegit de possibles fonts externes que el puguin danyar.

A la Figura 9 es mostren les dues tècniques existents de reforç de bigues per FRP. Tal com es pot observar, actualment es reforcen amb acer a l'interior (formigó armat) i a més a més, amb FRP. El conjunt del material compost amb el formigó armat resulta molt resistent gràcies al formigó i al reforç de FRP però sense perdre la ductilitat gràcies a l'acer.

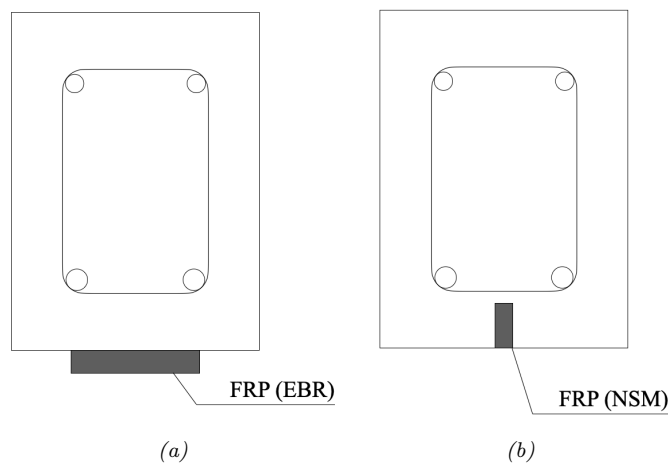


Figura 9: Esquema d'una biga reforçada amb (a) EBR i (b) NSM.

Estudis com per exemple el d'Alabdulhady et al. [24] en que s'estudia l'eficiència del reforç de CFRP com a mètode de reparació de bigues de formigó en 8 bigues amb diferents resistències a compressió (f_c), ha demostrat increments en la càrrega màxima del 54.5%. A la Taula 1 es mostren els resultats obtinguts per aquest estudi pel que fa a les bigues reforçades i el tipus de falla que hi ha hagut en cada cas. A la Taula 2 es mostren els resultats d'aquest mateix estudi de les bigues reparades, amb increments de la càrrega màxima de fins el 44.9%.

Tot i així, altres estudis, com el de [25] mostra increments de la càrrega màxima d'un 150% respecte a la biga original de control.

f_c (MPa)	P_u biga de control (kN)	P_u biga reforçada (kN)	Increment de P_u	Tipus de falla
21.1	86.3	129.4	50%	Desenganxament
36.1	107.9	166.7	54.5%	Ruptura de les fibres
48.2	125.0	171.6	37.3%	Desenganxament
68.5	127.5	186.3	46.2%	Desenganxament

Taula 1: Resultats estudi d'Alabdulhady, M. et al. [24] pel reforç de bigues de formigó de diferents f_c .

f_c (MPa)	P_u biga de control (kN)	P_u biga reforçada (kN)	Increment de P_u	Tipus de falla
21.1	86.3	122.6	44.9%	Delaminació
36.1	107.9	127.5	18.2%	Desenganxament
48.2	125.0	137.3	9.8%	Desenganxament
68.5	127.5	142.2	11.6%	Ruptura de les fibres

Taula 2: Resultats estudi d'Alabdulhady, M. et al. [24] per la reparació de bigues de formigó de diferents f_c .

6.2 Tipus de falla

La vida útil que es preveu del conjunt del formigó armat amb l'FRP és de 50 anys [26]. Tot i això, com s'ha vist en l'exemple de l'estudi d'Alabdulhady, M. et al. [24], existeixen alguns mètodes de falla que poden fer que falli o que fins i tot no arribi a durar tants anys. En primer lloc, es pot desenganxar l'FRP del bloc que formigó, en les diferents interfases de material que es mostren a la Figura 10. En segon lloc, pot fallar el formigó, això passa quan s'arriba abans a la deformació última del formigó que a la dels altres materials. En tercer i últim lloc, pot fallar l'FRP de diferents maneres. Per exemple, quan parlem de delaminació ens referim al fet que el reforç que estava format per diferents capes de fibres a diferents orientacions ha fallat i s'han separat algunes de les capes de la resta de material, es pot veure un exemple de delaminació a la Figura 11. En aquests casos s'estan aprofitant totes les propietats del FRP. En el cas que es tracti de ruptura en un dels components serà degut a la resistència d'aquell component, en cas que es trobi entre l'adhesiu i un dels altres dos components serà degut a un problema de l'adhesiu.

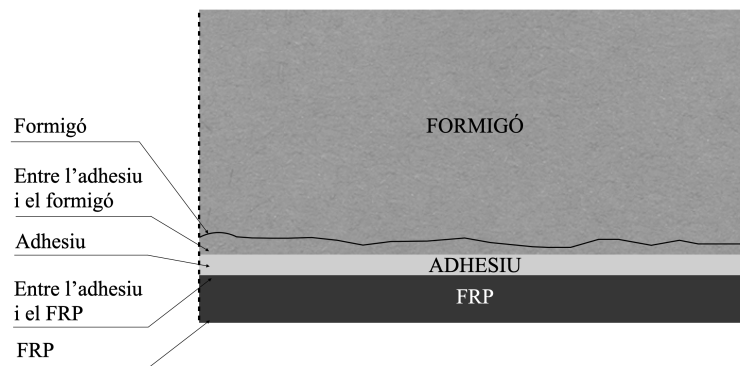


Figura 10: Falles per adherència entre el FRP i el formigó.

El primer cas esmentat de falla de l'estructura demostra la importància d'una bona adherència entre el formigó i el material compost. Una bona adherència pot permetre que les fissures siguin més estretes i que

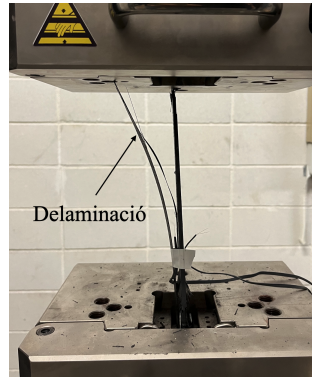


Figura 11: Exemple de falla de FRP per delaminació.

es distribueixin millor. A més a més, també poden minimitzar la curvatura gràcies a una millor rigidesa de la secció del conjunt. És important evitar la desenganxament degut a que podria provocar que l'estructura fallés de manera inesperada. És per això que en adherir el material compost al formigó s'han de seguir les indicacions del fabricant de l'adhesiu així com assegurar-se que la superfície està neta i que es deixa curar el temps necessari. En aquest estudi es considerarà adherència perfecte.

7 Caracterització del material reciclat

7.1 Estudi microscòpic del material

El material que es farà servir en aquest estudi es tracta d'un material que prové d'una aplicació aeronàutica no coneguda. No es coneix quina era la seva funció ni quines poden ser les seves propietats. Només se sap que es tracta d'un material compost. Observant-lo es pot veure que sembla ser un laminat amb capes a diferents direccions.

A fi d'entendre la composició del material, s'han examinat amb el microscopi òptic dos fragments dels dos laminats del material compost de gruixos totals diferents (4 mm i 8 mm) per, en primer lloc, confirmar que es tracta d'un laminat, i a més a més, a determinar l'orientació de les fibres a cada capa del laminat, determinar el gruix de cada una de les capes i el nombre de capes totals del laminat. Aquesta informació serveix per posteriorment obtenir les propietats mecàniques de les capes del material i per veure si les propietats del laminat més prim (nombre de capes i orientacions) tenen alguna relació amb les del material més gruixut. En moltes ocasions, quan existeixen dos laminats del mateix material i un d'ells té el doble de gruix que l'altre, s'observa que el laminat més gruixut presenta la mateixa microestructura que el més prim, però repetida dues vegades, com si es tractés de la superposició de dos laminats primos. Com es veurà més endavant, no és el cas dels laminats estudiats.

A la Figura 12 es mostra la microscòpia d'una de les capes d'un dels laminats que es farà servir d'exemple per l'explicació de l'anàlisi de l'estudi microscòpic.

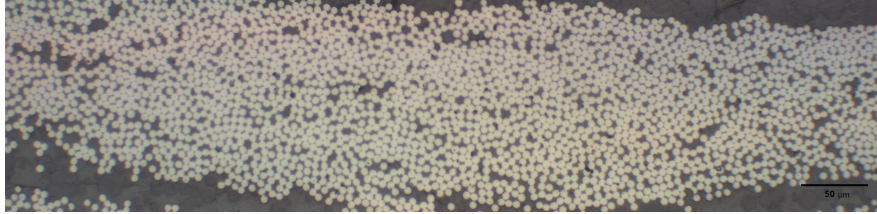


Figura 12: Microscòpia de la segona capa del laminat de 4 mm.

7.2 Anàlisi de l'estudi microscòpic

Actualment, existeixen programes específicament pensats per a l'anàlisi de les propietats d'una microscòpia, com per exemple *Fiji*. Aquest programa permet segmentar i identificar diverses propietats de partícules i hauria estat útil per aquest projecte. Tot i això, es va veure que per tal d'analitzar una sola imatge s'hi ha de dedicar un temps significatiu. Tenint en compte que en aquestes dues microscòpies ja es tenien al voltant de 60 imatges i pensant en la possibilitat d'estudiar futurs materials, s'ha creat un programa amb Python per tal d'accelerar i automatitzar el procés d'anàlisi de les microscòpies. Aquest programa basa els seus resultats en el processament d'imatge i s'ha comprovat el seu correcte funcionament amb el programa Fiji esmentat anteriorment.

El programa fa una iteració per anar processant totes les fotos d'una carpeta que ha de contenir totes les microscòpies, una per cada capa del laminat. En primer lloc, passa cada una per una escala de grisos per tal de poder-li fer un difuminat. Els difuminats són molt útils a l'hora de segmentar, ja que eliminen part del soroll de la imatge [27]. Tot seguit se li aplica un *adaptive thresholding*; una funció de la llibreria *OpenCV* [28] que té com a finalitat convertir la imatge que fins ara era una escala de grisos, a una imatge amb només blanc i negre. Per tal de fer això, recorre tota la imatge i per cada secció que analitza, tenint en compte els paràmetres que s'han especificat en cridar la funció, decideix quins píxels han de ser de color blanc i quins negres.

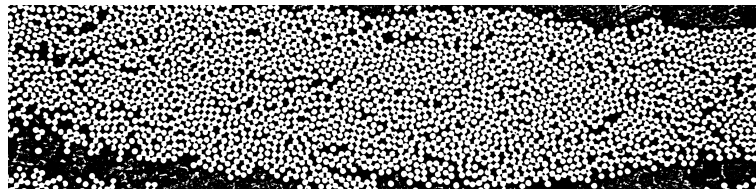
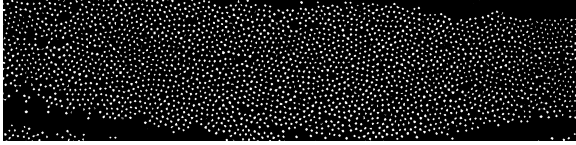


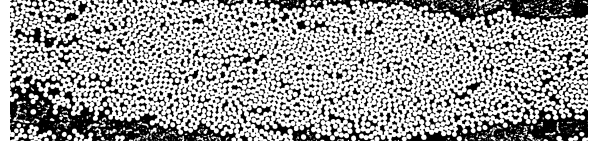
Figura 13: Resultat de la imatge de la capa 2 del laminat de 4 mm després de l'aplicació de l'*adaptive thresholding*.

Tot i que la imatge que s'aconsegueix en aquest moment, tal com es pot veure a la Figura 13 ja és més segmentable, es fa servir un altre tractament per a separar les fibres que hagin pogut quedar unides o les

zones que hagin pogut quedar marcades com a partícules i formen part del fons. En primer lloc, tal com mostra la Figura 14a, fent una erosió sobre la imatge, s'extreu el que es pot assegurar el que és fibra i fent una dilatació el que es pot assegurar que és fons, Figura 14b [29].



(a) Resultat de la imatge després d'aplicar-hi una erosió i obtenir el que es pot assegurar que és fibra.



(b) Resultat de la imatge després d'aplicar-hi una dilatació i obtenir el que es pot assegurar que és fons.

Figura 14: Fons i fibra de la capa 2 del laminat de 4 mm.

Tot seguit es resten les dues imatges i s'obté la zona de la imatge que no se sap ben bé si és fibra o fons. També s'assigna un número diferent a cada zona de color blanc de la Figura 14a, fet que fa que posteriorment es pugui assignar un color diferent a cada fibra. Amb tota aquesta informació, s'utilitza una funció anomenada *watershed*; aquesta funció tracta les intensitats altes de la imatge com a elevacions d'un paisatge i troba les carenes que separen les "muntanyes". Així pot crear una línia que separa les fibres, tal com es mostra a la Figura 15.

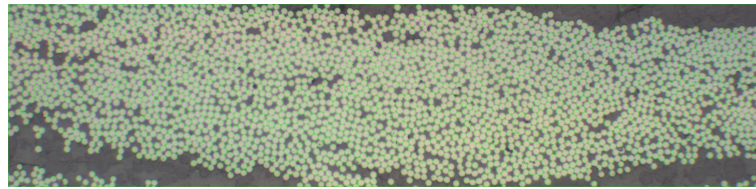


Figura 15: Resultat de la imatge de la capa 2 del laminat de 4 mm segmentada.

A partir d'aquí, com s'ha esmentat anteriorment, es pinta cada una de les fibres d'un color diferent, fet que ens permet aïllar-les i extreure'n la informació necessària a partir dels píxels que ocupa cada un dels colors. Tot seguit, es compten el nombre de píxels en el centre de la partícula, tant de manera vertical com horitzontal, obtenint així els dos diàmetres. Posteriorment, es calcula la ràtio d'aquests dos diàmetres per tal de saber com de circular és cada una. A continuació, a fi i efecte de saber la inclinació de les fibres de cada capa, s'ha suposat, tal com mostra la Figura 16, que el diàmetre vertical (que s'anomenarà d_y) que es veu a la microscòpia és el diàmetre natural de la fibra i que, per tant, la fibra només està inclinada en una direcció, fet que idealment hauria de ser cert. S'anomenarà d_x al diàmetre horitzontal que es calculi a la microscòpia.

Assumint que les fibres son circulars i que, per tant, els dos diàmetres haurien de ser iguals, l'angle al qual es troba inclinada la fibra es pot calcular amb l'Equació (5). En el cas que dy sigui més gran que dx el programa suposarà que l'angle és 0, ja que, si les fibres estan ben orientades, es tracta d'un error en la segmentació i el més probable és que es tracti d'una fibra a 0° .

$$\alpha = \arccos\left(\frac{dy}{dx}\right) \quad (5)$$

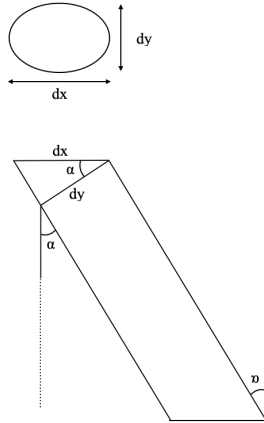


Figura 16: Esquema per al càlcul de l'angle de les fibres d'una capa d'un laminat.

Finalment, també es compten el nombre de píxels totals que ocupa cada partícula i es divideix entre el nombre total de píxels que es troben a la imatge. Això permet obtenir el % de fibra de la capa. Amb totes aquestes dades de cada làmina i sabent que l'escala de les imatges és de 6.08 píxels/ μm , s'han extret els resultats de la Taula 3. La primera capa de totes es tracta d'un teixit entre fibres a 90 i fibres a 0 graus, fet que es podia intuir a simple vista.

Per tal d'assegurar que aquest programa de Python serveix per a aquest projecte per substituir la feina que s'hauria de fer amb el programa Fiji s'ha fet l'estudi per una de les capes de les dues maneres i s'ha pogut comparar el % de fibra i la mida dels diàmetres. S'ha vist que hi ha una diferència relativa entre els dos mètodes d'aproximadament el 3.5%.

Amb la microscòpia feta anteriorment pel laminat d'aquest projecte no es pot determinar la inclinació dels angles de 45 i per tant no es pot saber si es tracta de 45 o -45, ja que en els dos casos la seva secció és la mateixa. Tot i així, s'ha de suposar que s'ha fabricat tant balancejat com s'ha pogut i veient que hi ha un nombre parell de capes a 45 es pot suposar que la meitat son a 45 i l'altra meitat a -45. De la mateixa manera, les fibres les quals els seus càlculs donen valors al voltant de 85, s'han considerat de 90 ja que observant les microscòpies es pot veure clarament que es tracten de fibres orientades horitzontalment. Distribuïdes de manera coherent el laminat de 4 mm podria ser denominat com: $(0_2/45/-45/0_2/45/0/-45/90/-45/0_2/45/0_2/-45/90/45)$. A simple vista es pot observar que no es tracta d'un laminat simètric.

La taula resum de les propietats del laminat de 8 mm es pot trobar a l'Annex A i els seus angles podrien ser denominats com: $(0/45/0/-45/0_3/45/90/-45/0_2/45/0_3/-45/90/-45/0_2/45/0/-45/0_2/-45/90/45/0_2/-45/0/45/90/-45)$. Tal com es pot veure, no té cap relació amb la microestructura del laminat més prim i no es tracta de dos laminats de 4 mm apilats.

Taula 3: Informació extreta de la microscòpia del laminat de 4 mm

Capa	Gruix (μm)	dy (μm)	dx (μm)	Ràtio (dy/dx)	Angle (graus)	Fibra (%)
1 (teixit)	333.72	3.75	5.76	0.91	28.96	40%
2	159.07	4.90	4.73	1.06	0.00	56%
3	176.12	4.74	4.52	1.09	0.00	50%
4	175.47	4.97	6.75	0.76	43.53	52%
5	167.92	4.89	7.00	0.74	47.01	52%
6	200.56	4.83	4.66	1.08	0.00	49%
7	175.96	4.75	4.57	1.07	0.00	49%
8	190.88	4.86	6.71	0.76	44.90	55%
9	188.09	4.82	4.65	1.08	0.00	49%
10	186.95	4.78	6.79	0.76	45.21	51%
11	188.26	2.19	70.51	0.23	85.47	44%
12	211.54	4.88	6.72	0.75	43.87	49%
13	191.21	4.84	4.75	1.05	0.00	50%
14	191.37	4.79	4.71	1.06	0.00	47%
15	195.63	4.88	6.85	0.73	45.21	51%
16	197.44	4.74	4.62	1.06	0.00	50%
17	173.00	4.84	4.90	1.07	0.00	48%
18	213.02	4.81	6.65	0.77	45.21	51%
19	178.25	2.95	50.38	0.49	83.31	46%
20	190.72	4.71	6.59	0.77	45.76	48%

7.3 Assaigs a tracció

A fi de saber les propietats del laminat s'han dut a terme un seguit d'assaigs a tracció. Per experiència en altres assaigs duts a terme anteriorment en el mateix laboratori, se sabia que la presa de les provetes era susceptible a fallar. És per aquest motiu que s'ha dut a terme un intent de la millora de la presa de la peça. S'han afegit als extrems de les provetes unes plaques d'alumini amb un acabat superficial rugós que genera més fregament i permet agafar-se millor a la màquina, tal com es pot veure a la Figura 17. Aquestes plaques han estat enganxades amb resina epoxi i deixant-se curar durant les hores especificades pel fabricant per tal d'evitar la desunió abans de la ruptura.

També es pot observar, a la mateixa Figura 17, que s'ha col·locat una galga extensomètrica per costat a cada proveta de laminat per tal de, posteriorment, extreure'n les dades per caracteritzar-lo. S'utilitzen dues galgues, una a cada costat, per tal de tenir en compte els efectes de la flexió. El valor que s'utilitza és la mitjana entre els valors de les dues galgues. Les galgues que s'han utilitzat son de factor 2.1 i de resistència 350 Ω .



Figura 17: Fotografia d'una proveta amb plaques d'alumini als extrems.

En total s'han assajat 7 provetes diferents, totes amb un gruix al voltant de 4 mm. Per calcular la secció de cada una de les provetes s'han agafat tres mesures de gruix i tres d'amplada per cada proveta, les mitjanes d'aquestes mides es poden trobar a la Taula 4. Les propietats de cada una de les provetes i els resultats que s'han obtingut a partir de la informació de les galgues es poden trobar a la Taula 5. Per tal d'obtenir la deformació s'ha fet la mitjana dels valors de les dues galgues i per obtenir el mòdul de Young s'han agafat els valors de la tensió normal al 0.05% i al 0.25% tal com indica la norma ISO 527-1 [30]. A la Figura 18 es mostren les corbes tensió-deformació de totes les provetes.

Taula 4: Mitjana de les mesures de gruix i amplada de les diferents provetes.

Proveta	Gruix	Amplada
1	4.2	49.8
2	4.2	50.5
3	4.2	50.2
4	4.1	50.8
5	4.3	47.6
6	4.4	49.2
7	4.3	50.0

Taula 5: Propietats de cada una de les provetes assajades.

Proveta	Secció (mm ²)	Tensió màxima (MPa)	Deformació màxima	Mòdul de Young (MPa)
1	209.2	- ^a	0.005262	79884
2	212.1	1339	0.015472	80124
3	210.8	- ^a	0.013409	82243
4	208.5	1350	0.015725	86605
5	204.6	1474	0.016628	83990
6	216.4	1184	0.013850	81847
7	215.0	1217	- ^b	- ^b

^a La biga ha perdut adherència abans de fallar.

^b Les galgues han fallat.

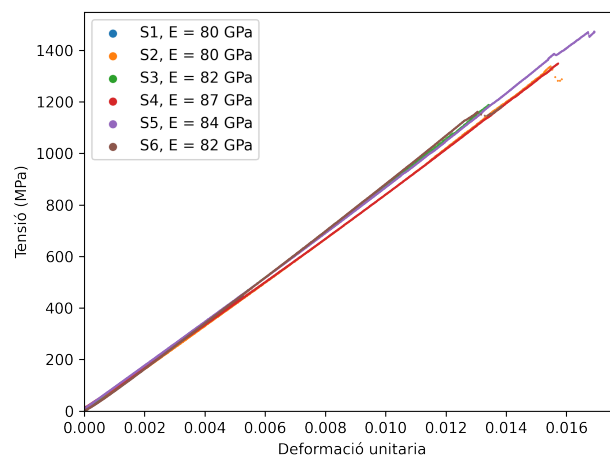


Figura 18: Gràfic del comportament tensió-deformació de les provetes assajades.

Algunes de les primeres provetes que van ser assajades van perdre adherència abans d'arribar al punt de ruptura. És el cas de per exemple la primera proveta, tal com es pot veure a la Figura 19a la peça va

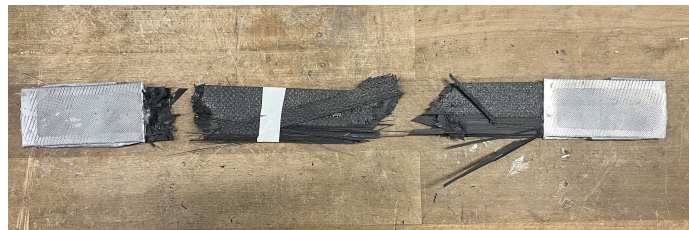
començar a deformar-se, però no va poder arribar a la seva tensió màxima degut a que el laminat va perdre l'adherència amb les plaques d'alumini que el subjectaven a la màquina. El mateix va passar amb la proveta 3. Pel que fa a la proveta 7 no es mostren valors per la deformació degut a que les galgues van fallar des del principi de l'assaig. Tot i això, aquesta proveta no va perdre adherència entre la proveta i la placa d'alumini.

Per les 3 provetes restants es va incrementar la rugositat de les plaques d'alumini i després de deixar curar la resina epoxi es van poder assajar i així sí que van arribar totes a la ruptura, tal com es pot veure per les provetes 4 i 5 a les Figures 19b i 19c respectivament.



(a) Proveta 1, exemple de pèrdua d'adherència.

(b) Proveta 4, exemple de ruptura total.



(c) Proveta 5, exemple de ruptura total per dos punts.

Figura 19: Exemples de fallada durant els assaigs a tracció.

Considerant els valors del mòdul de Young la Taula 5 s'ha calculat una mitjana de 82450 MPa amb una desviació típica de 2532 MPa i un coeficient de variació de 3%. Així doncs, podem considerar que les dades tenen una baixa variabilitat. Tenint en compte les provetes que no han perdut adherència, la mitjana de la resistència és de 1313 MPa, amb una desviació típica de 115.7 i amb un coeficient de variació de 9%, que es pot considerar de baixa variabilitat.

Tot i que com s'ha vist en els resultats de la microscòpia no es tracta d'un material simètric, el comportament de les dues galgues posicionades una a cada un dels costats del laminat és pràcticament el mateix, fet que fa que es comporti com un laminat simètric.

7.4 Aplicació de la teoria de laminats

Com s'ha explicat anteriorment, es poden saber les propietats del laminat a partir de la informació de cada capa i de les propietats del material, tal com mostra l'esquema de la Figura 20. En el cas de no saber les propietats del material de cada capa, com és el cas del material d'aquest projecte, es pot dur a terme el procediment invers, de dreta a esquerra i es poden trobar a partir de les propietats dels assaigs a tracció del laminat. Tot i això, el procediment invers només es pot dur a terme en el cas de tenir el mateix material per totes les capes. En cas de tenir més materials s'hauria d'utilitzar un altre enfocament de la teoria de laminats.

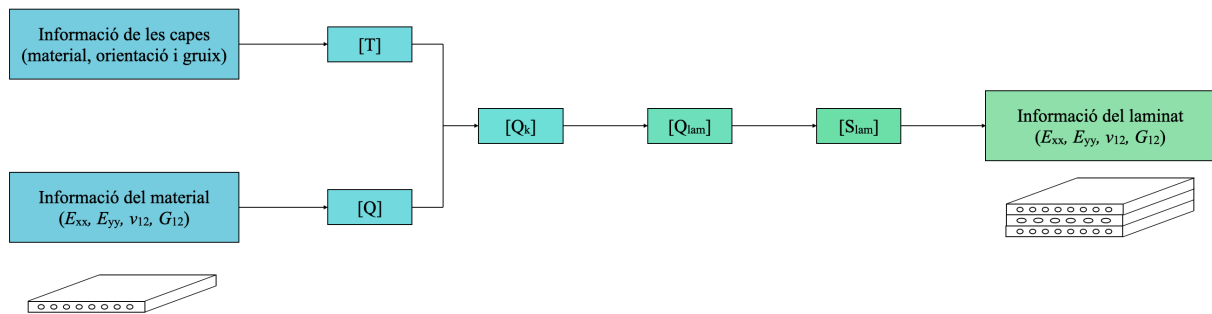


Figura 20: Diagrama de blocs de l'obtenció de les propietats d'un laminat qualsevol a partir de la informació del material.

Per aquest projecte només s'ha pogut assajar el mòdul elàstic en direcció longitudinal a la llargada del laminat. La resta de propietats han estat estipulades de manera coherent pel que fa a les propietats d'altres materials semblants. Tenint en compte el valor de E_{xx} obtingut al laboratori s'han estipulat els valors en blau de la Taula 6. Aquestes propietats es podrien haver trobat amb galgues extensomètriques transversals a l'assaig a tracció i assaigs a tracció en la direcció y . Els números que s'han estipulat de manera coherent, en aquest cas, són números una mica peculiars. La seva peculiaritat es deu al fet que una combinació de números qualsevol aleatòria, encara que els valors fossin molt propers als que tenim en aquest cas, ens podria estar dient per exemple el coeficient de Poisson en una de les làmines és negatiu. Com que se sap que això és impossible s'han buscat valors que, en primer lloc, fossin coherents en comparació a materials semblants (valors del mateix ordre) i, en segon lloc, que la seva combinació no generés valors impossibles.

Aquestes propietats es podrien haver obtingut realitzant assajos, però la configuració del material no permet tallar les provetes en direcció transversal i en fa difícil la seva determinació. És per això que s'ha optat per suposar aquestes altres propietats del laminat.

Taula 6: Propietats estipulades pel laminat de 4 mm.

Propietat	E_{xx} (MPa)	E_{yy} (MPa)	ν_{12}	G_{12} (MPa)
Valor	82450	40292	0,35	18221

A partir d'aquestes propietats, seguint el procés invers de la teoria de laminats explicada i fent un sistema

de matrius amb la matriu Q_k d'incògnita, s'han pogut trobar les propietats del material. Amb les propietats del material és possible aconseguir les propietats de qualsevol laminat amb qualsevol configuració. A l'esquema de la Figura 21 es mostra el procés simplificat. De la mateixa manera que seguint la direcció 1 es pot obtenir informació de cada capa (a partir del laminat de 4 mm de gruix), seguint la direcció 2 es pot obtenir informació del laminat (en aquest cas de 8mm).

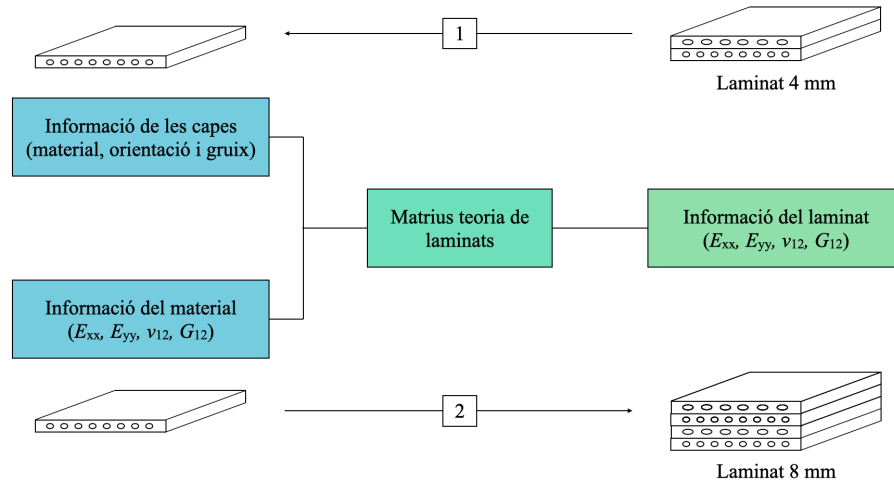


Figura 21: Diagrama de blocs del procés d'utilització de la teoria de laminats.

A la Taula 7 es mostren les propietats trobades del laminat de 8 mm. Aquesta teoria estalvia haver de perdre mostres de laminats i recursos fent assaigs a tracció. Amb la informació aconseguida es poden calcular les propietats per qualsevol laminat d'aquest mateix material amb qualsevol configuració de capes. Els laminats de 8 mm no es van poder assajar, però els resultats son aparentment coherents.

Taula 7: Taula propietats elàstiques de cada laminat i del material.

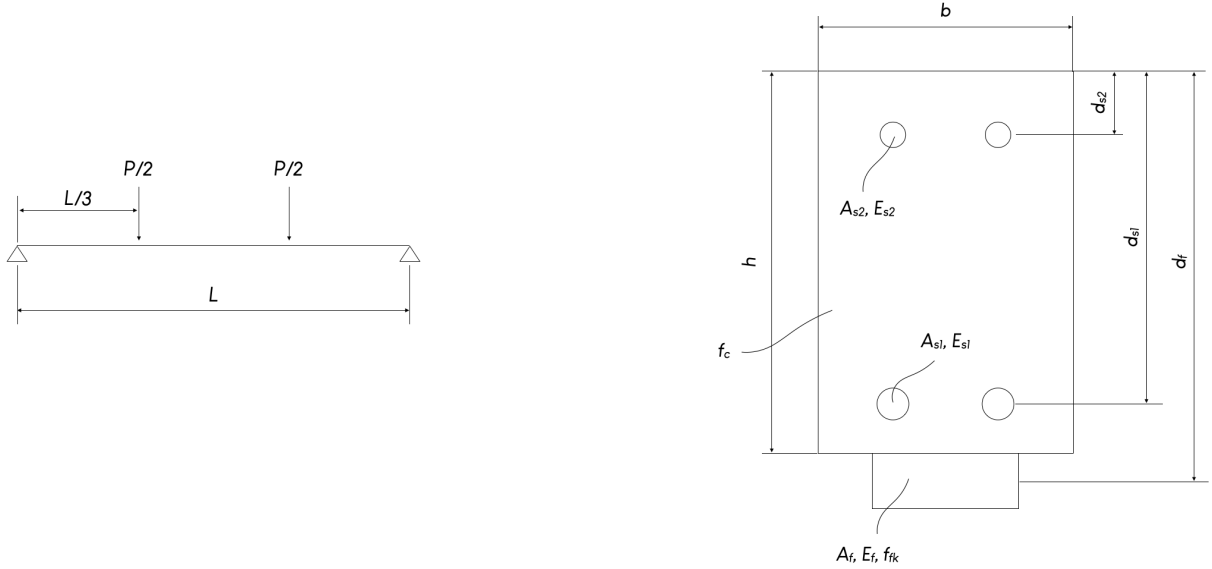
Propietat	Material	Laminat 8 mm
E_{xx} (MPa)	145471	87279
E_{yy} (MPa)	10402	36893
ν_{12}	0.19	0.36
G_{12} (MPa)	5221	17506

8 Anàlisi estructural a flexió d'una biga reforçada amb materials compostos

8.1 Metodologia de l'anàlisi estructural a flexió

L'anàlisi estructural és un procés que implica l'avaluació del comportament d'una estructura. En aquest cas, se n'ha elaborat un per calcular la capacitat a flexió d'una biga de formigó armat reforçada amb un

material compost, com es mostra a la Figura 22. Així es pot predir la resposta càrrega-deformació per uns paràmetres de biga reforçada determinats. En els esquemes el subíndex c fa referència al formigó, s a l'acer i f al reforç FRP.



(a) Esquema de la biga amb les posicions de les càrregues per un assaig de flexió a 4 punts.

(b) Esquema de la posició dels reforços per una secció de la biga.

Figura 22: Esquema de la biga amb càrregues aplicades i els reforços.

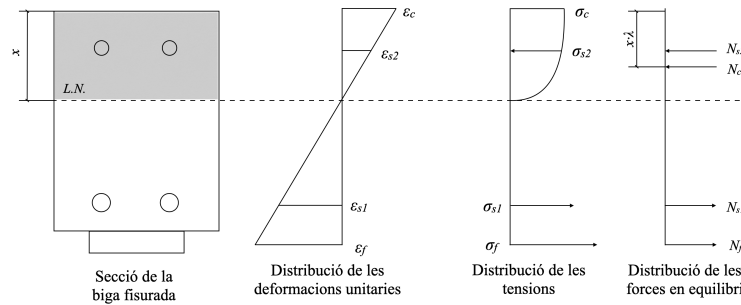


Figura 23: Anàlisi seccional de la biga fissurada.

Aquesta anàlisi consta de tres parts entre les quals s'obtidran el moment en secció fissurada i el moment en secció no fissurada. En primer lloc, se suposa que la zona de formigó sotmesa a tracció està totalment fissurada. L'esquema de la secció fissurada a tenir en compte per una biga totalment fissurada és el de la Figura 23. A partir d'aquest esquema es calcula el moment flector que aguanta la secció:

$$M_n = \sigma_1 A_{s1} (d_{s1} - x\lambda) + \sigma_2 A_{s2} (x\lambda - d_{s2}) + \sigma_f A_f (d_f - \lambda x) \quad (6)$$

On λ és el factor de modificació de la línia neutra pel bloc de formigó a compressió. Aquest factor depèn

de la deformació unitària del formigó i es calcula amb l'Equació (7). Per tal de trobar les tensions (σ) per a tots els materials, es troba la relació entre les diferents deformacions, seguint a la distribució de deformacions unitàries de la Figura 23. En el cas que la tensió de l'acer sigui més alta del valor de resistència de fluència determinat (en aquest cas de 586.4 MPa), s'assigna aquest valor a la tensió. Un cop calculat el moment per cada deformació del formigó també es calcula la curvatura de la secció de la biga seguint l'Equació (8) on ε_c és la deformació unitària del formigó a la fibra més comprimida i x és la posició de la línia neutra.

$$\begin{cases} 0 < \varepsilon_c < 0.002 \rightarrow \lambda = \frac{8-1000\varepsilon_c}{4(6-1000\varepsilon_c)} \\ 0.002 < \varepsilon_c < \varepsilon_{cmax} \rightarrow \lambda = \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-4)+2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-2)} \end{cases} \quad (7)$$

$$c = \frac{\varepsilon_c}{x} \quad (8)$$

Per altra banda, se suposa que la secció no fissura mai. A la Figura 24 es mostra l'anàlisi seccional de la biga sense fissurar. Com que no fissura, a diferència de l'anterior, es pot considerar que el formigó es comporta de manera lineal. En aquest cas, per trobar el moment a la secció de l'estudi s'utilitza es fa servir l'equació de Navier:

$$M_{nf} = \frac{\varepsilon_c}{x_n} E_c I_{ucr} \quad (9)$$

On I_{ucr} és el moment d'inèrcia i x_n és la nova profunditat de la línia neutra i pot ser extreta del càlcul del primer moment d'inèrcia:

$$A_{s2}(n_{s2} - 1)(x - d_{s2}) + 0.5bx^2 - A_{s1}(n_{s1} - 1)(d_{s1} - x) - A_f(n_f - 1)(d_f - x) - 0.5(h - x)^2b = 0 \quad (10)$$

On n_{s1} , n_{s2} i n_f son les relacions modulars, és a dir, la relació entre el mòdul elàstic del respectiu material i el formigó.

Tot seguit es calcula el moment de fissuració de la biga amb:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} I_{ucr}}{h - x_n} \quad (11)$$

On f_{ctm} és la resistència a tracció del formigó.

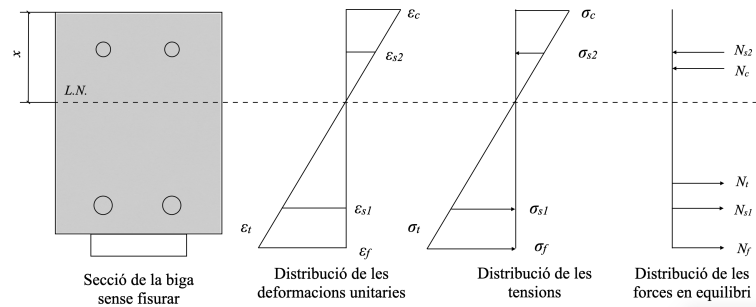


Figura 24: Anàlisi seccional de la biga sense fissurar.

Finalment, es fa una interpolació entre la resposta moment-curvatura de la biga totalment fissurada i la biga sense fissurar. La biga comença seguint el comportament de la biga sense fissurar i un cop comença a fissurar es va apropant al comportament de la biga totalment fissurada. A la Figura 25 es mostren les tres corbes. En primer lloc, l'anàlisi de la biga totalment fissurada, en segon lloc, sense fissurar i finalment la interpolació del comportament real de la biga.

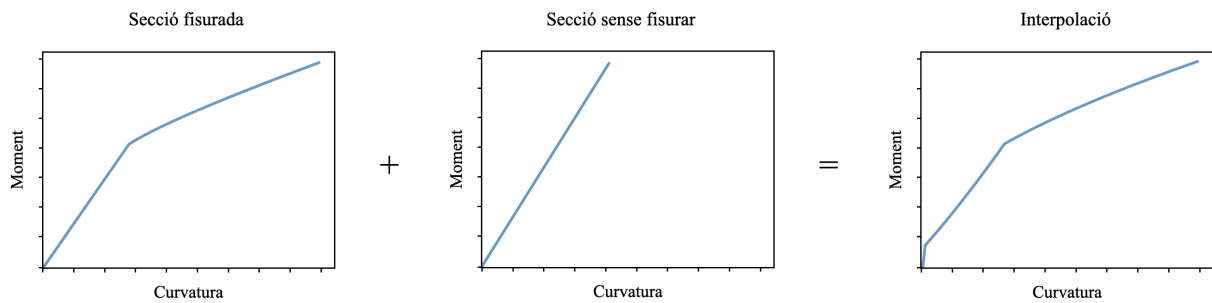


Figura 25: Anàlisi de secció fissurada i no fissurada de la biga.

Seguint la relació entre la curvatura i el moment o la relació entre la deformació unitària i la càrrega de l'esquema de la Figura 22a, es pot aconseguir la predicció de la resposta càrrega-deformació. A partir de la càrrega P aplicada a la biga es pot saber el moment al llarg de la biga (per exemple a cada mm) i es pot obtenir el diagrama de moments, que per una biga amb aquesta distribució de forces serà com el de la Figura 26.

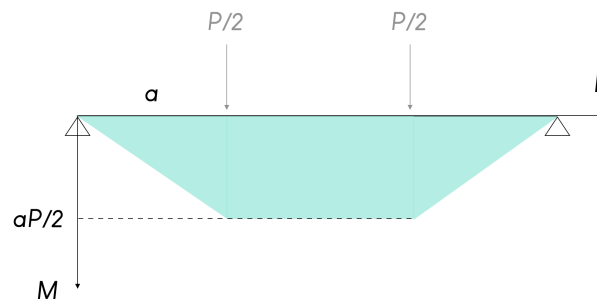


Figura 26: Diagrama de moments d'una biga amb dues càrregues.

A partir del moment, fent servir el mètode de la biga conjugada es pot trobar la fletxa al llarg de la biga.

Per tal de dur a terme aquest mètode es converteix el diagrama de moment flector de la Figura 26 en una càrrega on la magnitud de la càrrega en un punt és igual al valor del moment en aquell mateix punt i es crea una biga fictícia amb el diagrama de curvatures. Fent l'equilibri de moments d'aquesta nova biga fictícia s'obtenen les deformacions de la biga real. El programa de Python, que s'ha generat per fer l'anàlisi d'una manera més senzilla i automatitzada, relaciona la deformació al centre de la biga amb la càrrega aplicada i ho calcula per a diferents càrregues. A través d'aquests càlculs s'obté el gràfic de càrrega-deformació que té una forma semblant als gràfics de la Figura 25.

Com que en tot cas es té el valor de les deformacions unitàries i el valor de la deformació unitària màxima tant del formigó com del FRP, es pot determinar quin serà el primer en trencar. Com s'ha explicat anteriorment, existeixen diferents tipus de falla, analíticament en aquest treball només s'ha diferenciat entre ruptura del FRP o del formigó. El càlcul d'aquesta anàlisi s'ha programat amb Python i s'ha estipulat que es representi a la gràfica final si el que fa que la biga falli és la fissura total del formigó (assenyalat amb un rombe) o del FRP (assenyalat amb un cercle), tal com es mostra a la Figura 27. Aquesta simbologia s'utilitzarà d'ara endavant per totes les gràfiques del treball.

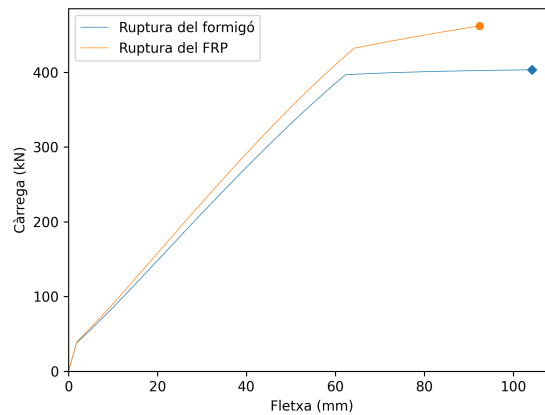


Figura 27: Corba càrrega-deformació de bigues amb diferents mètodes de falla.

8.2 Estudi paramètric

Els resultats obtinguts arran de l'assaig de tracció del material emprat en aquest treball mostren valors més baixos que els de la E_f dels CFRP comercials per a enginyeria civil (com ara de S&P o SIKKA). Això mateix passa amb els valors referents a la resistència a tracció. Aquestes dues diferències han fet que s'hagi de plantejar quina importància té la secció del reforç per tal de compensar-les i així obtenir rigideses o càrregues últimes similars. També s'ha volgut comprovar si en el cas de tenir reforços de rigideses i seccions baixes, els reforços poden servir per reforçar algun tipus de biga amb unes propietats concretes (ja sigui amb un tipus de formigó de menys prestacions o de secció més petita que l'habitual).

Amb la finalitat de determinar quines serien les condicions ideals per un material compost reutilitzat qualsevol, és a dir, en quina biga l'aplicació del material que s'intenta reutilitzar serà més eficaç, s'ha dut a terme un estudi paramètric de l'anàlisi estructural. S'han tingut en compte principalment unes qualitats semblants a les estudiades anteriorment però també per a possibles materials amb un mòdul elàstic o unes propietats geomètriques diferents.

L'estudi s'ha dut a terme principalment tenint en compte un assaig a flexió a quatre punts, que tal com el nom indica, té dos punts de suport als extrems i dos punts d'aplicació de càrrega (normalment i en el cas d'aquest estudi a $1/3$ i $2/3$ de la llargada total de la biga). En un cas de construcció industrial, per exemple, el més precís seria el de la càrrega repartida, ja que normalment en una biga s'hi tenen les càrregues repartides en àmplies àrees de la biga, en lloc de ser aplicades en uns punts discrets. En el moment de realitzar la prova al laboratori se sol utilitzar la prova a flexió a quatre punts, és per això que és el test que s'ha utilitzat per a l'estudi, ja que és el més pràctic pel que fa a la relació entre el material necessari per realitzar-la i els resultats que s'obtenen. És dels assaigs més habituals en estudis de recerca d'aquest àmbit.

A la Figura 28 es mostren tres tipus d'aplicació de càrregues habituals. Així queda representat que en augmentar la distribució de la càrrega, augmenta considerablement la càrrega màxima suportada i disminueix la fletxa resultant per al mateix nivell de càrrega. Per tal de poder comparar aquestes tres proves s'ha considerat que quan s'aplica només una força, té un valor de P , en el que se n'apliquen dues, de $P/2$ i la força distribuïda té un valor de P/L (sent L la longitud de la biga). Això permet comparar els valors de càrrega màxima que poden aguantar però aplicada en un punt, dos o repartida al llarg de la biga. En el cas d'aquest exemple s'ha fet l'anàlisi a la secció del mig de la biga reforçada, és per això que varia la fletxa màxima resultant en cada biga.

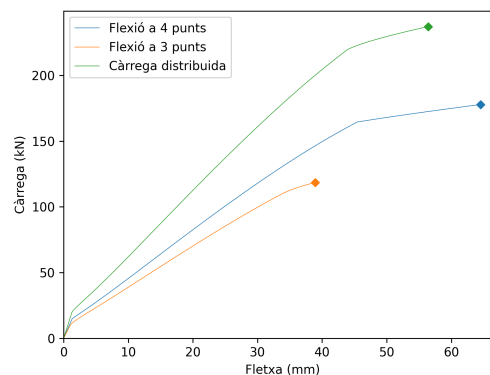


Figura 28: Representació gràfica de la diferència de resultats dels tres tipus de test.

L'objectiu principal d'aquest estudi és veure quins paràmetres són els més adequats en el cas de tenir un material compost que no ha estat concebut inicialment per a reforçar estructures civils. Per tal de proporcionar resultats viables pel futur disseny real de bigues reforçades amb materials reutilitzats, s'han hagut de posar algunes restriccions en el codi Python que s'ha generat per alguns dels paràmetres per seguir

les normatives vigents. En primer lloc, seguint les recomanacions de l'Eurocodi2 [31] s'ha limitat la relació entre l'alçada i la base de la biga de formigó a trobar-se entre:

$$1.5 < h/b < 2$$

En segon lloc, seguint el mateix codi de disseny s'ha establert que:

$$14 < L/d_s < 20$$

Sent L la llargada de la biga i d_s la distància entre l'acer i la superfície superior de la biga (anomenat cantell útil), valors que es poden entendre millor amb l'esquema de la Figura 22b.

La resposta que d'entrada sembla més important és la càrrega màxima que suporta cada biga. Tot i això, com es podrà veure més endavant, augmentar la càrrega vol dir posar en risc la ductilitat. Tot i que el principal objectiu d'una biga és que aguanti molt pes, una bona ductilitat li proporciona moltes més possibilitats de supervivència quan estigui sobrecarregada, sotmesa a un impacte accidental o per exemple a un terratrèmol [32]. Una bona ductilitat es pot avisar a temps que l'estructura està fallant i així evitar accidents sobtats.

El primer que s'ha fet per poder conduir un estudi que ens permeti treure conclusions clares és establir unes propietats estrictament constants que permetin jugar amb els paràmetres que poden variar d'una biga a una altra. És a dir, s'ha mirat quines bigues s'utilitzen actualment per a certes aplicacions i quin tipus de paràmetres tenen. En primer lloc, bigues per a l'edificació, s'han agafat bigues de 3 mides diferents:

- Biga 1: 200 × 350 mm de 5000 mm de llargada
- Biga 2: 300 × 450 mm de 6000 mm de llargada
- Biga 3: 400 × 600 mm de 8000 mm de llargada

Les bigues d'edificació segons normativa solen tenir una ρ al voltant de l'1% i s'ha establert una recobriment mecànic constant de 50 mm. La ρ és una quantia geomètrica que es calcula amb la següent fórmula:

$$\frac{A_s}{b \times d_s}$$

En segon lloc, s'ha agafat una biga amb mides de laboratori:

- Biga 4: 100 × 180 mm de 2500 mm de llargada

Per aquesta biga s'ha establert una recobriment mecànic de 20 mm i una ρ igual que per l'edificació.

Finalment, s'ha agafat una llosa de formigó per tal d'estudiar que passa en el cas que la base és considerablement més gran que l'altura del formigó:

- Llosa: 1000×180 mm de 5000 mm de llargada

Per a la llosa s'ha agafat un recobriment mecànic de 40 mm (normalment tenen valors més baixos però s'ha agafat aquest valor per qüestions comparatives amb les bigues). Pel que fa a la secció d'acer per la llosa no s'ha utilitzat el coeficient ρ sinó que s'han agafat valors de lloses reals, en aquest cas de:

$$A_{s1} = \frac{646 \times L}{1000}; A_{s2} = \frac{251 \times L}{1000}$$

Els rangs de les variables de l'estudi, és a dir, les propietats que seran estudiades per cada una de les bigues han estat les de la Taula 8.

Propietat	Rang per l'estudi
Resistència a compressió del formigó (f_c)	20-50 MPa
Àrea del material compost (A_f)	0-200 mm ²
Mòdul elàstic del material compost (E_f)	40-200 GPa
Resistència a tracció del material compost (f_{fk})	500-2900 MPa

Taula 8: Rang de propietats mecàniques i geomètriques considerades en l'estudi paramètric.

Tot i això, en els casos en què aquestes propietats s'havien de mantenir constants per poder facilitar la comparació, s'han utilitzat unes propietats aproximades semblants a les del material estudiat anteriorment, per tant: $A_f = 200$ mm², $E_f = 80$ GPa i $f_{fk} = 1300$ MPa. Pel formigó s'ha agafat una resistència a compressió de 25 MPa. Els coeficients de seguretat s'han considerat iguals a 1 .

Per tal de no tenir en compte la geometria del material compost, ja que en tractar-se de material reutilitzat es podria tractar d'una secció rectangular o de qualsevol altra secció, s'ha considerat que la distància des de la part superior de la secció del formigó fins al centre de la secció del material compost és la mateixa que l'altura de la biga, fent referència a la Figura 22b, en el cas d'aquest estudi es considera $d_f = h$. En el cas de voler estudiar la influència o importància de l'altura de la secció del material compost, s'hauria de tenir en compte que d_f és la distància fins al centre geomètric del FRP (és a dir, s'hauria de sumar l'altura h més la meitat de l'altura del material compost).

8.2.1 Resultats per la biga de tipus 1

Aquest primer tipus de biga de formigó es tracta d'una biga amb dimensions d'una biga utilitzada en edificació, de dimensions 200×350 mm. Per a cada un dels tipus de biga i per a la llosa s'ha estudiat l'efecte

del mòdul elàstic, la resistència a tracció i l'àrea del material compost així com la resistència a compressió del formigó.

8.2.1.1 Efecte del mòdul elàstic del material compost

En primer lloc, mantenint la resta de les propietats constants, s'ha avaluat la influència del mòdul elàstic del material compost i s'han extret els valors de deformació i càrrega en el punt de càrrega màxima i en la fluència de l'acer. A la Figura 29 es pot veure el comportament que prenen les bigues i a les Taules 9 i 10 es poden veure els valors exactes en els dos punts i l'increment respecte a l'absència de reforç.

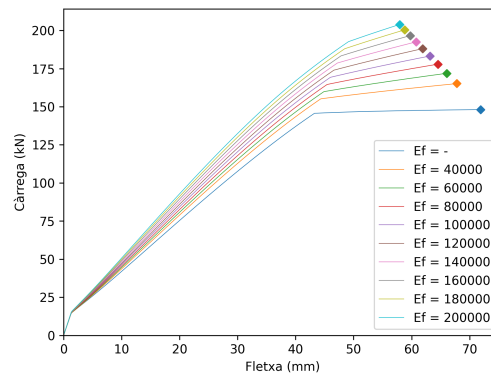


Figura 29: Gràfic del comportament d'una biga de 200×350 mm reforçada amb FRP de diferents mòduls elàstics (en MPa).

Taula 9: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

E_f (GPa)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
-	145.6	-	148.11	-
40	155.1	+6.52%	165.16	+11.51%
60	159.8	+9.75%	171.92	+16.08%
80	164.5	+12.98%	177.88	+20.1%
100	169.2	+16.21%	183.24	+23.72%
120	173.9	+19.44%	188.09	+26.99%
140	178.6	+22.66%	192.53	+29.99%
160	183.2	+25.82%	196.63	+32.76%
180	187.9	+29.05%	200.42	+35.32%
200	192.7	+32.35%	203.96	+37.71%

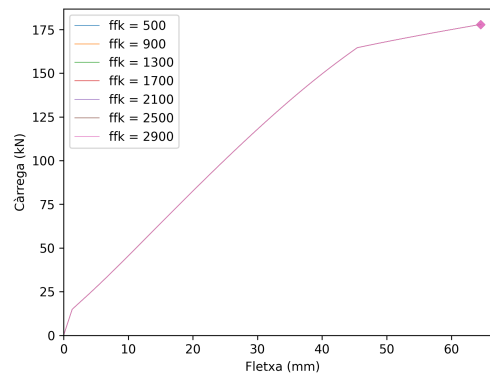
Tal com es pot veure la càrrega augmenta lleugerament a mesura que incrementa el valor de E_f fins a aconseguir una millora de resistència del 32.35%. També es pot veure que per tots els tipus de formigó, falla abans el formigó que el FRP. Amb l'ajuda del gràfic es veu que la rigidesa del conjunt augmenta amb E_f , com era d'esperar.

Taula 10: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

E_f (GPa)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
-	43.24	-	71.9	-
40	44.33	+2.52%	67.8	-5.7%
60	44.86	+3.75%	66.07	-8.11%
80	45.41	+5.02%	64.53	-10.25%
100	46.01	+6.41%	63.15	-12.17%
120	46.57	+7.7%	61.92	-13.88%
140	47.21	+9.18%	60.79	-15.45%
160	47.79	+10.52%	59.76	-16.88%
180	48.41	+11.96%	58.82	-18.19%
200	49.13	+13.62%	57.95	-19.4%

8.2.1.2 Influència de la resistència a tracció del material compost

En segon lloc, s'ha fet el mateix amb la resistència del material compost (ffk). A la Figura 30 es poden veure els resultats. Tal com es pot veure només apareix una línia a la representació, independentment de ffk la biga s'està comportant igual. Això és degut al fet que el formigó arriba abans a la seva deformació última que el material compost i, per tant, trenca abans. Per aquest motiu en aquest cas no s'han extret taules amb els resultats de cada biga. El que s'ha fet en aquest cas és buscar per quina ffk es tindria ruptura del reforç abans de la ruptura del formigó. S'ha trobat que aquest valor es trobaria al voltant de 483 MPa i per tots els valors inferiors a aquest.

Figura 30: Gràfic del comportament d'una biga de 200×350 mm reforçada amb FRP de diferents resistències (en MPa).

8.2.1.3 Influència de l'àrea del material compost

En tercer lloc, s'ha estudiat de la mateixa manera l'àrea del material compost (A_f). A la Figura 31 podem observar-ne els resultats i a les Taules 11 i 12 els valors numèrics i l'increment respecte a una biga sense cap mena de reforç per FRP.

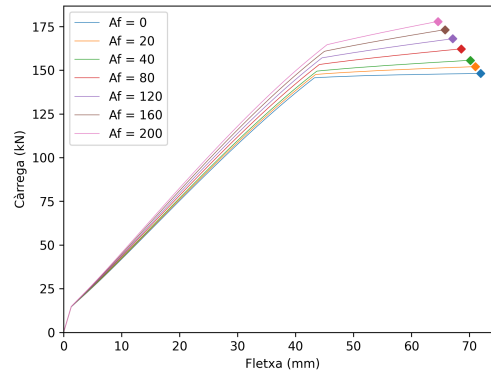


Figura 31: Gràfic del comportament d'una biga de 200×350 mm reforçada amb FRP de diferents àrees (en mm^2).

Taula 11: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

A_f (mm^2)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
0	145.57	-	148.11	-
20	147.44	+1.28%	152.03	+2.65%
40	149.45	+2.67%	155.65	+5.09%
80	153.15	+5.21%	162.19	+9.51%
120	157.06	+7.89%	167.97	+13.41%
160	160.78	+10.45%	173.17	+16.92%
200	164.59	+13.07%	177.88	+20.1%

Taula 12: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

A_f (mm^2)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
0	43.24	-	71.91	-
20	43.43	+0.44%	71.01	-1.25%
40	43.69	+1.04%	70.15	-2.45%
80	44.06	+1.9%	68.54	-4.69%
120	44.61	+3.17%	67.08	-6.72%
160	44.98	+4.02%	65.75	-8.57%
200	45.47	+5.16%	64.53	-10.26%

Tal com es pot observar la càrrega augmenta a mesura que augmenta la secció del material compost, així es pot demostrar l'eficiència del reforç, que arriba a augmentar la càrrega màxima fins a un 13.07%. El mode de falla continua sent per ruptura del formigó. Es continua veient que la rigidesa del conjunt augmenta a mesura que augmenta l'àrea, un comportament molt semblant al que s'ha obtingut incrementant E_f .

8.2.1.4 Influència de la resistència a compressió del formigó

Per acabar, també s'ha estudiat la variació causada per la resistència a compressió de formigó. Tal com es pot veure a la Figura 32 s'han representat quatre qualitats diferents de formigó, amb reforç i sense. Com es pot veure a les Taules 13 i 14 s'han reportat els resultats pel que fa a la càrrega màxima que aguanta la biga amb reforç en comparació a la que no està reforçada.

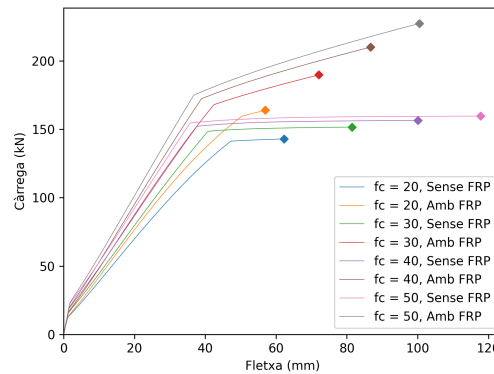


Figura 32: Gràfic per bigues de 200×350 mm de diferents resistències del formigó (en MPa) amb reforç de FRP i sense.

Taula 13: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

f_c (MPa)	P_y Sense FRP (kN)	P_y Amb FRP (kN)	Increment P_y	P_u Sense FRP (kN)	P_u Amb FRP (kN)	Increment P_u
20	141.2	159.7	+13.1%	143.01	163.99	+14.67%
30	148.5	168	+13.1%	151.67	189.83	+25.2%
40	152.3	172.3	+13.1%	156.48	210.15	+34.3%
50	154.7	175	+13.1%	159.71	227.5	+42.5%

Taula 14: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic de l'acer (δ_y) i en el punt de ruptura (δ_u).

f_c (MPa)	δ_y Sense FRP (kN)	δ_y Amb FRP (kN)	Increment δ_y	δ_u Sense FRP (kN)	δ_u Amb FRP (kN)	Increment δ_u
20	47.17	50.38	+6.8%	62.28	56.95	-8.6%
30	40.81	42.46	+4.0%	81.48	72.08	-11.5%
40	37.8	38.94	+3.0%	100.05	86.7	-13.3%
50	35.76	36.77	+2.8%	117.8	100.51	-14.7%

Es pot observar que la rigidesa global del conjunt continua augmentant a mesura que millora la qualitat del formigó i que la càrrega màxima segueix sent superior mentre que la fletxa màxima disminueix.

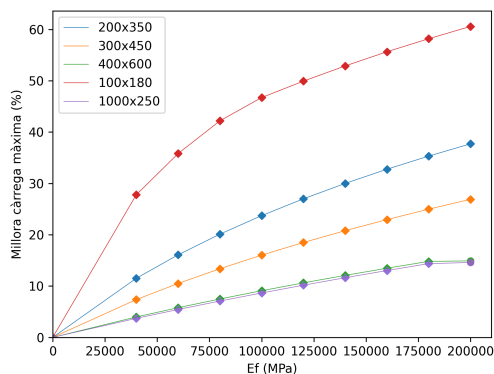
Els gràfics i taules individuals per a la resta de bigues es poden trobar a l'Annex B. Els resultats i valors extrets de la resta de bigues segueixen un comportament molt semblant a aquest primer tipus de biga. Per la biga de tipus 2 de 300×450 mm s'observen increments de la càrrega màxima del 28% amb el canvi de tipus de formigó amb pèrdues raonables de ductilitat i increments del 27% per materials compostos de E_f elevats. Els canvis en l'àrea de l'FRP són poc significatius i en tots els casos el que falla primer és el formigó.

Per la biga de tipus 3 de 400×600 mm s'obtenen resultats bastant semblants als de la segona biga, però els increments són més baixos i hi ha més casos en què el reforç falla abans que el formigó. L'estudi per a la biga de laboratori de tipus 4 mostra increments de càrrega màxima significativament més elevats, fins a un 133% en el cas de f_c màxima. Tot i això, aquesta biga mostra ductilitats molt baixes i en molts casos l'acer no arriba al seu límit de fluència. Pel que fa a la llosa, els resultats es mantenen més baixos, l'increment de càrrega màxima més alt és del 14%, però totes les configuracions de llosa considerades es mantenen dúctils i en tots els casos l'acer arriba al seu límit de fluència. Més endavant, amb l'ajuda de gràfiques comparatives es podran treure conclusions més clares d'aquests resultats.

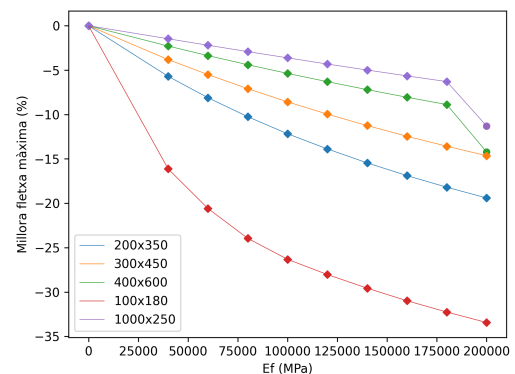
8.2.2 Comparacions de les bigues i conclusions de l'estudi

Per tal de comparar la influència de les variacions en les propietats explicades anteriorment per tots els tipus de bigues s'ha graficat l'increment de càrrega màxima i de fletxa màxima (extrets de les taules anteriors). S'ha continuat representant el tipus de falla del conjunt amb cercles i rombes per cada tipus de biga.

En primer lloc, i tal com es mostra a la Figura 33 s'ha comparat en la influència d' E_f .



(a) Comparació de l'increment de càrrega amb bigues reforçades amb materials de diferents E_f segons la seva secció (en mm).



(b) Comparació de l'increment de fletxa amb bigues reforçades amb materials de diferents E_f segons la seva secció (en mm).

Figura 33: Comparació de les diferents variacions d' E_f .

Tal com es pot veure a la Figura 33a la millora de càrrega màxima més gran es produeix per a les bigues de

secció menor. Tot així, la millora de càrrega màxima produeix una pèrdua de fletxa màxima, representat a la Figura 33b. En el cas de la biga més petita, la de laboratori, amb l'augment del mòdul elàstic es produeix una caiguda exponencial de la fletxa màxima i, per tant, de la ductilitat, fet que, com s'ha esmentat anteriorment es vol evitar.

Quan es reforça una biga amb un material es busca utilitzar-lo al màxim. Per exemple, quan s'afegeix l'acer i s'obtenen bigues de formigó armat es busca que l'acer arribi al seu límit elàstic al llarg del comportament de la biga, això indica que la biga és prou dúctil i avisarà abans de fallar. En alguns casos s'ha vist que, en les bigues més petites, quan es tenen propietats del material compost molt bones, la biga no es deforma prou abans de trencar-se i l'acer no arriba al seu punt de fluència. En aquests casos no s'estan rendibilitzant les propietats de l'acer i la biga no és prou dúctil.

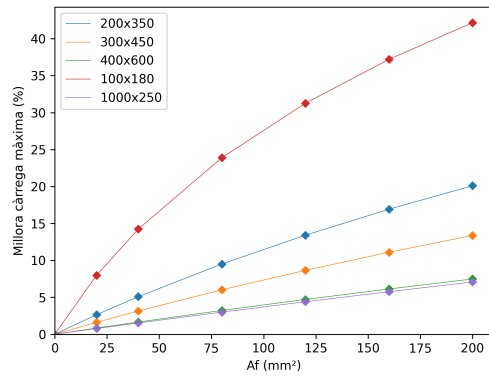
Un fet semblant passa amb les propietats del material compost; una manera de diferenciar els casos en què s'estan rendibilitzant les propietats del FRP és quan s'arriba abans a la seva fractura que a l'aixafament per compressió del formigó. És per aquest motiu que les millors propietats per una biga concreta haurien de ser pel primer punt en què tenim falla per ruptura del material compost. Tot i que en els casos d'aquest estudi només hem trobat per cada biga un màxim d'un punt en què tenim aquest tipus de falla, si augmentéssim a partir d'aquest punt les propietats, no millorarien els resultats.

Tot i que a efectes de càrrega el millor comportament s'obté en el primer punt de fractura per FRP, és a dir, per la biga de 400×600 mm amb una E_f de 200 GPa, si es considera la variació en la fletxa per aquest mateix punt, es pot observar que una caiguda de ductilitat significativa. És per aquest motiu que el millor comportament per aquesta biga amb aquestes propietats, per tal d'incrementar la càrrega però mantenir una ductilitat acceptable, es tractarà del punt just anterior a la ruptura per FRP. És a dir, en aquest cas, per aquesta biga amb aquestes propietats, l' E_f més efectiu es trobaria entre 127 i 200 GPa.

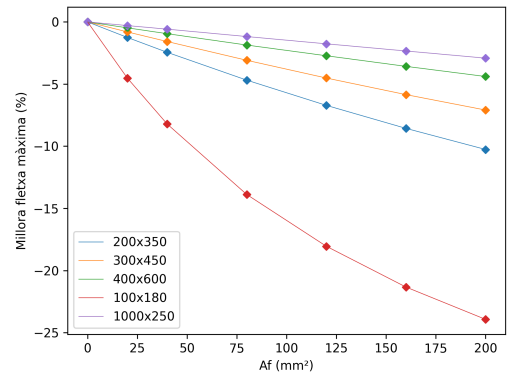
En segon lloc, la comparació que s'ha fet és de l' A_f , els resultats es mostren a la Figura 34. En aquest cas es pot observar que, de manera semblant a l'increment d' E_f , les àrees més grans generen un efecte a la càrrega màxima més gran per dimensions de les bigues més petites i alhora una pèrdua de ductilitat.

En aquests casos no es pot veure fractura per FRP en cap dels casos i, per tant, no s'estan aprofitant les propietats del material compost al seu màxim, tot i que sí que està provocant una millora en les propietats. Per tenir una ruptura per FRP s'hauria de tenir una àrea considerablement més gran de material compost o unes mides més petites de la biga (que actualment no son útils en cap dels camps estudiats en aquest projecte).

Finalment, s'ha fet el mateix amb l'increment d' f_c . A la Figura 35 es poden veure els resultats. S'observa que la millora de formigó només té una importància significativa per la biga de laboratori (de mides considerablement més petites que la resta). Per la resta de bigues, un formigó més bo que un altre no provoca



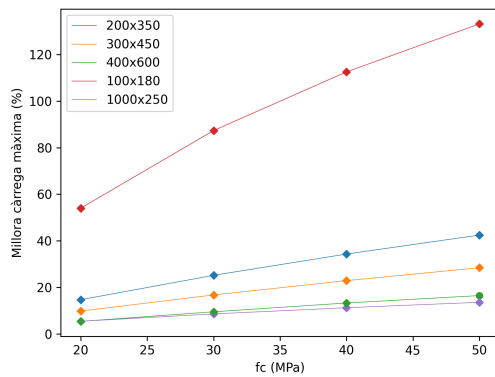
(a) Comparació de l'increment de càrrega amb bigues reforçades amb materials de diferents A_f (en mm).



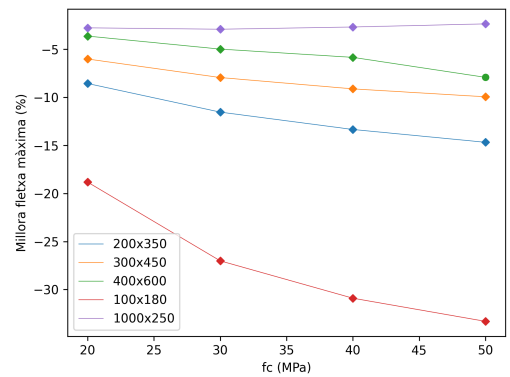
(b) Comparació de l'increment de fletxa amb bigues reforçades amb materials de diferents A_f (en mm).

Figura 34: Comparació de les diferents variacions d' A_f .

una diferència tan gran en l'increment de càrrega màxima. Tot i això, com ha passat anteriorment en altres casos, un gran augment de la resistència de la biga implica una pèrdua de ductilitat.



(a) Comparació de l'increment de càrrega amb bigues de diferents f_c amb reforç i sense.



(b) Comparació de l'increment de fletxa amb bigues de diferents f_c amb reforç i sense.

Figura 35: Comparació de les diferents variacions d' f_c .

8.2.3 Aplicació de FRP de mòdul elàstic molt baix

Amb l'ajuda de l'estudi paramètric i valorant si val la pena considerar FRP de mòdul elàstic molt baix s'ha calculat quin valor d'àrea seria necessari per compensar-lo. Tal com es mostra a la Figura 36 s'ha observat que, per aconseguir el mateix comportament que amb un material que té $n \times E_f$ es necessita una àrea de $n \times A_f$, sent n un nombre real. Així doncs, l'eficiència d'un material compost es pot qualificar pel valor del producte de $A_f \times E_f$. L'aplicació d'un material amb el mateix valor $A_f \times E_f$ resultarà en el mateix comportament. Això es pot veure representat per dos valors d' E_f a la Figura 36, en què es comparen l'efecte d'un reforç de E_f de 20 GPa i A_f de 200 mm² amb l'efecte d'un reforç que té un valor del doble de E_f i la

meitat d'àrea.

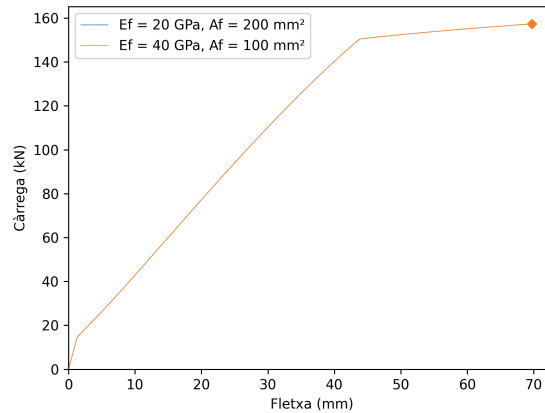


Figura 36: Comparació l'efecte de reforç en una biga de dos materials compostos de diferent mòdul elàstic però mateix valor $A_f \times E_f$.

9 Aplicació de l'estudi paramètric

A la vista dels resultats de l'estudi paramètric, es vol avaluar com aplicar els laminats caracteritzats al Capítol 6 i altres tipus de laminats que es puguin voler reutilitzar.

9.1 Aplicació als laminats caracteritzats

Agafant uns valors més exactes extrets de la caracterització dels dos laminats del laboratori i les mides que es poden assajar al laboratori amb el material disponible actualment s'ha fet una predicció de la càrrega que aguantaria el conjunt de la biga i la millora que cada laminat suposaria pel comportament de la biga. Les dades disponibles per la biga en aquest cas son les que es mostren a la Taula 15.

Taula 15: Propietats geomètriques i mecàniques de la biga de formigó del laboratori.

L (mm)	b (mm)	h (mm)	f_c (MPa)
1500	100	150	25

A la Figura 37 es poden veure els resultats de l'aplicació d'aquests laminats. S'observa una millora de la càrrega del 64.2% amb el laminat de 4 mm i una millora del 84.6% amb el de 8 mm. També es pot observar que la biga perd força ductilitat fins al punt que l'acer no ha arribat al seu límit de fluència. Com s'ha explicat, la fragilitat fa les bigues més susceptibles a terratrèmols o càrregues brusques. És per aquest motiu que segurament aquesta no és la millor aplicació per aquests laminats, o almenys no per una biga amb aquestes característiques geomètriques i resistència a compressió del formigó.

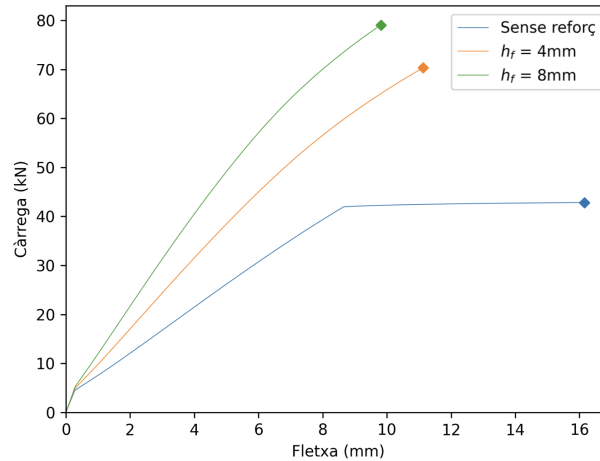


Figura 37: Comportament d'una biga amb les dimensions del laboratori sense reforç i reforçada amb els dos laminats caracteritzats en aquest treball.

El rang d'àrees d'FRP de l'estudi paramètric fet anteriorment no inclou aquestes dues àrees. No obstant, veient els resultats de la comparació amb diferents àrees de les Figures 34a i 34b es pot predir que per evitar un increment considerable de la fragilitat del conjunt, una millor aplicació per aquests laminats seria en bigues d'edificació de dimensions petites, per exemple la de 200×350 mm. Amb aquestes bigues podem estipular que s'aconseguiria un increment de la càrrega màxima d'aproximadament 20 i 35% sense perdre més del 10% de fletxa màxima i, per tant, sense tornar-se excessivament fràgil. Aquest increment de càrrega comparat amb el de la biga de laboratori estudiada anteriorment és considerablement petit, és per això que caldrà buscar una mida intermitja o triar un dels dos increments depenent de l'aplicació o les necessitats de la biga reforçada.

Per tal de comprovar que l'estipulació feta a partir de l'estudi és correcta s'han fet els càlculs i la gràfica d'una biga d'edificació de dimensions 200×350 mm i s'ha obtingut la gràfica de la Figura 38. S'observa un increment del 21% en el cas del laminat de 4 mm i amb una pèrdua de fletxa del 10%, uns resultats bastant semblants a les suposicions que permeten fer els resultats de l'estudi paramètric.

9.2 Aplicació a altres possibles laminats

En aquest estudi paramètric no s'ha considerat l'impacte de la geometria de la peça en el comportament del material com a reforç. Per posar un exemple, en el cas d'una de les parts que és de material compost d'una part del fuselatge d'un avió, com és el de la Figura 39, es pot veure una geometria complexa que podria dificultar la seva aplicació com a reforç d'una biga. En aquest exemple es pot veure la complexitat en la reutilització de peces prefabricades per altres finalitats. Ja que es desconeixen les propietats del material així com la seqüència de capes del laminat s'hauria de tornar a fer la caracterització del material (amb la corresponent microscòpia de cada una de les capes i el processament amb el codi Python generat). En casos

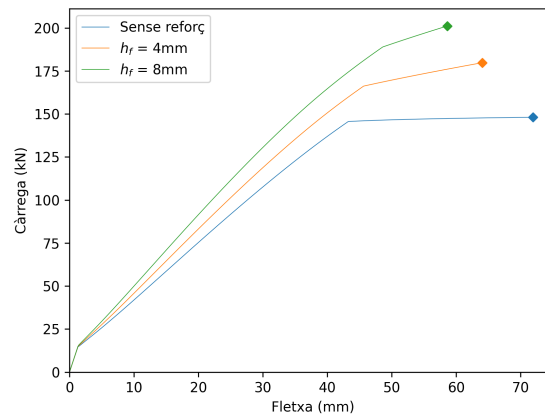


Figura 38: Comportament d'una biga amb les dimensions d'edificació sense reforç i reforçada amb els dos laminats caracteritzats en aquest treball.

com aquest en què es tracta d'una geometria irregular al llarg de la seva llargada, es poden trobar altres problemes com ara la variació de propietats al llarg del laminat o les curvatures en diferents direccions que en aquest cas es poden veure a simple vista. En casos com aquest, s'haurien de valorar altres tècniques en què la geometria no sigui un impediment, com podria ser la tècnica de NSM (explicada anteriorment en aquest treball). Per exemple, per seguir aquesta tècnica es podrien retallar tires primes longitudinals i inserir-les com s'ha mostrat a la Figura 9b.



Figura 39: Secció d'una part de l'ala d'un avió de material compost.

En molts casos de materials reutilitzats també es poden trobar casos en què han variat les propietats del material respecte al moment de la seva fabricació degut al seu ús.

10 Conclusions

Avui en dia, amb la quantitat de recursos desaprofitats en una gran nombre de sectors cal prendre consideració i emprendre mesures respecte a la seva reutilització. Tant la Comunitat Europea com cadascun dels països de la mateixa comunitat marquen uns objectius de desenvolupament sostenible arrel dels quals neixen propostes com l'agenda 2030. Aquests objectius tenen com a finalitat que les activitats humanes adoptin línies més sostenibles amb el medi ambient i que, per tant, minimitzin l'impacte ambiental. En el cas d'aquest treball es tracta la reutilització de FRP procedents del sector aeronàutic. En finalitzar aquest treball, es pot afirmar que és totalment viable la reutilització d'aquest recurs, des d'un punt de vista teòric.

En primer lloc, s'ha aconseguit desenvolupar amb èxit un programa que automatitzi la recopilació d'informació de cada una de les capes del laminat obtingudes a partir de l'anàlisi de dades microscòpiques. A més, també s'ha creat un programa per implementar la teoria de laminats, tant per determinar les propietats del mateix material com per predir les propietats d'un laminat amb un nombre de capes variable.

En segon lloc, també s'ha dut a terme un estudi paramètric per tal de determinar la importància de les propietats del reforç així com tenir-lo de guia en el cas de proposar un possible material nou. D'aquest estudi se'n poden determinar les següents observacions:

S'ha observat que l'increment de càrrega suportada per la biga augmenta a mesura que les propietats del laminat reforçant milloren, especialment en el cas de les bigues més petites. Així mateix, s'ha detectat que un augment exagerat de la càrrega final suportada per la biga comporta una pèrdua significativa en la ductilitat i s'ha argumentat com aquest fet pot acabar sent perjudicial per a la biga. També s'ha vist que les mides de les seccions de laminat proposades en l'estudi son massa petites per arribar a rendibilitzar les propietats del material compost.

Sense tenir en compte la geometria de la secció del laminat, es pot afirmar que dos materials amb el mateix valor pel producte d' $E_f \times A_f$ provocaran exactament el mateix efecte si es col·loquen de reforç a una biga amb les mateixes característiques, sempre que es tingui un mínim valor de resistència.

Finalment, s'han pogut determinar les millors condicions pel laminat que s'intentava reutilitzar en aquest treball. S'ha vist que és totalment viable donar-li aquest segon ús i que milloraria l'ús de bigues amb mides de laboratori en un 80% i bigues per a l'edificació en aproximadament un 30%.

En resum, aquest treball proporciona informació valuosa per al disseny i l'aplicació de FRP reciclats en diferents tipus de bigues. S'han identificat les condicions òptimes per a l'aplicació d'aquests materials i s'han analitzat els seus efectes sobre les propietats estructurals. Aquestes conclusions poden ser útils tant per a futures investigacions i desenvolupaments en el camp de les estructures reforçades com en el camp del

reciclatge i reutilització de FRP.

11 Relació de documents

El projecte consta dels següents documents:

- Document 1: Memòria i annexos
 - Annex A: Resultats de la microscòpia del laminat de 8 mm.
 - Annex B: Taules i gràfiques de l'estudi paramètric per a totes de bigues.
- Document 2: Pressupost

Referències

- [1] Davis, J. R. (2004). *Tensile Testing, 2nd Edition*. ASM International.
- [2] Yi, X., Du, S., & Zhang, L. (2017). *Composite Materials Engineering, Volume 1: Fundamentals of Composite Materials*. Springer.
- [3] Staab, G. H. (1999). *Introduction to composite materials (p. 1-16)* Laminar composites.
- [4] Matthews, F. L. & Rawlings, R. D. (1999). *Composite Materials: Engineering and Science*. Woodhead Publishing.
- [5] Haritos, G. K., Hager, J., Amos, A. K., Salkind, M. J. & Wang, A. (1988). Mesomechanics: The microstructure-mechanics connection. *International Journal of Solids and Structures*, 24(11), 1081-1096.
- [6] Ueki, Y., Lilholt, H. & Madsen, B. (2020). Experimental evaluation of stiffness predictions of multiaxial flax fibre composites by classical laminate theory. *PLOS ONE*, 15(6), e0234701.
- [7] Whitney, J. (2018). *Structural Analysis of Laminated Anisotropic Plates*. Equations of a Laminated Anisotropic Plate. Routledge.
- [8] Kollár, L. P. & Springer, G. S. (2003). *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge University Press.
- [9] George H. Staab (1999). 3 - Lamina analysis, *Laminar Composites*, Butterworth-Heinemann, Pages 37-101.
- [10] Das, P. P. & Chaudhary, V. K. (2021). Mechanical Characterization Techniques for Composite Materials. En *CRC Press eBooks* (pp. 155-161).
- [11] Reddy, R (2016). Composite materials - history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. *Proceedings of 29th IRF International Conference*.
- [12] Khalid, M., Arif, Z. U., Ahmed, W. & Arshad, H. (2021). Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 31, e00382.
- [13] Halkos, G., & Petrou, K. N. (2019). Analysing the energy efficiency of EU Member States: The potential of energy recovery from waste in the circular economy. *Energies*, 12(19), 3718.
- [14] Yang, Y., Boom, R., Irion, B., Van Heerden, D., Kuiper, P. J. C., & De Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 51, 53-68.
- [15] Shehab, E., Meirbekov, A., Amantayeva, A. & Tokbolat, S. (2022). Cost Modelling for Recycling Fiber-Reinforced Composites: State-of-the-Art and Future Research. *Polymers*, 15(1), 150.
- [16] Generalitat de Catalunya (2017). Memòria. *Annex al pla nacional per a la implementació de l'agenda 2030 a Catalunya*.

- [17] Gobierno de España (2018). Plan de acción para la Implementación de la Agenda 2030. Hacia una Estrategia Española de Desarrollo Sostenible.
- [18] Zhang, P., Wang, J., Li, Q., Wan, J. & Wang, K. (2021). Mechanical and fracture properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. *Science and Engineering of Composite Materials*, 28(1), 299-313.
- [19] L'Hermite, R., Bresson, J. (1967) Béton armé par collage d'armature. *Proceedings of the Colloque RI-LEM*. p. 175
- [20] ACI Commitee 440 (2017). ACI 440.2R-17. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*.
- [21] Meier, U. (1987) Brückensanierungen mit Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen. *Mater. Tech.* 15, 125-128.
- [22] Czaderski, C., & Meier, U. (2018). EBR Strengthening Technique for Concrete, Long-Term Behaviour and Historical Survey. *Polymers*, 10(1), 77.
- [23] Bilotta, A., Ceroni, F., Nigro, E. & Pecce, M. (2015). Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. *Composite Structures*, 124, 163-175.
- [24] Alabdulhady, M. Y., Chkheiw, A. H., & Ojaimi, M. F. (2022). The efficiency of CFRP strengthening and repair system on the flexural behavior of RC beams constructed with different concrete compressive strength. *Results in engineering*, 16, 100763.
- [25] Kachlakev, D. I., & McCurry, D. D. (2000). Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates. *Composites Part B-engineering*, 31(6-7), 445-452.
- [26] GangaRao, H. V., & Prachasaree, W. (2021). *FRP Composite Structures: Theory, Fundamentals, and Design*. CRC Press.
- [27] Verma, R & Ali, J (2013). A Comparative Study of Various Types of Image Noise and Efficient Noise Removal Techniques. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. Volume 3, Issue 10*.
- [28] Bradski, G. (2000). The OpenCV library. *Dr.Dobb's Journal*, 25(11), 120-125.
- [29] Said, K. A. M., & Jambek, A. B. (2021). Analysis of Image Processing Using Morphological Erosion and Dilation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2071(1), 012033.
- [30] International Organization for Standardization. (2020) *Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles (ISO 527-1:2019)*.
- [31] Standardization, E. C. (2005). EN 1992-1-1 *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
- [32] Kwan, A. K. H., Ho, J. C. M., PAM, H. J. (2002). *Flexural strength and ductility of reinforced concrete beams*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 152(4), 361-369.

12 Glossari

f_c : Resistència a compressió del formigó.

FRP : *Fiber reinforced polymer*.

E_f : Mòdul elàstic del formigó.

RC : *Reinforced concrete*.

f_{fk} : Resistència del material compost.

P : Càrrega aplicada a la biga.

A_f : Àrea del material compost.

M_{cr} : Moment en què la biga comença a fissurar.

P_y : Càrrega en el límit elàstic de la biga.

f_{ctm} : Resistència a tracció del formigó.

δ_y : Fletxa en el límit elàstic de la biga.

I_{ucr} : Moment d'inèrcia.

P_u : Càrrega en el punt de ruptura de la biga.

E_c : Mòdul elàstic del formigó.

δ_u : Fletxa en punt de ruptura de la biga.

x_n : Posició de la línia neutra per la secció sense fissurar.

b : Base de la biga de formigó.

d_f : Posició del centre de gravetat del material compost respecte a la superfície superior de la biga.

d_s : Distància entre la superfície superior de la biga fins on està situat l'acer inferior.

M_n : Moment de la biga sense fissurar.

L : Llargada de la biga.

M_{nf} : Moment de la biga amb el formigó sotmès a tracció totalment fissurat.

h_f : Gruix del material compost.

Annex A. Resultats de la microscòpia pel laminat de 8 mm.

Taula amb els resultats que genera el programa Python pel processament de les imatges de la micrografia de cada capa d'un laminat, en aquest cas el de 8mm.

Taula A.1: Informació extreta de la microscopia del laminat de 8mm

Capa	Gruix (μm)	dy (μm)	dx (μm)	Ratio (dy/dx)	Angle (graus)	Fibra (%)
1 (teixit)	244.51	3.36	5.42	0.92	23.56	32%
2	184.49	4.48	4.39	1.06	0.00	47%
3	183.49	4.81	6.58	0.79	44.87	55%
4	179.24	4.67	4.56	1.07	0.00	53%
5	158.74	4.74	6.43	0.78	43.87	54%
6	178.25	4.65	4.52	1.06	0.00	52%
7	166.28	4.53	4.45	1.05	0.00	49%
8	183.17	4.59	4.52	1.06	0.00	52%
9	181.04	4.83	6.56	0.80	44.67	48%
10	190.06	2.84	32.89	0.42	77.64	48%
11	203.35	4.65	6.42	0.8	45.92	49%
12	173.99	4.61	4.49	1.09	0.00	49%
13	179.90	4.52	4.38	1.08	0.00	50%
14	188.91	4.32	5.90	0.81	44.92	50%
15	175.14	4.51	4.42	1.06	0.00	45%
16	183.17	4.33	4.32	1.08	0.00	46%
17	177.93	4.24	4.20	1.08	0.00	44%
18	159.07	4.51	6.13	0.82	43.53	47%
19	171.04	2.38	42.39	0.29	83.45	47%
20	196.79	4.63	6.37	0.77	44.11	50%
21	188.09	4.69	4.73	1.05	0.00	49%
22	193.51	4.63	4.47	1.07	0.00	48%
23	178.42	4.52	6.29	0.79	46.46	49%
24	180.22	4.47	4.57	1.08	0.00	51%
Resina	116.10	2.55	2.57	1.09	34.56	0%
25	194.49	4.56	6.27	0.77	43.53	45%
26	176.45	4.64	4.55	1.05	0.00	50%
27	175.80	4.52	4.40	1.06	0.00	50%
28	187.27	4.70	6.79	0.76	47.59	53%
29	177.93	2.49	40.39	0.39	76.15	52%
30	184.98	4.70	6.41	0.79	44.67	52%
31	177.60	4.66	4.52	1.06	0.00	52%
32	194.49	4.60	4.47	1.08	0.00	52%
33	181.70	4.87	6.87	0.72	45.21	45%
34	193.83	4.62	4.57	1.04	0.00	44%
35	185.90	4.63	4.57	1.04	0.00	44%
36	191.70	4.78	6.72	0.76	45.76	50%
37	164.48	4.55	4.39	1.07	0.00	48%
38	171.37	4.72	6.65	0.79	47.59	51%
39	185.31	2.69	47.87	0.36	83.12	49%
40	184.16	4.57	6.28	0.79	45.57	47%

Annex B. Taules i gràfiques de l'estudi paramètric.

Taules i gràfiques de l'estudi paramètric per totes les mides de bigues estudiades. Per totes les bigues s'ha calculat l'increment de les dades en el límit elàstic i en el punt de ruptura total.

B.1 Biga 1 (200 × 350 mm)

B.1.1 Estudi de la f_c

Taula B.1: Taula de l'increment de la càrrega respecte una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

f_c (MPa)	P_y Sense FRP (kN)	P_y Amb FRP (kN)	Increment P_y	P_u Sense FRP (kN)	P_u Amb FRP (kN)	Increment P_u
20	141.2	159.7	+13.1%	143.01	163.99	+14.67%
30	148.5	168	+13.1%	151.67	189.83	+25.2%
40	152.3	172.3	+13.1%	156.48	210.15	+34.3%
50	154.7	175	+13.1%	159.71	227.5	+42.5%

Taula B.2: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

f_c (MPa)	δ_y Sense FRP (kN)	δ_y Amb FRP (kN)	Increment δ_y	δ_u Sense FRP (kN)	δ_u Amb FRP (kN)	Increment δ_u
20	47.17	50.38	+6.8%	62.28	56.95	-8.6%
30	40.81	42.46	+4.0%	81.48	72.08	-11.5%
40	37.8	38.94	+3.0%	100.05	86.7	-13.3%
50	35.76	36.77	+2.8%	117.8	100.51	-14.7%

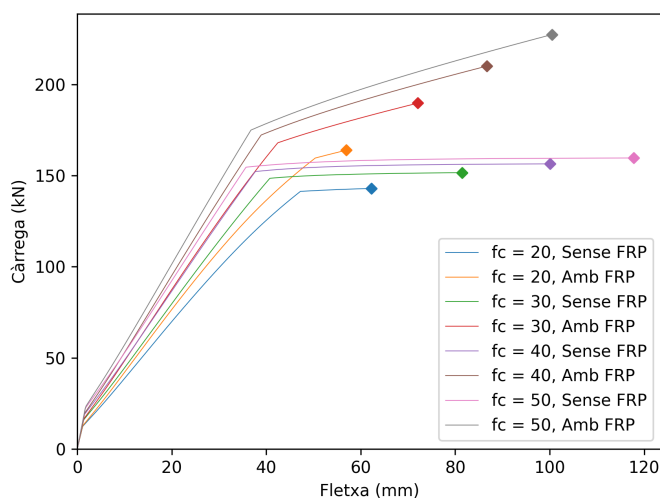


Figura B.1: Gràfic per bigues de 200 × 350 mm de diferents resistències del formigó amb reforç i sense.

B.1.2 Estudi de la E_f

Taula B.3: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

E_f (GPa)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
-	145.6	-	148.11	-
40	155.1	+6.52%	165.16	+11.51%
60	159.8	+9.75%	171.92	+16.08%
80	164.5	+12.98%	177.88	+20.1%
100	169.2	+16.21%	183.24	+23.72%
120	173.9	+19.44%	188.09	+26.99%
140	178.6	+22.66%	192.53	+29.99%
160	183.2	+25.82%	196.63	+32.76%
180	187.9	+29.05%	200.42	+35.32%
200	192.7	+32.35%	203.96	+37.71%

Taula B.4: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

E_f (GPa)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
-	43.24	-	71.9	-
40	44.33	+2.52%	67.8	-5.7%
60	44.86	+3.75%	66.07	-8.11%
80	45.41	+5.02%	64.53	-10.25%
100	46.01	+6.41%	63.15	-12.17%
120	46.57	+7.7%	61.92	-13.88%
140	47.21	+9.18%	60.79	-15.45%
160	47.79	+10.52%	59.76	-16.88%
180	48.41	+11.96%	58.82	-18.19%
200	49.13	+13.62%	57.95	-19.4%

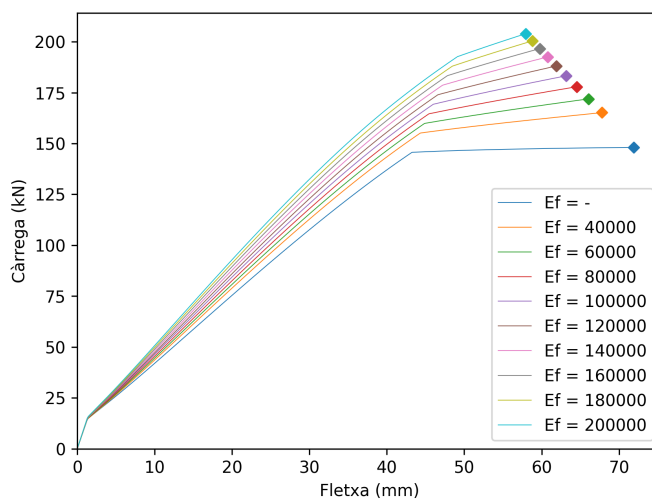


Figura B.2: Gràfic del comportament d'una biga de 200×350 mm reforçada amb materials compòsits de diferents mòduls elàstics.

B.1.3 Estudi de la A_f

Taula B.5: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

$A_f(\text{mm}^2)$	$P_y(\text{kN})$	Increment P_y	$P_u(\text{kN})$	Increment P_u
0	145.57	-	148.11	-
20	147.44	+1.28%	152.03	+2.65%
40	149.45	+2.67%	155.65	+5.09%
80	153.15	+5.21%	162.19	+9.51%
120	157.06	+7.89%	167.97	+13.41%
160	160.78	+10.45%	173.17	+16.92%
200	164.59	+13.07%	177.88	+20.1%

Taula B.6: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

$A_f(\text{mm}^2)$	$\delta_y(\text{mm})$	Increment δ_y	$\delta_u(\text{mm})$	Increment δ_u
0	43.24	-	71.91	-
20	43.43	+0.44%	71.01	-1.25%
40	43.69	+1.04%	70.15	-2.45%
80	44.06	+1.9%	68.54	-4.69%
120	44.61	+3.17%	67.08	-6.72%
160	44.98	+4.02%	65.75	-8.57%
200	45.47	+5.16%	64.53	-10.26%

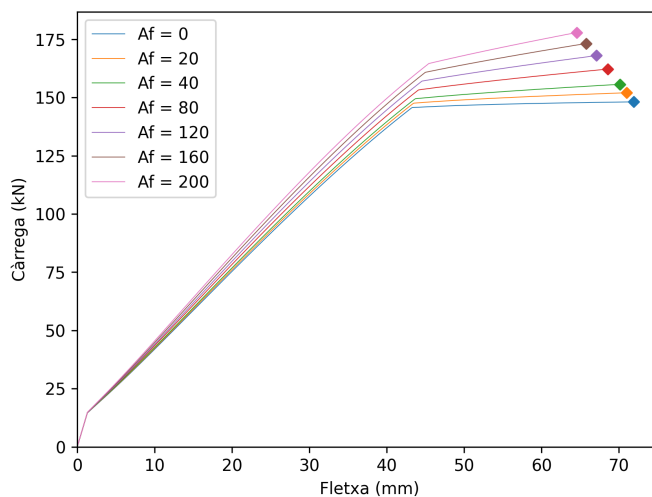


Figura B.3: Gràfic del comportament d'una biga de 200×350 mm reforçada amb materials compòsits de diferents àrees.

B.1.3 Estudi de la f_{fk}

En el cas d'aquest paràmetre, totes les bigues reforçades es comporten de la mateixa manera degut a que la resistència del formigó és més baixa que la del material compòsit i, per tant, trenca abans. És per aquest motiu que per aquest paràmetre no hi ha taules comparatives del comportament.

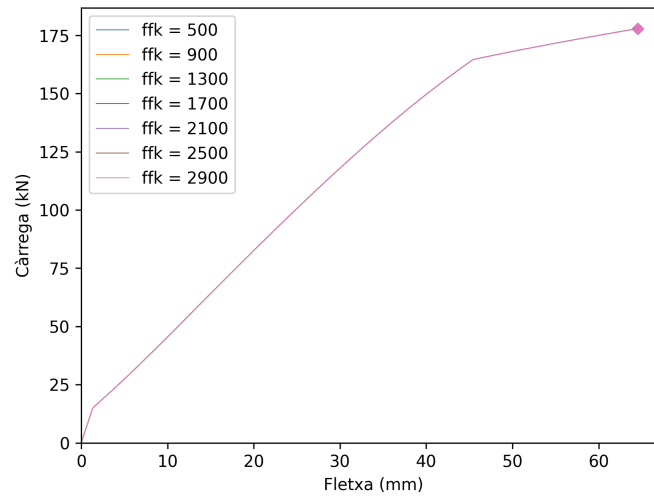


Figura B.4: Gràfic del comportament d'una biga de 200×350 mm reforçada amb materials compòsits de diferents resistències.

B.2 Biga 2 (300 × 450 mm)

B.2.1 Estudi de la f_c

Taula B.7: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

f_c (MPa)	P_y Sense FRP (kN)	P_y Amb FRP (kN)	Increment P_y	P_u Sense FRP (kN)	P_u Amb FRP (kN)	Increment P_u
20	292	310.6	+6.37%	297.29	326.43	+9.8%
30	304	323.7	+6.48%	312.25	364.48	+16.73%
40	310.5	330.7	+6.51%	320.4	393.69	+22.87%
50	314.5	335.1	+6.55%	325.78	418.38	+28.42%

Taula B.8: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

f_c (MPa)	δ_y Sense FRP (kN)	δ_y Amb FRP (kN)	Increment δ_y	δ_u Sense FRP (kN)	δ_u Amb FRP (kN)	Increment δ_u
20	48.8	50.1	+2.66%	73.37	68.96	-6.01%
30	42.7	43.4	+1.64%	97.36	89.63	-7.94%
40	39.7	40.3	+1.51%	120.42	109.44	-9.12%
50	37.7	38.2	+1.33%	142.4	128.24	-9.94%

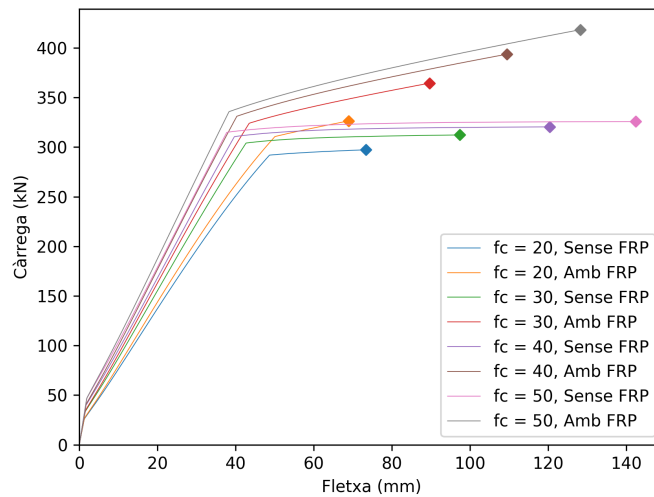


Figura B.5: Gràfic per bigues de 300 × 450 mm de diferents resistències del formigó amb reforç i sense.

B.2.2 Estudi de la E_f

Taula B.9: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

E_f (GPa)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
-	299.2	-	306.13	-
40	308.8	+3.21%	328.66	+7.36%
60	313.7	+4.85%	338.27	+10.5%
80	318.6	+6.48%	347.06	+13.37%
100	323.5	+8.12%	355.18	+16.02%
120	328.3	+9.73%	362.72	+18.49%
140	333.2	+11.36%	369.76	+20.79%
160	337.7	+12.87%	376.37	+22.94%
180	342.7	+14.54%	382.6	+24.98%
200	347.4	+16.11%	388.49	+26.9%

Taula B.10: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

E_f (GPa)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
-	45.05	-	85.45	-
40	45.51	+1.02%	82.19	-3.82%
60	45.81	+1.67%	80.75	-5.5%
80	46.06	+2.22%	79.39	-7.09%
100	46.31	+2.78%	78.12	-8.58%
120	46.57	+3.37%	76.94	-9.96%
140	46.86	+4.01%	75.84	-11.25%
160	47.11	+4.57%	74.81	-12.45%
180	47.37	+5.13%	73.85	-13.58%
200	47.6	+5.65%	72.94	-14.64%

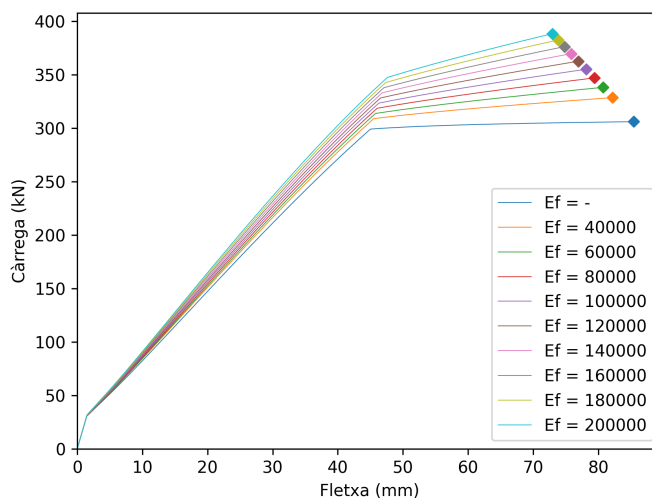


Figura B.6: Gràfic del comportament d'una biga de 300×450 mm reforçada amb materials compòsits de diferents mòduls elàstics.

B.2.3 Estudi de la A_f

Taula B.11: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

A_f (mm ²)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
0	299.18	-	306.13	-
20	301.11	+0.65%	311.07	+1.61%
40	303.04	+1.29%	315.77	+3.15%
80	306.88	+2.57%	324.54	+6.01%
120	310.85	+3.9%	332.61	+8.65%
160	314.8	+5.22%	340.09	+11.09%
200	318.03	+6.3%	347.06	+13.37%

Taula B.12: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

A_f (mm ²)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
0	45.05	-	85.45	-
20	45.12	+0.16%	84.76	-0.81%
40	45.21	+0.36%	84.1	-1.58%
80	45.42	+0.83%	82.81	-3.09%
120	45.62	+1.28%	81.59	-4.52%
160	45.87	+1.81%	80.45	-5.85%
200	46.03	+2.18%	79.39	-7.09%

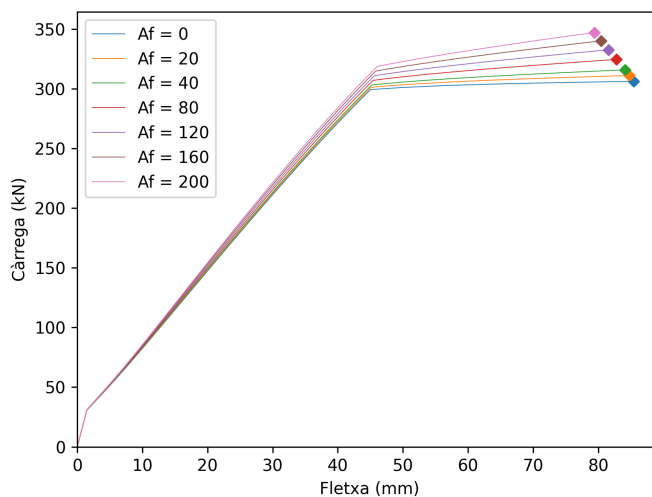


Figura B.7: Gràfic del comportament d'una biga de 300×450 mm reforçada amb materials compòsits de diferents àrees.

B.2.4 Estudi de la f_{fk}

En el cas d'aquest paràmetre, pràcticament totes les bigues reforçades es comporten de la mateixa manera degut a que la resistència del formigó és més baixa que la del material compòsit i, per tant, trenca abans. És per aquest motiu que per aquest paràmetre no hi ha taules comparatives del comportament. L'únic valor d' f_{fk} pel qual la resistència del FRP és més baixa que la del formigó i el conjunt falla degut al FRP és per 500 MPa.

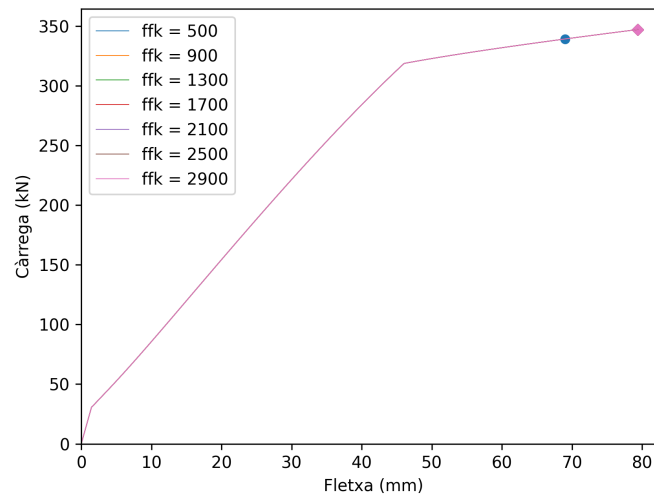


Figura B.8: Gràfic del comportament d'una biga de 300×450 mm reforçada amb materials compòsits de diferents resistències.

B.3 Biga 3 (400 × 600 mm)

B.3.1 Estudi de la f_c

Taula B.13: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

f_c (MPa)	P_y Sense FRP (kN)	P_y Amb FRP (kN)	Increment P_y	P_u Sense FRP (kN)	P_u Amb FRP (kN)	Increment P_u
20	554.9	573.2	+3.3%	567.5	597.99	+5.37%
30	576.6	595.9	+3.35%	594.88	651.36	+9.49%
40	588.8	608	+3.26%	609.26	690.12	+13.27%
50	596.6	616.3	+3.3%	618.42	720.18	+16.45%

Taula B.14: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

f_c (MPa)	δ_y Sense FRP (kN)	δ_y Amb FRP (kN)	Increment δ_y	δ_u Sense FRP (kN)	δ_u Amb FRP (kN)	Increment δ_u
20	62.7	63.8	+1.75%	96.24	92.75	-3.63%
30	55.1	55.7	+1.09%	128.92	122.5	-4.98%
40	51.4	51.75	+0.68%	160.63	151.25	-5.84%
50	48.9	49.3	+0.82%	191.12	175.98	-7.92%

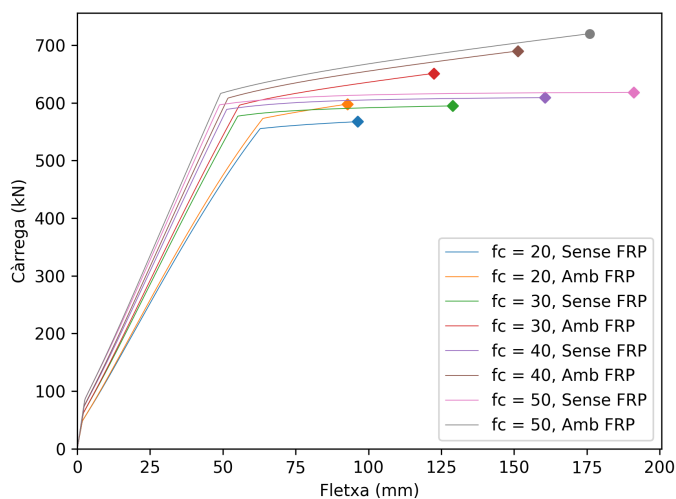


Figura B.9: Gràfic per bigues de 400 × 600 mm de diferents resistències del formigó amb reforç i sense.

B.3.2 Estudi de la E_f

Taula B.15: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

E_f (GPa)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
-	568.2	-	583.78	-
40	577.4	+1.62%	606.99	+3.98%
60	582.3	+2.48%	617.51	+5.78%
80	586.7	+3.26%	627.44	+7.48%
100	591.3	+4.07%	636.84	+9.09%
120	595.9	+4.88%	645.77	+10.62%
140	600.5	+5.68%	654.28	+12.08%
160	605	+6.48%	662.42	+13.47%
180	609.7	+7.3%	670.21	+14.81%
200	614.1	+8.08%	670.76	+14.9%

Taula B.16: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

E_f (GPa)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
-	58.14	-	112.66	-
40	58.49	+0.6%	110.08	-2.29%
60	58.71	+0.98%	108.87	-3.36%
80	58.85	+1.22%	107.71	-4.39%
100	59.02	+1.51%	106.61	-5.37%
120	59.19	+1.81%	105.56	-6.3%
140	59.34	+2.06%	104.55	-7.2%
160	59.48	+2.3%	103.58	-8.06%
180	59.68	+2.65%	102.66	-8.88%
200	59.82	+2.89%	96.64	-14.22%

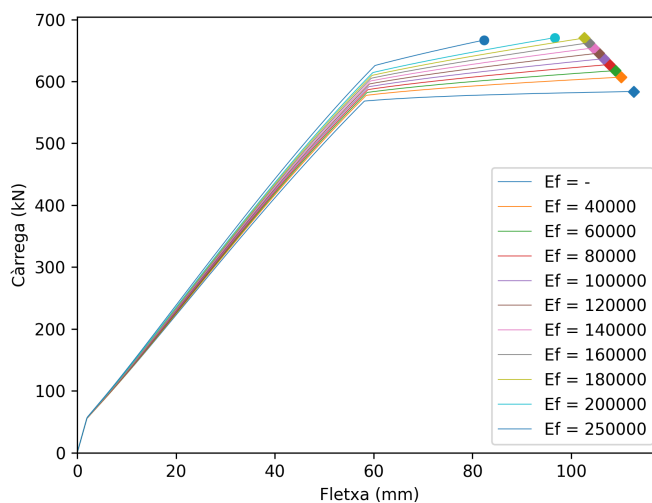


Figura B.10: Gràfic del comportament d'una biga de 400×600 mm reforçada amb materials compòsits de diferents mòduls elàstics.

B.3.3 Estudi de la A_f

Taula B.17: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

Af (mm ²)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
0	568.22	-	583.78	-
20	569.9	+0.3%	588.68	+0.84%
40	571.65	+0.6%	593.45	+1.66%
80	575.24	+1.24%	602.59	+3.22%
120	579.45	+1.98%	611.28	+4.71%
160	582.88	+2.58%	619.54	+6.13%
200	586.36	+3.19%	627.44	+7.48%

Taula B.18: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

Af (mm ²)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
0	58.13	-	112.66	-
20	58.17	+0.06%	112.12	-0.48%
40	58.22	+0.15%	111.59	-0.95%
80	58.35	+0.37%	110.56	-1.86%
120	58.57	+0.74%	109.59	-2.73%
160	58.67	+0.92%	108.63	-3.58%
200	58.78	+1.11%	107.71	-4.39%

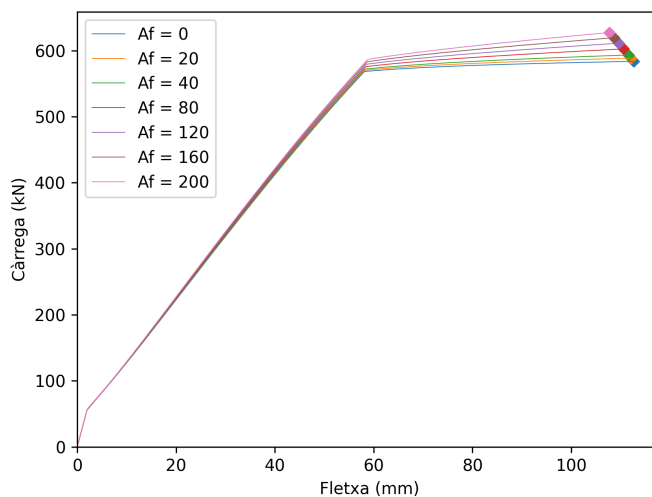


Figura B.11: Gràfic del comportament d'una biga de 400×600 mm reforçada amb materials compòsits de diferents àrees.

3.3.4 Estudi de la f_{fk}

En el cas d'aquest paràmetre, pràcticament totes les bigues reforçades es comporten de la mateixa manera degut a que la resistència del formigó és més baixa que la del material compòsit i, per tant, trenca abans. És per aquest motiu que per aquest paràmetre no hi ha taules comparatives del comportament. L'únic valor d' f_{fk} pel qual la resistència del FRP és més baixa que la del formigó i el conjunt falla degut al FRP és per 500 MPa.

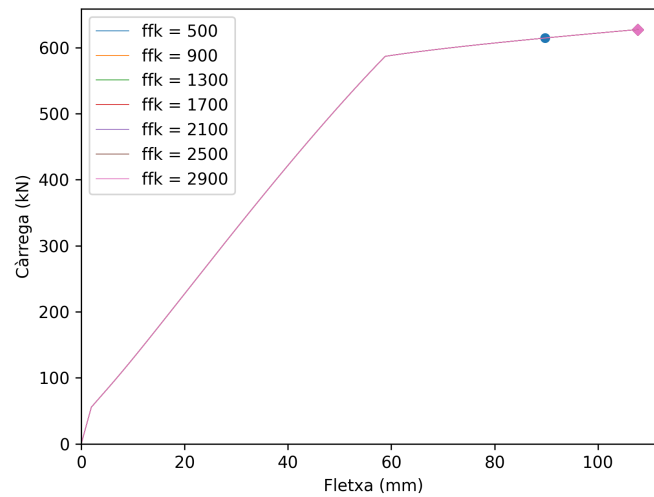


Figura B.12: Gràfic del comportament d'una biga de 400×600 mm reforçada amb materials compòsits de diferents resistències.

B.4 Biga 4 (100 × 180 mm)

B.4.1 Estudi de la f_c

Taula B.19: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

f_c (MPa)	P_{cr} Sense FRP (kN)	P_{cr} Amb FRP (kN)	Increment P_{cr}	P_u Sense FRP (kN)	P_u Amb FRP (kN)	Increment P_u
20	26.2	-	-	26.32	40.53	+53.99%
30	28.1	-	-	28.7	53.77	+87.35%
40	29.1	56.45	+93.99%	30.3	64.4	+112.54%
50	29.6	57.1	+92.91%	31.54	73.54	+133.16%

Taula B.20: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

f_c (MPa)	δ_{cr} Sense FRP (kN)	δ_{cr} Amb FRP (kN)	Increment δ_{cr}	δ_u Sense FRP (kN)	δ_u Amb FRP (kN)	Increment δ_u
20	28.1	-	-	33.11	26.88	-18.82%
30	23.9	-	-	41.76	30.48	-27.01%
40	21.9	26.9	+22.83%	50.13	34.64	-30.9%
50	20.5	24.4	+19.02%	58.12	38.76	-33.31%

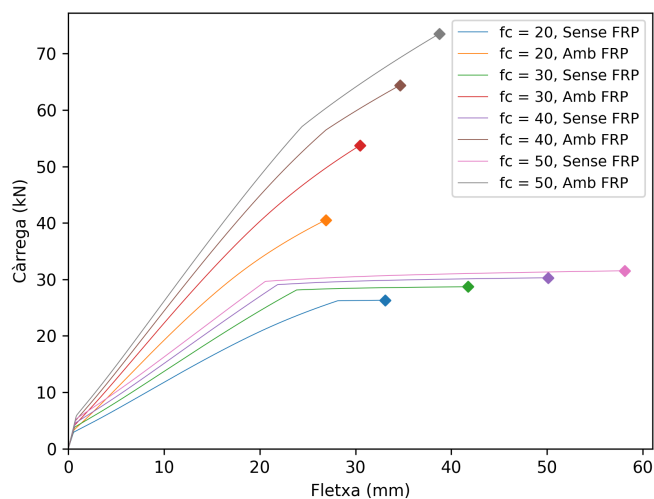


Figura B.13: Gràfic per bigues de 100 × 180 mm de diferents resistències del formigó amb reforç i sense.

3.4.2 Estudi de la E_f

Taula B.21: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

E_f (GPa)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
-	42.21	-	43.15	-
40	51.37	+21.7%	55.14	+27.79%
60	55.68	+31.91%	58.6	+35.81%
80	60.28	+42.81%	61.35	+42.18%
100	-	-	63.31	+46.72%
120	-	-	64.69	+49.92%
140	-	-	65.97	+52.89%
160	-	-	67.16	+55.64%
180	-	-	68.26	+58.19%
200	-	-	69.29	+60.58%

Taula B.22: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

E_f (GPa)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
-	20.32	-	33.86	-
40	22.28	+9.65%	28.4	-16.13%
60	23.24	+14.37%	26.89	-20.58%
80	24.58	+20.96%	25.75	-23.95%
100	-	-	24.95	-26.31%
120	-	-	24.37	-28.03%
140	-	-	23.85	-29.56%
160	-	-	23.37	-30.98%
180	-	-	22.94	-32.25%
200	-	-	22.54	-33.43%

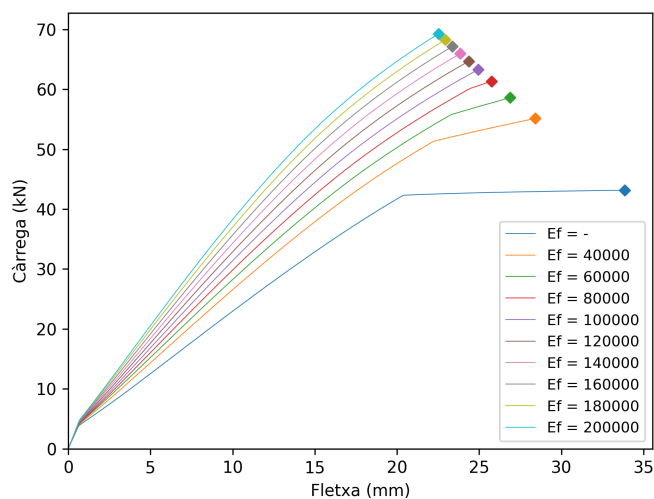


Figura B.14: Gràfic del comportament d'una biga de 100×180 mm reforçada amb materials compòsits de diferents mòduls elàstics.

3.4.3 Estudi de la A_f

Taula B.23: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

A_f (mm ²)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
0	42.3	-	43.15	-
20	44.12	+4.3%	46.59	+7.97%
40	45.97	+8.68%	49.29	+14.23%
80	49.55	+17.14%	53.46	+23.89%
120	53.11	+25.56%	56.64	+31.26%
160	56.65	+33.92%	59.2	+37.2%
200	60.18	+42.27%	61.35	+42.18%

Taula B.24: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una biga sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

A_f (mm ²)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
0	20.37	-	33.85	-
20	20.71	+1.69%	32.32	-4.52%
40	21.11	+3.61%	31.07	-8.21%
80	21.84	+7.21%	29.15	-13.88%
120	22.65	+11.18%	27.74	-18.05%
160	23.52	+15.44%	26.63	-21.33%
200	24.48	+20.19%	25.75	-23.93%

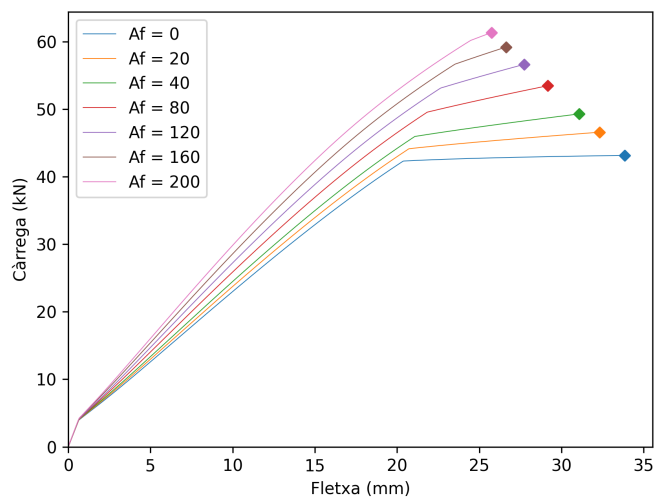


Figura B.15: Gràfic del comportament d'una biga de 100×180 mm reforçada amb materials compòsits de diferents àrees.

Estudi de la f_{fk}

En el cas d'aquest paràmetre, totes les bigues reforçades es comporten de la mateixa manera degut a que la resistència del formigó és més baixa que la del material compòsit i, per tant, trenca abans. És per aquest motiu que per aquest paràmetre no hi ha taules comparatives del comportament.

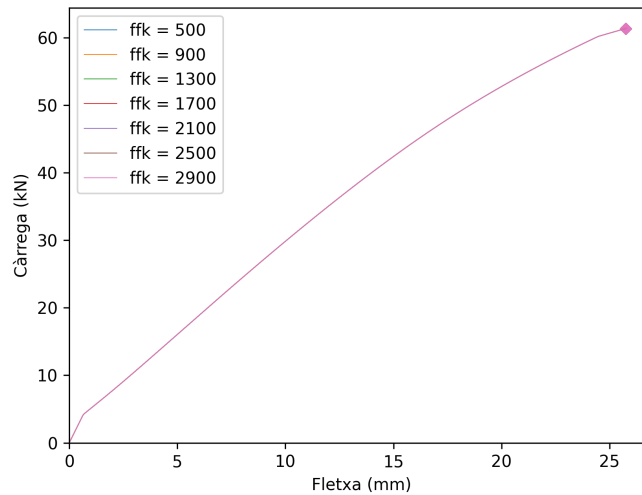


Figura B.16: Gràfic del comportament d'una biga de 100×180 mm reforçada amb materials compòsits de diferents resistències.

B.5 Llosa (1000 × 250 mm)

B.5.1 Estudi de la f_c

Taula B.25: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una llosa sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

f_c (MPa)	P_{cr} Sense FRP (kN)	P_{cr} Amb FRP (kN)	Increment P_{cr}	P_u Sense FRP (kN)	P_u Amb FRP (kN)	Increment P_u
20	387.3	401.3	+3.61%	392.87	414.15	+5.42%
30	403.4	417.9	+3.59%	411.32	446.61	+8.58%
40	413.0	427.8	+3.58%	423.5	471.13	+11.25%
50	420.0	434.9	+3.55%	432.84	491.58	+13.57%

Taula B.26: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una llosa sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

f_c (MPa)	δ_{cr} Sense FRP (kN)	δ_{cr} Amb FRP (kN)	Increment δ_{cr}	δ_u Sense FRP (kN)	δ_u Amb FRP (kN)	Increment δ_u
20	67.2	68.2	+1.49%	92.51	89.95	-2.77%
30	58.9	59.6	+1.19%	115.37	112.01	-2.91%
40	54.7	55.1	+0.73%	136.17	132.52	-2.68%
50	52.0	52.4	+0.77%	155.35	151.69	-2.36%

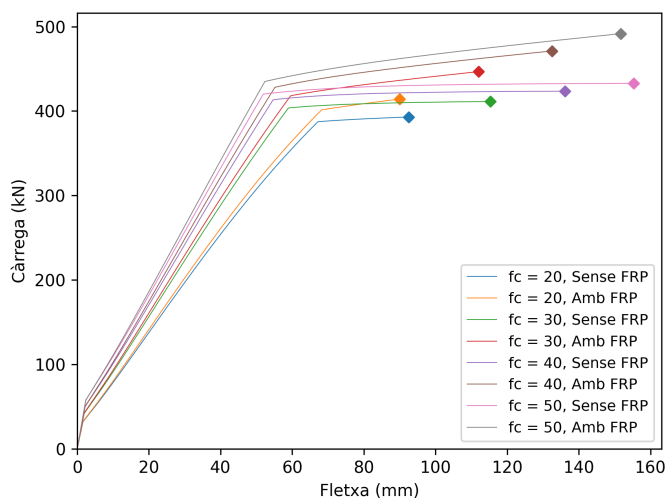


Figura B.17: Gràfic per lloses de 1000 × 250 mm de diferents resistències del formigó amb reforç i sense.

B.5.2 Estudi de la E_f

Taula B.27: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una llosa sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

E_f (GPa)	P_y (kN)	Increment P_y	P_u (kN)	Increment P_u
0	396.5	-	403.29	-
40	403.51	+1.77%	418.23	+3.7%
60	407.3	+2.72%	425.18	+5.43%
80	410.8	+3.61%	431.82	+7.07%
100	414.2	+4.46%	438.18	+8.65%
120	417.9	+5.4%	444.28	+10.16%
140	421.4	+6.28%	450.15	+11.62%
160	425.0	+7.19%	455.8	+13.02%
180	428.6	+8.1%	461.25	+14.37%
200	432.0	+8.95%	462.11	+14.59%

Taula B.28: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una llosa sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

E_f (GPa)	δ_y (mm)	Increment δ_y	δ_u (mm)	Increment δ_u
0	62.3	-	104.22	-
40	62.6	+0.48%	102.69	-1.47%
60	62.9	+0.96%	101.93	-2.2%
80	63.0	+1.12%	101.18	-2.92%
100	63.2	+1.44%	100.45	-3.62%
120	63.5	+1.93%	99.72	-4.32%
140	63.6	+2.09%	99.02	-4.99%
160	63.9	+2.57%	98.33	-5.65%
180	64.0	+2.73%	97.66	-6.29%
200	64.2	+3.05%	92.45	-11.29%

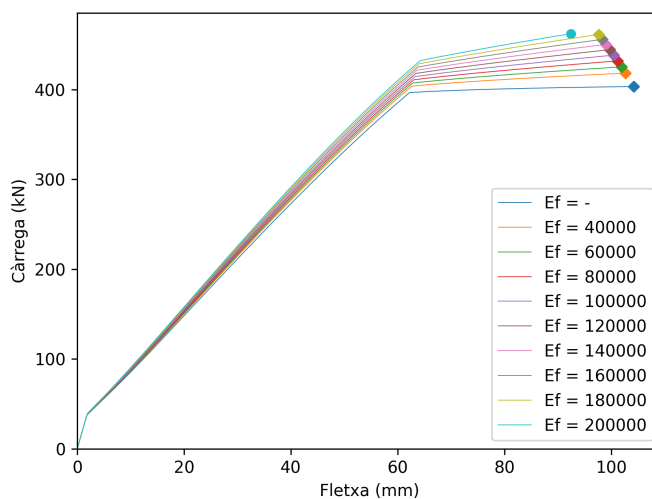


Figura B.18: Gràfic del comportament d'una llosa de 1000×250 mm reforçada amb materials compòsits de diferents mòduls elàstics.

B.5.3 Estudi de la A_f

Taula B.29: Taula de l'increment de la càrrega respecte a una llosa sense reforç en el límit elàstic (P_y) i el punt de ruptura (P_u).

$A_f(\text{mm}^2)$	$P_y(\text{kN})$	Increment P_y	$P_u(\text{kN})$	Increment P_u
0	396.5	-	403.29	-
20	398	+0.38%	406.4	+0.77%
40	399.3	+0.71%	409.45	+1.53%
80	402.2	+1.44%	415.36	+2.99%
120	405	+2.14%	421.05	+4.4%
160	407.9	+2.88%	426.53	+5.76%
200	410.8	+3.61%	431.82	+7.07%

Taula B.30: Taula de l'increment de la fletxa respecte a una llosa sense reforç en el límit elàstic (δ_y) i el punt de ruptura (δ_u).

$A_f(\text{mm}^2)$	$\delta_y(\text{mm})$	Increment δ_y	$\delta_u(\text{mm})$	Increment δ_u
0	62.3	-	104.22	-
20	62.3	+0.0%	103.91	-0.3%
40	62.4	+0.16%	103.61	-0.59%
80	62.6	+0.48%	102.99	-1.18%
120	62.7	+0.64%	102.38	-1.77%
160	62.9	+0.96%	101.78	-2.34%
200	63.0	+1.12%	101.18	-2.92%

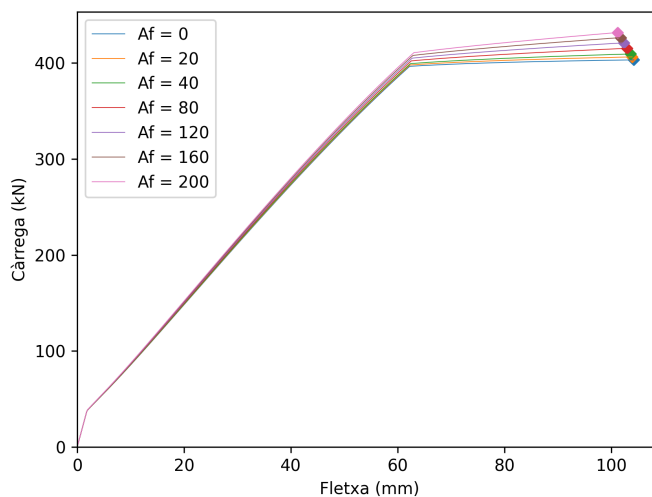


Figura B.19: Gràfic del comportament d'una llosa de 1000×250 mm reforçada amb materials compòsits de diferents àrees.

B.5.4 Estudi de la f_{fk}

En el cas d'aquest paràmetre, pràcticament totes les lloses reforçades es comporten de la mateixa manera degut a que la resistència del formigó és més baixa que la del material compòsit i, per tant, trenca abans. És per aquest motiu que per aquest paràmetre no hi ha taules comparatives del comportament. L'únic valor d' f_{fk} pel qual la resistència del FRP és més baixa que la del formigó i el conjunt falla degut al FRP és per 500 MPa.

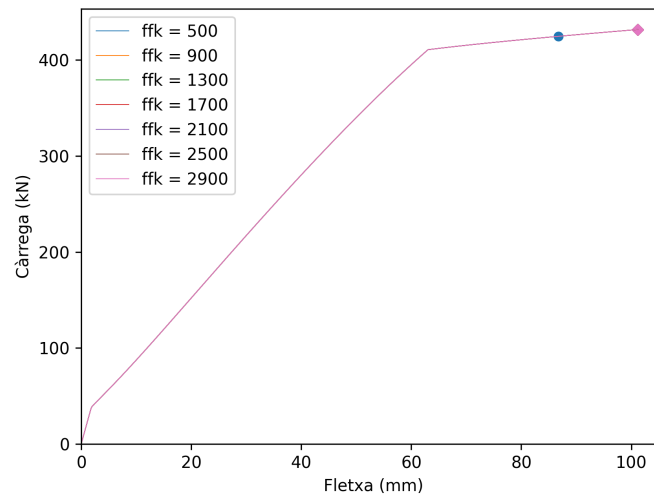


Figura B.20: Gràfic del comportament d'una llosa de 1000×250 mm reforçada amb materials compòsits de diferents resistències.