



**EPS**

Escola Politècnica  
Superior

## **Projecte/Treball Fi de Carrera**

**Estudi:** Enginyeria Tècn. Ind. Mecànica. Pla 2002

**Títol:** Reforç d'un element estructural mitjançant l'adhesió de làmines de compòsits reforçats amb fibres FRP

**Document:** ANNEXES

**Alumne:** Jesús Franganillo López

**Director/Tutor:** Albert Turón Travessa

**Departament:** Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

**Àrea:** Mecànica dels medis continus i teoria d'estructures

**Convocatòria (mes/any):** 09/08

# ÍNDEX

## ANNEXES

### **A. REFORÇ ESTRUCTURAL MITJANÇANT SISTEMA FRP**

#### **A.1. APLICACIONS DEL PRODUCTE, COST I IMPLANTACIÓ EN EL MERCAT-----6**

- A.1.1. Introducció
- A.1.2. Breu història
- A.1.3. Classificació dels materials compostos
- A.1.4. Descripció general del sistema
  - A.1.4.1. Reforç amb materials preconformats
  - A.1.4.2. Reforç amb teixits de fibra
  - A.1.4.3. Reforç amb bandes doblegades amb angles
- A.1.5. Camp d'aplicació
  - A.1.5.1. Reforç a flexió
  - A.1.5.2. Reforç per confinament
  - A.1.5.3. Reforç a tallant
  - A.1.5.4. Reforç de murs
- A.1.6. Cost de la solució i comparació amb altres sistemes
  - A.1.6.1. Cost del material
  - A.1.6.2. Cost de instal·lació
  - A.1.6.3. Cost de manteniment
  - A.1.6.4. Durabilitat
  - A.1.6.5. Costos associats
- A.1.7. Implantació al mercat Espanyol
- A.1.8. Projecció futura

#### **A.2. CRITERIS GENERALS DE DISSENY-----13**

- A.2.1. Normativa vigent, present i futura
  - A.2.1.1. Normatives generals
  - A.2.1.2. Normatives particulars
- A.2.2. Característiques mecàniques dels materials
  - A.2.2.1. Les fibres de carboni
  - A.2.2.2. Les resines
- A.2.3. Criteris per reforçar (Segons EHE)
  - A.2.3.1. Criteris per reforços a flexió
  - A.2.3.2. Criteris per reforços a compressió
  - A.2.3.3. Criteris per reforços a tallant
- A.2.4. Altres aspectes: Aancoratge, durabilitat i incendi
  - A.2.4.1. *Ancoratge*
  - A.2.4.2. Durabilitat
  - A.2.4.3. Foc
- A.2.5. Errors habituals de concepció i disseny

## **A.3. ESTUDI DE LES PROPIETATS DELS MATERIALS COMPOSTOS-----25**

- A.3.1. Propietats de les fibres
- A.3.2. Propietats de la resina
- A.3.3. Propietats del laminat
  - A.3.3.1. Resistència
  - A.3.3.2. Efecte d'orientació de les fibres
  - A.3.3.3. Resistència a flexió
  - A.3.3.4. Resistència a tallant
  - A.3.3.5. Resistència específica
  - A.3.3.6. Capacitat de deformació
  - A.3.3.7. Mòdul d'elasticitat o mòdul de deformació
  - A.3.3.8. Mòdul específic d'elasticitat
  - A.3.3.9. Densitat
  - A.3.3.10. Coeficient de Poisson
  - A.3.3.11. Coeficient de dilatació tèrmica
  - A.3.3.12. Fluència
  - A.3.3.13. Relaxació
  - A.3.3.14. Tenacitat
  - A.3.3.15. Durabilitat
  - A.3.3.16. Envelliment físic de la matriu del polímer
  - A.3.3.17. Influència de la humitat
  - A.3.3.18. Efectes higrotèrmics
  - A.3.3.19. Ambient alcalí
  - A.3.3.20. Efectes de les baixes temperatures
  - A.3.3.21. Efecte del cicle gel – desgel
  - A.3.3.22. Influència de la radiació ultraviolada (UV)
  - A.3.3.23. Fatiga
  - A.3.3.24. Inflamabilitat i resistència al foc

## **A.4. ASSAJOS I CONTROL DE QUALITAT-----40**

- A.4.1. Introducció
- A.4.2. Caracterització de materials constituents
  - A.4.2.1. Caracterització de fibres
  - A.4.2.2. Caracterització de matrius i adhesius
- A.4.3. Caracterització del laminat
  - A.4.3.1. Determinació de densitat i volum de fibra
  - A.4.3.2. Determinació de les propietats mecàniques de tracció
  - A.4.3.3. Determinació de la resistència a tallant pla
- A.4.4. CARACTERITZACIÓ DE L'ESTRUCTURA
  - A.4.4.1. Sistemes de reforç
  - A.4.4.2. Preparació i geometria de les provetes
  - A.4.4.3. Resultats

## **A.5. POSADA EN OBRA-----48**

- A.5.1. Introducció
- A.5.2. Sistema de laminats a base de fibra de carboni
  - A.5.2.1. Materials utilitzats
  - A.5.2.2. Requeriments generals
  - A.5.2.3. Transport i preparació dels laminats
  - A.5.2.4. Posada en obra
  - A.5.2.5. Recobriment del laminats
  - A.5.2.6. Posada en càrrega
  - A.5.2.7. Control de qualitat
- A.5.3. Sistema de teixits a base de fibra de carboni
  - A.5.3.1. Materials utilitzats
  - A.5.3.2. Requeriments generals per l'execució del reforç

- A.5.3.3. Treballs previs a l'execució
- A.5.3.4. Regeneració
- A.5.3.5. Posada en obra
- A.5.3.6. Recobriment per qüestions estètiques
- A.5.3.7. Recobriment com protecció contra incendis
- A.5.3.8. Posada en càrrega
- A.5.3.9. Control de qualitat

## Índex figures

- Fig A.1. Imatges d'estructures tipus
- Fig A.2. Relació Tensió-Deformació segons el material base que utilitzem per produir les fibres
- Fig A.3. Gràfic representatiu de la col·locació de metres lineals de fibra durant el període d'anys del 1997-2003
- Fig A.4. Exemple d'aplicació dels FRP com a sistema estructural
- Fig A.5. Exemple de fulles i laminats, en forma comercial
- Fig A.6. Diagrama de pivots per seccions amb reforç
- Fig A.7. Domini dels plans que pivoten en R
- Fig A.8. Domini dels plans que pivoten en B
- Fig A.9. Gràfic Moment-Àrea de reforç []
- Fig A.10. Tipus de reforç a tallant
- Fig A.11. Gràfic representatiu de la col·locació del laminat a flexió segons la norma Europea
- Fig A.12. Mòdul en funció de l'orientació de les fibres d'un compost típic de Vidre/Poliéster amb una configuració  $[\theta_1/-\theta_2/\theta_1]$ , on  $\theta$  és l'angle en graus.
- Fig A.13. Mòdul tallant en funció de l'orientació de les fibres d'un compost típic de Vidre/Poliéster amb una configuració  $[\theta_1/-\theta_2/\theta_1]$ , on  $\theta$  és l'angle en graus.
- Fig A.14. Coeficient de Poisson en funció de l'orientació de les fibres d'un compost típic de Vidre/Poliéster amb una configuració  $[\theta_1/-\theta_2/\theta_1]$ , on  $\theta$  és l'angle en graus.
- Fig A.15. Absorció d'aigua. Comportament de compostos polimèrics
- Fig A.16. Comportament típic de fatiga d'un compost de E-glass/epoxi
- Fig A.17. Mètode d'assaig de filaments
- Fig A.18. Corba tensió-deformació típica
- Fig A.19. Proveta de tracció per assajos mecànics en resina
- Fig A.20. Proveta d'assaig a tracció
- Fig A.21. Corba tensió-deformació per un material compost grafit-epoxi
- Fig A.22. Posicionament de les galgues extensomètriques per la mida de les propietats a tallant a partir d'una proveta  $[45/-45]_{2s}$  a tracció
- Fig A.23. Corba tensió-deformació d'un assaig a tracció de la proveta  $[45/-45]_{2s}$  d'un material compost grafit/epoxi
- Fig A.24. Esquema de reforços estudiats
- Fig A.25. Esquema de preparació de provetes
- Fig A.26. Geometria de les provetes assajades

## Índex de taules

- Taula A.1. Classificació de materials compostos
- Taula A.2. Característiques tipus de fulles de fibra de carboni
- Taula A.3. Característiques tipus de laminats de fibra de carboni
- Taula A.4. Taula resum dels camps d'aplicació de laminats i fulles de fibres
- Taula A.5. Valors típics de les propietats de les fibres
- Taula A.6. Propietats de les resines
- Taula A.7. Resistència típica en laminats unidireccionals
- Taula A.8. Efecte de l'orientació de les fibres a la resistència a tracció d'un laminat Vidre/Poliéster
- Taula A.9. Valors típics dels mòduls d'elasticitat d'un laminat unidireccional
- Taula A.10. Coeficients de dilatació tèrmica comuns per diferents materials
- Taula A.11. Assajos contra el foc per materials de construcció
- Taula A.12. Dimensions recomanades de la proveta en mm

## **B. COMPORTAMENT EXPERIMENTAL**

### **B.1. ASSAIG A FLEXIÓ-----55**

- B.1.1. Introducció
- B.1.2. Assaig de la biga VD-TFC1
  - B.1.2.1. Evolució de la fletxa amb la càrrega
  - B.1.2.2. Comportament del FRP
- B.1.3. Assaig de la biga VD-TFC2
  - B.1.3.1. Evolució de la fletxa amb la càrrega
  - B.1.3.2. Comportament del FRP
- B.1.4. Assaig de la biga VD-CFK1
  - B.1.4.1. Evolució de la fletxa màxima amb la càrrega
  - B.1.4.2. Comportament del FRP
- B.1.5. Anàlisi comparatiu
  - B.1.5.1. Biga VD-TFC1
  - B.1.5.2. Biga VD-TFC2
  - B.1.5.3. Biga VD-CFK1

### **B.2. ASSAIG A COMPRESSIÓ-----68**

- B.2.1. Introducció
- B.2.2. Equips d'assaig
- B.2.3. Assaigs
  - B.2.3.1. Assaig de formigó sense confinar
  - B.2.3.2. Assaig de formigó confinat amb tub d'acer
  - B.2.3.3. Assaig de formigó confinat amb FRP
  - B.2.3.4. Conclusions

### **Índex figures**

- Figura B.1. Configuració deformada de la biga VD-TFC1
- Figura B.2. Assajos de la biga VD-TFC1; (Esq) Detall de la junta al inici de l'assaig; (Dret) Detall de la junta en fase de ruptura.
- Figura B.3. Gràfica càrrega-fletxa de la biga VD-TFC1
- Figura B.4. Gràfica càrrega-deformació del TFC de la biga VD-TFC1
- Figura B.5. Gràfica càrrega-obertura de les juntes de la biga VD-TFC1
- Figura B.6. Configuració deformada de la biga VD-TFC2
- Figura B.7. Desadhesió del TFC a la biga VD-TFC2
- Figura B.8. Gràfica Càrrega-Fletxa, etapa 1 de la biga VD-TFC2
- Figura B.9. Gràfica Càrrega-Fletxa, etapa 2 de la biga VD-TFC2
- Figura B.10. Gràfica Càrrega-Fletxa, etapa 3 de la biga VD-TFC2
- Figura B.11. Gràfica Càrrega-Deformació del TFC, etapa 1 de la biga VD-TFC2
- Figura B.12. Gràfica Càrrega-Deformació del TFC, etapa 2 de la biga VD-TFC2
- Figura B.13. Gràfica Càrrega-Deformació del TFC, etapa 3 de la biga VD-TFC2
- Figura B.14. Gràfica Càrrega-Obertura de junta etapa 1 de la biga VD-TFC2
- Figura B.15. Gràfica Càrrega-Obertura de junta etapa 2 de la biga VD-TFC2
- Figura B.16. Gràfica Càrrega-Obertura de junta etapa 3 de la biga VD-TFC2
- Figura B.17. Detall de la desadhesió del TFC a la biga VD-TFC2; (Esq) Fisuració inicial a la junta; (Dret) Desadhesió del TFC.
- Figura B.18. Configuració deformada de la biga VD-CFK1
- Figura B.19. Detall de la junta central entre dovelas després de l'assaig VD-CFK1
- Figura B.20. Gràfica Càrrega-Fletxa de la biga VD-CFK1
- Figura B.21. Gràfica Càrrega-Deformació del CFK de la biga VD-CFK1
- Figura B.22. Gràfica Càrrega-Obertura de juntes de la biga VD-CFK1
- Figura B.23. Assaig de la biga VD-CFK1; (Esq) Detall de les juntes centrals ; (Dret) Detall de la zona superior de la junta 3
- Figura B.24. Gràfica comparativa Càrrega-Fletxa, biga VD-TFC1
- Figura B.25. Gràfica comparativa Càrrega-Fletxa, biga VD-TFC2

Figura B.26. Gràfica comparativa Càrrega-Fletxa, etapa 3, VD-TFC2  
Figura B.27. Gràfica comparativa Càrrega-Fletxa, biga VD-CFK1  
Figura B.28. Detall del despreniment del CFK a la biga VD-CFK1  
Figura B.29. Instrumentació de provetes per assaig de formigó sense confinar  
Figura B.30. Instrumentació de provetes per assaig de formigó confinat amb tub d'acer  
Figura B.31. Corba càrrega-desplaçament axial, sense i amb la correcció del desplaçament inicial  
Figura B.32. Esquema del mode de ruptura de les provetes assajades  
Figura B.33. Comportament tensió-deformació uniaxial dels formigons estudiats  
Figura B.34. Models de fallida dels formigons confinats amb diferents espessors de tub d'acer, amb aplicació de càrrega únicament a la secció de formigó.  
Figura B.35. Models de fallida dels formigons confinats amb diferents espessors de tub d'acer, amb aplicació de càrrega en tota la secció  
Figura B.36. Corbes tensió-deformació axial del H30 confinat amb tub d'acer  
Figura B.37. Comparatiu de corbes tensió-deformació axial dels formigons H70 i HE70 confinades amb tub d'acer  
Figura B.38. Corba càrrega-deformació axial del H30 confinat amb tub d'acer  
Figura B.39. Corbes càrrega-deformació axial dels formigons H70 i HE70 confinades amb tub d'acer  
Figura B.40. Assaig de tracció dels FRP  
Figura B.41. Procediment típic de congreny: (a) Imprimació, (b) Aplicació de sistema epoxy sobre la capa d'FRP, (c) Colocació de la primera capa de congreny, (d) Congreny amb ajuda del corró de ranura, (e) Aplicació d'última capa del sistema epoxy.  
Figura B.42a). Esquemes del mode de ruptura dels formigons confinats amb FRP  
Figura B.42b). Esquemes del mode de ruptura dels formigons confinats amb FRP  
Figura B.43. Esquemes del mode de ruptura del extrem superior de les provetes  
Figura B.44. Corbes tensió-deformació del HF30 confinades amb FRP de vidre  
Figura B.45. Corbes tensió-deformació del HF30 confinades amb FRP de carboni  
Figura B.46. Corbes tensió-deformació del HF70 confinades amb FRP de vidre  
Figura B.47. Corbes tensió-deformació del HF70 confinades amb FRP de carboni

## Índex de taules

Taula B.1. Programa experimental d'assajos  
Taula B.2. Propietats mecàniques dels formigons sense confinar estudiats  
Taula B.3. Propietats dels FRP obtinguts experimentalment i dades del fabricant  
Taula B.4. Assaigs de confinament amb FRP: programa d'assaigs  
Taula B.5. Caracterització i ubicació de la ruptura de la proveta i del FRP  
Taula B.6. Resultats dels assajos de formigó confinat amb tub d'acer  
Taula B.7. Resultats dels assajos de formigó confinat amb FRP

## A. REFORÇ ESTRUCTURAL MITJANÇANT SISTEMA FRP

### A.1. APLICACIONS DEL PRODUCTE, COST I IMPLANTACIÓ EN EL MERCAT [3]

#### A.1.1. Introducció

El reforç d'estructures de formigó és el camp de la construcció on més ràpidament i amb major èxit s'estan aplicant els nous materials compostos (FRP, o polímers armats amb fibres). Això es degut sobretot a la seva resistència a la corrosió i lleugeresa, que es tradueix en facilitat, estalvi en transport i posada en obra. Els reforços amb FRP es realitzen de forma molt ràpida, amb pocs operaris i utilitzant medis auxiliars lleugers, es minimitzen les interrupcions d'ús de l'estructura i les molèsties als usuaris.



Fig A.1. Imatges d'estructures tipus

Els "composites" o materials compostos es defineixen com la unió d'un o més materials clarament identificables, una matriu i unes fibres, que actuen d'una manera conjunta i solidària on les propietats en conjunt són superiors a les que tenen ambdós per separat. D'aquesta forma s'aconsegueix unes prestacions òptimes, en quan a comportament mecànic, principalment.

Per un determinat propòsit; existeixen composts naturals (fusta) i artificials (formigó armat). Els composts que s'utilitzen com a elements de reforç estructural, són plàstics a base de resines d'epoxi, armats amb filaments continus i rígids de fibres (FRP) de carboni, d'aramida, de vidre o polièster.

Aquests es poden presentar en diferents formes comercials, tal com; laminats, cordons, mantes flexibles unidireccionals i teixits bidireccionals, pre-impregnats o no.

L'ús més habitual és en reforços a flexió, tot i que encara falten alguns aspectes d'estudi, existeix un procediment de dimensionament firmament establert i comunament acceptat. No passa el mateix amb reforços a tallant, on els models proposats son diferents i controvertits, i encara no existeixen regles de projecte uniforme o son tractades molt per sobre en les recomanacions de disseny editades fins la data.

Aquestes investigacions, així com multitud d'aplicacions arreu del món, han provat que el reforç amb FRP és una tècnica eficaç per incrementar la capacitat última front a esforços tallants, però també han posat de manifest la necessitat de continuar investigant per avançar en el coneixement experimental i teòric del reforç a tallant, i arribar a establir procediments de disseny idonis que aprofitin i optimitzin les excel·lents propietats del material.

### A.1.2. Breu història

A mitjans dels 80, a l'EMPA ( Laboratori Suís de materials) situat a Zürich, de la mà del professor Urs Maier, es van començar a fer probes per la utilització dels materials compostos com reforç exterior d'elements de formigó armat. Fins aquests moments s'havia anat utilitzant el mètode L'Hermite de xapes d'acer adherides amb epoxi. La intenció de les investigacions era substituir la xapa pels materials compostos, degut a les seves prestacions mecàniques.

Entre els diferents tipus de fibres ( grafit, carboni, vidre, aramida) que podem fer servir per aquests ús, es va decidir utilitzar les de carboni, ja que tenen el mòdul d'elasticitat més alt, compatible amb la deformació del formigó armat. Les altres dues (vidre i aramida) tot i sent substancialment més barates, donen unes propietats molt inferiors.

Evidentment, segons mostra el gràfic següent, les de grafit són les que presenten millors prestacions, però el seu elevat preu no fa rentable utilitzar-les.

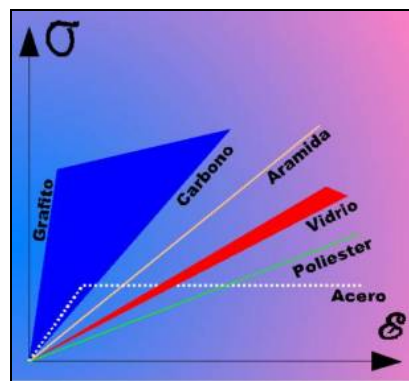


Fig A.2. Relació Tensió-Deformació segons el material base que utilitzem per produir les fibres( Font: [3])

En quan a les matrius, la més compatible amb les fibres de carboni ha demostrat ser la resina epoxi. És la que millor mulla les fibres i la que més adherència té amb elles. A més, té un curat sense restricció, cull és important per l'ús al qual va destinat.

Al 1991 a l'EMPA, es van realitzar assajos per veure la factibilitat de la utilització dels laminats FRP. En aquest mateix any es va executar la primera obra real. Es va reforçar el pont Ibach a Lucerna (Suïssa).

Als següents anys es van seguir realitzant alguns reforços a diferents estructures, d'una manera encara experimental.

Al 1995 es va començar a utilitzar aquest tipus de sistema d'una manera sistemàtica. Es va començar a comercialitzar els primers sistemes de reforç per part de distintes empreses. A Espanya, la primera obra que es va realitzar va ser al Pont del Dragó a Barcelona. Va consistir en reforçar varies bigues que havien estat malmeses, aquesta va ser al 1996. A partir d'això, aquest tipus de sistemes de reforç s'ha anat popularitzant i fent pràctica comú a Espanya.

### A.1.3. Classificació dels materials compostos

Els materials compostos s'han classificat de moltes maneres segons les idees i conceptes necessaris per identificar-los. Una classificació útil i completa es mostra a la taula següent amb alguns exemples.

La majoria dels materials que apareixen a la naturalesa obtenen les seves magnífiques propietats de la combinació de dos o més components.



Així per exemple, molts teixits del cos, que tenen una alta resistència combinada amb una enorme flexibilitat, estan fets de fibres resistents tals com el col·lagen, embegudes a una matriu de rigidesa inferior. Les fibres s'alineen de tal manera que proporcionen una rigidesa màxima a la direcció de majors càrregues sent capaces de lliscar unes sobre les altres perquè el teixit sigui flexible. De manera similar, quan s'observa la fusta amb el microscopi és possible distingir la seva estructura fibril·lar.

Tipus	Exemples
<b>Materials compostos naturals</b>	Fusta
	Ossos
	Bambú
	Músculs i altres teixits
<b>Materials microcompostos</b>	Aleacions metàl·liques
	Termoplàstics endurits
	Poliestiré de impacte ABS
	Termoplàstics reforçats
<b>Macrocomposites</b>	Acer galvanitzat
	Bigues de formigó armat
	Pales d'helicòpters

Taula A.1. Classificació de materials compostos (Font: [3])

Tot i que els materials compostos són productes d'alta tecnologia per alguns, aquests prenen les seves característiques d'organismes vius, com les microestructures de la fusta, etcètera. Un arbre és un bon exemple d'un material compost natural, sent la cel·lulosa el material fibrós i la lignina un polímer natural, formant així, les parets cel·luloses de la fusta, reforçant el material entre ells.

Les fibres i matrius de materials compostos avançats poden ser combinades utilitzant una varietat de processos de fabricació, segons el seu destí. Llavors, es selecciona l'orientació de les fibres, el número i tamany de filaments, i la complexitat de les fibres entre altres coses. La paraula "composites" es refereix usualment a reforços amb fibra de materials metàl·lics, polimèrics i ceràmics.

#### A.1.4. Descripció general del sistema

Els sistemes de reforç amb "composites", consisteixen en l'encolat extern sobre la superfície del formigó, i d'uns materials amb unes prestacions mecàniques excel·lents (principalment la resistència a tracció). D'aquesta manera els materials compostos actuen com una armadura externa que fa unes funcions molt similars a les que fa l'armadura interna d'acer.

Els principals sistemes de reforç amb materials compostos són els següents:

##### A.1.4.1. Reforç amb materials preconformatos

El material compost ve en forma de laminats, on les fibres porten un element resistent i una matriu de resina. Normalment tenen un gruix entre 1,2 i 1,4mm i una amplada entre 50 i 80mm. Es presenten en rotllos de longitud entre 100 i 500 ml que després es tallen a l'obra a la mida desitjada.

Com adhesiu per enganxar els laminats al suport s'utilitza una resina epoxi. Normalment ha de ser un adhesiu de dos components de consistència pastosa i elevada tixotropia\*<sub>1</sub> per poder col·locar-ho a les parets o sostres sense cap problema de desadhesió. Les característiques que ha de tenir aquest adhesiu han de ser:

- Bona resistència, principalment a tracció i esquinçament.
- Temperatura de transmissió vítria elevada.
- Bona adherència al formigó i laminats.

#### A.1.4.2. Reforç amb teixits de fibra

Els teixits a base de fibra de carboni o vidre son materials en els que no s'ha col·locat encara la matriu de resina. Normalment tenen entre el 95-98% de les fibres en direcció longitudinal i entre el 2-5% en direcció transversal, per efectuar el cosit i evitar el descosit de les longitudinals.

Els teixits tenen un espessor entre el 0,13 i 0,30mm, amb gramatge entre 200 i 800 g/m<sup>3</sup>. Es presenten normalment amb amplades entre el 30 i 60 cm, en rotllos entre 40 i 100 ml, que posteriorment es tallen en obra a les dimensions desitjades.

Per adherir els teixits al suport de formigó s'utilitzen resines epoxi fluides. Aquesta fluïdesa permet a la resina penetrar entre les fibres del teixit, impregnar-les, mullar-les i formar el material compost.

#### A.1.4.3. Reforç amb bandes doblegades amb angles

Existeix un tercer tipus de sistema que es compon d'un producte laminat, igual al descrit al primer sistema, però que ve doblegat en forma de "L" per l'adaptació a angles rectes. Aquesta forma es correcta per fer reforços a tallant. Aquests laminats es presenten en peces de longituds adequades per adaptar-s'hi a les dimensions més habituals de les bigues (entre 30 i 100cm per braç).

La resina que s'utilitza és la mateixa que pel sistema de laminat recte.

#### A.1.5. Camp d'aplicació

Els camps d'aplicació dels sistemes de reforç descrits anteriorment són els que es resumeixen a continuació.

##### A.1.5.1. Reforç a flexió

Per al reforç a flexió de bigues, biguetes forjats i altres elements de formigó armat s'utilitza, principalment, el mètode d'adhesió de laminats rectes o teixits de fibres. En ambdós casos consisteix en adherir el reforç que actuarà com armadura externa de tracció. L'adhesiu serveix per transmetre el esforç tallant entre el reforç i formigó.

Cal recalcar que aquest sistema de reforç no es pot utilitzar com armadura de compressió, ja que el pandeig és molt elevat degut a la seva esveltesa. Això podria provocar que s'estripi part del suport de formigó.

---

\*<sub>1</sub> *Tixotropia*: Propietat d'alguns fluids no newtonians i pseudoplàstics que mostren un canvi depenent del temps a la seva viscositat, quan més es sotmeti el fluid a esforços d'esquinçament, més disminueix la seva viscositat. Un fluid tixotròpic mostra una disminució de la viscositat al llarg del temps a un ritme d'esquinçament constant, mentre que un fluid pseudoplàstic mostra la disminució al augmentar el ritme d'esquinçament.

#### A.1.5.2. Reforç per confinament

S'utilitza per a elements sotmesos a compressió simple o composta. Aquest és realitzat principalment per pilars. El sistema utilitzat és el de teixits de fibres degut a la seva adaptabilitat a qualsevol forma del suport.

Amb els teixits s'embolica la peça a reforçar completament, de d'alt a baix. Es poden posar tantes capes de teixit com es desitgi. Aquest embolicat provoca un confinament de la peça que fa millorar el seu comportament front a càrregues. Quan la peça es comprimeix, s'escurça i per l'efecte Poisson es dilata transversalment. L'efecte de confinament consisteix en controlar aquesta dilatació transversal, millorant així la capacitat portant <sup>\*2</sup>.

#### A.1.5.3. Reforç a tallant

Per realitzar el reforç a tallant, el que es fa és col·locar les fibres de carboni com si fossin estreps externs, adherits per la resina epoxi. Per realitzar aquest tipus de reforç es poden utilitzar tant el sistema de teixits com el de laminats preconformats amb forma de "L". En ambdós casos es tracta de reforçar l'element de manera transversal.

#### A.1.5.4. Reforç de murs

Aquest és menys usual. Parlem de " murs de fabrica de maó " com de formigó. Aquests murs poden estar sotmesos a esforços longitudinals ( càrregues sísmiques, de vent) com verticals (càrregues gravitatòria). Amb el sistema d'adhesió de teixits de fibres col·locats en forma de creu de San Andreu, s'aconsegueix millorar la capacitat portant dels murs contra les càrregues incidents que s'han indicat anteriorment.

#### A.1.6. Cost de la solució i comparació amb altres sistemes

El sistema més habitual que s'ha anat utilitzant per reforçar elements de formigó, és l'adhesió de xapes d'acer per mitjà de resines epoxi (mètode l'Hermite). Els sistemes d'adhesió amb material compost és la solució alternativa i substitutiva a l'anterior. Per aquest motiu ara fem la comparació d'aquest dos sistemes.

##### A.1.6.1. Cost del material

L'acer és un material comparativament barat respecte a les fibres, que són cares. Es requereix gran aportació d'energia per la seva fabricació. Això, unit a les economies d'escala (materials poc utilitzats) fa que el cost del material sigui gran. Fent una estimació ràpida, podem parlar de 6 a 10 vegades més cares que l'acer.

##### A.1.6.2. Cost de instal·lació

Les fibres de carboni són un material extraordinàriament lleuger i fàcil de manipular. Això fa que la seva aplicació i instal·lació sigui molt ràpida, i pràcticament sense cap necessitat de mitjans auxiliars. En un dia es poden col·locar molts metres lineals, el que comporta un baix cost unitari d'aplicació.

En canvi, els elements d'acer són pesats i rígids. Necessiten mitjans auxiliars i estar pressionats fins l'enduriment de la resina d'adhesió, que fa que augmenti el cost.

S'estima que el cost del sistema amb xapes és 3 o 4 vegades més elevat que el de fibres.

---

<sup>\*2</sup> Capacitat portant, Es denomina a la capacitat del material per suportar les càrregues aplicades sobre ell.

#### A.1.6.3. Cost de manteniment

Les xapes d'acer pateixen per la corrosió, per això han de tenir un manteniment per conservar-les, tant pintant-les com protegint-les. Al contrari, les fibres no presenten aquest desavantatge, comportant una disminució del cost.

#### A.1.6.4. Durabilitat

La durabilitat que s'espera amb el reforç amb fibres respecte el de xapes d'acer, és molt superior, degut a que les fibres no pateixen l'efecte de corrosió, no és afectada per ambient marí, humit o amb agressió química. Excepte els impactes mecànics o una radiació solar excessiva, hi ha poques coses que puguin deteriorar significativament als materials compostos de fibres.

#### A.1.6.5. Costos associats

Aquests reforços normalment es realitzen en instal·lacions que estan en funcionament, comportant així uns costos associats, a part dels propis de l'execució (tallar el tràfic, parar la fàbrica..) que solen ser majors que els de l'execució.

Degut a que el sistema amb fibres és més fàcil i flexible de instal·lar, comporta una disminució d'aquests costos associats. Al contrari que el sistema de xapes d'acer.

#### A.1.7. Implantació al mercat Espanyol

Anteriorment s'ha indicat que la primera obra realitzada a Espanya data del 1996, però no és fins el 1997 que es comença a utilitzar d'una manera sistemàtica.

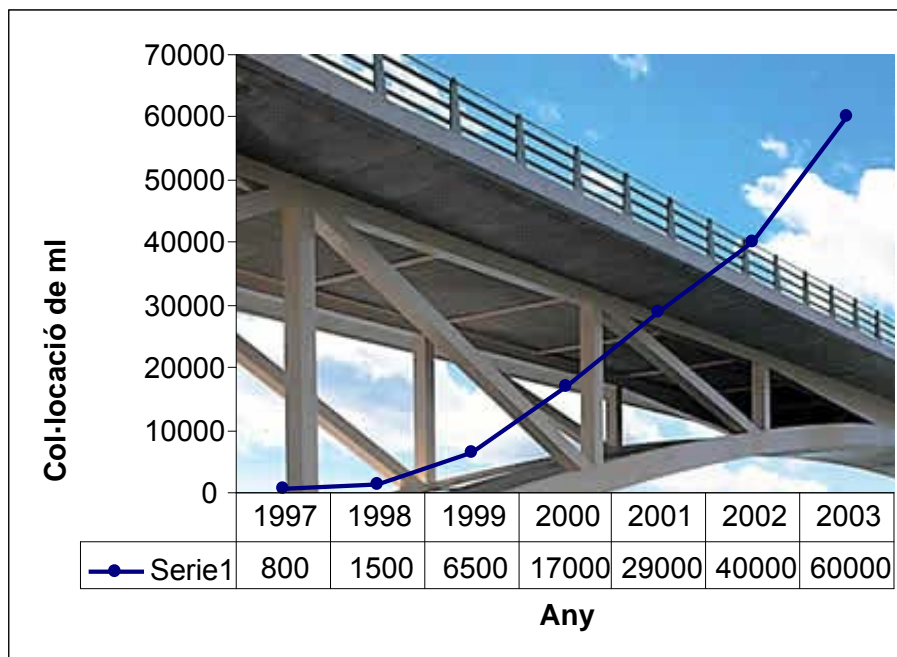


Fig A.3. Gràfic representatiu de la col·locació de metres lineals de fibra durant el període d'anys del 1997-2003 (Font: [3])

#### A.1.8. Projecció futura

El camps on s'estan efectuant més investigacions i en els que, probablement, veurem més avanços en el futur, són:

- *Laminats pretensats*; Es tracta d'optimitzar la capacitat dels laminats, que no és totalment utilitzada amb els reforços passius.
- *Barres de fibra de carboni*; Es tracta d'utilitzar la fibra de carboni, en forma de barres inserides al formigó, i no adherides externament amb una resina.
- *Noves fibres*; S'està realitzant l'estudi de noves fibres sintètiques, a partir, de les innumerables possibilitats que ens dona la ciencia dels polímers i plàstics.
- *Materials compostos híbrids*; Consisteix en la possibilitat d'utilitzar "composites" amb una mescla de fibres de carboni i vidre. D'aquesta forma es pot optimitzar la relació prestacions-preu.
- *Nous mètodes d'ancoratge*; Un dels principals problemes d'aquest tipus de reforç és el comportament d'ancoratge a les puntes, principalment per formigons de baixa resistència. El desenvolupament de mètodes d'ancoratge per aquest tipus de situacions és una de les qüestions que encara no està totalment resolta.
- *Millora dels adhesius*; Els adhesius de resina epoxi funcionen perfectament si son aplicats dins unes condicions determinades. Amb els nous adhesius que s'estan desenvolupant es pretén fer-les més versàtils en quant a les condicions d'aplicació ( temperatura, humitat ambiental i del suport, velocitat d'enduriment,...).

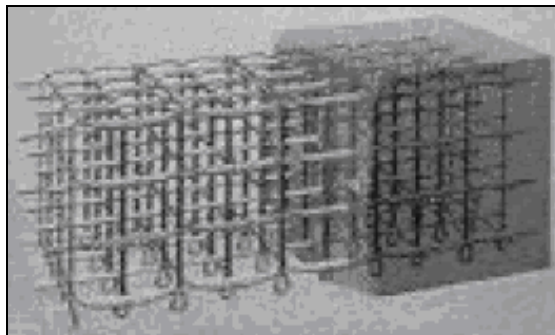


Fig A.4. Exemple d'aplicació dels FRP com a sistema estructural (Font; [3])

## A.2. CRITERIS GENERALS DE DISSENY

### A.2.1. Normativa vigent, present i futura

La tecnologia de reforços estructurals utilitzant materials elaborats amb fibra de carboni, és relativament nova dins el món de la construcció si fem la comparació amb altres tipus de materials utilitzats en els reforços com son l'acer, ja sigui utilitzat en forma de platabandes encolades, armadures col·locades a posteriori o perfils afegits.

Dins el camp de la reparació i reforç d'estructures, els tècnics projectistes han hagut d'enfrontar-s'hi a problemes estructurals que requerien solucions no indicades de manera implícita a cap normativa, com és el cas de càlcul de reforços amb platabandes encolades amb resina epoxi. Aquests tipus de reforç s'han anat calculant i realitzant des de fa més de 30 anys basant-se en els assajos realitzats a diferents centres d'investigació, tesis doctorals i l'experiència acumulada per les realitzacions.

Dins l'actual normativa espanyola de càlcul "EHE". "Instrucción de Hormigón Estructural" no es parla en cap moment de la tecnologia de reforços d'elements de formigó, però deixa un marge al tècnic per prendre decisions basades en els principis fonamentals del càlcul d'estructures. El bon criteri del projectista de reforços té un paper fonamental a l'hora de fer el disseny dels reforços.

#### A.2.1.1. Normatives generals

- CODIGO MODELO. CEB-FIP 1990 para hormigón estructural
- ACI 318-99. Building Code Requirements for Structural Concrete

#### A.2.1.2. Normatives particulars

- ACI 440R-96. State-of-the-Art Report on Fiber-Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1997 " Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials, " Concrete Engineering Series 23, ed. by A.Machida, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan.
- CAN/CSA-S806-02, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers", Canadian Standard Association, Toronto, Ontario, Canada (May 2002).
- FIP Task Group 9.3 " FRP Reinforcement for Concrete Structures" (1999).
- "Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP systems for Strengthening Concrete Structures" American Concrete Institute ACI 440.2R-02.
- Strengthening reinforced Concret Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers. ISIS Canada Research Network.

## A.2.2. Característiques mecàniques generals dels materials

Abans s'ha parlat que el material més utilitzat per reforçar elements eren les fibres i laminats, per tant, des d'ara parlarem d'aquests per fer el disseny de reforç de las nostres estructures. Els sistemes de reforç per mitjà de fibres es basa fonamentalment en l'adhesió externa mitjançant la utilització de resines especials de matriu epoxi. Actualment s'utilitzen al mercat dos sistemes diferents:

- Laminats de fibra
- Fulles de teixit de fibra

Per altre costat, aquests poden estar fabricats amb diferent classe de material que tenen com paràmetre bàsic de comparació els seu diferent mòdul d'elasticitat, així diferenciem:

- *Fibres de baix mòdul d'elasticitat*, amb un mòdul entorn de  $2.3 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup> i un allargament en ruptura aproximat de un 15 %.
- *Fibres d'alt mòdul d'elasticitat*, amb un mòdul d'elasticitat entre 4,4 i  $6,4 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup> i un allargament en ruptura entre 4 i 6 %.

### A.2.2.1. Fulles de fibra

La fibra és un material compost no metàl·lic de tipus polimèric. Està compost per una matriu també denominada resina que conté un reforç a base de fibres, en aquest cas de carboni, que té com a matèria prima el polietilnitrilo. Aquest és un material molt car, amb propietats mecàniques molt elevades i lleuger.

Al tractar-se d'un material compost, la majoria dels casos (aproximadament un 75%) s'utilitzen polímers termoestables. El polímer és habitualment resina epoxi, de tipus termoestable, encara que altres polímers, com el polièster o el vinilèster també s'utilitzen com a base per la fibra, però aquests estan en desús.



Fig A.5. Exemple de fulles i laminats, en forma comercial (Font; [3])

Les propietats principals són:

- Excepcional resistència a tots els tipus d'atacs químics. No és afectat per la corrosió degut a que el carboni és inert. No és bo utilitzar aquest sistema de reforç amb estructures metàl·liques per la possibilitat del carboni d'afavorir la corrosió de tipus galvànic <sup>\*</sup>4, degut a les diferències de potencial que es genera a l'estar en contacte amb metalls.
- Òptima resistència a la fatiga i a l'actuació de càrregues cícliques.
- Elevada resistència mecànica, amb un mòdul d'elasticitat elevat.
- Baixa densitat, en comparació amb altres elements com l'acer
- Elevat preu de producció

- Bon comportament sota deformacions o accions imposades.
- Resistència a les variacions de temperatura, conservant la seva forma, només si s'utilitza matriu termoestable.
- Les fibres resulten de la carbonització ( o grafitització), entre 1000 i 3000°C, de fibres de polímers orgànics ( acrílic o alquitrà), col·locant-s'hi els àtoms del material base al llarg de les fibres originals; Els filaments són agrupats d'acord a la característica mecànica desitjada, podent-s'hi definir a les fibres de carboni com les de baix mòdul d'elasticitat i gran resistència a la tracció, i les fibres de grafit a les d'elevat mòdul, implicant això un cost més elevat.

i) Fulla de fibra de carboni

Es tracta d'una làmina flexible i adaptable a qualsevol superfície, composta per filaments de fibra de carboni orientats en una sola direcció. Les fulles tenen una elevada relació resistència/pes i rigidesa/pes. Les fibres de carboni es fabriquen mitjançant la piròlisis de fibres recursors de base poliacrilonitrílica a una temperatura aproximada de 1500°C. Com a resultat de la piròlisis <sup>\*5</sup> s'obté una cadena de fibres de carboni d'alineació elevada. Els filaments de fibra de carboni s'ensamblen formant hebras sense torçar-se, utilitzades per crear una làmina unidireccional. Després que han estat alineades i estirades, les fibres s'entrellacen en simultani amb una tela de fibres de vidre generant-s'hi el teixit definitiu.

Les característiques generals d'aquest tipus de material són les que a continuació es detallen.

	BAIX MÒDUL	ALT MÒDUL
<b>Mòdul d'elasticitat (N/mm<sup>2</sup>)</b>	230.000	440.000
<b>Resistència a tracció (N/mm<sup>2</sup>)</b>	3.400	2.400
<b>Deformació de Ruptura (‰)</b>	15	5.5
<b>Espessor (mm)</b>	0.11-0.16	0.16
<b>Pes (g/m)</b>	200-300	300

Taula A.2. Característiques tipus de fulles de fibra de carboni (Font: [3])

ii) Laminat de fibra de carboni

El sistema està compost per un composite de matriu polimèrica de resina epoxi reforçada amb fibres de carboni. Les fibres de carboni es fabriquen a partir d'un copolímer de poliacrilonitrilo (PAN). El filament de PAN és sotmès a una sèrie de tractaments a elevades temperatures, fins 2000-2500°C, on s'eliminen molts elements diferents del carboni i s'afavoreix l'aparició de cristalls de carboni orientats segons l'eix. Les característiques generals d'aquest tipus de material són les que a continuació es detallen.

<sup>\*4</sup> *Corrosió galvànica*; S'estableix quan dos metalls diferents entre sí actuen com ànode un d'ells i l'altre com càtode. Aquell que tingui el potencial de reducció més negatiu procedirà com una oxidació i viceversa aquell metall que exhibeixi un potencial de reducció més positiu procedirà com una reducció.

<sup>\*5</sup> *Piròlisis*; Descomposició química de matèria orgànica causada per l'escalfament en absència d'oxigen o altres reactius, excepte possiblement el vapor d'aigua.



	BAIX MÒDUL
<b>Mòdul d'elasticitat (N/mm<sup>2</sup>)</b>	165.000
<b>Resistència a tracció (N/mm<sup>2</sup>)</b>	2.800
<b>Deformació de Ruptura (‰)</b>	17
<b>Contingut volumètric en fibra (%)</b>	>68
<b>Espessor (mm)</b>	1.2

Taula A.3. Característiques tipus de laminats de fibra de carboni (Font: [3])

### iii) Camps d'aplicació

Els reforços més habituals són sobre bigues, ponts, lloses, pilars, murs, dipòsits...,etcètera. En quan als esforços, la naturalesa i rigidesa del material laminat fa que aquest sigui aplicable només per esforços sobre superfícies planes traccionades d'elements sotmesos a flexió. La fulla de fibra de carboni, gràcies a la seva flexibilitat i adaptabilitat a qualsevol superfície pot ser utilitzada pel reforç d'elements sotmesos a esforços de tracció, tallant o de compressió per efecte de confinament. La següent taula serveix de resum:

TIPUS D'ESFORÇ	LAMINAT	FULLA
<b>FLEXIÓ</b>		
<b>TALLANT</b>		
<b>CONFINAMENT</b>		

Taula A.4. Taula resum dels camps d'aplicació de laminats i fulles de fibres (Font: [3])

#### A.2.2.2. Les Resines

Una Resina Epoxi o poliepòxido és un polímer termoestable que s'endureix quan es barreja amb un agent catalitzador o "enduridor". Les resines epoxi més freqüents són producte d'una reacció entre epiclorohidrina i bisfenol-a.

La resina que constitueix la matriu polimèrica dels plàstics té la funció d'embolicar, protegir i aglutinar les fibres de l'armadura per:

- Garantir l'adequada transferència dels esforços fibra a fibra, aconseguint que l'armadura treballi com un tot.
- Protegir les fibres de les agressions ambientals i contra el desgast
- Impedir desplaçaments de l'armadura, tant horitzontals com de pandeig.
- En els teixits i mantes, les resines assumeixen també la funció d'adhesió, garantint l'adherència de l'armadura al substrat i entre camades.

La resina influeix molt poc en la resistència a la tracció final del plàstic, però bastant en el comportament del mateix al tall i a la compressió.

La gran influència de la resina es manifesta en les condicions de fabricació del plàstic, a través de característiques tals com la viscositat, punt de fusió, temperatura de curat, etcètera.

Les característiques més importants són:

- Mòdul d'elasticitat baix, de l'ordre dels 2 GPa

- Deformació de ruptura elevada, per garantir comportament dúctil del plàstic.
- Baixa retracció durant el curat, i llarg temps de curat
- Estabilitat front als agents químics
- Viscositat compatible amb la dificultat de impregnació ( quantitat de fibres/m<sup>2</sup>)
- Bona capacitat d'adhesió a les fibres

i) Resines per imprimació de suports

Resines de base epoxi i baixa viscositat dissenyades per tancar els porus superficials del formigó. Una vegada preparada la superfície de formigó, es procedeix a aplicar el imprimador que penetrant en el formigó millora les característiques resistents superficials d'aquest a la vegada que incrementa l'adhesió amb la fulla de fibra de carboni.

El "omple-porus" de imprimació es presenta en forma de dos components (component actiu i enduridor) envasats separatament, que han de barrejar-s'hi en el moment de la seva aplicació. Aquesta barreja s'ha de realitzar amb la proporció i quantitat necessària segons l'aplicació que s'hagi de realitzar, tenint en compte el temps de vida en el recipient (pot-life) i el temps obert d'aplicació de la barreja una vegada realitzada.

Existeixen diferents versions de imprimador en funció de la temperatura ambient, segons aquest compresa entre 15 i 35°C (resines d'estiu) o entre 5 i 15°C ( resines d'hivern).

ii) Massilles d' anivellació

Aquestes massilles estan especialment dissenyades per omplir cavitats i irregularitats superficials menors de 0,5cm. Posseeixen una elevada adhesió al formigó, bona resistència a compressió i un temps de vida en recipient (pot-life) i temps obert d'utilització adequats per l'aplicació que s'ha de realitzar amb ella.

Existeixen diferents versions de massilles en funció de la temperatura ambient, segons aquest compresa entre 15 i 35°C (resines d'estiu) o entre 5 i 15°C ( resines d'hivern).

iii) Adhesiu o resina

Aquest és el material que actua de pont de transmissió de càrregues entre les làmines de fibres de carboni i el formigó, per consegüent, les seves característiques mecàniques i reològiques són molt importants per la major eficàcia del reforç. La missió de la capa d'adhesiu o resina, és adherir la lamina de reforç a la superfície del formigó i, al mateix temps, crear un compost d'elevades característiques mecàniques capaç de transmetre els esforços des del formigó a la làmina de fibra de carboni, per consegüent ha de posseir una adhesió al formigó i a la làmina molt bona, a més, de característiques mecàniques i reològiques adequades.

Existeixen diferents versions de resines en funció de la temperatura ambient, segons aquest compresa entre 15 i 35°C (resines d'estiu) o entre 5 i 15°C ( resines d'hivern).

### A.2.3. Criteris per reforçar (segons EHE)

#### A.2.3.1. Criteri per reforços a flexió

i) Generalitats

Per la comprovació de l' E.L.U i E.L.S s'utilitzaran els criteris establerts per la normativa EHE sempre que s'hagin d'aplicar. Es a dir, que l'existència d'un nou material de reforç s'acomodarà a les exigències establertes per l'acer i el formigó en les distintes comprovacions de tal forma que es compleixin les hipòtesis bàsiques dels mètodes adoptats en lo relatiu a l'equilibri i a la compatibilitat de deformacions.

ii) Estat Límit Últim

L'E.L.U de flexió d'una secció reforçada amb fibra de carboni, té unes consideracions teòriques molt similars al cas d'una secció de formigó estructural. L'única diferència és l'existència d'un nou material que està sempre situat al parament de la secció sotmès a tracció.

La teoria general de flexió que desenvolupa la EHE, utilitza el diagrama de pivots. Ampliant aquest diagrama a les seccions reforçades amb fibra de carboni, s'obté un nou pivot al que denominarem R, per ser el material de "R"eforç, front a les tradicionals A,B i C.

El pivot R correspon a la deformació màxima de càlcul del material de reforç  $\varepsilon_{R,d}$ .

La deformació màxima garantida pels fabricants del material, que es considera com deformació màxima característica  $\varepsilon_{R,k}$ , s'ha de dividir pel coeficient de seguretat del material, és a dir:

$$\varepsilon_{Rd} = \frac{\varepsilon_{Rk}}{\gamma_R} [1]$$

A més, s'ha de tenir en compte que la deformació màxima del material de reforç s'ha de limitar per prevenir el possible despeniment de dit material o la possible ruptura del recobriment de la secció.

El diagrama de pivots que es considera és:

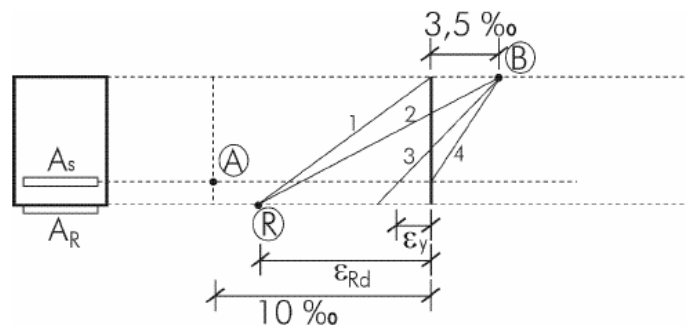


Fig A.6. Diagrama de pivots per seccions amb reforç (Font: [3])

A flexió simple, en formigó armat, els pivots són A i B. I en seccions reforçades, els pivots seran R i B.

iii) Dominis de deformació

Els dominis de deformació d'una secció reforçada sotmesos a flexió són dos, el de domini dels plans que pivoten en R i el dels plans que pivoten en B.

**Domini dels plans que pivoten en R**

Aquest domini està limitat pels plans 1 i 2.

Tots els plans d'aquest domini passen pel pivot R, és a dir, que les seccions que trenquen pels plans que pertanyen a aquest domini, trenquen pel reforç.

Si el dimensionament permet utilitzar aquesta forma de ruptura, és molt rentable disposar reforç, ja que aquest es disposa treballant a la seva màxima capacitat.

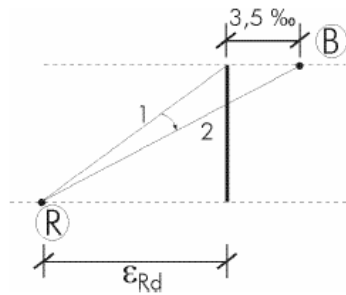


Fig A. 7. Domini dels plans que pivoten en R (Font: [3])

### Domini dels plans que pivoten en B

Aquest domini està limitat pels plans 2 i 4.

Tots els plans d'aquest domini passen pel pivot B, és a dir, que les seccions que trenquen pels plans que pertanyen a aquest domini, trenquen per compressió del formigó.

En aquests plans de deformació, el reforç ja que no té efectivitat màxima encara que el reforç sigui sent rentable.

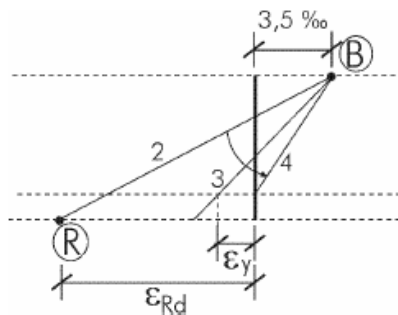


Fig A. 8. Domini dels plans que pivoten en B (Font: [3])

Dins dels possibles plans de deformació que passen per B hi ha dos dominis amb un comportament marcadament diferent.

### El domini entre els plans 2 i 3

En aquest domini, l'acer disposat a la secció, treballa a la seva màxima capacitat, i fins que perd efectivitat respecte el domini anterior, segueix sent rentable disposar de reforç.

### El domini entre els plans 3 i 4

En aquest domini, l'acer de la secció disminueix la seva col·laboració perquè la deformació de l'acer és menor que la seva deformació de plastificació. En aquest domini no és rentable disposar de reforç ja que el increment resistent necessari de l'element estructural és molt petit. Aquest domini, tampoc s'utilitza per dimensionar el formigó armat a flexió.

Per tant, en un problema general de reforç a flexió és convenient saber abans de disposar-s'hi a calcular, a quins dels dominis abans descrits es troba el pla de ruptura de la secció reforçada.

iv) Moment  $R_B$  i Moment Límit

Primer de tot es defineixen:

- Moment últim de la secció sense reforçar:  $M_0$
- Moment que és necessari resistir:  $M_r$

Evidentment, sempre tindrem que  $M_r > M_0$  perquè, en cas contrari, no s'haurà de reforçar. Per altre costat, per una secció donada, cadascun dels plans de deformació que delimiten dominis que estan associats a un moment flector. Aquests moments que es poden denominar moments de referència o moments de comparació són, en concret, els següents:

- Moment  $R_{RB}$ : És el moment flector que delimita el pas del pivot R al pivot B, és a dir, el moment corresponent al pla 2.  $M_{RB}$  s'obté, senzillament, aplicant les equacions d'equilibri de forces i moments.
- Moment límit: És el moment corresponent al pla 3 on l'acer de la secció existent deixa de treballar a la seva màxima capacitat per d'alt d'ell.  $M_{LIM}$  s'obté aplicant les equacions d'equilibri de forces i moments.

Per tenir una visió gràfica de la importància d'aquests moments de referència:



Fig A.9. Gràfic Moment-Àrea de reforç (Font: [3])

- La zona i, té una pendent constant i això és degut a que la tensió de l'acer i del reforç es mantenen als seus valors màxims ( $f_y$ ,  $f_R$ ). Aquesta zona és la que correspon al domini de plans de deformació entre els plans 1 i 2, governada pel pivot R.
- A la zona ii, augmenta la pendent progressivament de forma lenta fins el  $M_{LIM}$ . Això és degut a que, si ve la tensió de l'acer es manté en el seu límit màxim  $f_{yd}$ , la tensió del reforç disminueix progressivament. Aquesta zona és la governada pel pivot B i correspon a la zona entre els plans 2 i 3.
- A la zona iii, l'augment de la pendent es molt major ja que tant la tensió del reforç com la de l'armadura, són menors que els seus màxims que a mesura que van decreixent, s'augmenta el moment. Això passa quan el moment és major que  $M_{LIM}$  i el pla de deformació està entre els plans 3 i 4.

S'observa que situar el moment que es necessari resistir,  $M_R$ , respecte al  $M_{RB}$  i al  $M_{LIM}$  és molt important en l'estudi de la rentabilitat del reforç.

Quan  $M_R$  està per baix del  $M_{LIM}$ , no és rentable reforçar perquè per un petit increment de moment, la necessitat de  $cm^2$  de reforç es molt gran.

No es poden donar valors concrets respecte als percentatges de increment de moment que són possibles assumir amb reforç, perquè aquests depenen molt de la secció a reforçar i del moment resistent de la secció a reforçar, i del moment resistent de la secció sense reforç  $M_0$ .

### A.2.3.2. Criteri per reforços a compressió

#### i) Generalitats

La fibra de reforç té una important resistència a tracció, però nul·la capacitat d'absorbir compressions degut a la seva elevadíssima esveltesa. No se li pot confiar per contribuir a la compressió quan esta adherida a un element comprimit, precisament perquè no es pot assegurar que aquesta no es desadhereixi. Tot i això, en pilars es poden utilitzar les fibres en direcció perpendicular a l'esforç de compressió reforçant l'element.

El reforç transversal de l'element, aconsegueix minimitzar la deformació transversal per efecte Poisson del formigó, amb el que es millora la resistència del formigó de l'element i en conseqüència, s'augmenta la capacitat del suport. Aquest efecte es denomina confinament. El confinament augmenta dues característiques del formigó molt importants: la resistència a compressió i la deformació de ruptura.

L'efecte del confinament té un senzill tractament des de el punt de vista qualitatiu. Es a dir, és fàcil explicar com funciona, però te una complexa implementació numèrica.

#### ii) Descripció de l'efecte de confinament

Sigui una secció circular, per exemple, sotmesa a una força  $P$  i, per tant, a una tensió longitudinal. Si la secció està sense confinar transversalment, aquesta tindrà una deformació transversal donada per la relació entre ambdues existent a través del coeficient de Poisson. Aquesta tensió transversal apareixerà quan es reforci aquesta deformació a través d'un element de reforç transversal, tant siguin els cèrcols del pilar o un material de reforç exterior que comprimeix el formigó de la secció perpendicularment a l'esforç longitudinal.

La tensió produïda pel material de reforç transversal, serà tant major quan més rígid sigui el material i, també, és proporcional a la deformació transversal d'aquest. És a dir, a major deformació transversal, major tensió de "zunchado".

Assegurant l'equilibri del material de "zunchado", considerant el seu comportament elàstic i garantint la compatibilitat de la deformació transversal del formigó amb la deformació del reforç de fibra de carboni, s'obté una tensió de confinament que depèn del increment de la resistència i de la deformació última del formigó confinat.

Per tant, la millora de resistència del formigó depèn de la deformació del material de reforç, que a la vegada depèn de la capacitat de deformació transversal de la secció, que també depèn del grau de confinament. Aquesta dependència circular te solució mitjançant un procés iteratiu que convergirà fins la solució.

#### iii) Influència de la forma de la secció transversal confinada

La forma de la secció transversal confinada és determinant amb l'efectivitat del reforç a efectes de confinament de la secció. Atenent a la secció transversal, l'efectivitat del reforç depèn fonamentalment del canvi de direcció del reforç. És a dir, en el cas d'una secció circular, el canvi de direcció del reforç és constant al llarg de tot el perímetre, per això, l'efectivitat del reforç és màxima.

En el cas d'una secció quadrada, l'efectivitat del reforç es deguda al canvi de direcció que es produeix, exclusivament, a les cantonades. Per aquesta raó es veu disminuïda la capacitat de confinament. Aquesta disminució es fa encara més patent quan, en lloc d'una secció quadrada, es té una secció rectangular.

### A.2.3.3. Criteri per reforços a tallant

S'ha demostrat que la resistència a l'esforç tallant d'una biga augmenta si aquesta s'embolica parcial o totalment amb fibra de carboni. L'augment de resistència dependrà de varis factors, entre els quals s'inclou la configuració de l'embolicadura, la quantitat i el tipus de fibra, la resistència del formigó original, i la naturalesa de les càrregues i les condicions del suport.

L' E.L.U. front a tallant d'un element de formigó estructural es garanteix comprovant que:

$$Vd \leq Vu_1 \quad [2]$$

$$Vd \leq Vu_2 = Vcu + Vsu + Vru \quad [3]$$

On:

$Vd$ = Esforç tallant de càlcul.

$Vu_1$ = Esforç tallant de fatiga per compressió obliqua de l'ànima.

$Vu_2$ = Esforç tallant de fatiga per tracció a l'ànima.

$Vcu$ = Contribució del formigó a la resistència a esforç tallant.

$Vsu$ = Contribució de l'armadura transversal de l'ànima a la resistència a tallant.

$Vru$ = Contribució del reforç amb fibra de carboni a la resistència a tallant.

La contribució del reforç de l'ànima mitjançant fibra de carboni, té una formulació similar a la de l'acer convencional dels estreps. S'emboquen les fibres transversalment al voltant d'una secció de formigó.

El mètode més eficaç pel reforç a tallant es tracta d'emboicar tota la biga amb fibra de carboni. Habitualment aquesta disposició no és fàcilment executable a la pràctica degut a la presència de lloses o altres elements suportats.

El mètode més comú és emboicar els costats i la part inferior de la secció amb forma de "U", o també és possible fer el reforç col·locant-lo a ambdós costats de la biga (fig A), però la eficàcia d'aquesta disposició està limitada pel deficient ancoratge de la fulla de carboni (fig B).

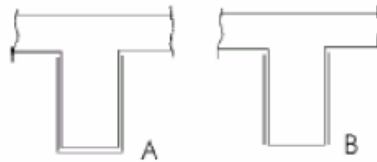


Fig A. 10. Tipus de reforç a tallant (Font: [3])

L'orientació de la fibra per altre costat pot optimitzar el reforç utilitzant una disposició a 45°, però requereix especial atenció a la seva correcta orientació i una major dificultat de col·locació i longitud d'emboicadora.

La tensió del material de reforç ha de limitar-s'hi a un valor que correspon a l'obtingut de la seva equació constitutiva per un valor de la deformació que compleixi la compatibilitat. Aquest requisit garantirà un control adequat de l'estat tensional de l'armadura en servei i, conseqüentment de la fisuració corresponent. A falta d'estudis de dita compatibilitat, s'ha de suposar una deformació no major del 2 per mil, segons marca la EHE al seu Art.40.2.

La deformació efectiva de la fibra de carboni en un reforç a tallant serà, en molts casos, major que aquest 2 per mil. Per això, la limitació de la EHE serà la que ha de ser introduïda al càlcul. Tot i això, existeixen casos en els que aquesta deformació efectiva pot ser menor, pel que la tensió de càlcul ha de calcular-s'hi amb dita deformació. Aquest cas pot ser habitual quan els elements a reforçar tenen un cantell petit, quan la resistència del formigó a reforçar és baixa, o quan es disposen de reforços tan sols sobre els costats de la biga (fig B).

#### A.2.4. Altres aspectes: Ancoratge i incendi

##### A.2.4.1. Ancoratge

L'ancoratge del material de reforç a l'estructura existent s'ha de garantir mitjançant una adequada longitud d'ancoratge i un correcte tractament de la superfície de contacte. El compliment de les prescripcions d'aquest apartat es fonamental per garantir un adequat comportament del reforç.

S'ha de garantir segons EHE:

- Una resistència característica del formigó major de  $17 \text{ N/mm}^2$ .
- Una obertura de fisura menor de  $0,25\text{mm}$ . En cas d'existir fisures majors, aquestes han de ser injectades.
- La superfície del formigó de contacte, ha d'estar neta, sense grassa, sense restes de producte de curat, sense pols.
- El material de reforç no ha d'embolicar cantonades perpendiculars a la direcció de la fibra.
- El radi mínim dels xamfrans ha de ser  $30\text{mm}$ .
- No s'han d'embolicar superfícies còncaues.

Una adequada longitud d'ancoratge evita la ruptura de l'adherència o la possible ruptura del recobriments de formigó. La ruptura de l'adherència del material de reforç amb el formigó es produeix per una deficient superfície de contacte per ancorar la força que desenvolupa el material de reforç. Normalment, la ruptura de l'adherència del material de reforç no es produeix a la interfase formigó-reforç, sinó que es produeix per desprendiment del formigó de recobriments. La longitud de contacte es calcula, per tant, igualant la capacitat del material de reforç a la capacitat a tracció del formigó.

També s'han de prendre les següents precaucions:

- A bigues simplement recolzades, a partir del punt on el moment flector de càlcul és menor que el moment flector de fisuració, es prolonga la fibra una longitud de  $15\text{cm}$  (el major d'ells).
- En bigues contínues, a partir del punt on el moment flector de càlcul és nul, es prolonga la fibra una longitud de  $15\text{cm}$  (el major d'ells).
- Si es disposen de varies capes de fibra, el punt final de cada capa ha de separar-s'hi  $15\text{cm}$  entre capes.
- Totes aquestes longituds han de ser majors que la que resulta d'aplicar la distància  $l_b$  a partir del punt d'esforç màxim.

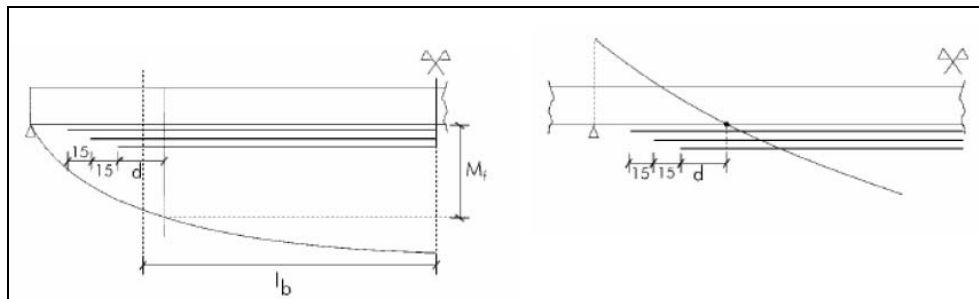


Fig A. 11. Gràfic representatiu de la col·locació del laminat a flexió segons la norma Europea (Font: [3])

#### A.2.4.2. Incendi

Les fibres de carboni tenen alta resistència al calor, però no les resines de base epoxi que constitueixen part fonamental d'aquests tipus de sistemes de reforç. El punt de transició vítria d'aquestes resines està a l'entorn dels  $50^\circ\text{C}$ , temperatura que és ràpidament aconseguida en un incendi.

Tot i això, si es manté un criteri de càlcul, de general acceptació i aplicació en reforços estructurals, pel que s'ha de satisfer que el valor de càlcul de la resposta estructural de l'element sense reforçar sigui major que el valor característic de l'efecte de les accions, és a dir, que l'estructura sense reforçar tingui al menys un coeficient de seguretat major o igual a 1, es garantirà que, en servei, si el material de reforç falla, l'estructura no col·lapsarà, estant llavors el temps de resistència al foc condicionat per la resistència al foc de l'element de formigó.



Si en canvi, el coeficient de seguretat residual es menor que 1, s'haurà de projectar, en cada cas, una protecció contra el foc suficient com per assegurar que durant el temps desitjat les resines epoxi no aconseguixin la seva temperatura de transició vítria.

#### A.2.5. Errors habituals de concepció i disseny

Pel desenvolupament de les diferents teories utilitzades s'han hagut de tenir en compte una sèrie de consideracions que formen part fonamental dels principis bàsics de disseny que s'han de garantir no només en la fase de projecte, sinó també en el procés d'execució material d'aquests reforços.

Una de les hipòtesis fonamentals que s'ha de complir en aquests tipus de reforç, és la *compatibilitat de deformacions*. Per complir aquesta hipòtesi és precís, per exemple en flexió, per reforços amb fulles de carboni, limitar quan el numero de capes és gran, la deformació màxima compatible amb el material existent. Aquesta limitació disminueix, evidentment, la capacitat de reforç del material.

Altres mètodes de reforç ( per exemple amb xapes d'acer) extreuen del material aportat tota la seva capacitat resistent. És convenient recordar que, per poder utilitzar-la, fa falta demostrar la compatibilitat de deformacions entre xapa i el material existent. En el cas concret de reforços amb xapes, és imprescindible demostrar que el material de la interfase transmet el rasant amb la correcta resistència i rigidesa. En cas de que no es pugui garantir dita compatibilitat, els tradicionals mètodes de càlcul de seccions no són aplicables.

Altre exemple per veure que les consideracions de compatibilitat limiten la capacitat resistent del material de reforç, es dona en el reforç de confinament. Per garantir el càlcul correcte del material de reforç és precís imposar la igualtat de la deformació transversal de la secció "zunchada" amb la deformació longitudinal del material. A la vista dels diferents estudis realitzats s'observa que en molt poques ocasions és possible aconseguir la deformació màxima al material de reforç. Per això, la tensió del material a introduir a les fórmules de confinament no pot ser la màxima del material a cada cas concret, aquesta s'haurà de calcular específicament mitjançant un procés iteratiu. La consideració que el material treballa al seu límit està del costat de la incertesa, disposar d'un coeficient de seguretat per aquesta deformació tampoc sembla el mètode més adequat.

La mateixa consideració pot fer-s'hi respecte a la tensió del material a utilitzar en tots els reforços a tallant. En aquests tipus de reforços es podrà considerar una deformació del 2 ‰ només quan es donin una sèrie de consideracions ja especificades. En altre cas, s'haurà de realitzar estudis específics ja que la deformació del material de reforç serà, sense cap dubte, menor. En cap cas el reforç a tallant haurà de treballar a una deformació superior al 2 ‰, segons es prescriu a la EHE. Dita consideració limita l'efectivitat del reforç front a l'esforç tallant.

### A.3. ESTUDI DE LES PROPIETATS DELS MATERIALS COMPOSTOS

Les propietats dels materials compostos depenen del tipus de materials que estan fabricats. A continuació es farà referència a les característiques de les fibres i les resines utilitzades i, posteriorment, als FRP. Tot el que es descriu a continuació s'enfocarà a tres tipus de fibres utilitzades habitualment a l'Enginyeria civil; fibra de carboni, fibra de vidre i fibra d'aramida.

#### A.3.1. Propietats de les fibres

Existeixen varis graus de fibres dins les tres que utilitzem ( carboni, vidre o aramida), la taula A.5 mostra varis tipus de fibres amb les seves propietats típiques.

Segons es pot observar a aquesta taula, les fibres de carboni tenen el mòdul d'elasticitat més elevat, en canvi les fibres de vidre com les d'aramida tenen una resistència a tracció major. La resistència a tracció major de les fibres de vidre i d'aramida ( comparades amb les de carboni), no es tradueix en una resistència major del material compost, ja que les fibres de vidre són molt sensibles a petits defectes, culls poden reduir de manera important la seva resistència. Les fibres de carboni tenen una deformació a ruptura molt baixa, per això s'han d'utilitzar en aplicacions que es requereixi un ductilitat important (ex. Reforç sísmic). Tant la rigidesa com la resistència a compressió són molt difícils d'estimar a les fibres, ja que són difícils d'assajar experimentalment.

És difícil obtenir una conclusió de quina de les fibres és estructuralment més eficient, ja que això dependrà de les condicions de contorn, i a més, el pes del material compost dependrà de la concentració de fibres a la matriu.

Tipus de fibres	Mòdul d'elasticitat a flexió. Gpa	Resistència a tracció. Mpa	Deformació axial màx. En ruptura. %	Densitat g/cm3
<b>Carboni (mòdul baix)</b>	170	1380	0.90	1.90
<b>Carboni (mòdul alt)</b>	380	1720	0.40	2.00
<b>Carboni (mòdul molt alt)</b>	760	2210	0.30	2.15
<b>Vidre (E-glass)</b>	81	3450	4.88	2.60
<b>Vidre (S-glass)</b>	89	4590	5.70	2.48
<b>Aramida (alta tenacitat)</b>	83	3620	4.00	1.44
<b>Aramida (mòdul alt)</b>	131	3620-4140	2.80	1.44
<b>Aramida (mòdul molt alt)</b>	186	3450	2.00	1.47

Taula A.5. Valors típics de les propietats de les fibres (Font: [1])

### A.3.2. Propietats de la resina

Aquestes depenen de la seva estructura interna, a la taula A.6 que es mostra a continuació apareixen algunes típiques.

Com es pot observar comparant les taules A.5 i A.6, la majoria de les resines contribueixen molt poc amb la capacitat de càrrega dels materials compostos. De qualsevol forma, les resines poden tenir gran importància en la tenacitat dels materials compostos, ja que quan més dúctil sigui la resina, la tenacitat del laminat augmentarà. La funció de la resina és transferir la càrrega d'una fibra a altre adjacent, per tant, quan una fibra trenca, una resina dúctil distribueix millor la força a varies fibres i no només a la fibra adjacent. Això vol dir que el laminat resistirà més fibres trencades, augmentant la tenacitat del material compost.

Tipus de resina	Resistència a tracció. Mpa	Mòdul d'elasticitat a flexió. Gpa	Deformació. %
<b>Epoxi</b>	103-172	4.83-6.21	<2.0
<b>Poliàmida</b>	48-83	2.76-5.52	1.73-3.2
<b>Polièster</b>	21-83	2.76-4.14	1.4-4.0
<b>Termoplàstics</b>	76-103	2.21-4.83	05-oct

Taula A.6. Propietats de les resines (Font: [1])

### A.3.3. Propietats del laminat

#### A.3.3.1. Resistència

Per una combinació de fibres i resines donades, existeixen dos paràmetres addicionals que afecten significativament a la resistència del material compost. Aquests paràmetres són el percentatge del volum de fibres i l'orientació de les fibres. El percentatge volumètric de fibres, és el percentatge del volum del material compost que és ocupat per les fibres. La taula A.7 mostra les propietats d'un laminat unidireccional, la taula A.8 mostra les propietats d'un laminat multidireccional. Aquestes són les dades que s'utilitzen pels dissenys actuals, sense ser la combinació dels valors de les taules A.5 i A.6.

#### i) Resistència a tracció

A la taula A.7 quan parla de resistència longitudinal es refereix a la resistència horitzontal en direcció perpendicular a la fibra, i transversal es refereix a la resistència en direcció perpendicular a la fibra. La resistència longitudinal a tracció és de 30 a 40 vegades major que la resistència transversal a tracció, degut a que en el sentit transversal el material compost pot fallar sense presentar ruptura de fibres. La seva resistència en aquesta direcció es determina principalment per la resistència aportada per la resina.

Material	Resistència longitudinal		Resistència transversal		
	Tracció		Tracció	Compressió	Tallant
Compressió (Mpa)					
Carboni / Epoxi	1448	600	52	206	93
Vidre / Vinil	610	215	49	49	16
Aramida / Epoxi	1400	235	12	53	34

Taula A.7. Resistència típica en laminats unidireccionals (Font: [1])

ii) Resistència a compressió

Es pot observar que la resistència a compressió transversal és major que la resistència a tracció transversal per un sistema unidireccional. La resina per si mateixa és més resistent a compressió que a tracció, a més, les fibres poden subministrar resistència significativa a càrregues transversals de tracció. La resistència a compressió transversal és també típicament menor que la resistència longitudinal a compressió.

Els materials compostos basats en fibres d'aramida tenen una resistència a compressió molt menor que la resistència a tracció, degut a que les fibres en l'aramida tenen una estructura semblant a una corda i està composta per fibres molt més petites originant com a conseqüència una resistència longitudinal a compressió molt baixa.

Cal recordar que el sistema per reforç a compressió no és massa efectiu degut al vinclament que es produeix a les fibres quan són sotmeses a compressió.

1.3.3.2. Efecte d'orientació de les fibres

La majoria dels laminats no són unidireccionals, sinó que tenen una varietat d'orientacions a les fibres. A la taula A.8 es presenten les resistències calculades per un laminat Vidre/Polièster amb varies orientacions. La notació utilitzada pel tipus de fibra és  $[\theta_n/\theta_n/\dots]_s$ , on  $\theta$  és l'orientació de les fibres,  $n$  el número de capes amb aquesta orientació i  $s$  indica que es repeteixen les capes simètricament. Per exemple, un laminat de 16 capes que té la meitat de les fibres en una direcció i meitat d'elles a una direcció perpendicular es podria representar com:

$$[0_4/90_8/0_4]$$

Degut a que aquest laminat és simètric, es pot utilitzar una notació alterna com aquesta:

$$[0_4/90_4]_s$$

Tipus de laminat Segons 1110-2- 548(1997)	Resistència típica en direcció 0°, Mpa	Resistència típica en direcció 90°, Mpa
[08]	610	49
[458]	98,8	98,8
[452/-452] <sub>s</sub>	120	120
[02/902] <sub>s</sub>	453	453
[0/90/45/-45] <sub>s</sub>	287	287
[04/904/45/-45] <sub>s</sub>	393	393
[06/902/45/-45] <sub>s</sub>	456	123
[08/45/-45] <sub>s</sub>	539	206

Taula A.8. Efecte de l'orientació de les fibres a la resistència a tracció d'un laminat Vidre/Polièster (Font: [1])

El primer laminat de la taula A.8 és unidireccional, pel que la resistència serà la màxima possible en una direcció, però a la direcció transversal tindrà la resistència mínima, el que podria ocasionar la fallida prematura si es donés el cas que alguna càrrega fossi aplicada fora de l'eix longitudinal del laminat. S'ha d'observar que el increment en la resistència del laminat amb orientacions de fibres a + 45° i - 45°, comparant amb el que té només fibres orientades a + 45° pot fallar al llarg de la direcció de les fibres sense haver-s'hi trencat cap. Pel contrari, amb el que es presenten les dues direccions pot ser que trenquin algunes fibres sense arribar a la ruptura del laminat.

A l'actualitat les disposicions de les fibres utilitzades als laminats són molt similars als quatre últims que es mostren a la taula A.8. Tradicionalment els dissenyadors han utilitzat disposicions de fibres on existeix el mateix número de capes a:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$  i  $90^\circ$ , obtenint un laminat que té una resistència d'una vegada i mitja comparat amb la capa orientada a  $0^\circ$  que la compon. De qualsevol manera, aquestes configuracions tenen resistències menors que els laminats unidireccionals. S'ha d'observar que la resistència a l'eix longitudinal augmenta quan s'incrementen les capes col·locades a  $0^\circ$ , tot i que aquest augment no és proporcional.

#### A.3.3.3. Resistència a flexió

La resistència a flexió està relacionada tant amb la capacitat portant a tracció com a compressió del material compost. Això és degut a que al flexionar el material compost part estarà sotmès a esforços de compressió. Durant la càrrega a flexió del membre reforçat en comptes d'una càrrega a tracció directa, tot i que els nivells de resistència a flexió i a tracció pot ser que siguin els mateixos, els mecanismes de fallida poden ser molt diferents.

La majoria dels materials compostos són anisòtrops, podent jugar un paper significatiu si existeixen moments flectors aplicats a l'estructura. Si les capes amb menor resistència d'acord amb la seva orientació es troben a la cara exterior de l'estructura (on es localitzen les tensions màximes a flexió), llavors és possible que es produeixi la ruptura del laminat amb nivells baixos de càrrega. Pel contrari, si les capes amb major resistència d'acord a la seva orientació es localitzen a la cara exterior de l'estructura, llavors aquests es desenvoluparan gran resistència a flexió. En resum, la resistència a flexió varia segons l'ordre de les capes que conformen el laminat, el que no passa amb la tracció directa.

#### A.3.3.4. Resistència a tallant

Com es mostra a la taula A.8, la resistència a tallant d'un laminat unidireccional és molt baixa. Això és degut a que les fibres no poden resistir la deformació en la direcció del tallant màxim. La resistència a tallant es pot incrementar significativament si hi ha algunes capes on les fibres estan orientades a  $\pm 45^\circ$  amb respecte a la càrrega aplicada. Si totes les fibres estan orientades a  $\pm 45^\circ$ , llavors el laminat desenvoluparà la seva resistència màxima a tallant, tot i això, la resistència a tallant serà baixa. En resum, si la resistència a tracció és prioritària, llavors s'han de col·locar algunes capes a  $\pm 45^\circ$  per incrementar la resistència a tallant.

#### A.3.3.5. Resistència específica

La resistència específica és una mesura que mostra l'habilitat d'un material per sostenir una càrrega coneguda tenint una massa donada, a diferència de la resistència que és la mesura que mostra l'habilitat per resistir una càrrega coneguda en una àrea donada. Els valors de la resistència específica varien amb el contingut de fibres i l'orientació d'aquestes de la mateixa manera que ho fa la resistència. Si la capacitat de càrrega d'una estructura és el paràmetre a controlar, els materials compostos amb major resistència específica seran els més lleugers. Ja que la resistència específica considera la capacitat de càrrega d'una massa coneguda d'un material, el laminat més lleuger possible no sigui el de secció transversal menor.

#### A.3.3.6. Capacitat de deformació

La capacitat de deformació dels polímers reforçats amb fibres normalment és baixa. A la taula A.6 es mostra la capacitat de deformació per un número determinat de fibres. La capacitat de deformació és la deformació a ruptura mesurada a l'assaig a tracció. Per tant, les fibres de carboni que tenen una ductilitat baixa ( $<1\%$ ). La fibra de vidre es considera molt dúctil, de l'ordre del 4 al 6%. Les fibres d'aramida tenen una ductilitat del 2 al 4%. Com es mostra a la taula A.9, les resines epòxiques tenen una ductilitat baixa, menors al 1%, les resines termoplàstiques comunament utilitzades als materials compostos poden tenir capacitats de deformació fins el 10%. En contrast amb això l'acer ASTM A36 té un mínim de ductilitat del 20%. L'acer estructural comú per conseqüent és molt més dúctil que les fibres o les resines en aquest tipus de FRP.

Quan les fibres i la resina s'ajunten, la ductilitat del material compost serà igual a la mitja ponderada de la ductilitat de la fibra i resina. Això significa que els materials compostos freqüentment tenen una baixa ductilitat ( de l'ordre del 1 al 5%). Alguns polímers molt dúctils poden proporcionar ductilitats al material compost de l'ordre del 10%. Si el material compost s'elabora en formes complexes, llavors aquestes formes necessitaran ser moldejades durant el procés inicial de fabricació. Una vegada que el material compost termoendurit ha estat curat no podrà ser refabricat. Això es contraposa amb la propietat de molts metalls, culls es poden treballar en fred per crear formes complexes.

#### A.3.3.7. Mòdul d'elasticitat o mòdul de deformació

El mòdul d'elasticitat és significativament afectat pel tipus de fibres que estan involucrades. A la taula A.9 es mostren exemples de tres tipus de materials compostos.

Material	Longitudinal (GPa)	Transversal (GPa)	Tallant (GPa)	Coefficient de Poisson
Carboni/Epoxi	181	10,3	7,17	0,3
Vidre/Polièster	54,1	14,05	5,44	0,25
Aramida/Epoxi	75,86	5,45	2,28	0,34

Taula A.9. Valors típics dels mòduls d'elasticitat d'un laminat unidireccional (Font: [1])

Els materials compostos carboni/epoxi són intrínscament els més rígids, en contraposició, els materials compostos de vidre tenen una resistència transversal superior. Els materials compostos basats en aramides són els més desfavorables front a càrregues transversals al sentit de les fibres.

El percentatge volumètric de fibres tenen un efecte significatiu sobre el mòdul d'elasticitat. Per un sistema unidireccional, el mòdul es pot representar per una senzilla regla a partir de l'equació de les mescles.

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad [4,5]$$

$E_L$ ; Mòdul longitudinal del material compost ( a la direcció de les fibres)

$E_f$ ; Mòdul de les fibres

$V_f$ ; Percentatge volumètric de les fibres

$E_m$ ; Mòdul de la matriu

$V_m$ ; Percentatge volumètric de la matriu

$E_T$ ; Mòdul transversal del material compost ( perpendicular a la direcció de les fibres)

No s'han d'utilitzar les equacions anteriors per disseny, ja que són aproximacions, degut a que el mòdul també depèn del procés de fabricació.

L'orientació de les fibres també juga un paper important a la rigidesa del material compost. La taula A.8 mostra com els mòduls longitudinals i transversals varien amb l'orientació. Com s'ha previst, el compost és més rígid quan és carregat a la direcció de les fibres i menys rígid quan la càrrega és perpendicular a les fibres.

La figura A.13 demostra que la relació entre el mòdul i l'orientació no és simple, així mateix, el mòdul de tallant variarà en funció de l'orientació de la fibra. El mòdul de tallant aconsegueix el seu valor màxim amb una orientació de 45° i un mínim en 0 o 90°. A la figura A.12 es mostra un gràfic del mòdul de tallant en funció de l'orientació de les fibres.

En moltes aplicacions es tenen que complir requeriments mínims tant pel mòdul a tracció com el de tallant, pel que és comú que s'utilitzi una combinació de capes a 0 i 45°.

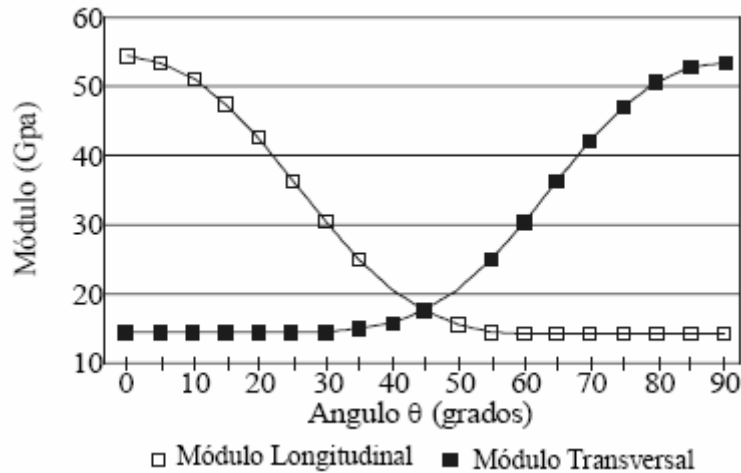


Fig A.12. Mòduls en funció de l'orientació de les fibres d'un compost típic de Vidre/Poliéster amb una configuració  $[\theta_1/-\theta_2/\theta_1]$ , on  $\theta$  és l'angle en graus. (Font; [1])

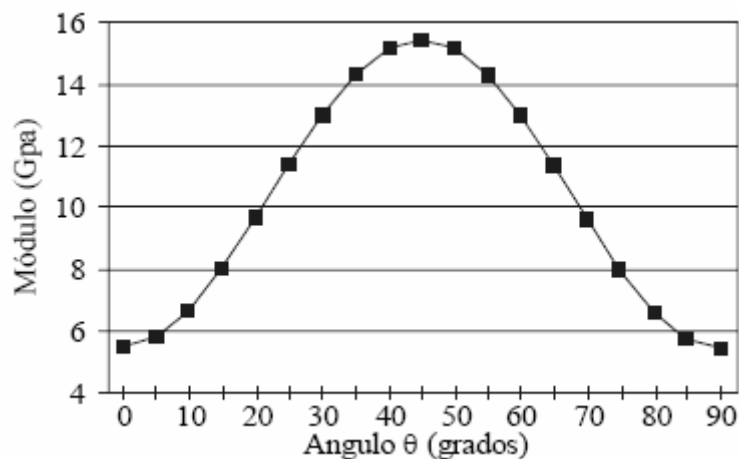


Fig A.13. Mòdul tallant en funció de l'orientació de les fibres d'un compost típic de Vidre/Poliéster amb una configuració  $[\theta_1/-\theta_2/\theta_1]$ , on  $\theta$  és l'angle en graus. (Font; [1])

#### A.3.3.8. Mòdul específic d'elasticitat

Aquesta és la mesura dels materials per resistir deformació amb una massa donada. En contrapartida el mòdul d'elasticitat és la mesura de la capacitat d'un material de resistir deformació amb una àrea donada. El mòdul específic d'un material és el seu mòdul dividit per la seva densitat ( o gravetat específica ). Els valors del mòdul específic variaran d'acord al contingut i orientació de les fibres, de manera semblant a com ho fa el mòdul d'elasticitat. Si el paràmetre que regeix a una estructura és la rigidesa, llavors el material compost amb el mòdul específic més alt serà el més lleuger.

A.3.3.9. Densitat

La taula A.5 mostra els valors de densitats per varis tipus de fibres oscil·lant entre 1.4 a 2.5 g/cm<sup>3</sup> aproximadament. La densitat de les resines varien entre 1.3 a 1.8 g/cm<sup>3</sup> aproximadament. Aquesta es pot calcular amb una senzilla regla partint de l'equació de les mescles.

$$\rho_c = \rho_m V_m + \rho_f V_f \quad [6]$$

- $\rho_c$ ; Densitat del material compost
- $\rho_m$ ; Densitat de la matriu
- $V_m$ ; Percentatge volumètric de la matriu
- $\rho_f$ ; Densitat de les fibres
- $V_f$ ; Percentatge volumètric de les fibres

La majoria dels materials compostos tenen densitats entre 1.5 i 2.5 g/cm<sup>3</sup>, en contrast amb la densitat de l'acer, cull és 7.87 g/cm<sup>3</sup>. La baixa densitat dels FRP's (comparada amb els metalls) és el que proporciona alts valors de mòduls específics i resistència específica.

A.3.3.10. Coeficient de Poisson

El coeficient de Poisson per un material compost pot variar significativament en relació a l'orientació de les fibres. Quan les fibres estan a 0° en relació a la càrrega aplicada, el coeficient de poisson amb freqüència és similar a la majoria dels metalls, dins un rang de 0.25 a 0.35. No obstant això, quan es presenten altres orientacions de fibres, el coeficient de poisson pot variar considerablement. Quan les fibres estan orientades a 90°, el coeficient de poisson pot ser molt petit, de l'ordre de 0,02 a 0,05, degut a que les fibres que són rígides resisteixen la contracció de la resina, per altre costat quan les fibres estan orientades amb angle entre 30 i 40°, el coeficient de poisson es quasi sempre gran. Per alguns materials, el coeficient de poisson pot ser major que en altres, degut a que les fibres s'intenten alinear per si mateixes al aplicar-se una càrrega. Quan l'angle d'orientació decreix lleugerament, les fibres actuen alineant la resina amb la càrrega, que proporciona un valor molt alt pel coeficient de poisson. Un exemple d'aquest comportament es mostra a la figura A.14.

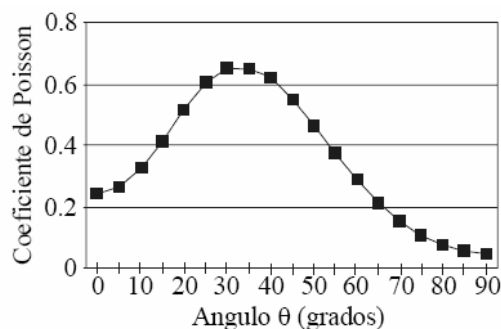


Fig A.14. Coeficient de Poisson en funció de l'orientació de les fibres d'un compost típic de Vidre/Poliéster amb una configuració  $[\theta_1/-\theta_2/\theta_1]$ , on  $\theta$  és l'angle en graus. (Font: [1])



### A.3.3.11. Coeficient de dilatació tèrmica

Com la resta de les discutides característiques fins ara, els coeficients de dilatació tèrmica són afectats perceptiblement per l'orientació de les fibres. A la taula A.11 es mostren les propietats d'alguns laminats unidireccionals, i els valors per l'acer i l'alumini. En molts cassos els materials compostos unidireccionals presenten un valor negatiu per la dilatació tèrmica a la direcció de la fibra, això és degut que les fibres resisteixen la dilatació tèrmica de la resina en direcció de la fibra. En la direcció perpendicular a les fibres, la resina es pot expandir bastant perquè les fibres no resisteixen la dilatació.

S'ha d'observar que els materials compostos de la taula A.11, tenen un coeficient de dilatació tèrmica ( perpendicular a les fibres) considerablement major al de l'acer.

Tot i això, és possible dissenyar materials compostos basats en fibres de carboni o aramides, culls presenten valors molt baixos del coeficient de dilatació tèrmica, degut a que aquests compostos tenen valors negatius del coeficient en una direcció i positius en l'altre. Una bona elecció de les capes que conformen el laminat pot arribar a obtenir coeficients de dilatació tèrmica a l'estructura properes a zero, que permet el disseny d'estructures tèrmicament estables. No obstant això, la seqüència del laminat que produeix un valor del coeficient de dilatació tèrmica proper a zero, probablement no sigui el de major resistència. Per tant, el dissenyador possiblement estigui en la necessitat d'utilitzar materials compostos amb valors del coeficient diferents a zero.

<b>Materials compostos reforçats amb fibres</b>	<b>Coeficient de dilatació tèrmica paral·lel a les fibres (m/m)<sup>o</sup>Cx10-6</b>	<b>Coeficient de dilatació tèrmica perpendicular a les fibres (m/m)<sup>o</sup>Cx10-6</b>
<b>Carboni/Epoxi</b>	181	28,1
<b>Vidre/Polièster</b>	54,1	22,1
<b>Aramida/Epoxi</b>	75,86	79
<b>Materials isòtrops</b>	<b>Coeficient de dilatació tèrmica (m/m)<sup>o</sup>Cx10-6</b>	
<b>Resina epòxica</b>	54	
<b>Hacer</b>	11,8	
<b>Alumini</b>	23,6	

Taula A.10. Coeficients de dilatació tèrmica comuns per diferents materials (Font: [1])

### A.3.3.12. Fluència

La fluència pot passar a temperatura ambient per molts materials compostos. La part que pateix la fluència en el compost, generalment és la resina. Les fibres de carboni i de vidre no flueixen significativament a temperatura ambient.

La fluència esta en funció de la tensió, de l'orientació de les fibres, del percentatge volumètric de fibres i de la ductilitat de la resina aplicada. L'orientació de les fibres és molt important perquè quan més fibres hi hagin alineades en direcció de la càrrega, la tensió serà menor a la resina. Quan més alta és la concentració de fibres ( a qualsevol direcció), més baixa serà la proporció de fluència, degut a que hi ha menys resina disponible a deformat. Una resina dúctil fluirà més que una més fràgil. De qualsevol manera, la fluència i la relaxació no són generalment un problema amb resines termoendurides com l'epoxi, però poden originar un problema quan s'utilitzin materials termoplàstics d'alta ductilitat.

### A.3.3.13. Relaxació

Perquè un material es relaxi s'ha hagut de deformat prèviament. La quantitat de relaxació està en relació amb la tensió inicial aplicada, l'orientació de les fibres, el percentatge volumètric de fibres i la ductilitat de la resina. Una tensió inicial més alta permet que després es presenti més relaxació al material. Més fibres orientades a la direcció de la càrrega disminuirà la fluència i la relaxació potencial. Una resina dúctil es deformatà més que una fràgil i per tant haurà més relaxació.

#### A.3.3.14. Tenacitat

La tenacitat d'un material compost està en relació al tipus de fibres, al tipus de resina i al percentatge volumètric de fibres. La seqüència de capes al laminat no sembla afectar a la seva tenacitat.

##### i) Tenacitat de impacte

Les proves de impacte al sentit tradicional (mètode de Charpy) no es realitza habitualment als materials compostos. Els materials compostos basats en resina epoxi tenen una resistència molt baixa al impacte. Els materials termoplàstics tenen una resistència lleugerament superior. El laminat unidireccional de vidre/polièster té una tenacitat de impacte al voltant de 972 J/m, comparat amb l'alumini que té de 215 a 647 J/m i l'acer inoxidable entre 458 a 593 J/m.

Una prova d'impacte més comú, consisteix en aplicar una petita càrrega d'impacte a l'estructura que aconsegueixi fer-la malbé sense trencar-la. El dany intern causat per la càrrega de impacte canviarà la resistència i la rigidesa del material compost. La resistència a compressió de l'estructura es mesura després de l'impacte i s'avalua si es compleixen els requeriments de l'estructura.

##### ii) Tenacitat de delaminació

El mecanisme de falla de delaminació és comú per aquest tipus de polímers. La delaminació és la separació d'un material compost a les seves capes originals. Això pot passar degut a la vinculació relativament dèbil entre capes, pel que s'haurà de dissenyar el material compost de tal forma que s'eviti això. La tenacitat de delaminació està en funció del tipus de resina i del seu percentatge volumètric.

La seqüència de les capes al laminat no sembla afectar a la tenacitat de delaminació. Quan més dúctil sigui la resina, més alta serà la seva capacitat, tot i això, no és una relació lineal, ja que també influeix la interfase resina/fibra. La presència de fibres també pot influir disminuint la zona plàstica de la resina i tenacitat del material compost.

El percentatge volumètric de la resina és només important per aquelles resines de mitja a alta tenacitat ( $G_{IC}$  aproximadament 250 J/m). Per aquestes, si la quantitat de resina s'incrementa, la zona plàstica també augmentarà (haurà menys fibres a la interfase degut a l'expansió de la resina), i per tant augmentarà la seva tenacitat. Per una resina fràgil, la zona plàstica no s'estén més allà de la regió entre capes riques en resina. Al fer aquesta regió més gran, no augmentarà la zona plàstica i la tenacitat global del material compost no s'incrementarà.

Altre paràmetre important és la resistència de la interfase resina/fibra. Una resistència pobre de la interfase, produirà una tenacitat inferior a l'esperada. Les tenacitats típiques de les resines  $G_{IC}$ , està dins del rang de 200 a 8000 J/m<sup>2</sup>. La tenacitat de delaminació del material compost està dins del rang de 200 a 2500 J/m<sup>2</sup>, comparat amb la de l'acer A36 que té un valor aproximat de 13000 J/m<sup>2</sup>.

S'han desenvolupat varies tècniques per prevenir la delaminació. Un dels mètodes consisteix en utilitzar un material més resistent que la resina per la matriu. Altre mètode consisteix en tenir cert reforç de fibres per mitjà de l'espessor del laminat cosint les capes entre elles.

#### A.3.3.15. Durabilitat

La seva durabilitat és la raó principal per la seva utilització en moltes aplicacions amb una llarga vida útil. Tot i això, quan una aplicació en específic és contemplada, és essencial conèixer no només les qüestions i respostes respecte a la resistència i rigidesa, sinó que també la vida útil estimada segons les condicions a les que estigui exposada l'estructura.

Existeixen molts factors en joc que redueixen la vida útil dels materials, i les característiques de la majoria d'aquests canvien per la interacció amb el seu entorn al llarg del temps.

En un principi també és important definir quina és la vida útil de l'estructura; això significa que ha de determinar-s'hi quan acaba la funció eficaç després del seu període de servei. Per exemple, alguns materials, incloent els materials compostos polimèrics, no fallen sota certes condicions de càrrega de servei, però es poden continuar deformant més allà del seu límit predeterminat de deformació o de fletxa.

Els mecanismes que controlen la durabilitat dels materials compostos són: 1) Canvis químics o físics de la matriu del polímer, 2) pèrdua d'adherència o desadhesió a nivell de la interfase fibra/matriu, i 3) reducció de la resistència i del mòdul d'elasticitat de la fibra. El ambient juga un paper molt important a la modificació de les característiques de la matriu als materials compostos polimèrics. Quan es parla "d'ambient" es refereix tant a l'ambient on resideix la matriu com a les condicions de càrrega que està sotmesa.

La matriu i fibres poden ser afectades per la humitat, temperatura, llum del sol, ozó i la presència de productes químics que degraden al material compost tal com sals o àlcalis.

Les exposicions repetides a temperatures molt altes i baixes, poden introduir també alguns canvis. Sota condicions on es presenten varies repeticions de cicles càrrega-descàrrega pot aparèixer fatiga als materials compostos com l'acer. La càrrega sotmesa durant molt de temps pot originar que el material flueixi.

#### A.3.3.16. Envelliment físic de la matriu del polímer

El paper principal de la matriu als materials compostos és transferir tensions entre fibres, proporcionar una barrera contra un ambient agressiu, i protegir la superfície de les fibres contra l'abradió mecànica. Tot i que el seu paper a la capacitat portant és de menor importància, té una influència transcendental a la transferència interlaminar de forces d'esquinçament. Per tant, ha d'haver certa preocupació si la matriu del polímer canvia les seves característiques per sí mateixa amb el temps. És normal que tots els polímers experimentin un canvi extremadament lent a la seva estructura molecular. L'ambient, principalment la temperatura i la humitat, controla aquest canvi. Aquest procés es coneix com envelliment. El que succeeix és que quan un polímer es refreda per sota de la temperatura de cristal·lització, el material no arribi a l'equilibri termodinàmic instantani. En comptes d'això, el seu equilibri de volum lliure es desenvolupa en cert període, i durant aquest temps les característiques mecàniques poden canviar.

És important observar que polímers amb diverses configuracions moleculars dins del mateix grup de polímers, responen de manera diferent al mateix tipus d'ambient. Els efectes de l'envelliment físic són menys severos en els materials compostos termoendurits que en els termoplàstics. Com a resultat de l'envelliment físic, alguns polímers poden arribar a ser més rígids i fràgils, podent tenir influència en les característiques de la matriu, modificant així la resposta al esquinçament i tallant. Però a la majoria dels casos aquests efectes no són crítics perquè el procés de transferència de càrrega passa en última instància a través de les fibres, i els efectes de l'envelliment en aquestes són mínims. Tot i que els canvis físics causats per l'envelliment són totalment reversibles una vegada que el material polimèric s'escalfa sobre la seva temperatura de cristal·lització, aquest no serà aplicable a les estructures d'enginyeria civil, ja que mai s'arribarà a la temperatura de cristal·lització.

A.3.3.17. Influència de la humitat

Quan els compostos polimèrics s'exposen a la humitat de l'aire o aigua, aquests absorbeixen la humitat per absorció superficial instantània i difusió. Generalment la concentració d'humitat augmenta amb el temps fins arribar al punt de saturació (equilibri), després de varis dies d'exposició a l'ambient humit. El període per arribar al punt de saturació depèn del gruix del material compost i de la temperatura ambient.

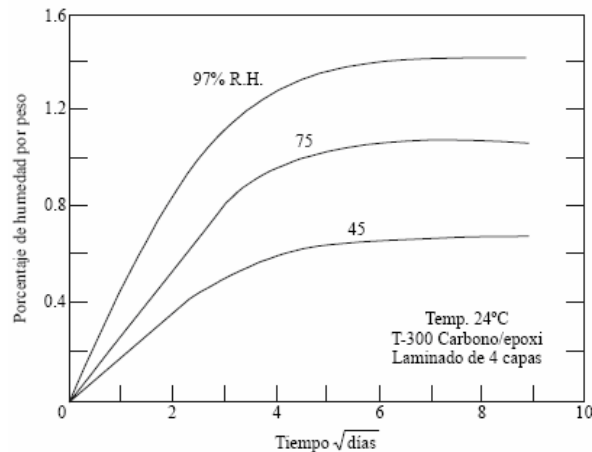


Fig A.15. Absorció d'aigua. Comportament de compostos polimèrics (Font; [1])

i) Influència de la humitat a la matriu del polímer

En alguns casos, l'absorció de l'aigua per la resina pot canviar les característiques d'aquesta, incloent la temperatura de cristallització. Tot i això, no és de major importància a les aplicacions relacionades amb enginyeria civil dels materials composts, ja que això succeeix a temperatures superiors a 120°C. L'absorció d'humitat té un efecte favorable en el material compost, ja que origina l'expansió de la resina, la qual redueix les tensions de compressió residuals a la interfase fibra/matriu causades per la retracció de curat.

Als materials composts on es presenten buits a la interfase fibra/matriu o les capes del compost, la inclusió de l'aigua als buits pot provocar la formació de bombolles. Els problemes es poden eliminar per la selecció minuciosa dels materials, del tractament superficial i de les tècniques de fabricació.

ii) Influència de la humitat a les fibres

Comunament es té fe de que les fibres de vidre es poden danyar per l'exposició prolongada a l'aigua. Les raons són que els cristalls estan constituïts per sílice, als quals on els òxids alcalins es troben dispersos. Els òxids de metalls alcalins són hidrocòpics i hidrolitzables<sup>\*6</sup>. Tot i això, la forma més comú de les fibres de vidre per les aplicacions d'enginyeria civil són el "E-glass" i "S-glass", que contenen només quantitats petites d'òxids de metalls alcalins, pel que els fan resistents a l'aigua. Tot i això, els compostos de fibres de vidre s'han de fabricar cuidadosament per evitar qualsevol inclusió important d'aigua, perquè la presència d'aigua a la interfase de la fibra de vidre baixa la seva energia superficial que pot afavorir al creixement d'esquerdes. A més, els períodes llargs de degradació a altes temperatures no s'han estudiat. Les fibres d'aramida poden absorbir quantitats considerables d'aigua donant com a resultat l'expansió del material. Tot i això, la majoria de les fibres estan protegides amb un recobriments, assegurant així una bona vinculació amb la matriu i protegint-les contra l'absorció de l'aigua. No es coneixen efectes de degradació originades per la humitat a les fibres de carboni.

\*<sub>6</sub> Hidrocòpic; Que té capacitat d'absorbir l'aigua. Hidrolitzable; Que es pot trencar en fragments o parts més petites.

iii) Comportament general dels materials compostos saturats per aigua

Els materials compostos saturats per aigua presenten generalment un increment en la ductilitat degut a l'estovament de la matriu. Aquest podria ser un aspecte positiu de l'absorció de l'aigua en compostos polimèrics i es podria utilitzar possiblement en alguns casos específics. La degradació limitada de la resistència i del mòdul d'elasticitat es pot presentar en materials compostos saturats per aigua. Els canvis originats per la degradació són reversibles a la seva majoria, de tal mode, que al secar-s'hi el compost recupera la majoria de les característiques perdudes.

També és interessant observar que l'augment de la pressió hidrostàtica ( per aplicacions submarines) no augmenta necessàriament l'absorció de l'aigua, i per tant, no contribueix a la degradació del compost. Així, s'espera que la majoria de les estructures polimèriques subaquàtiques tinguin alta durabilitat. De fet, sota pressió hidrostàtica, l'absorció de l'aigua es redueix lleument degut al tancament de les microfissures i dels defectes superficials, però en investigacions posteriors, s'ha comprovat que poden tenir un augment significatiu de la humitat en alguns tipus de materials compostos degut a la pressió hidrostàtica.

L'absorció de l'aigua afecta a les característiques dielèctriques dels materials compostos, degut a que la presència de microfissures omplertes d'aigua que pot fer disminuir aquesta característica dràsticament.

A.3.3.18. Efectes higrotèrmics

La temperatura juga un paper crucial en el mecanisme de l'absorció de l'aigua als materials compostos i dels seus efectes irreversibles subseqüents, ja que influeix directament en la distribució de l'aigua, a la quantitat d'aquesta, i a la velocitat a la qual s'absorbeix. Quan la temperatura augmenta, la quantitat i velocitat d'absorció d'aigua s'incrementa ràpidament. S'ha demostrat que els danys produïts per la immersió en aigua bullint per només unes hores produeixen desadhesió i esquerdament de la mateixa magnitud que en aigua a 50°C durant 200 dies.

A.3.3.19. Ambient alcalí

Al utilitzar compostos basats en fibra de vidre en ambients alcalins, és essencial assegurar-s'hi que la fibra de vidre sigui resistent a un alt contingut d'àlcalis, perquè la solució alcalina reacciona amb les fibres de vidre formant gels de sílice expansius. Aquesta precaució és especialment important per l'ús de barres de reforç en formigó fabricades a partir de fibra de vidre reforçada.

Es considera que les fibres "E-glass" no tenen resistència suficient contra l'atac de l'àlcali. En canvi les resines de vinil proporcionen una barrera eficaç contra aquest.

A.3.3.20. Efectes de les baixes temperatures

Els canvis extrems de temperatura dona lloc a variacions i efectes importants als materials compostos. La majoria dels materials es dilaten quan s'eleva la temperatura.

Als materials compostos reforçats amb fibres embegudes en una matriu polimèrica, tenen un coeficient de dilatació tèrmica de la matriu, generalment major que el de les fibres. Una disminució en la temperatura degut al refredament durant el procés de fabricació o unes condicions de funcionament a baixa temperatura, faran que la matriu es contregui. La contracció de la matriu és resistida per les fibres relativament rígides a través de la vinculació amb la interfase fibra/matriu, originant tensions residuals proporcionals a la diferència en temperatures del moment del curat i del funcionament del material compost, a excepció d'un ambient extremadament fred on les tensions residuals induïdes no són de major importància.

Allà on existeixen grans diferències amb la temperatura ( per exemple: en l'àrtic i les regions antàrtiques), les tensions suficientment grans poden induir a la microfissuració del material. Aquestes microfissures poden reduir la rigidesa del compost, augmentar la permeabilitat, la inclusió de l'aigua a través de la interfase fibra/matriu, i finalment contribuir així als processos de degradació.

Altre efecte que es produeix per les baixes temperatures, és el canvi del mòdul d'elasticitat a la matriu. La majoria de les resines arriben a ser més rígides i més resistents mentre més baixa la temperatura, però conseqüentment més fràgils. Aquests canvis poden influenciar als mecanismes de falla. L'absorció de l'energia abans de la ruptura a baixa temperatura és més alta que a temperatura ambient. Aquest aspecte particular ha de ser considerat al dissenyar materials compostos on es presenten càrregues d'impacte a temperatures molt baixes.

#### A.3.3.21. Efecte del cicle gel-desgel

A menys que un material compost contingui un percentatge significatiu de buits interconnectats que estiguin plens d'aigua, els efectes del procés gel-desgel dins del rang de temperatura normal (  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$ ) no seran significatius en la resistència. Els materials compostos de fibra de vidre comercials contenen generalment prop del 0,4 % de buits, el que no permet que cap humitat congelada apreciable causi algun mal important.

No obstant això, al completar un cicle tèrmic de baixa temperatura, té altres efectes en els materials compostos ja que apareixen tensions residuals degut al gradient del coeficient de dilatació tèrmica dels elements constitutius de la microestructura del material. Sota condicions extremes de baixa temperatura, aquestes tensions poden donar lloc a la formació de microfissures a la matriu i/o a la interfase resina/fibra. La incidència de creixement de les microfissures dins del rang normal de temperatures de servei ( $-20^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$ ), són generalment rares o insignificants. No obstant això, sota condicions que completen cicles tèrmics severos, per exemple, entre  $60^{\circ}\text{C}$  i  $-60^{\circ}\text{C}$ , les microfissures poden créixer i unir-se per formar esquerdes a la matriu que poden propagar-se al voltant de la interfase fibra/matriu. Baix cicles tèrmics prolongats, aquestes continuen creixent de tamany i numero, podent donar lloc a degradació en la rigidesa, entre altres característiques importants de la matriu.

El numero limitat de les proves conduïdes a baixes temperatures (sota de  $-50^{\circ}\text{C}$ ), la resistència a tracció en direcció de les fibres de tots els compostos polimèrics tendeix a disminuir, encara que la resistència a tracció fora de l'eix de les fibres i la resistència transversal augmenten. Aquest fenomen s'explica per l'enduriment de la matriu polimèrica a temperatures molt baixes. Els cicles tèrmics prolongats en temperatures extremes, també han demostrat la degradació de la resistència a tracció fora de l'eix de les fibres i de la rigidesa. Aquests canvis de les característiques són importants pel disseny d'estructures en regions extremadament fredes.

#### A.3.3.22. Influència de la radiació ultraviolada (UV)

L'efecte de la llum ultraviolada en compostos polimèrics és ben sabut. Quan s'exposen de manera continua a la llum del sol, la matriu pot endurir i desadherir-se. El problema és superat generalment aplicant una capa resistent als UV i als materials compostos. La major preocupació radica en la degradació del FRP tal com l'aramida. Un exemple d'això es demostra amb la pèrdua de resistència ( 50%) registrat en teixit d'aramida, després de l'exposició al sol per un període de cinc setmanes.

No obstant això, només la capa externa de l'estructura composta sofreix aquest tipus de degradació. Així doncs, en materials compostos amb gruixos importants, els efectes de la degradació és mínim. Per les aplicacions on les característiques superficials són importants, s'hauran de realitzar consideracions especials per reduir esquerdes a la superfície degudes als raigs del sol.

### A.3.3.23. Fatiga

Les propietats de la fatiga d'un material estructural representa la seva resposta a les càrregues cícliques. Les càrregues cícliques repetides donen lloc generalment a una disminució en la resistència dels materials metàl·lics. Per altre part, es considera generalment que els materials compostos tenen una resposta excel·lent a la fatiga.

El comportament a fatiga d'un material és caracteritzat generalment per un diagrama S-N, que representa la relació que existeix entre l'amplitud de la tensió (S) i el número de cicles (N) fins arribar a la falla, en una escala semilogarítmica (Fig 1.27). En general, el número de cicles fins la falla augmenta quan es redueix el nivell de tensió. Per l'acer suau, el límit de fatiga està per l'ordre de  $10^5$ - $10^6$  cicles al 50% de la seva resistència última a tracció. Sota el límit de la fatiga, la probabilitat de produir-se la fallida per fatiga és baixa, de mode que la vida del material es considera infinita.

Un dels problemes principals per predir el límit de falla per fatiga en materials compostos és la complexitat en la determinació dels modes de falla. L'assaig més utilitzat per la caracterització a fatiga dels materials compostos és el cicle tracció-tracció (segons norma ASTM D 3479). El cicle tracció-compensió pels assajos de fatiga a flexió també s'està divulgant.

La resposta a la fatiga de cicles compressió-compensió dels materials compostos és generalment menys satisfactòria que en cicles tracció-tracció. A les càrregues a fatiga per flexió, per tant, el dany inicial s'origina generalment al costat comprimit de l'espècimen.

Una característica única d'un material compost a la prova a fatiga, és que presenta una degradació gradual al incrementar-s'hi els cicles. Així, a vegades les proves no es realitzen per un tipus de falla representativa, sinó per un límit de la rigidesa de l'espècimen o de les tensions residuals prèviament predeterminades.

La corba S-N pels materials compostos es pot representar per una relació lineal donada per:

$$S = \sigma_u (m \log N + b) \quad [7]$$

S; Tensió màxima de la fatiga

$\sigma_u$ ; Resistència estàtica

m,b; Constants (per un compost de vidre/epoxi amb orientació de les fibres a  $0^\circ$  és 0.1573 i 1.3743, respectivament)

N; número de cicles fins la falla

Generalment s'ha observat que als assajos a fatiga amb cicles tracció-tracció, els materials compostos unidireccionals de carboni i d'aramida presenten una resistència excepcionalment bona front a la fatiga. Per altre part, quan les fibres s'orienten en direccions fora de l'eix longitudinal, la resistència a la fatiga depèn de la proporció de fibres alineades amb l'eix de càrrega, la seqüència de les capes, i els paràmetres del cicle de càrrega. S'ha d'observar que el cicle tracció-compensió pot generar un diagrama S-N més irregular que el del cicle tracció-tracció. La resposta front a la fatiga dels materials compostos de fibres reforçades de "S-glass" és menor que en els compostos de carboni o aramida.

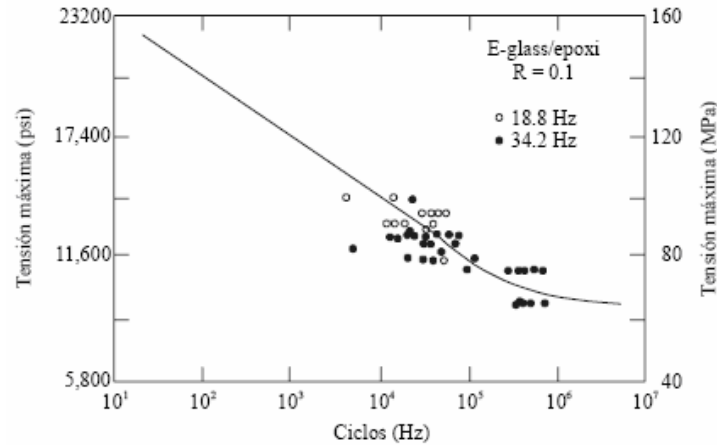


Fig A.16. Comportament típic de fatiga d'un compost de E-glass/epoxi (Font; [1])

#### A.3.3.24. Inflamabilitat i resistència al foc

Els materials compostos de FRP utilitzats per qualsevol construcció han de complir amb els requeriments del codi de la construcció local, incloent especificacions de resistència al foc i altres de seguretat a l'usuari. Actualment la normativa pels materials compostos estructurals en edificacions o altre tipus de construccions no és extensa. Per tant, és imprescindible que els dissenyadors treballin des d'un principi en conjunt amb les autoritats encarregades de la construcció per establir en el procés de selecció els requisits de resistència al foc dels materials compostos seleccionats, perquè puguin ser verificats amb els assajos front al foc. Quan existeix el perill del foc, les característiques relacionades a la protecció contra el foc han de ser identificades en conjunció amb el codi de construcció apropiat.

Els assajos contra el foc pels materials compostos de FRP han de basar-s'hi en l'ús final, quantitat, localització, i requisits especials determinats pel client. Després d'identificar el perill d' incendis, un mètode convenient per realitzar els assajos s'ha de seleccionar a partir d'estàndards o desenvolupar un assaig adequat per la necessitat específica. Dins d'aquests assajos s'inclouen; proves d'ignició, d'extensió de la flama, d'extinció i avaluació del fum, de toxicitat i de resistència al foc.

Tipus d'assaig	Metodologia (Normativa)	Objecte de l'assaig
<b>Assajos d'ignició</b>	ASTM D 1929	Medició T <sup>a</sup> ignició
	ASTM E 136	Classificació dels materials com a combustibles/ no-combustibles
<b>Assajos de propagació de flama</b>	ASTM 84	Medició de la propagació de les flames a la superfície, generació de fum i lliberació total de el calor
	UL-94	Medició de la flamabilitat en especimens verticals amb forma de barra
<b>Assajos d'avaluació de fums</b>	NFPA 258	Medició de la densitat òptica màxima pel fum
<b>Assajos d'avaluació de fums</b>	ASTM E 119	Determina la penetració de la flama a la cara no exposada i el col·lapse estructural

Taula A.11. Assajos contra el foc per materials de construcció (Font; [1])



## A.4. ASSAJOS I CONTROL DE QUALITAT

### A.4.1. Introducció

El càlcul i disseny d'estructures amb materials compostos requereix disposar de dades experimentals fiables. Als casos de càlculs i anàlisi, la caracterització experimental es pot fer a varies escales: micromecànica, macromecànica o estructural. L'assaig dels materials compostos té tres objectius principals: determinació de les propietats bàsiques de la làmina unidireccional pel seu ús com dades d'entrada al càlcul i disseny estructural; investigació i verificació dels models mecànics de comportament; i estudis experimentals del comportament del material i d'estructures amb geometries específiques i sota condicions de càrrega determinades.

Sota aquests principis generals, podem nombrar tipus específics d'assajos i aplicacions concretes de dits assajos:

1. Caracterització dels materials constituents: fibres, matrius i interfase entre ambdues, pel seu ús a un anàlisi micromecànic. Coneixent aquestes propietats es pot predir, en principi, el comportament de la làmina individual i a continuació el de laminats i estructures.
2. Caracterització de les propietats de la làmina unidireccional simple que forma la unitat bàsica de construcció de laminats de material compost.
3. Determinació de les propietats interlaminars, es a dir, de la interacció entre làmines de material compost.
4. Comportament del material sota condicions especials de càrrega, per exemple, fatiga multiaxial, deformacions diferides en el temps o impacte.
5. Anàlisi experimental de l'estat tensional i resistència d'estructures i sistemes de materials compostos, especialment aquells que presenten discontinuïtats geomètriques, amb cantos lliures, forats, unions o transaccions súbites.
6. Avaluació de la integritat estructural per mitjà d'assajos no destructius.

En el cas de reforç i reparació d'estructures de formigó armat, fàbrica de maó i fusta, aquest esquema també és vàlid. Els components a assajar més habituals són la fibra de carboni i la resina epoxi que compleixen la funció tant de matriu de la làmina de carboni com d'adhesiu entre el laminat i substrat. La caracterització de làmines generalment es limita a assajar les propietats elàstiques a la direcció de la fibra de làmines unidireccionals, però conèixer altres propietats com el comportament front tensions de tallant, amplia nostre capacitat de disseny. Per últim, l'assaig de l'estructura completa permet determinar la influència dels diferents substrats.

Per la pròpia naturalesa dels materials compostos, els assajos utilitzats per la seva caracterització són molt més complexos que els utilitzats per materials isòtrops, i no tots ells estan normalitzats.

### A.4.2. Caracterització de materials constituents

#### A.4.2.1. Caracterització de fibres

Les propietats assajades més comuns són el mòdul longitudinal, la resistència a tracció i l'allargament a ruptura. La norma ASTM D3379-75 descriu un assaig apropiat per la caracterització d'aquests paràmetres. Aquest mètode es recomana per fibres amb mòdul elàstic major a 21Gpa. L'assaig es realitza sobre una fibra individual o filament, que es munta al llarg de l'eix central d'una paper troquelat que permet tensar i alinear la fibra sense fer-la malbé. (Fig A.17). Una vegada tenim muntada la proveta a la màquina d'assaig, el paper es rasga per permetre l'elongació de la fibra. La Fig A.18 mostra una corba tensió-deformació típica de la fibra de carboni.

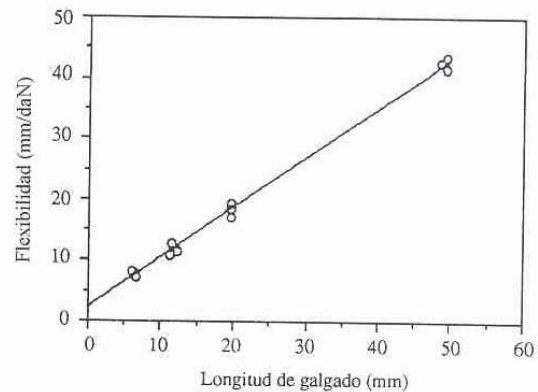
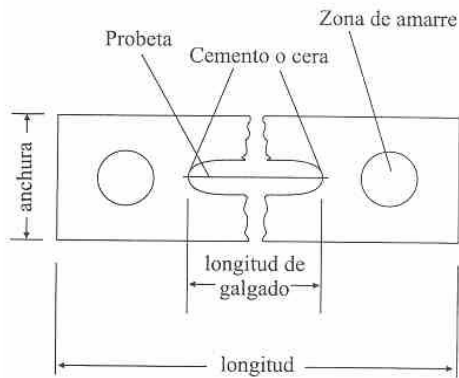


Fig A. 17. Mètode d'assaig de filaments (Font: [3]) Fig A. 18. Corba tensió-deformació típica

#### A.4.2.2. Caracterització de matrius i adhesius

La resistència i mòdul de tracció com la deformació de ruptura, es poden determinar utilitzant panells plans o provetes com la que es mostra a la Fig A.19. Els detalls d'aquest mètode d'assaig es reflexa a la Norma ASTM D638M-84 per un panell gruixut ( 1 a 10mm) i ASTM D638-78 per un panell prim (<1mm)

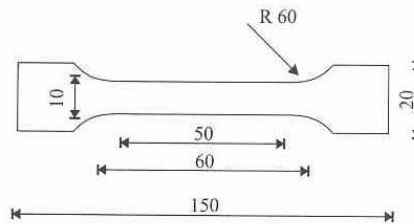


Fig A. 19. Probeta de tracció per assajos mecànics en resina (Font: [3])

Degut a la gran dependència entre la velocitat de deformació i la velocitat de càrrega, els resultats dels assajos han de ser interpretats amb molta cura. La deformació es pot mesurar mitjançant bandes extensomètriques o extensòmetres. Si es vol obtenir el coeficient de Poisson, la deformació transversal es pot mesurar mitjançant una banda extensomètrica col·locada perpendicularment a la direcció de la càrrega.

#### A.4.3. Caracterització del laminat

##### A.4.3.1. Determinació de densitat i volum de fibra

###### i) Densitat

La densitat d'un material compost es pot determinar obtenint el pes de la proveta en sec i submergida amb aigua. La proveta pot ser qualsevol peça de tamany i formes generals sempre que el seu volum no sigui inferior a  $1\text{cm}^3$ . El pes de la proveta submergida en aigua es pot determinar per mitjà d'un fil fi que l'envolti i s'uneixi a un dels extrems d'una balança. El recipient no ha de tocar ni el fil ni la proveta i qualsevol bombolla adherida al fil o proveta, s'ha d'eliminar fregant amb altre fil. Els detalls d'aquest mètode d'assaig es descriuen a la norma ASTM D3800-79.

La gravetat específica es determina a partir de la relació:

$$\rho = \frac{a}{a - w - b} \quad [8]$$

a: Pes de la proveta en sec

w: Pes del fil parcialment submergit

b: Pes del conjunt proveta+ fil submergit

♣ La densitat la obtindrem multiplicant la gravetat específica per 0.9975

ii) Percentatge de volum en fibra

#### Mètode de la dissolució en àcid

El contingut en fibra dels materials compostos de matriu orgànica es solen determinar dissolent la resina del material compost en un mitjà que no ataqüi la fibra. Una vegada la resina és completament dissolta, el residu (la fibra) es filtra, seca i pesa. L'elecció del medi que dissolgui la resina depèn del tipus de matriu. Per les resines epoxi, el mitjà mes habitual és l'àcid nítric concentrat.

La norma ASTM D3171-76 descriu els detalls d'aquest mètode d'assaig. El percentatge en volum de fibra s'obté a partir del percentatge en pes de la fibra, de les densitats de la fibra i del material compost.

$$\%V_f = \frac{w_f / \delta_f}{w_c / \delta_c} \cdot 100 \quad [9]$$

$w_f$ : Pes de la fibra en el material compost

$w_c$ : Pes del material compost

$\delta_f$ : Densitat de la fibra

$\delta_c$ : Densitat del material compost

Si es coneix la densitat de la matriu,  $\delta_m$ , la fracció de volum de buits  $V_v$  es pot calcular a partir de les relacions següents.

#### Mètode directe

El percentatge en volum de fibra es pot determinar a partir de les densitats de la fibra, la matriu i el material compost. Suposant que el contingut de buits és menyspreable. En molts casos, els materials compostos de matriu orgànica es fabriquen amb un contingut de buits menor del 1%. En aquests casos s'accepta calcular el percentatge de volum de fibra mitjançant l'expressió:

$$V_v = 1 - \frac{[w_f / \delta_f + (w_c - w_f) / \delta_m]}{w_c / \delta_c} \quad [10]$$

#### A.4.3.2. Determinació de les propietats mecàniques a tracció

L'assaig a tracció uniaxial constitueix el mètode fonamental per la determinació de dades tals com; l'especificació del material, inspecció, investigació, desenvolupament i càlcul de components estructurals. Les principals normes Europees són:

- UNE EN 2561:1996 Material aeroespacial. Plàstics reforçats amb fibres de carboni. Estratificats unidireccionals. Assaig a tracció paral·lelament a la direcció de la fibra.

- UNE EN 2597:1999 Material aeroespacial. Plàstics reforçats amb fibres de carboni. Laminats unidireccionals. Assaig a tracció perpendicular a la direcció de les fibres.
- UNE EN 53189-2: 1997 Materials plàstics. Plaques de materials estratificats amb resines termoestables. Determinació de la resistència a tracció.
- UNE 61 (UNE 53280:1979) Plàstics. Plàstics reforçats amb fibra de vidre. Determinació de les propietats a tracció.

La normativa Americana per tracció en compostos fibra-resina està recollida a la Norma ASTM D 3039. Existeixen certes diferències entre aquest assaig i la normativa Europea. La EN 61 i altres com la UNE EN 2561 presenten diferències tals com la longitud mínima de la proveta ( ha de ser 250mm al cas Europeu), la forma de la proveta ( la EN 61 admet tres tipus diferents), la longitud de les llengüetes d'amarri ( un mínim de 50mm en el cas Europeu, i no han d'acabar amb bisell), l'espessor per plàstics reforçats ( pot variar entre 2 i 10mm) i l'espessor per materials aeroespacials ( ha de ser 2mm).

i) Provetes d'assaig

S'accepten universalment provetes rectangulars de secció constant amb llengüetes incorporades als extrems. La taula A.13 representa les dimensions recomanades per la ASTM D 3039. La Fig.A.20 mostra la geometria de la proveta.

Orientació de la fibra respecte la càrrega	Amplada	Longitud	Espessor
0 graus	12,7	127	1 a 2,54
90 graus	25,4	38	1 a 2,54
multidireccional	25,4	127	1 a 2,54

Taula A.12. Dimensions recomanades de la proveta en mm (Font: [3])

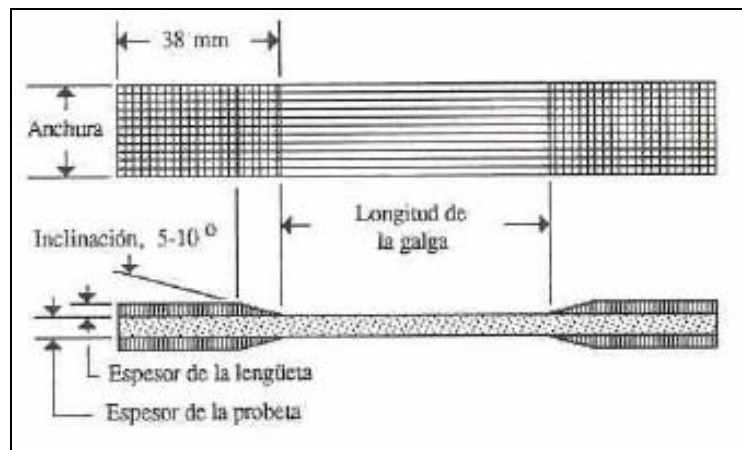


Fig A.20. Provetes d'assaig a tracció (Font: [3])

ii) Llengüetes d'amarri

S'utilitzen generalment plaques de teixit o laminat creuat de vidre epoxi i alumini. Les provetes amb fibra orientades a 90 graus s'assagen freqüentment sense llengüetes d'amarri. La longitud de la llengüeta es determina en funció de la resistència a tallant de l'adhesiu i la resistència a tracció del material compost. Ha d'estar compresa entre 25 i 38mm.

L'espessor de la llengüeta varia amb l'espessor de la proveta, i el seu rang de variació es troba entre 1,5 i 2,5 mm. Es recomana utilitzar qualsevol adhesiu d'alta deformació compatible amb les condicions ambientals. Finalment, es recomana preparar la superfície d'unió mitjançant les operacions d'escatol i neteja amb un dissolvent adequat.

### iii) Procediment d'assaig

Consisteix en determinar l'amplada i l'espessor a diferents punts, i prendre els valors mínims pel càlcul de la secció de la proveta.

Aplicar la càrrega a través d'una sèrie de mordasses amb forma de tascó amb objecte de generar la pressió lateral suficient per evitar el lliscament. Es recomana que la superfície de la mordassa sigui estriada.

L'alineació dels eixos de la proveta respecte a la direcció de la càrrega és extremadament important.

Es recomana una relació de deformació constant des de  $16,7 \times 10^{-6}$  a  $33,7 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . S'accepta també una velocitat de càrrega constant o una relació de càrrega constant corresponent a la relació de deformació.

La medició de deformacions es realitzarà mitjançant:

- Extensòmetre de longitud de galga de 12,5 o 25 mm
- Resistència elèctrica de la galga de deformació: 350 o 120  $\Omega$ . Galga tipus làmina amb longitud de 3,3 a 6,5mm

És desitjable un voltatge baix al circuit de la galga extensiomètrica per minimitzar la generació de calor. Es recomana 1V.

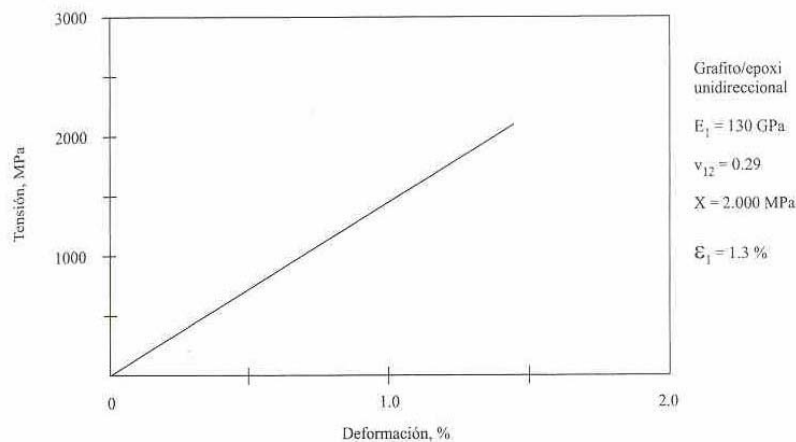


Fig A.21. Corba tensió-deformació per un material compost grafit-epoxi (Font: [3])

#### A.4.3.3. Determinació de la resistència a tallant pla

Aquest assaig està present a la Norma Europea UNE EN ISO 14129:1999 Materials compostos plàstics reforçats amb fibres.

És un assaig simple que segueix el mateix procediment que l'assaig a tracció. La Fig A.22 representa la proveta i el posicionament de dos galgues extensiomètriques. A partir de les deformacions mesurades transversal i longitudinalment, podem deduir el mòdul de tallant com segueix:

$$S = \tau_{12} = \frac{P}{2bd} \quad [11] \qquad G_{12} = \frac{S}{(|\epsilon_1| + |\epsilon_2|)} \quad [12]$$

P; Càrrega aplicada  
 b; Amplada de la proveta  
 d; espessor de la proveta  
 S; Tensió de tallant  
 $\epsilon_1$  i  $\epsilon_2$ ; Deformacions axial i longitudinal respectivament

Aquest mètode presenta l'avantatge que la proveta és senzilla i barata de fabricar i no es requereix cap utilatge especial. Cal destacar que la relació tensió-deformació a tallant en un material compost no és lineal.

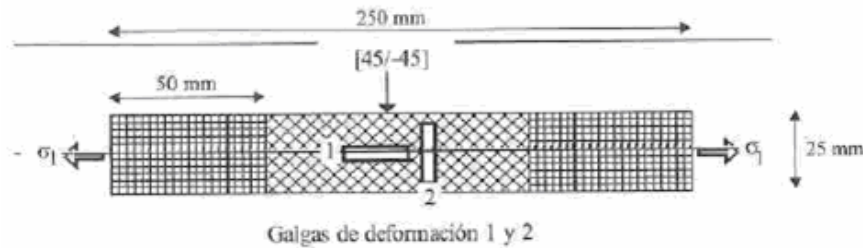


Fig A.22. Posicionament de les galgues extensomètriques per la mida de les propietats a tallant a partir d'una proveta  $[45/-45]_{2s}$  a tracció (Font; [3])

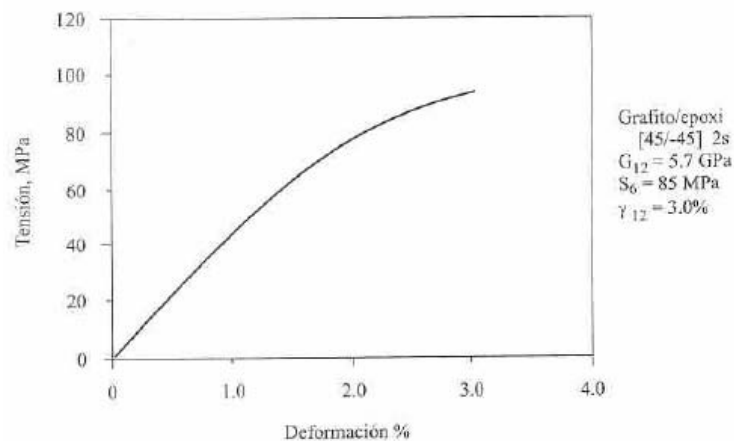


Fig A.23. Corba tensió-deformació d'un assaig a tracció de la proveta  $[45/-45]_{2s}$  d'un material compost grafit/epoxi (Font; [3])

#### A.4.4. Caracterització de l'estructura

No existeixen assajos normalitzats dels sistemes de reforç d'estructures de formigó, fàbrica de maó o fusta mitjançant laminats de carboni. Existeixen una sèrie de informes sobre estudis individuals, realitzats per diverses institucions.

*En aquest apartat es descriu l'estudi realitzat per David Revuelta, Dr. Enginyer Industrial (IETcc) junt amb el grup de materials compostos de la Universitat de Zaragoza, per l'empresa NECSO.*

A.4.4.1. Sistemes de reforç

La Fig.A.24 mostra de forma esquemàtica els dos sistemes de reforç a estudiar: El reforç a flexió s'executa mitjançant la superposició d'una sèrie de capes, fins arribar a un espessor donat, i sempre orientant les fibres en la direcció de màxima tracció. Per això es fixen a la cara inferior de la biga, tractant així d'evitar l'aparició d'esquerdes en les zones de moment flector màxim que posteriorment progressarà en direcció vertical.

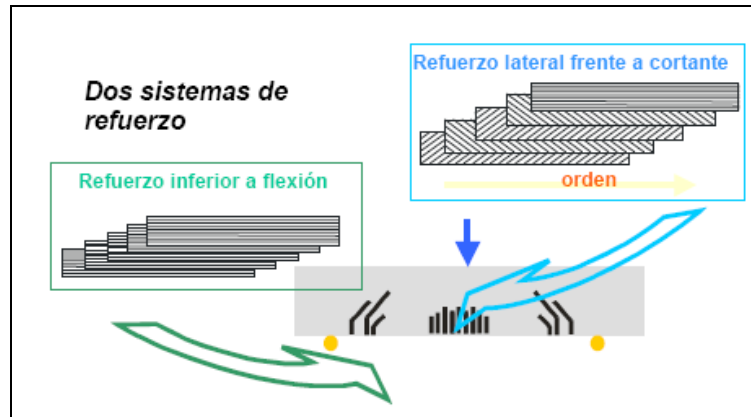


Fig A.24. Esquema de reforços estudiats (Font: [3])

El reforç front a esforços tallants, tracta de prevenir la formació d'esquerdes, que si segueixen originant-se per tensions principals màximes ( mecanisme de fallida dominant en els materials fràgils com el formigó), posseeixen una distribució més erràtica. La seva progressió pot ser visualitzada amb l'ajuda de les línees isostàtiques ( família de corbes envolventes de les direccions principals).

En una biga sotmesa simultàniament a tensions normals produïdes per flexió, i tensions tangencials com a resultat dels esforços tallants presents, la relació entre ambdues varia al llarg de la longitud i altura de l'element, fent variar així la direcció de les tensions principals des de 0° (paral·lela a la directriu de la biga) a les fibres extremes superior i inferior fins formar 45° en la línia neutra. Aquesta és la raó perquè al reforç a tallant s'utilitzin laminats a  $\pm 45^\circ$ .

A.4.4.2. Preparació i geometria de les provetes

En la fabricació de les provetes, junt a les bigues de formigó, es va utilitzar un preimpregnat de fibra de carboni unidireccional i resina epoxi de l'empresa ACG, i denominació LTM 45. Com adhesiu es va utilitzar un compost comercial d'ús específic, denominat Sikadur 30. Es tracta d'un adhesiu bicomponent basat en epoxi.

Per la preparació de les plaques de reforç, es va fer ús de la bossa de buit. La Fig A.25 mostra l'esquema de fabricació i distintes etapes de la mateixa.

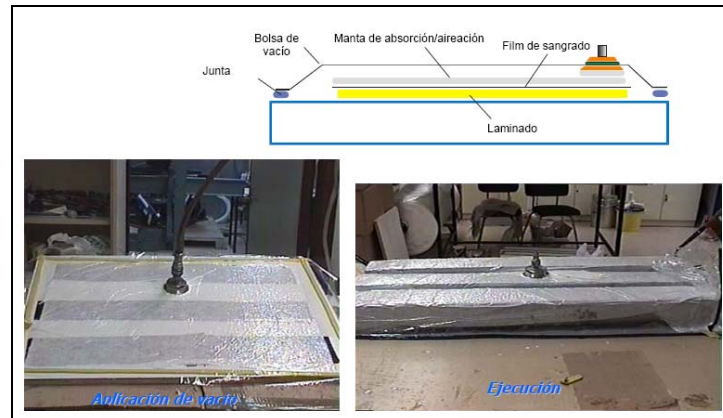


Fig A.25. Esquema de preparació de provetes (Font: [3])

L'estudi experimental realitzat va constar de dos fases: En primer lloc, i amb objecte de caracteritzar el comportament del formigó es van assajar una sèrie de bigues compostes únicament de formigó sense reforçar . A la segona fase es va procedir a assajar les provetes fabricades amb reforç. Els resultats obtinguts, reacció i desplaçament a un assaig a flexió per tres punts, il·lustren el comportament tant resistent com de deformació pels diferents sistemes de reforç estudiats. L'elecció del mètode d'assaig ( flexió per tres punts) respon a la facilitat de la seva realització i no tant a l'obtenció d'unes dades extrapolades a situacions de càrrega o geometria diferents.

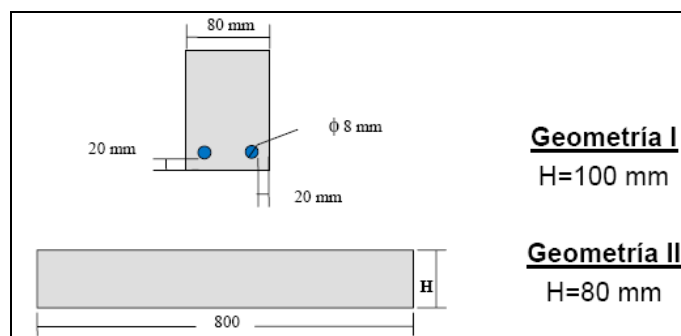


Fig A.26. Geometria de les provetes assajades (Font: [3])

#### A.4.4.3. Resultats

Es van utilitzar a l'estudi experimental quatre tipus diferents de provetes, corresponents a dos geometries i sistemes de reforç diferents. Les dimensions de ambdues geometries es mostren a la Fig.A.26.

Els dos sistemes de reforç estudiats, flexió i flexió-tallant, es van assajar per una geometria diferent, es van utilitzar en ambdós casos l'assaig de bigues sense reforçar com a mètode de control, utilitzats per comparar els seus resultats amb aquelles provetes reforçades i així poder extreure conclusions de l'efectivitat de la tècnica de reforç utilitzada.



## A.5. POSADA EN OBRA

### A.5.1. Introducció

A alguna de les presentacions anteriors s'ha descrit els sistemes de reforç d'estructures actualment existents, amb quins materials es componen, per què s'utilitzen, i quins són els avantatges a cada cas. En aquest capítol es descriu quins són els procediments de posada en obra.

Aquest aspecte és molt important, ja que no serveix tenir sistemes perfectament provats i amb un bon disseny, si tot falla per no haver tingut en compte la posada en obra adequada. A continuació es descriu la posada en obra dels següents tipus de sistemes de reforç amb materials compostos:

- Sistema de laminats a base de fibra de carboni.
- Sistema de teixits a base de fibra de carboni

### A.5.2. Sistema de laminats a base de fibra de carboni

#### A.5.2.1. Materials utilitzats

• Adhesiu tixotrópic de dos components, a base de resines epoxi i càrregues especials. No conté dissolvents. El producte una vegada endurit posseeix altes resistències mecàniques, excel·lent adherència i molt bon comportament front a atacs químics.

• Laminat a base d'un material compost de fibres de carboni amb una matriu de resina epoxi. És un producte anisòtrop\*<sub>7</sub> on totes les fibres van en sentit longitudinal.

#### A.5.2.2. Requeriments generals

##### i) Requeriments exigibles al suport

- La resistència al esquinçament realitzada mitjançant assaig SATEC ha de ser major de 1,5 MPa ( 15 Kg/cm<sup>2</sup>).
- La planitud de les superfícies ha de ser tal que les irregularitats compleixin el següent:
  - Sota regla de 2m: < 10mm
  - Sota regla de 0,20m: < 4mm
- La porositat superficial complirà:
  - Superfície del porus: < 3 cm<sup>2</sup>
  - Profunditat: < 5 mm
  - Extensió: < 10% de la superfície total
- Per l'estat de la superfície es comprovaran els següents aspectes:
  - Alcalinitat: grau de carbonatació
  - Humitat: < 4%
  - Taques:
    - Olis, grasses, productes de curat per obra recent
    - Moho, vegetació, etc... a obres antigues, etc.

\*<sub>7</sub> Anisòtrop; Material que canvia de propietats segons la direcció on es mesuri

ii) Condicions atmosfèriques

La velocitat de polimerització de les resines epoxi està relacionada amb la temperatura d'aplicació. Quan les temperatures siguin superiors a les recomanades, la vida de barreja s'excurta, succeint el contrari quan són inferiors.

A vegades les necessitats de treball obliguen a utilitzar lots un darrera l'altre. Es recomana no barrejar el següent lot fins no acabar l'anterior per no reduir el temps de manejabilitat.

iii) Treballs previs a l'execució

Preparació del suport

• Sanejat

Les superfícies a tractar es presentaran de tal manera que, al moment d'executar els treballs de reforç, estiguin en perfectes condicions, per la qual cosa s'eliminaran les taques superficials, brutícia, parts mal adherides, restes d'altres oficis, etc, mitjançant el repicat, cisellat, escarificat, buixardat o qualsevol altre procediment manual o preferiblement mecànic, fins aconseguir un suport que reuneixi les condicions idònies, en quan a cohesió i rugositat, que garanteixin la bona adherència físico-química del producte d'adhesió.

• Neteja

Realitzades les operacions de sanejat i amb el fi d'obtenir superfícies totalment netes, aquestes es sotmetran a qualsevol dels sistemes que a continuació s'indiquen:

*Raig de sorra:* És el més indicat per aquests tipus de treballs. Consisteix en projectar sobre el suport un raig de sorra de sílice per mitjà d'un compressor de cabal variable en funció de la distància al suport, amb una pressió de 7 atm (aproximadament). La granulometria de la sorra estarà compresa entre 1 i 2mm i l'operari que realitzi el treball actuarà previst d'una escafandra protectora ventilada amb aire fresc.

*Aigua a alta pressió:* Consisteix en projectar sobre el suport aigua a una pressió mínima de 150 atm, mitjançant un equip especial, amb una llançadora prevista d'una boquilla adequada i amb una pressió en bomba controlada per un manòmetre.

*Raig d'aigua-sorra:* Sistema combinació d'altres mencionats, en el que s'utilitza bàsicament l'equip de raig d'aigua a alta pressió i una llançadora de projecció amb un dispositiu que permet incorporar la sorra de sílice a la boquilla (Efecte Venturi).

*Altres tipus:* Pistola d'aire comprimit amb agulles. Neteja amb un raig de vapor. Neteja amb flama. Tractament amb àcids.

Si s'utilitza qualsevol dels dos últims indicats, es comprovarà posteriorment que la cohesió del suport ( interna i en superfície) no ha estat afectada pel tractament ( xoc tèrmic o atac tèrmic).

iv) Regeneració

Sobre les superfícies que han perdut espessor de recobriment es realitza una regeneració per restituir el perfil original a l'element, i regularitzar les superfícies amb el fi que l'espessor de resina epoxi sigui mínim.

Així mateix, es prestarà especial atenció a les superfícies que hagin de rebre els laminats de reforç.

- La planitud de les superfícies
  - Sota regla de 2m: < 10 mm
  - Sota regla de 0,20m: < 4 mm

Sobre les zones on s'hagi perdut espessor de recobriment, serà precís regenerar-les per mitjà de morters o base de resina epoxi. Prèviament es realitzarà la imprimació del suport amb la finalitat de garantir l'adherència.

### *A.5.2.3. Transport i preparació dels laminats*

#### *i) Transport*

Degut a la flexibilitat del material, que permet que es doblegui fàcilment, es recomana el transport d'aquest format en rollo. Aquest rollo pot tenir la longitud que es desitgi, però es recomana portar tot el que es vagi a utilitzar en un sol tros ( fins una longitud de 250m) i efectuar el tallat del laminat a obra a les longituds que es desitgin.

#### *ii) Tall i preparació dels laminats*

El tall del laminat a les longituds desitjades es realitzarà en obra per mitjà d'una serra manual. La preparació dels laminats consisteix, simplement, a la neteja de la pols i brutícia dipositada a la cara que s'hagi d'adherir. L'altre cara no necessita cap preparació. Aquesta neteja es farà passant per la superfície del laminat un paper impregnat amb dissolvent. S'efectuarà aquesta operació fins que no quedin restes de brutícia o pols sobre la superfície tractada.

### A.5.2.4. Posada en obra

#### i) Aplicació de l'adhesiu sobre el suport

L'adhesiu és un producte de dos components a base de resina epoxi i càrregues especials, que no conté dissolvents.

Per la seva aplicació, mesclar completament els dos components amb un batidora elèctrica de baixa velocitat (màx 600 rpm), al menys durant dos minuts, fins aconseguir una pasta totalment homogènia i de color gris.

Una vegada neta les superfícies mitjançant raig de sorra o altre procediment, i regularitzades, es procedirà a l'aplicació tant sobre la xapa metàl·lica, com sobre el suport, d'una pel·lícula entre 0,5 i 1mm d'espessor d'adhesiu.

#### ii) Aplicació de l'adhesiu sobre el laminat

Una vegada net el laminat, s'aplicarà sobre la cara més rugosa ( Les dues cares del laminat no són iguals, i no és indiferent aplicar l'adhesiu a una cara u altre ) una capa entre 0,5 i 1mm d'espessor.

#### iii) Col·locació del laminat sobre el suport

Una vegada aplicat l'adhesiu sobre el suport i laminat, es procedirà a superposar un amb l'altre. Primerament es col·locarà el laminat sense efectuar pressió fins que es comprovi que està perfectament situat en el seu lloc. Una vegada que s'hagi aconseguit la perfecta col·locació, es procedirà a efectuar pressió sobre el laminat mitjançant un corró de goma dura que s'anirà passant al llarg de tota la longitud.

D'aquesta forma s'aconseguirà que rebosi l'adhesiu sobrant pels costats, igual que les possibles bombolles d'aire. L'adhesiu sobrant s'ha d'extreure amb una espàtula. Al final ha de quedar una superfície contínua d'adhesió, sense bombolles d'aire entre laminat i suport. Degut al seu baix pes, els laminats no necessiten ajuda per sostenir-s'hi des del principi.

#### A.5.2.5. Recobriment dels laminats

##### i) Recobriment per qüestions estètiques

Si per qüestions estètiques es necessita, el laminat es pot recobrir amb pintures, tant acríliques com de resina epoxi.

##### ii) Recobriment com a protecció contra incendis

Si es desitja protegir el reforç contra el foc, es recomana la utilització de plaques ignífugues. També es poden utilitzar pintures ignífugues, prèvia comprovació de l'adherència i compatibilitat amb el laminat mitjançant assajos previs.

#### A.5.2.6. Posada en càrrega

L'adhesiu va adquirint les seves resistències des de el moment en que es col·locat, fins aconseguir l'enduriment total als 7 dies. Per tant, és necessari esperar 7 dies fins sobrecarregar l'element estructural a la seva càrrega màxima, podent-s'hi carregar prèviament amb sobrecàrregues inferiors que no fessin superar el límit de resistència de l'adhesiu a cada moment.

#### A.5.2.7. Control de qualitat

##### i) Previ a l'execució dels treballs

S'hauran de fer controls tals com:

- Assajos de resistències mecàniques del formigó
- Assajos d'estabilitat i polimerització correcta de l'adhesiu:
  - Relació resina-enduridor correcta
  - Temperatura d'aplicació

##### ii) Finalitzats els treballs d'execució

Es poden fer controls tals com:

- Assajos d'adherència per tracció directa
- Proves de càrrega

#### A.5.3. Sistema de teixits a base de fibra de carboni

##### A.5.3.1. Productes base

- *Adhesiu de dos components a base de resina epoxi*: No conté dissolvents. El producte una vegada endurit posseeix altes resistències mecàniques, excel·lent adherència i molt bon comportament front a atacs químics.
- Teixits a base de fibres de carboni d'alta resistència: constitueixen l'element resistent del sistema.

#### A.5.3.2. Productes complementaris

- Morter tixotròpic, a base de resines epoxi, per regularització de superfícies, sense dissolvents.
- Producte per injeccions de dos components, a base de resina epoxi, molt fluid i sense dissolvents.

#### A.5.3.3. Requeriments generals

##### i) Requeriments exigibles al suport

Les condicions que ha de complir el suport són les següents:

- La resistència al esquinçament realitzada mitjançant assaig SATEC ha de ser major de 1 MPa ( $10 \text{ Kg/cm}^2$ ).
- La planitud de les superfícies ha de ser tal que les irregularitats siguin menors de 0,5mm.
- La porositat superficial complirà:
  - Superfície del porus:  $< 3 \text{ cm}^2$
  - Profunditat:  $< 5 \text{ mm}$
  - Extensió:  $< 10\%$  de la superfície total
- Per l'estat de la superfície es comprovaran els següents aspectes:
  - Alcalinitat: grau de carbonatació
  - Humitat:  $< 4\%$
  - Taques:
    - Olis, grasses, productes de curat per obra recent
    - Moho, vegetació, etc... a obres antigues, etc.

##### ii) Condicions atmosfèriques

La velocitat de polimerització de les resines epoxi està relacionada amb la temperatura d'aplicació. Quan les temperatures siguin superiors a les recomanades, la vida de barreja s'excurta, succeint el contrari quan són inferiors.

A vegades les necessitats de treball obliguen a utilitzar lots un darrera l'altre. Es recomana no barrejar el següent lot fins no acabar l'anterior per no reduir el temps de manejabilitat.

##### iii) Treballs previs a l'execució

#### Preparació del suport

##### • Sanejat

Les superfícies a tractar es presentaran de tal manera que, al moment d'executar els treballs de reforç, estiguin en perfectes condicions, per la qual cosa s'eliminaran les taques superficials, brutícia, parts mal adherides, restes d'altres oficis, etc, mitjançant el repicat, cisellat, escarificat, buixardat o qualsevol altre procediment manual o preferiblement mecànic, fins aconseguir un suport que reuneixi les condicions idònies, en quan a cohesió i rugositat, que garanteixin la bona adherència físico-química del producte d'adhesió.

### • Neteja

Realitzades les operacions de sanejat i amb el fi d'obtenir superfícies totalment netes, aquestes es sotmetran a qualsevol dels sistemes que a continuació s'indiquen:

*Raig de sorra:* És el més indicat per aquests tipus de treballs. Consisteix en projectar sobre el suport un raig de sorra de sílice per mitjà d'un compressor de cabal variable en funció de la distància al suport, amb una pressió de 7 atm (aproximadament). La granulometria de la sorra estarà compresa entre 1 i 2mm i l'operari que realitzi el treball actuarà previst d'una escafandra protectora ventilada amb aire fresc.

*Aigua a alta pressió:* Consisteix en projectar sobre el suport aigua a una pressió mínima de 150 atm, mitjançant un equip especial, amb una llançadora prevista d'una boquilla adequada i amb una pressió en bomba controlada per un manòmetre.

*Raig d'aigua-sorra:* Sistema combinació d'altres mencionats, en el que s'utilitza bàsicament l'equip de raig d'aigua a alta pressió i una llança de projecció amb un dispositiu que permet incorporar la sorra de sílice a la boquilla (Efecte Venturi).

*Altres tipus:* Pistola d'aire comprimit amb agulles. Neteja amb un raig de vapor. Neteja amb flama. Tractament amb àcids.

Si s'utilitza qualsevol dels dos últims indicats, es comprovarà posteriorment que la cohesió del suport ( interna i en superfície) no ha estat afectada pel tractament ( xoc tèrmic o atac tèrmic).

#### A.5.3.4. Regeneració

Sobre les superfícies que han perdut espessor de recobriment es realitzarà una regeneració per; restituir el perfil original a l'element i regularitzar les superfícies amb el fi de que l'espessor de resina epoxi sigui mínim.

Així mateix, es prestarà especial atenció a les superfícies que vagin a rebre els laminats del reforç ha de ser tal que les irregularitats siguin menors de 0,5mm.

Sobre les zones en les que s'hagi perdut el recobriment serà precís regenerar-les a base de resines epoxi. Prèviament es realitzarà la imprimació del suport amb el fi de garantir l'adherència.

#### A.5.3.5. Posada en obra

##### i) Aplicació de l'adhesiu sobre el suport

L'adhesiu és un producte de dos components a base de resina epoxi i càrregues especials, que no conté dissolvents.

Per la seva aplicació, barrejar completament els dos components amb un batidora elèctrica de baixa velocitat (màx 600 rpm), al menys durant dos minuts, fins aconseguir una pasta totalment homogènia i de color gris.

Una vegada neta les superfícies mitjançant raig de sorra o altre procediment, i regularitzades, es procedirà a l'aplicació sobre el suport, utilitzant una paleta o brotxa de la resina Sikadur 330, en una quantitat aproximada de 0,7 a 1,2 Kg/m<sup>2</sup>, depenent de la rugositat del suport.

##### ii) Col·locació del teixit sobre el suport

Col·locar el teixit sobre la resina a la direcció adequada, embebent el teixit a la mateixa, i pressionant fins que la resina surti pels forats del teixit. És important aconseguir que les fibres quedin el més rectes possibles, per la qual cosa s'ha d'estirar amb força els teixits.

iii) Eliminació dels forats o bombolles d'aire

Una vegada col·locat el teixit sobre la superfície, es procedeix a repartir la resina amb un corró fins aconseguir una superfície homogènia, i la completa eliminació dels forats i bombolles d'aire. Al final ha de quedar una superfície continua d'adhesió, sense bombolles d'aire entre el teixit i el suport.

Degut al seu baix pes, els laminats no necessiten ajuda perquè es sostinguin des de el principi.

iv) Recobriment del teixit

Com a recobriment final, s'aplicarà una capa addicional de resina amb un consum aproximat de 0,5 Kg/m<sup>2</sup>. La forma d'aplicació més adequada és amb corró. Si es vol es pot espolvoritzar sobre l'arena de quars que actuarà de capa d'adhesió per posteriors recobriments cimentosos.

A.5.3.6. Recobriment per qüestions estètiques

Si per qüestions estètiques es necessités, les fibres es poden recobrir amb pintures, tant acríliques com de resina epoxi.

A.5.3.7. Recobriment per a protecció contra incendis

Si es desitges protegir el reforç contra el foc, es recomana la utilització de plaques ignífuges. També es poden utilitzar pintures ignífuges, prèvia comprovació de l'adherència i compatibilitat amb el laminat mitjançant assajos previs.

A.5.3.8. Posada en càrrega

L'adhesiu va adquirint les seves resistències des del moment en que és col·locat fins aconseguir l'enduriment total als 7 dies. Per tant, és necessari esperar 7 dies fins sobrecarregar l'element estructural a la seva càrrega màxima, podent-s'hi carregar prèviament amb sobrecàrregues inferiors que no fessin superar el límit de resistència de l'adhesiu a cada moment.

A.5.3.9. Control de qualitat

i) Previ a l'execució dels treballs

S'hauran de fer controls tals com:

- Assajos de resistències mecàniques del formigó.
- Assajos d'estabilitat i polimerització correcta de l'adhesiu.
- Relació resina-enduridor correcta
- Temperatura d'aplicació ( com a regla general es pot admetre que una elevació de temperatura de 10°C duplica aproximadament la velocitat de reacció).

ii) Finalitzats els treballs d'execució

Es poden fer controls tals com:

- Assajos d'adherència per tracció directa
- Proves de càrrega

## B. COMPORTAMENT EXPERIMENTAL

Aquests assajos han estat extrets de les tesis doctorals de dos estudiants d'Enginyeria de Camins de la UPC. L'assaig a flexió realitzat per Alejandro Alarcón López [1], i l'assaig de confinament de pilars realitzat per Carlos Aire Untiveros [2].

Les idees extretes als assajos han estat resumides i transportades a la nostra aplicació, per tal de extreure idees de disseny aplicant-ho a un bon dimensionament de l'element que volem calcular.

### B.1. ASSAIG A FLEXIÓ [1]

#### B.1.1. Introducció

Aquest capítol mostra el comportament d'una biga de formigó de tipus dovella sotmesa a flexió, amb reforç exterior mitjançant FRP.

Als assajos realitzats es centra especial atenció a tres conjunts de dades principals com són ; la rigidesa de la biga a partir de la fletxa registrada a la dovella central, la segona relacionada amb el pretensat exterior, mostrant els increments de tensió registrats als tendons a la zona d'ancoratge i tram central, així com el desplaçament relatiu dels tendons als desviadors, i l'última relacionada amb la deformació registrada a les galgues extensiomètriques col·locades al CFRP al llarg de la biga i en especial a les juntes de dovella.

Per la nostra aplicació, treballarem les dades de l'últim apartat que són les que ens serveixen d'aplicació.

Es mostren els assajos amb les possibles variants pel TFC i CFK preimpregnat de resina epoxi. Aquestes dues paraules es defineixen com:

TFC ( Teixit bidireccional de Fibres de Carboni)

CFK ( Laminat de fibres de carboni prefabricat, preimpregnat de resina epoxi)

#### B.1.2. Assaig de la biga VD-TFC1

Es va arribar a un nivell de càrrega de 172 kN a cadascun dels gats, que estava lleugerament per d'amunt de la càrrega de ruptura calculada prèviament (160kN), de tal forma que l'acer pretensat va arribar a tensions properes al seu límit elàstic.

S'esperava que l'obertura de les juntes centrals 3 i 4, generessin la desadhesió de la fibra a partir d'aquesta zona, però en comptes d'això, al reforçar només per 5 dovelles, ja que les tres centrals estaven unides per la seva part inferior amb el CFRP, van tenir un comportament monolític, produint l'obertura de les juntes pròximes sense reforç (2 i 5), com es mostra a l'esquema següent:

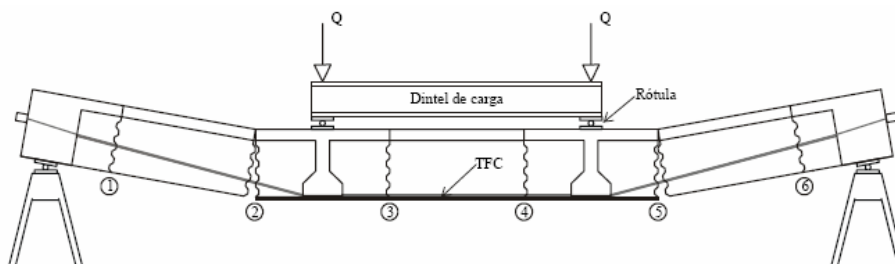


Figura B.1. Configuració deformada de la biga VD-TFC1 (Font; [1])



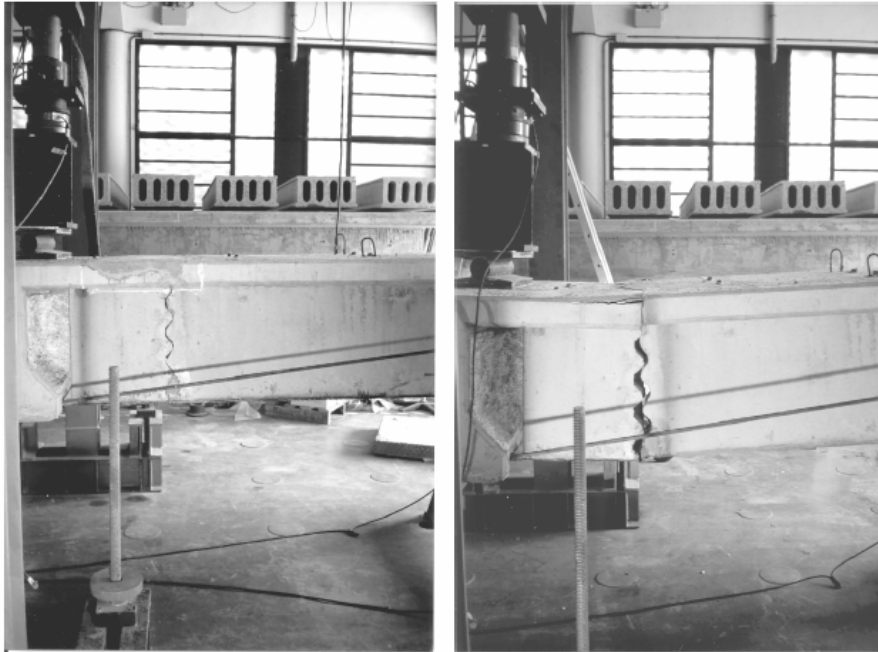


Figura B.2. Assajos de la biga VD-TFC1; (Esq) Detall de la junta al inici de l'assaig; (Dret) Detall de la junta en fase de ruptura. (Font; [1])

#### B.1.2.1. Evolució de la fletxa amb la càrrega

Es pot observar al gràfic un tram elàstic inicial fins una càrrega aproximada de 40 kN, precedida per un canvi de pendent que té relació amb l'obertura de la junta entre la dovella 5 (Fig B.1). Al arribar a una càrrega de 120kN, s'observa un nou canvi de pendent originat per la fisuració i obertura de la junta 2 que havia estat reparada monolíticament, que a l'obrir-se va modificar el comportament de la biga degut al canvi de deformada d'aquesta originant una redistribució a l'obertura de les juntes que va produir una recuperació relativa a la fletxa central i un guany de rigidesa del sistema.

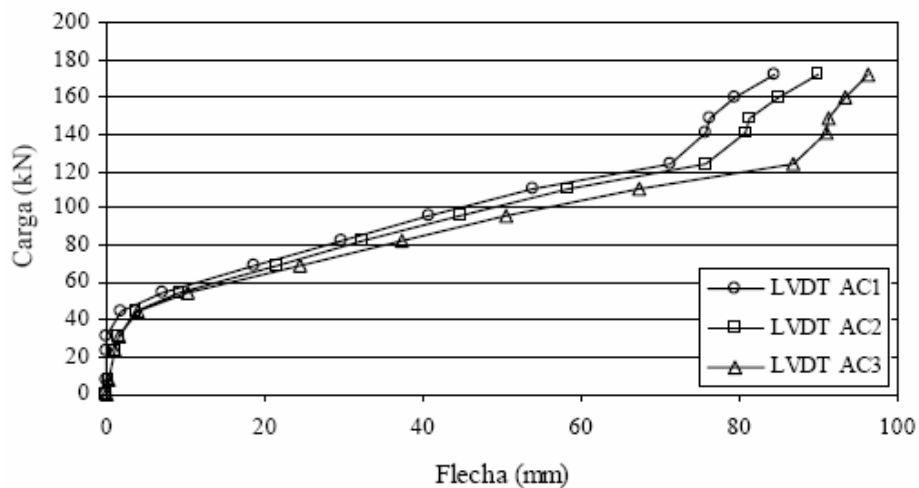


Figura B.3. Gràfica càrrega-fletxa de la biga VD-TFC1 (Font; [1])

B.1.2.2. Comportament del FRP

La figura B.4 mostra el comportament del TFC en una de les juntes de dovelas. La galga GT11 col·locada sobre la junta 3 ( figura B.1) i les galgues GT10 i GT12 a 15 cm de la junta. Es pot observar la diferència de deformació entre les galgues, ja que mentre la galga extensiomètrica col·locada a la junta presenta una gran deformació, les galgues situades a 15 cm de la junta van presentar una deformació menyspreable, amb el que es demostra que existeix una concentració de tensions important a la zona pròxima a les juntes.

A la figura B.5 es mostra l'evolució de l'obertura a les juntes centrals ( 3 i 4 segons la figura B.1), s'observa que degut a la rigidització originada pel TFC va presentar-se una obertura a les juntes centrals insignificant. En canvi, l'absència del TFC a les juntes adjacents ( 2 i 5 segons la figura B.1) va ocasionar que es presentarà una obertura considerable en aquestes juntes. Lamentablement aquestes no estaven instrumentades, pel que no es pot mostrar l'evolució de l'obertura durant l'assaig. Es pot observar que tant el temposonic 1 com el 4 col·locats a la junta 3, mostren un canvi de comportament a una càrrega aproximada de 120 kN, això es degut a la fisuració de la junta entre dovelas que havia estat reparada monolíticament abans de l'assaig, el que va provocar un recomodament i canvi de comportament de l'estructura, originant una disminució a l'obertura de la junta 3.

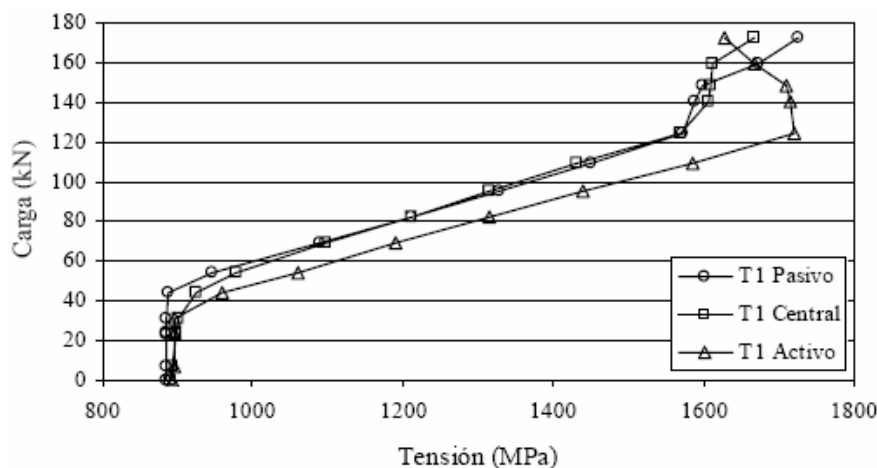


Figura B.4. Gràfica càrrega-deformació del TFC de la biga VD-TFC1 (Font: [1])

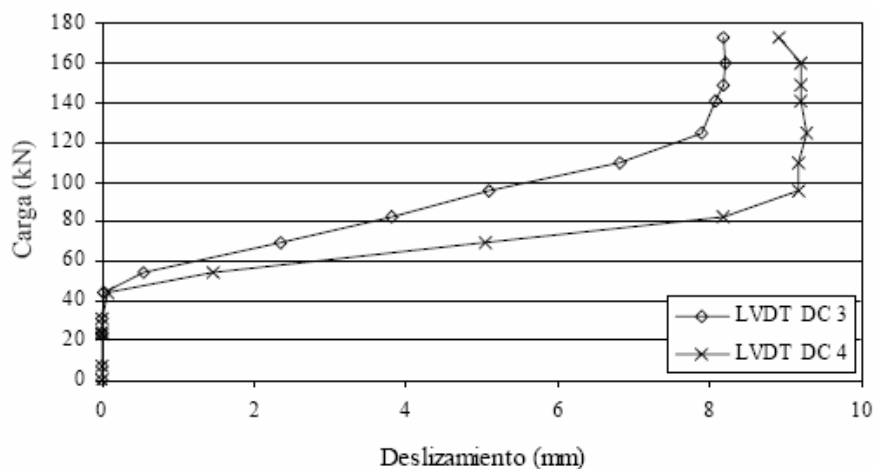


Figura B.5. Gràfica càrrega-obertura de les juntes de la biga VD-TFC1 (Font: [1])

### B.1.3. Assaig de la Biga VD-TFC2

L'assaig es va realitzar en tres etapes; A la primera etapa, es va portar la biga a una càrrega de 80 kN aproximadament a cadascú dels gats i després es va descarregar totalment. El motiu pel qual es va portar la biga a aquest nivell de càrrega va ser degut al inici de la desadhesió del TFC, originant-s'hi a la zona de les juntes entre dovelas i propagant-se gradualment per ambdós costats de la junta, produint sorolls i despreniment de trossos de resina a la zona on es produïa la desadhesió. En una segona etapa, es va portar la biga a una càrrega similar a la de la primera etapa, amb el fi de poder comparar el comportament de la biga a partir de les dades registrades durant la primera etapa de l'assaig. Per últim, després de descarregar-se la biga, es va arribar a la ruptura aconseguint un nivell de càrrega de 113 kN aproximadament a cadascú dels gats, produint-se la desadhesió total de la fibra de forma explosiva.

A primera vista pot resultar confús ja que a l'assaig VD-TFC1, la càrrega a la que es va arribar va ser superior i no es va presentar despreniment del TFC, però tenint en compte que la força de pretensat es va reduir, aquesta càrrega resulta congruent.

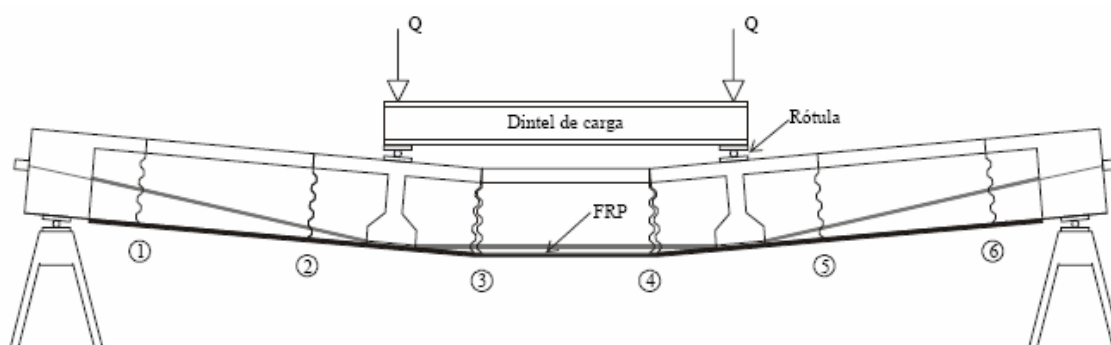


Figura B.6. Configuració deformada de la biga VD-TFC2 (Font: [1])



Figura B.7. Desadhesió del TFC a la biga VD-TFC2 (Font: [1])

A diferència del primer assaig VD-TFC1, al estar unides pel TFC totes les juntes entre dovelas, la configuració de la deformada va coincidir amb l'esperada, on les juntes centrals 3 i 4 obririen i no les adjacents com al primer assaig. A la figura B.6 es pot veure un esquema de la biga VD-TFC2 deformada.

La figura B.7 indica que el despreniment del FRP no va ser degut a una fallida en el propi sistema de reforç, sinó pel contrari, a la fisuració i/o esquinçament del formigó a nivell de la interfase formigó-FRP.

B.1.3.1. Evolució de la fletxa amb la càrrega

La fletxa màxima es va registrar a la dovella central. A les figures B.8, B.9 i B.10 es mostra l'evolució de la fletxa a cadascuna de les tres etapes de l'assaig. Es pot observar la diferència de rigidesa de la biga a la primera i segona etapa abans que s'iniciés el despreniment del TFC, per altre part no existeix cap diferència apreciable en quant a comportament si es compara la segona i tercera etapa. Tot i que és molt difícil determinar el inici del despreniment, es pot observar un canvi de comportament a la primera etapa de l'assaig al sobrepassar els 40 kN.

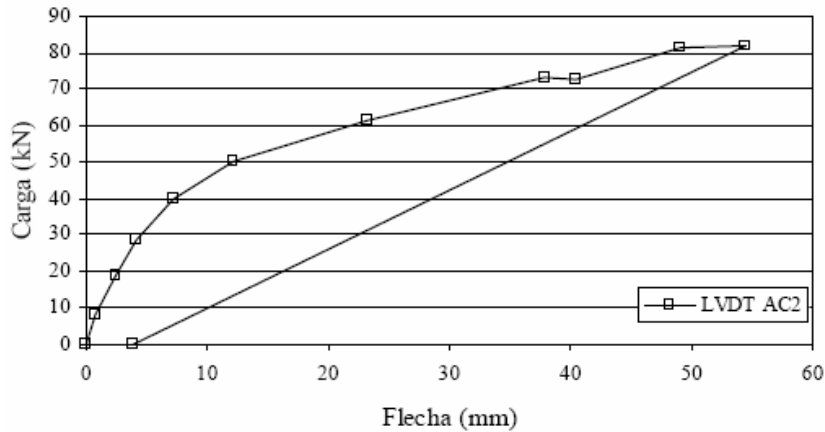


Figura B.8. Gràfica Càrrega-Fletxa, etapa 1 de la biga VD-TFC2 (Font; [1])

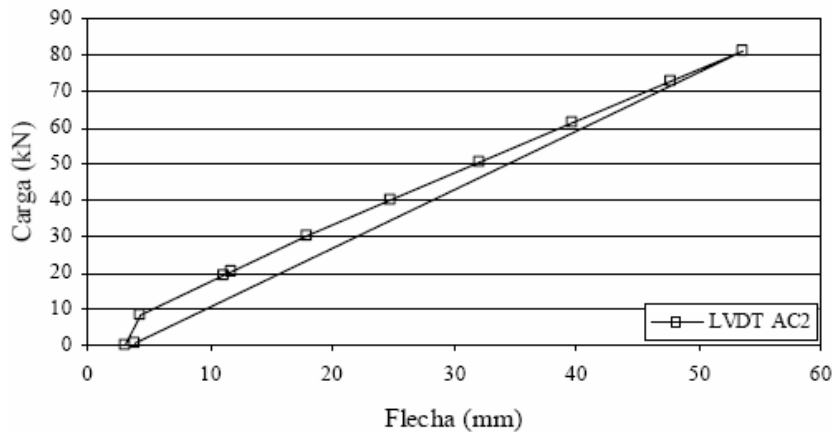


Figura B.9. Gràfica Càrrega-Fletxa, etapa 2 de la biga VD-TFC2 (Font; [1])

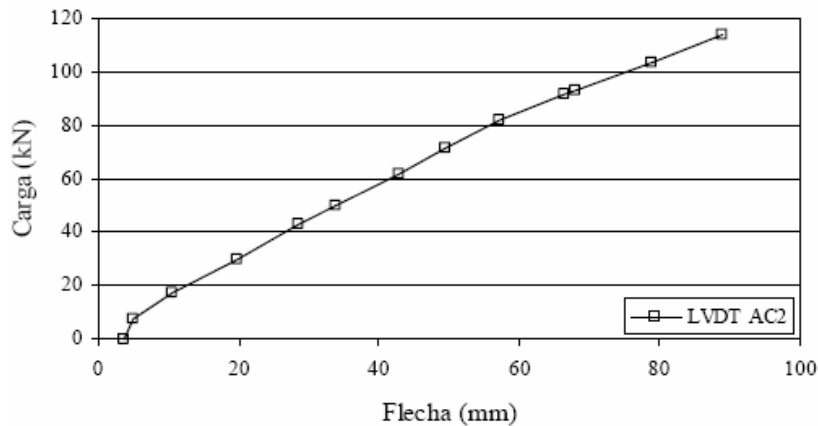


Figura B.10. Gràfica Càrrega-Fletxa, etapa 3 de la biga VD-TFC2 (Font; [1])

B.1.3.2. Comportament del FRP

Les figures B.11, B.12 i B.13 mostren el comportament del TFC en una de les juntes de dovelas durant les tres etapes de l'assaig. La galga GT5 col·locada sobre la junta 4 (figura B.6) i les galgues GT4 i GT6 a 15cm de la junta.

A la primera etapa de l'assaig es pot observar clarament el moment en que s'inicia el despreniment del TFC pels dos costats de la junta. Mentre la galga GT5 mostra un comportament sense canvis considerables de pendent fins pràcticament el final, les galgues GT4 i GT6 canvien el seu comportament de manera dràstica entre 40 i 50 kN de càrrega.

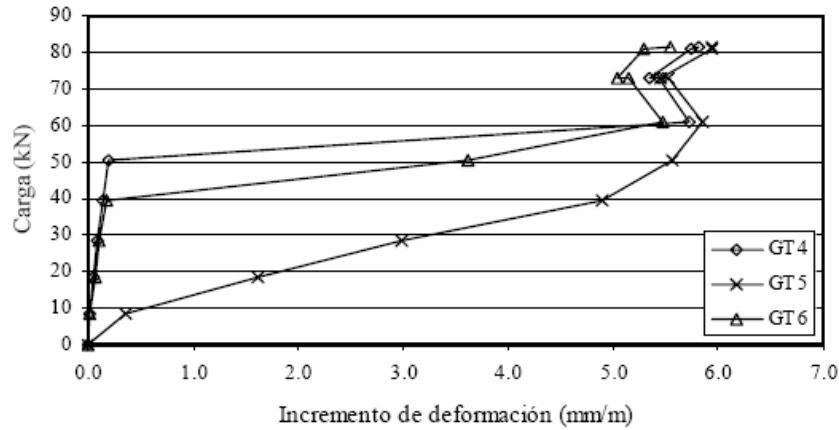


Figura B.11. Gràfica Cárrega-Deformació del TFC, etapa 1 de la biga VD-TFC2 (Font: [1])

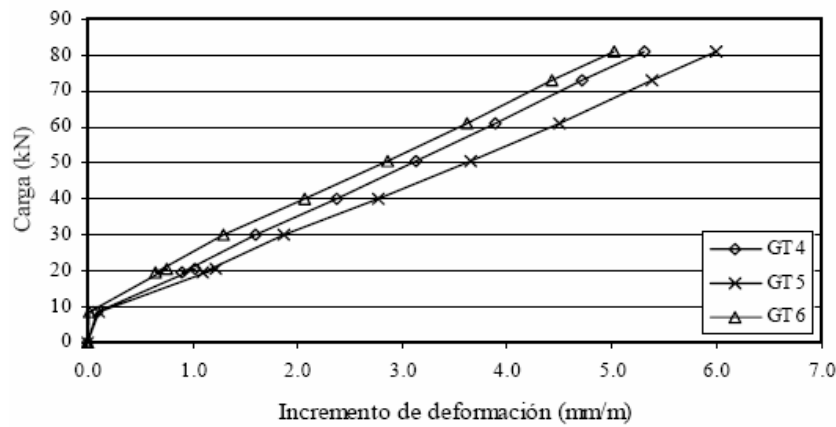


Figura B.12. Gràfica Cárrega-Deformació del TFC, etapa 2 de la biga VD-TFC2 (Font: [1])

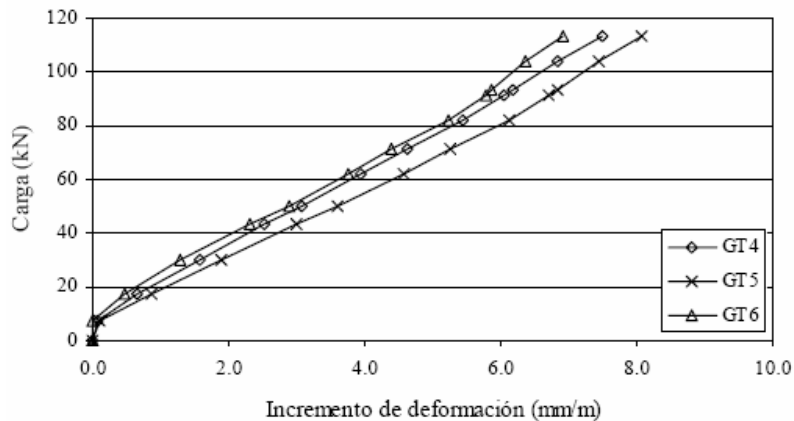


Figura B.13. Gràfica Cárrega-Deformació del TFC, etapa 3 de la biga VD-TFC2 (Font: [1])

En contrast, es pot observar la deformació registrada per les galgues a les dues etapes següents, constatant el despreniment del TFC en una zona important al voltant de les juntes entre dovelas, llavors es pot observar la concordança en deformació de les tres galgues amb el que es pot comprovar la hipòtesi feta de que el TFC a partir de la segona etapa es comporta com un cable ancorat als extrems en les zones d'ancoratge. Aquest mateix comportament es va poder observar a la resta de les galgues col·locades al llarg del TFC.

No només es va poder registrar el despreniment del TFC per mitjà de la instrumentació de la biga, sinó que al descarregar-la després de la primera etapa de l'assaig, es va poder constatar clarament aquest fenomen a l'observar la interfase formigó/TFC, com es mostra a la figura.

Del mateix mode que en el TFC, es pot veure el canvi de comportament en quant a l'evolució de l'obertura de les juntes a les tres etapes. Aquest comportament es reflexa a les figures B.14,B.15,B.16.

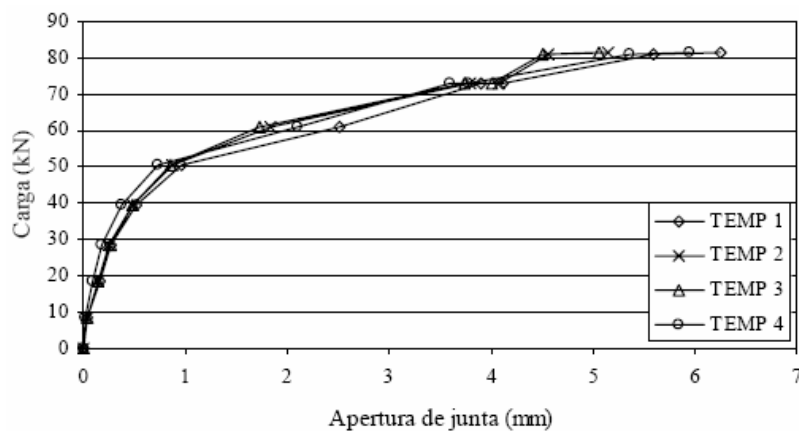


Figura B.14. Gràfica Cárrega-Obertura de junta etapa 1 de la biga VD-TFC2 (Font; [1])

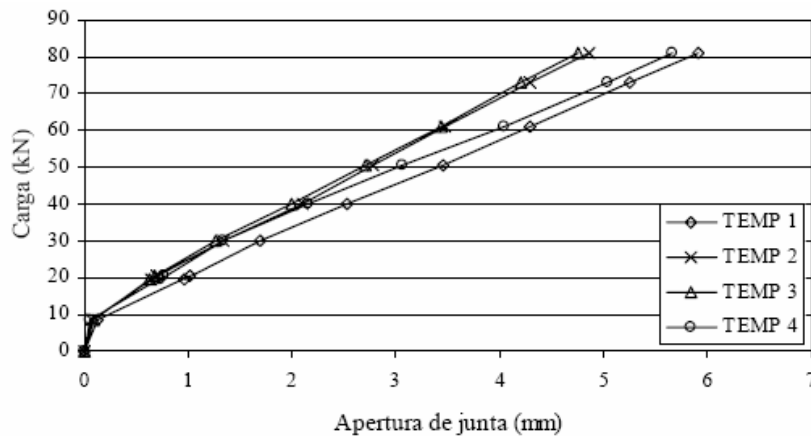


Figura B.15. Gràfica Cárrega-Obertura de junta etapa 2 de la biga VD-TFC2 (Font; [1])

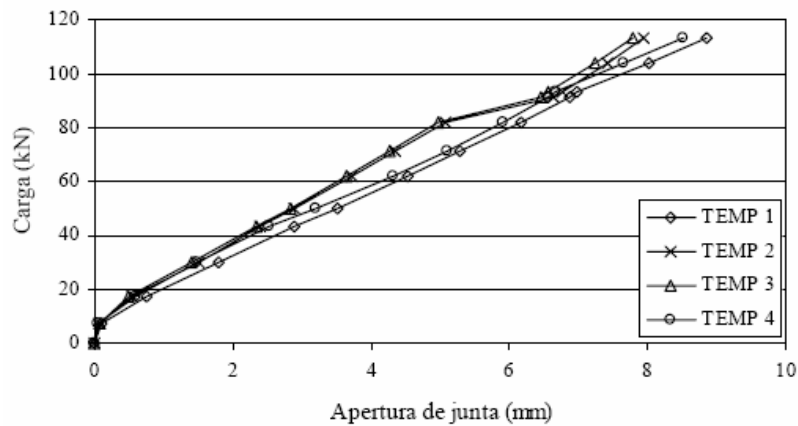


Figura B.16. Gràfica Càrrega-Obertura de junta etapa 3 de la biga VD-TFC2 (Font; [1])

El mecanisme de ruptura es va iniciar amb una fisura diagonal localitzada a la zona pròxima a la junta de dovelas ( figura B.17 esquerra), propagant-s'hi a través de la interfase formigó/TFC causant la desadhesió de la fibra pel procés denominat "peeling".

A la figura B.17 dreta es pot observar el despreniment del formigó a la zona de juntes entre dovelas fins l'acer passiu, motiu pel qual es va originar una fisura longitudinal que es va propagar a través de la interfase formigó/TFC.



Figura B.17. Detall de la desadhesió del TFC a la biga VD-TFC2; (Esq) Fisuració inicial a la junta; (Dret) Desadhesió del TFC. (Font; [1])

#### B.1.4. Assaig de la biga VD-CFK1

L'assaig es va realitzar en una sola etapa, fins arribar la biga a la desadhesió del CFK. En aquest assaig la desadhesió del CFK va ser gradual, a diferència de l'assaig VD-TFC2, pel qual es va arribar a una càrrega màxima de 96kN a cadascú dels gats, per després registrar una disminució gradual de la rigidesa del sistema i disminució de càrrega a l'anar augmentant l'àrea de desadhesió del CFK.

La deformació observada a la biga VD-CFK1 va ser similar a la que va presentar a l'assaig de la biga VD-TFC2. A la figura B.18 es pot veure un esquema de la biga VD-CFK1 deformada.

Com es va mencionar anteriorment la desadhesió del CFK es va presentar gradualment des de la zona pròxima a les juntes entre dovelas centrals fins a ambdós costats d'aquestes.

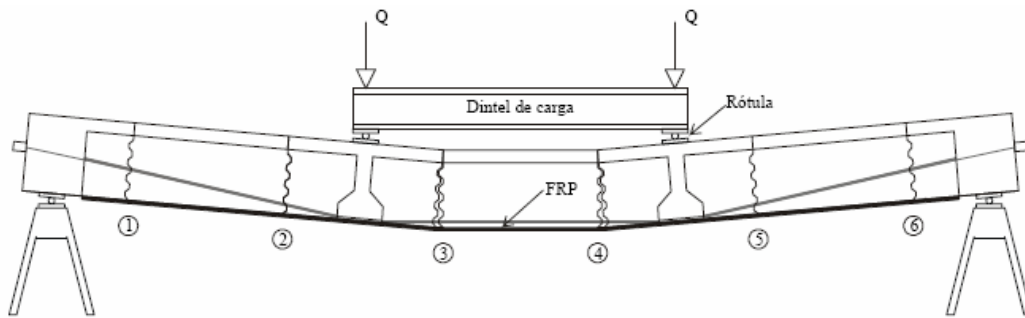


Figura B.18. Configuració deformada de la biga VD-CFK1 (Font: [1])



Figura B.19. Detall de la junta central entre dovelas després de l'assaig VD-CFK1 (Font: [1])

#### B.1.4.1. Evolució de la fletxa màxima amb la càrrega

La fletxa màxima es va registrar a la dovela central mitjançant el LVDT col·locat al centre del vànol. A la figura B.20 es mostra l'evolució de la fletxa respecte a la càrrega.

Es pot observar en aquesta figura com a partir de quan s'inicia la desadhesió amb una càrrega màxima de 70 kN, pràcticament la càrrega no té variacions importants, continuant així fins el desprendiment del laminat on es presenta súbitament un descens de la càrrega i després un enduriment possiblement causat per l'increment de tensió al pretensat a estats avançats de càrrega. Es presenta al principi una rama elàstica pràcticament lineal fins a una càrrega de 70 kN aproximadament, seguida d'una etapa amb canvis dràstics produïts per la desadhesió gradual del CFK i continuant amb una rama amb tendència asimptòtica on es pot suposar nul·la la contribució del FRP.



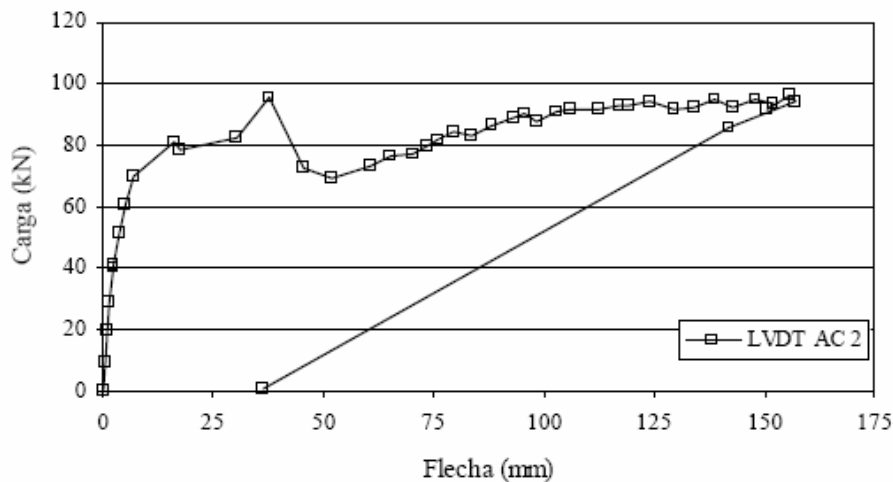


Figura B.20. Gràfica Càrrega-Fletxa de la biga VD-CFK1 (Font; [1])

B.1.4.2. Comportament del FRP

La figura 2.21 mostra el comportament del CFK en una de les juntes de dovelas. La galga GC2 col·locada sobre la junta 3 (figura 2.18) i les galgues GC1 i GC3 a 15 cm de la junta. Al igual que en la primera etapa de l'assaig VD-TFC2 es pot observar la diferència de deformació entre les galgues, ja que al principi mentre la galga extensiomètrica col·locada sobre la junta presenta una gran deformació, les galgues situades a 15 cm de la junta va presentar molt poca deformació, fins desadherir-se el CFK sota la galga.

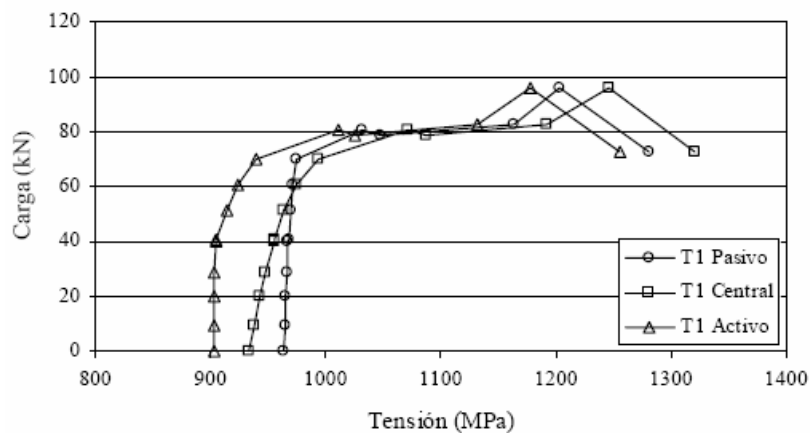


Figura B.21. Gràfica Càrrega-Deformació del CFK de la biga VD-CFK1 (Font; [1])

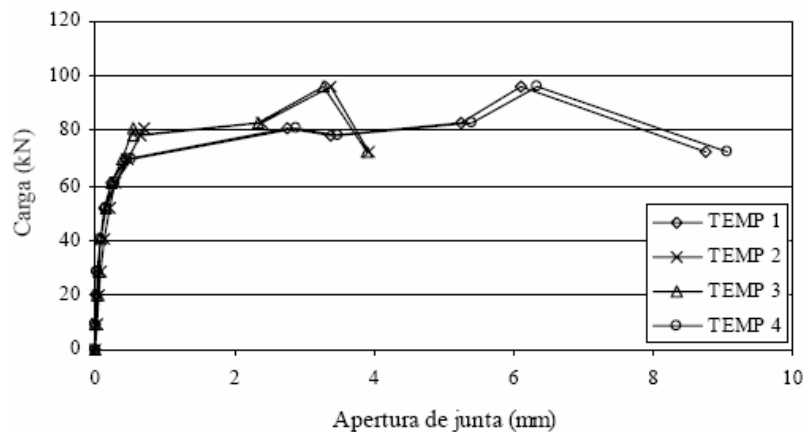


Figura B.22. Gràfica Càrrega-Obertura de juntes de la biga VD-CFK1 (Font; [1])

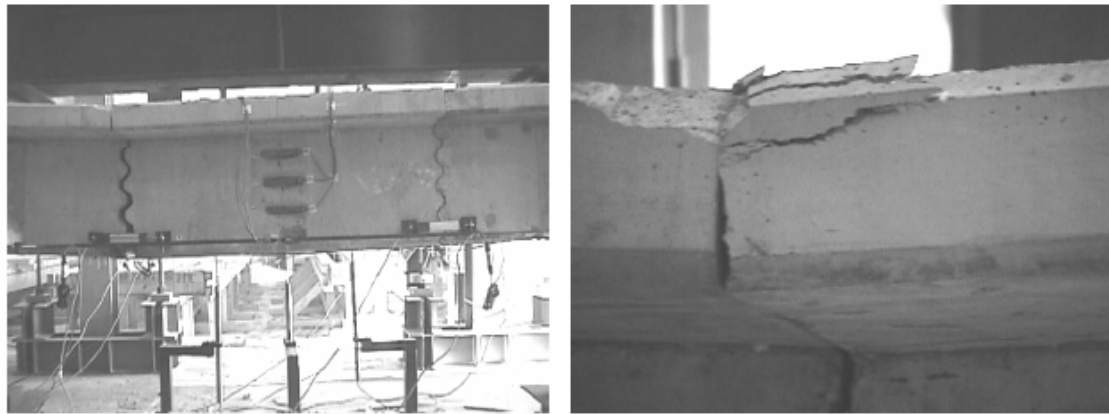


Figura B.23. Assaig de la biga VD-CFK1; (Esq) Detall de les juntes centrals ; (Dret) Detall de la zona superior de la junta 3 (Font; [1])

### B.1.5. Anàlisis comparatius

#### B.1.5.1. Biga VD-TFC1

A la figura B.24 es mostra l'evolució de la fletxa al centre del vànol tant per la biga VD-TFC1, la biga model i la biga control. Es pot observar a primera vista que el comportament de la biga VD-TFC1 és més semblant al de la biga control que al model teòric fins una càrrega aproximada de 120 kN, tot i això, la fletxa registrada durant l'assaig d'aquesta biga va ser influenciada per la reparació monolítica realitzada a la junta feta malbé, pel que les dades obtingudes a l'assaig experimental són poc fiables per comparar-les amb el model numèric. De qualsevol manera es pot visualitzar un canvi de rigidesa en estats avançats de càrrega si comparem la biga model amb la biga control. Tot i això, l'absència de reforç de CFRP a la totalitat de les juntes ocasiona una obertura localitzada en les juntes sense reforç, deguda al canvi de rigidesa seccional tant important en aquestes juntes, el que produeix als assajos VD-TFC2 i VD-CFK1 com es mostrarà més endavant quan s'analitzin aquests assajos.

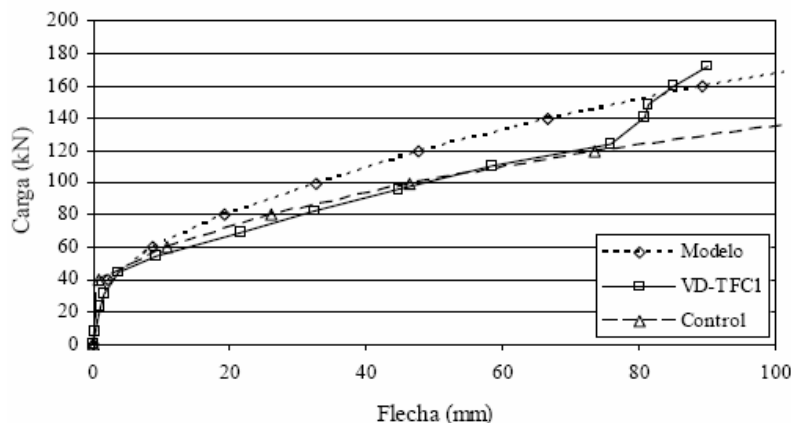


Figura B.24. Gràfica comparativa Càrrega-Fletxa, biga VD-TFC1 (Font; [1])

#### B.1.5.2. Biga VD-TFC2

A la gràfica càrrega-fletxa de la biga VD-TFC2 es poden observar varis fenòmens interessants. El primer possiblement més important, és la similitud de les corbes de la biga model i la biga VD-TFC2 fins nivells intermitjos de càrrega, demostrant que el comportament inicial del TFC correspon al d'una barra d'acer amb adherència perfecta.

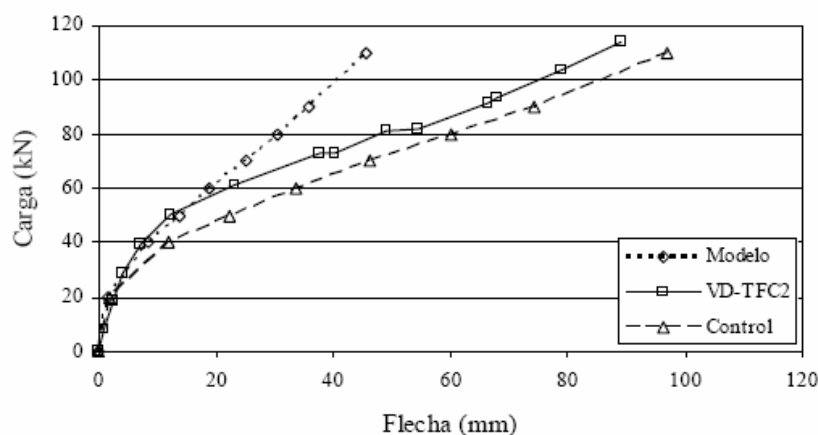


Figura B.25. Gràfica comparativa Càrrega-Fletxa, biga VD-TFC2 (Font: [1])

Per altre part, el punt en el que les gràfiques comencen a separar-se, coincideix amb el moment en el que es va registrar la desadhesió inicial del FRP.

Es pot verificar un augment de rigidesa global del sistema que es manté relativament constant fins el desprendiment del TFC, pel que es pot suposar que l'aportació del TFC a la resistència del sistema continua constant fins el desprendiment total del reforç. Aquest fet es pot contrastar a l'observar la figura B.11, on es comprova que al igualar-s'hi la deformació en el TFC on totes les galgues extensiomètriques estan situades pròximes a la junta, la deformació no s'incrementa en els escalons successius de càrrega, pel que la contribució del FRP es pot considerar constant durant el procés de desadhesió.

Totes aquestes observacions demostren la relació que existeix entre l'aportació del sistema de reforç i la deformació de desadhesió admissible d'aquest. Per altre part, a l'observar el comportament de la biga Model, podem confirmar la contribució tant important del FRP en cas de que no es presentarà el fenomen de "peeling".

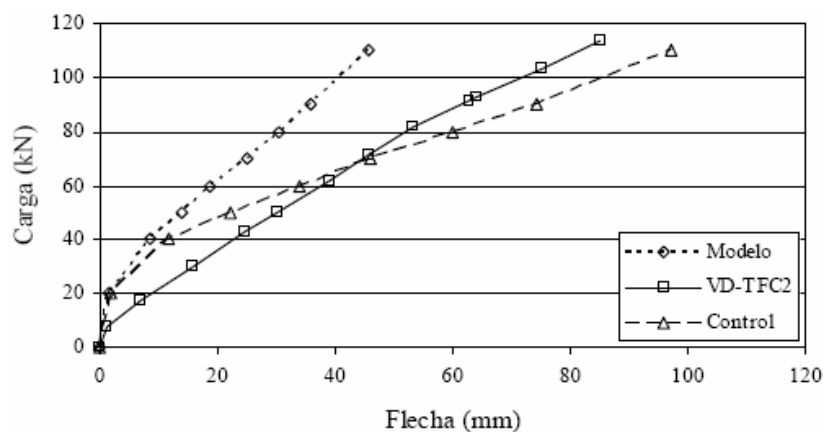


Figura B.26. Gràfica comparativa Càrrega-Fletxa, etapa 3, VD-TFC2 (Font: [1])

Un dels aspectes interessants que es van observar en aquest assaig, va ser la pèrdua de rigidesa inicial de la biga després de realitzar el cicle càrrega-descàrrega.

A la figura B.26 es mostra l'evolució de la fletxa de la biga VD-TFC2 a la tercera i última etapa de càrrega, comparada amb la biga Model i la biga Control.

Es pot observar la disminució tant important de rigidesa que va experimentar la biga a les etapes inicials de càrrega, podent-s'hi intuir hipotèticament que va ser degut a una possible microfissuració a la part superior de les dovelas originada per la deformació a la que es va sotmetre el sistema en les dues primeres etapes de càrrega-descàrrega originada pel pretensat tan baix utilitzat als assajos.

B.1.5.3. Biga VD-CFK1

A la figura B.27 es mostra l'evolució de la fletxa central de la biga VD-CFK1 i les corbes comparatives amb la biga Model i la biga Control. Al igual que a la biga VD-TFC2 s'observa una rigidització del sistema en nivells intermitjos de càrrega que es veu disminuïda al presentar-s'hi la desadhesió del FRP, com es pot constatar a l'observar la figura B.21. Es pot observar a més que la rigidització que es mantenia constant fins el final de la desadhesió no es presenta en aquest sistema de reforç, degut a la rigidesa transversal del laminat, sent molt propici a la desadhesió degut a alteracions puntuals a la superfície del suport.

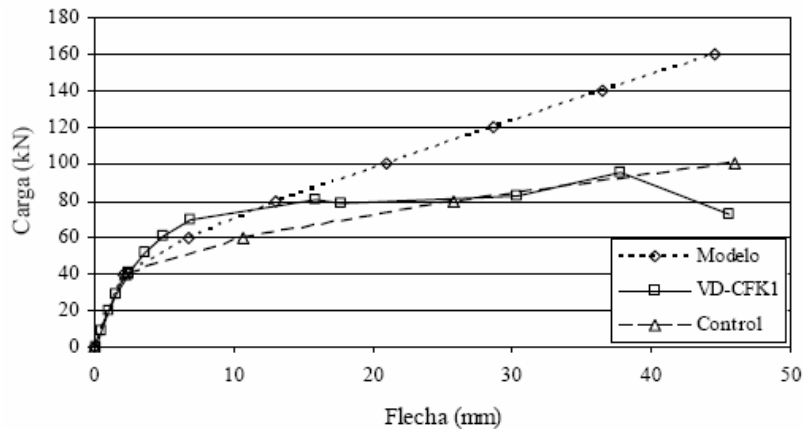


Figura B.27. Gràfica comparativa Càrrega-Fletxa, biga VD-CFK1 (Font: [1])

Del mateix mode que a la biga VD-TFC2, podem observar la pèrdua de rigidesa deguda a la desadhesió del FRP ocasionat pel fenomen de "peeling".

Es pot observar clarament el moment en que passa la desadhesió del CFK fins ambdós costats de la junta i com la deformació registrada a les galgues tendeix a igualar-s'hi degut al fenomen de despreniment gradual.

De la mateixa manera que als dos assajos anteriorment exposats, es mostra a la figura B.22 l'obertura de les juntes centrals de la biga, podent-s'hi observar una diferència marcada entre ambdues juntes, degut a l'aixafament del formigó a la part superior de la junta com es pot observar a la figura B.23.

Al igual que en la biga VD-TFC2, el mecanisme de ruptura es va iniciar amb una fisura diagonal localitzada a la zona pròxima a la junta entre dovelas, propagant-s'hi a través de la interfase formigó/CFK causant la desadhesió de la fibra pel procés denominat "peeling".

A la figura B.24 es pot observar el despreniment del formigó a la zona de juntes entre dovelas fins l'acer passiu, motiu pel qual es va originar una fisura longitudinal que es va propagar a través de la interfase formigó/CFK.

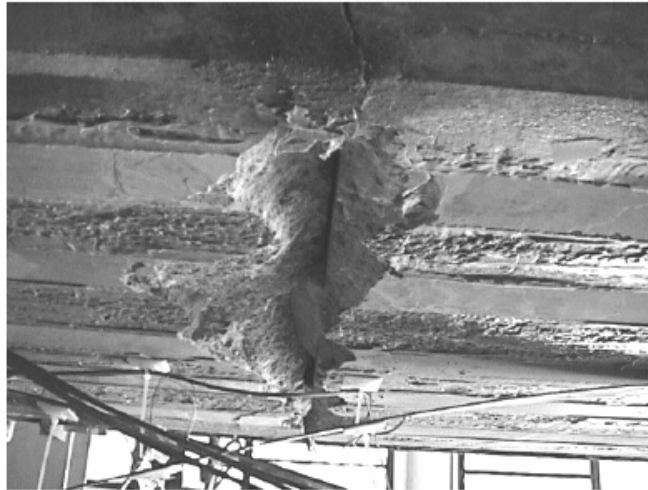


Figura B.28. Detall del despreniment del CFK a la biga VD-CFK1 (Font: [1])

## B.2. ASSAIG A COMPRESSIÓ [2]

### B.2.1. Introducció

Els efectes del confinament del formigó han estat extensivament investigats al passat, i a l'actualitat s'entén relativament bé el resultant increment en resistència i ductilitat.

A la pràctica, el confinament del formigó en un membre estructural és proporcionat comunament pel reforç transversal en forma de congreny o espirals.

A l'actualitat, existeixen nombroses estructures que estan amb la necessitat d'alguna rehabilitació degut al deteriorament que elles acusen durant el temps. Per altre costat, els pilars de ponts construïts al passat poden tenir la urgent necessitat de ser actualitzats degut a les exigències més rigoroses dels nous codis. En aquest sentit, la necessitat de reparar o reforçar s'ha incrementat significativament. En resposta a això, han sorgit noves tecnologies de reforç que inclouen la utilització de fibres d'acer, produint un efecte de confinament intern, tubs d'acer plens de formigó i el congreny de teixits compostos, normalment amb polímers reforçats amb fibres (FRP) o teixits de fibres sintètiques.

Bàsicament, el confinament restringeix la fisuració per compressió i tallant, augmentant així la ductilitat de l'element estructural durant la ruptura.

L'encamisat amb tub d'acer ha provat ser un medi efectiu per reforçar columnes de ponts per incrementar resistència i ductilitat, utilitzant-s'hi a més en aplicacions estructurals. No obstant això, no s'ha arribat a entendre completament el confinament del nucli de formigó. Tot i que és àmpliament utilitzat a la pràctica, s'estan buscant altres alternatives per millorar el procés de reforç d'alguns ponts deficientes estructuralment existents. Una de les claus és la facilitat de construcció.

Al respecte, a anys recents s'ha incrementat l'ús dels polímers reforçats amb fibra (FRP) com element de confinament, degut a les seves excel·lents propietats mecàniques i químiques d'aquests materials. Alguns investigadors han mostrat que el confinament amb FRP millora el comportament de columnes sotmeses a càrrega sísmica, i s'han aplicat eficientment a la rehabilitació sísmica de pilars de ponts a USA i Japó.

Els objectius principals d'aquest apartat són:

- Obtenir informació experimental sobre el comportament del formigó de baixa i alta resistència quan és sotmès a confinament passiu i actiu.

- Avaluar la millora en resistència i ductilitat dels formigons degut a l'efecte del confinament.
- Caracteritzar el comportament tensió-deformació del formigó sotmès a diferents nivells i tipus de confinament.

Per arribar als objectius proposats, es pretén estudiar els següents casos:

- Formigó sense confinar
- Formigó confinat amb tub d'acer
- Formigó confinat amb polímers reforçats de fibra (FRP) de carboni i vidre

S'ha estudiat el comportament de provetes cilíndriques de formigó de resistència normal i alta, sotmeses a dos tipus de confinament. Les resistències característiques de disseny dels formigons van ser de 25 i 60 MPa. Els materials utilitzats en la fabricació del formigó, tals com, ciment, àrids i additius són disponibles localment.

Pel confinament passiu, es van utilitzar dos tipus de materials: tubs d'acer, i polímers reforçats amb fibres (FRP) de carboni (C) i vidre (V). El nivell de confinament va ser imposat per l'espessor del tub i el número de capes dels polímers reforçats amb fibra (FRP). Es van utilitzar 3 espessors diferents de tub d'acer; i 1 a 6 capes de FRP pel formigó de baixa resistència i de 1 a 12 capes de FRP pel formigó d'alta resistència.

#### B.2.2. Equips d'assaig

L'adquisició de la resposta completa tensió-deformació de l'assaig a compressió axial, requereix una màquina d'assaig molt rígida i un sistema de control que permeti obtenir informació del postpic. Per aquesta raó, s'ha utilitzat una premsa servohidràulica amb capacitat de 4,5 MN, conformat per un marc molt rígid controlat per un sistema analògic de llaç tancat. Aquest sistema permet a la premsa controlar la càrrega, el desplaçament i la velocitat de desplaçament.

El registre de la càrrega, deformacions i pressió de confinament va ser realitzat en forma automàtica i contínua durant tot l'assaig mitjançant un sistema d'adquisició de dades.

Amb el fi d'obtenir el registre de deformacions longitudinals i transversals durant els assajos, les provetes es van instrumentar amb galgues extensiomètriques i transductors de desplaçament, tipus LVDT. Les galgues extensiomètriques es van col·locar sobre la superfície de la proveta de formigó, mentre que els transductors de desplaçament es col·loquen entre els plats de càrrega de la màquina d'assaig.

S'adjunten figures il·lustratives per veure la instrumentació utilitzada als assajos.

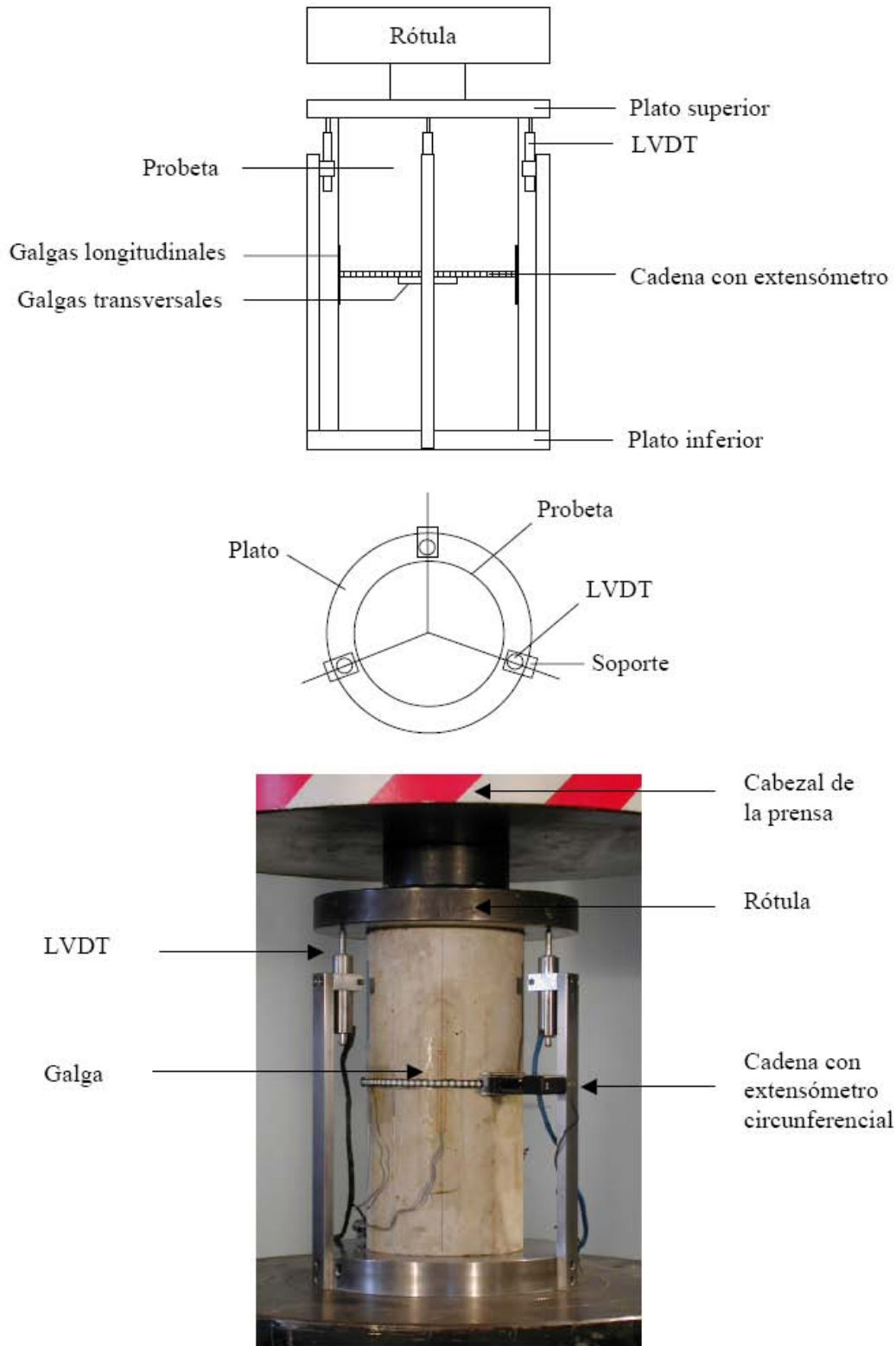


Figura B.29. Instrumentació de provetes per assaig de formigó sense confinar (Font: [2])

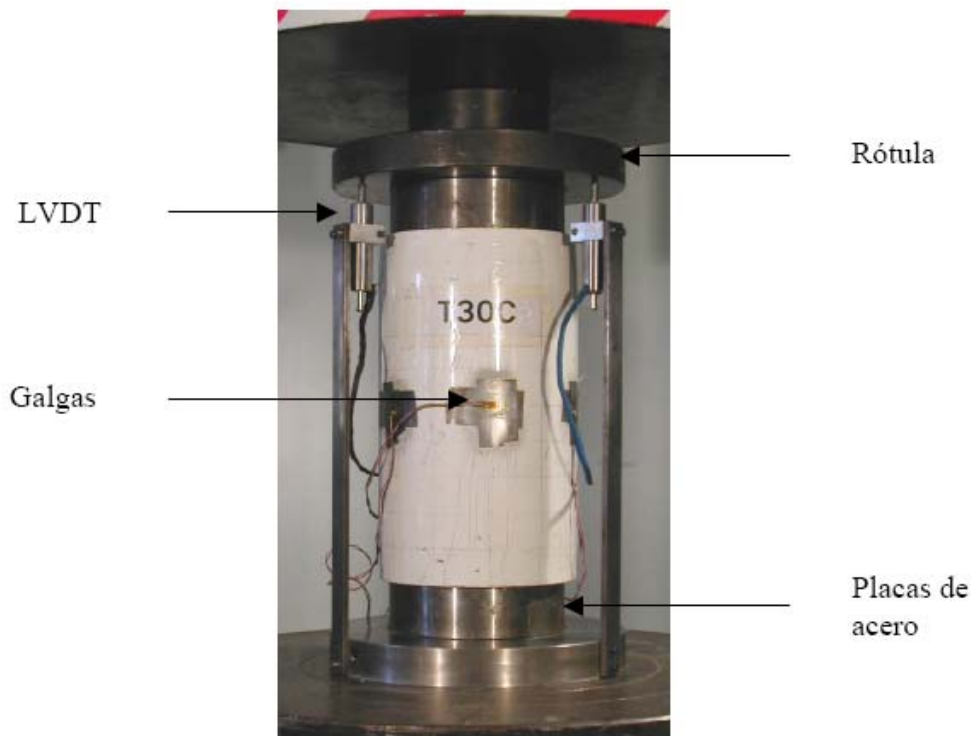


Figura B.30. Instrumentació de provetes per assaig de formigó confinat amb tub d'acer (Font: [2])

### B.2.3. Assajos

La taula següent mostra el programa d'assajos que es va realitzar.

Hormigón	Tipo de confinamiento y variables			
	En célula triaxial	Tubo de acero	Polímero reforzado con fibra (FRP)	
	Presión (MPa)	Espesor (mm)	Carbono (C) Número de capas	Vidrio (V) Número de capas
H30	0 a 35	0, 1.8, 4.5, 7.6		
HF30			0, 1, 3, 6	0, 1, 3, 6
H70, HE70	0 a 50	0, 1.8, 4.5, 7.6		
HF70			0, 1, 3, 6, 9, 12	0, 1, 3, 6, 9, 12

Taula B.1. Programa experimental d'assajos (Font: [2])

#### B.2.3.1. ASSAIG DE FORMIGÓ SENSE CONFINAR



Els cilindres van ser assajats per control de desplaçament circumferencial, pel que es va col·locar una cadena amb extensòmetre circumferencial al centre de la proveta. El procediment d'aplicació de càrrega i obtenció de les corbes tensió-deformació són les que es presenten a continuació.

i) Comportament en compressió uniaxial

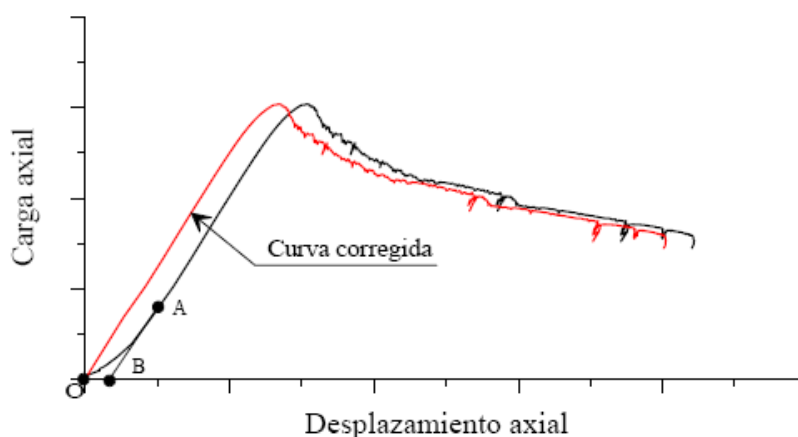


Figura B.31. Corba càrrega-desplaçament axial, sense i amb la correcció del desplaçament inicial (Font; [2])

Sota compressió uniaxial, el mode de ruptura dels formigons de baixa resistència (H30) i alta resistència (H70 i HE70) assajats, presenta una fisuració típica, caracteritzada per la formació d'esquerdes paral·leles a la direcció de la càrrega.

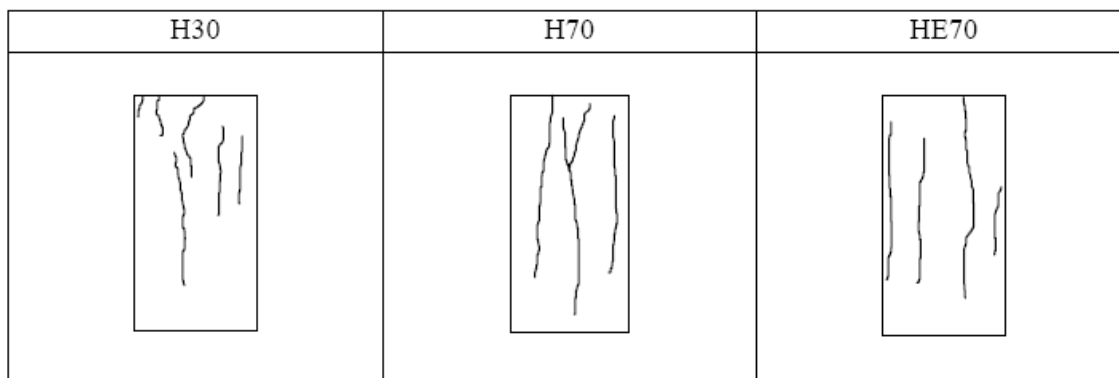


Figura B.32. Esquema del mode de ruptura de les provetes assajades (Font; [2])

Com s'aprecia a la figura, existeix una marcada diferència en el comportament tensió-deformació axial entre ambdós formigons, caracteritzada per una major pendent al tram inicial de la corba i un ràpid descens de la càrrega després d'arribar al valor màxim en el cas del formigó d'alta resistència, en comparació amb el formigó de baixa resistència.

Si considerem que la ductilitat està associada a la capacitat de suportar deformacions sense pèrdua substancial en la seva capacitat de càrrega, es pot dir que el formigó d'alta resistència té menor ductilitat, en conseqüència, major fragilitat, com es va observar als assajos realitzats. En general, el comportament tensió-deformació dels formigons d'alta resistència (H70 i HE70) va ser similar, no obstant això, es va observar una disminució significativa del valor màxim de la tensió en el cas del formigó HE70, que va incloure en la seva composició un additiu reductor de retracció.

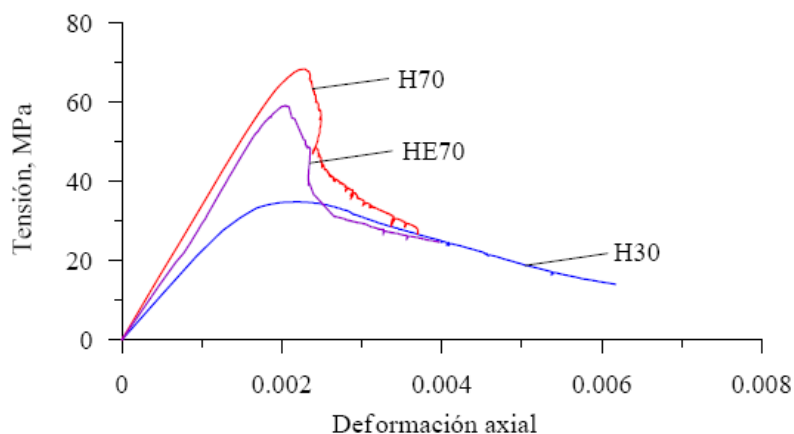


Figura B.33. Comportament tensió-deformació uniaxial dels formigons estudiats (Font: [2])

Propiedad	Tipo de hormigón		
	H30	H70	HE70
$f'_c$ , MPa	34.7	68.2	59.2
$E_c$ , GPa	22.9	33.7	30.4
$\epsilon_c$ , $\mu\epsilon$	2190	2250	2030
$\mu$	0.22	0.26	0.19*

\* Un solo valor

Taula B.2. Propietats mecàniques dels formigons sense confinar estudiats (Font: [2])

$f'_c$ ; Resistència a compressió,  $E_c$ ; Mòdul d'elasticitat en compressió,  $\Sigma_c$ ; Deformació corresponent a la tensió màxima, i  $\mu$ ; Coeficient de Poisson.

Els resultats presentats corresponen al promig de dos assajos.

#### B.2.3.2. ASSAIG DE FORMIGÓ CONFINAT AMB TUB D'ACER

Es van realitzar dos tipus d'assajos; un primer aplicant càrrega únicament a la secció de formigó, i un segon aplicant càrrega sobre la secció composta, tub d'acer i secció de formigó. La realització de l'assaig consisteix en lo següent: posada en marxa la premsa, s'aplica una petita càrrega axial ( de l'ordre de 15 a 20 kN) sobre la proveta. Això assegura el contacte amb les plaques d'acer i sensibilitza els instruments de medicció. Ràpidament s'aplica la càrrega a la velocitat prèviament establerta. L'assaig finalitza quan els LVDT's arriben a la seva capacitat màxima de desplaçament.

El programa d'adquisició de dades, registra durant tot l'assaig els valors de càrrega i els desplaçaments mesurats a través de les galgues extensiomètriques i els LVDTs.










#### i) Comportament en compressió uniaxial

El model de fallida dels formigons de baixa resistència (H30) i alta resistència (H70 i HE70) confinat amb tub d'acer amb aplicació de càrrega únicament a la secció de formigó, està caracteritzada pel pandeig local que es presenta a un extrem o al centre de la proveta, com es mostra a la Figura B.34. En aquesta figura s'aprecia que independentment del tipus de formigó, el pandeig es presenta a l'extrem superior de la proveta per l'espessor de tub de 1,8mm. No

obstant això, quan s'incrementa l'espessor del tub d'acer, el pandeig es localitza al centre de l'altura de la proveta.

Per altre costat, també es va observar que la placa d'acer que es va utilitzar per garantir que l'aplicació de càrrega sigui única sobre la secció de formigó, va penetrar dins de la secció confinada, com es mostra a l'esquema de la secció transversal de la proveta assajada (Figura B.34). A tots els cassos la profunditat de penetració de la placa d'acer va ser major a l'extrem superior.

Les figures B.38 i B.39 mostren el comportament tensió-deformació axial dels formigons de baixa resistència (H30) i alta resistència (H70 i HE70) confinats amb tubs d'acer, assajats a compressió axial amb aplicació de càrrega únicament a la secció de formigó. Les corbes corresponen al promig de dos assajos en el cas del formigó de baixa resistència (H30), i al cas dels formigons d'alta resistència ( H70 i HE70) es presenten les corbes de les provetes assajades.

Hormigón	1.8 mm	4.5 mm	7.6 mm	Observaciones
H30				Pandeo local. En la parte superior para el tubo de menor espesor. En el centro para el tubo de mayor espesor.
H70				Pandeo local. Idéntico al caso anterior.
HE70				Pandeo local. Idéntico al caso anterior.

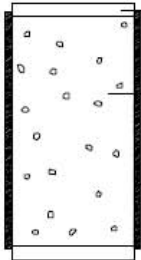
Aspecto de la probeta después del ensayo	Observaciones
<p>Sección transversal</p>  <p>Placa de acero de carga</p> <p>Sección de hormigón</p> <p>Tubo de acero</p>	Las placas superior e inferior de carga penetraron dentro de la sección del tubo de acero.

Figura B.34. Models de fallida dels formigons confinats amb diferents espessors de tub d'acer, amb aplicació de càrrega únicament a la secció de formigó. (Font: [2])










Hormigón	1.8 mm	4.5 mm	7.6 mm	Observaciones
H30				Pandeo local. En todos los casos en la parte superior de las probetas.
H70				Pandeo local. Idéntico al caso anterior.
HE70				Pandeo local. En la parte inferior para el tubo de menor espesor. En la parte superior para los otros espesores.

Figura B.35. Models de fallida dels formigons confinats amb diferents espessors de tub d'acer, amb aplicació de càrrega en tota la secció (Font; [2])

De les figures B.36 a B.37 es pot deduir que existeix un comportament tensió-deformació axial similar entre els formigons estudiats. Les corbes presenten un tram inicial lineal, seguit per un tram corba fins arribar a la càrrega màxima, i finalment un tram descendent, on aquesta pendent és funció de l'espessor del tub d'acer.

Contràriament, la pendent del tram descendent ( règim post-pic) disminueix quan s'incrementa aquest espessor.

Així mateix, és evident que el confinament incrementa significativament la resistència i la capacitat de deformació del formigó, per tant, la seva ductilitat . També és notable el increment de la deformació corresponent a la tensió màxima, de l'ordre de 0.002 pel formigó sense confinar a valors tan alts amb 0,04 pel formigó confinat amb tub d'acer d'espessor gruixut (7,6mm).

De la figura B.38 es pot deduir que amb un espessor de tub d'acer de 1,8mm és suficient perquè el formigó de baixa resistència (H30) arribi al règim plàstic.

No obstant això, pels formigons d'alta resistència (H70 i HE70) és necessari un espessor de tub d'acer de 7.6mm per arribar ha aquest estat, com s'observa a la figura B.37. Això vol dir que la influència del confinament és diferent per ambdós formigons, major el formigó de baixa resistència (H30).

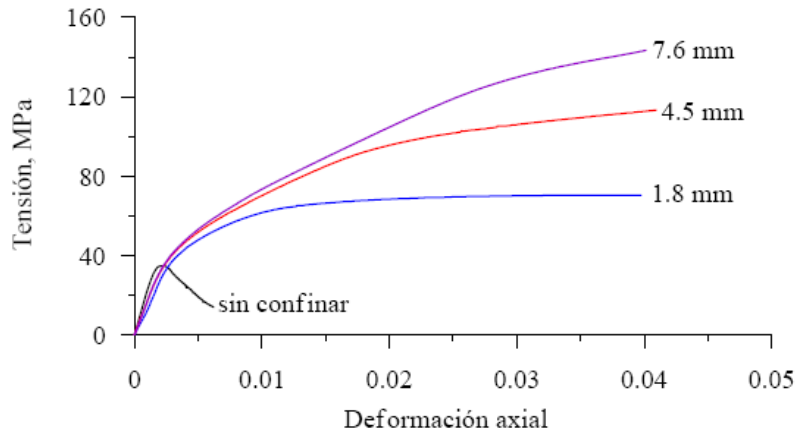


Figura B.36. Corbes tensió-deformació axial del H30 confinat amb tub d'acer (Font; [2])

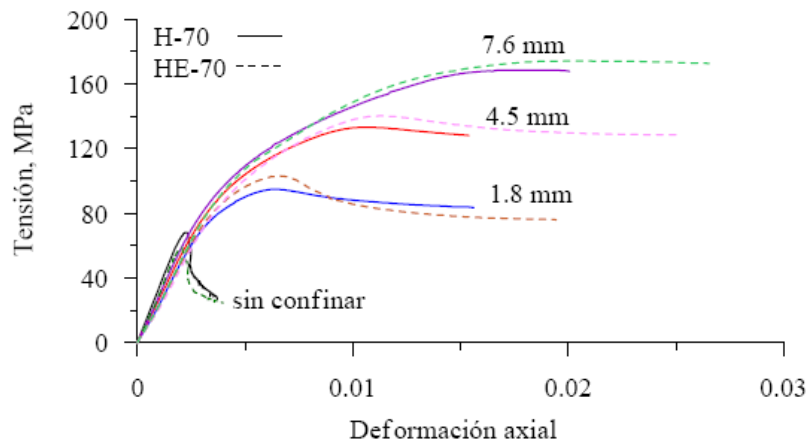


Figura B.37. Comparatiu de corbes tensió-deformació axial dels formigons H70 i HE70 confinades amb tub d'acer (Font; [2])

Observant els cicles de descàrrega i càrrega a que van ser sotmeses durant els assajos les provetes d'alta resistència ( H70 i HE70), es pot dir que hi ha una recuperació de la càrrega al valor inicial del cicle de descàrrega. Això suggereix que el formigó està en un estat de deformació irreversible o plàstica dins del tub.

Les figures B.38 i B.39 que corresponen a les corbes dels assajos amb aplicació de càrrega a tota la secció, mostren un comportament similar a l'observat als assajos amb aplicació de càrrega únicament a la secció de formigó, és a dir, presenten un tram inicial lineal, seguit per un tram corba fins arribar a la càrrega màxima, i finalment un braç descendent amb pendent que depèn de l'espessor del tub d'acer. Les pendents dels trams inicials s'incrementa amb el increment de l'espessor del tub d'acer, mentre que en els trams descendents disminueix. Així mateix, les pendents dels cicles de descàrrega i càrrega són similars.

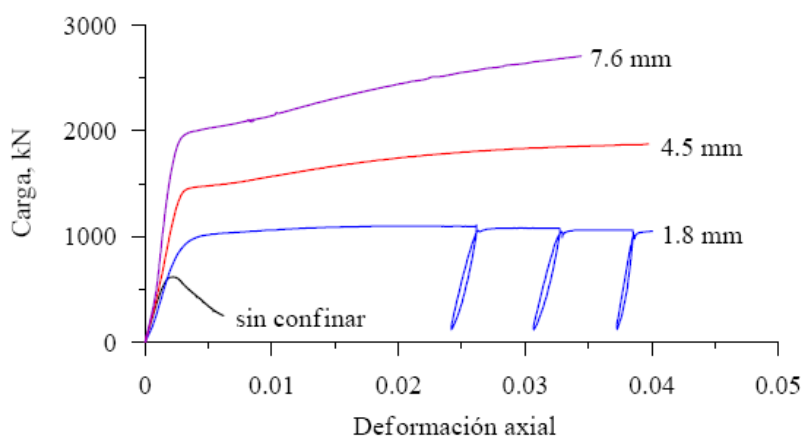


Figura B.38. Corba càrrega-deformació axial del H30 confinat amb tub d'acer (Font: [2])

Per altre costat, els valors de càrrega màxima arribada pels formigons d'alta resistència ( H70 i HE70) quan l'assaig és realitzat amb aplicació de càrrega a tota la secció, són bastant comparables, com es mostra a la figura B.39. També les pendents del braç descendent ( règim post-pic) són similars.

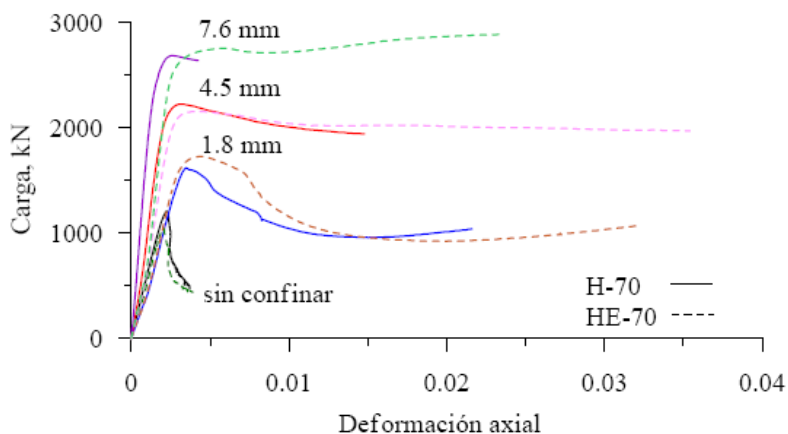


Figura B.39. Corbes càrrega-deformació axial dels formigons H70 i HE70 confinades amb tub d'acer (Font: [2])

### B.2.3.3. ASSAIG DE FORMIGÓ CONFINAT AMB FRP

#### i) Introducció

En aquest capítol s'estudia el comportament del formigó confinat amb polímers reforçats amb fibra (FRP). Per això es van assajar provetes cilíndriques de formigó confinades amb FRP, sent les variables experimentals la resistència del formigó sense confinar, el tipus de FRP i el nivell de confinament proporcionat pel número de capes d'FRP. Es van utilitzar dos tipus d'FRP: de carboni i de vidre. Les capes de confinament van variar entre 1 i 12. Les resistències característiques dels formigons van ser 25 i 60 MPa.

Els objectius principals d'aquest capítol són: caracteritzar el comportament del formigó sotmès a confinament passiu mitjançant assajos de compressió axial de provetes cilíndriques de formigó confinades amb FRP. A més, avaluar la influència de la resistència de formigó sense confinar i el número de capes de confinament.

Els mètodes de reforç tradicional, tals com, postensat extern i reforç amb plaques d'acer, han estat un concepte de reparació als últims 20 anys, tot i això, freqüentment tenen desavantatges inherents. La corrosió de l'acer i el seu elevat cost de manipulació i col·locació constitueixen les principals desavantatges.

Els avanços en la tecnologia dels compostos avançats han conduït al desenvolupament dels compostos de polímers reforçats amb fibra (FRP) que superen les propietats de resistència i fatiga de l'acer.

A l'actualitat, varis tipus de materials FRP són considerats per reparar o reajustar estructures de formigó, entre els quals figuren els polímers reforçats amb fibra de vidre (GFRP), polímers reforçats amb fibra de carboni (CFRP) i polímers reforçats amb fibra d'aramida (AFRP).

## ii) Caracterització del FRP

Es van separar dos tipus de mostres: una en el sentit de la direcció de confinament i l'altre en sentit transversal. S'ha de mencionar que els FRP de carboni tenen fibres unidireccionals, mentre que els FRP de vidre tenen un reforç bidireccional. Els assajos es mostren a la taula B.43 i corresponen al promig de 4 mostres en el cas de l'assaig en direcció transversal al confinament.



Figura B.40. Assaig de tracció dels FRP (Font: [2])

Com s'observa a la taula, la càrrega i rigidesa estan en unitats de força per dimensió unitària perpendicular a la direcció principal de les fibres per capa (es a dir, N/mm/capa). Aquestes unitats permeten quantificar el confinament sense tenir que considerar l'espessor final del compost. Per altre costat existeixen diferències entre els valors reportats pel fabricant i els determinats experimentalment.



Parámetro	Tipo de FRP	
	Carbono	Vidrio
Datos proporcionados por el fabricante (dirección del confinamiento)		
Carga unitaria máxima, $f_{fr}$	456 N/mm/capa	447 N/mm/capa
Rigidez del compuesto, $E_{fs}$	28 kN/mm/capa	9.7 kN/mm/capa
Datos determinados experimentalmente		
Ensayo: Dirección del confinamiento		
Carga unitaria máxima, $f_{fr}$	330.5 N/mm/capa ( $\pm 3.5\%$ )	238.8 N/mm/capa ( $\pm 3.8\%$ )
Rigidez del compuesto, $E_{fs}$	23.9 kN/mm/capa ( $\pm 1.8\%$ )	12.3 kN/mm/capa ( $\pm 3\%$ )
Ensayo: Dirección transversal al confinamiento		
Carga unitaria máxima, $f_{fr}$	7.97 N/mm/capa ( $\pm 7.43\%$ )	27.15 N/mm/capa ( $\pm 5.2\%$ )
Rigidez del compuesto, $E_{fs}$	3.4 kN/mm/capa ( $\pm 10\%$ )	2.2 kN/mm/capa ( $\pm 10.3\%$ )

Taula B.3. Propietats dels FRP obtinguts experimentalment i dades del fabricant (Font: [2])

iii) Descripció dels assajos sobre el formigó

Es van assajar provetes cilíndriques de formigó de 150-300mm confinades amb diferent numero de capes d'FRP de carboni i vidre. Les resistències característiques dels formigons sense confinar van ser 25 i 60 MPa. La taula B.4 presenta en detall, el programa d'assajos. Totes les configuracions d'assaig van ser a compressió axial i el control va ser per desplaçament del pistó a una velocitat de 0,005 mm/seg. En el cas del formigó confinat la càrrega va ser aplicada únicament sobre la superfície de formigó.

Serie	Tipo de fibra	Número de capas	Espesor de confinamiento nominal mm
HF30	Carbono	Ninguno	0
		1	0.117
		3	0.351
	Vidrio	6	0.702
		1	0.149
		3	0.447
HF70	Carbono	6	0.894
		Ninguno	0
		1	0.117
		3	0.351
		6	0.702
		9	1.053
	Vidrio	12	1.404
		1	0.149
		3	0.447
		6	0.894
		9	1.341
		12	1.788

Taula B.4. Assaigs de confinament amb FRP: programa d'assajos (Font: [2])

iv) Descripció de l'assaig

Les provetes d'assaig van ser confinades mitjançant congreny. Es van utilitzar dos tipus de compostos, els quals són adherits al formigó mitjançant un sistema epoxy. El sistema consisteix en dos parts: resina i enduridor. El sistema epoxy van ser barrejat durant 3 minuts mitjançant un taladre acondicionat amb un agitador. Les provetes de formigó van ser netejades i impregnades amb una imprimació prèvia a la col·locació de l'epoxi, amb el fi de tancar els poros i permetre una bona adherència de la fibra. Es va aplicar una capa molt fina a la fibra prèviament col·locat sobre una superfície llisa i plana, i després es va aplicar directament sobre la superfície de la proveta de formigó. S'ha de tenir especial cura en assegurar que no existeixen buits entre la fibra i la proveta de formigó, pel qual l'aplicació del FRP impregnat de resina es fa amb ajuda d'un corró de ranures. Després de l'aplicació de la primera capa d'FRP s'aplica una segona capa d'epoxi per permetre l'aplicació de la segona i successives capes d'FRP. Finalment, s'aplica una última capa d'epoxi sobre la superfície de la proveta de formigó congrenyada. En tots els casos els solapats van ser de 150mm i, les capes d'FRP van estar col·locades diametralment oposades amb respecte a l'anterior.

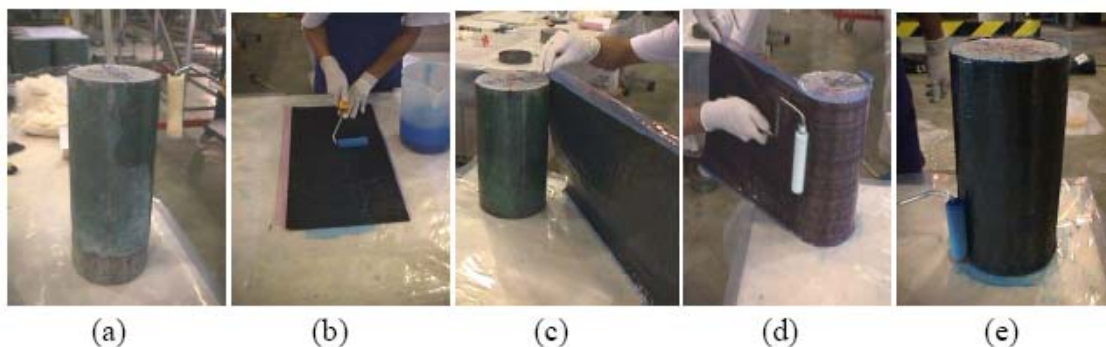


Figura B.41. Procediment típic de congreny: (a) Imprimació, (b) Aplicació de sistema epoxy sobre la capa d'FRP, (c) Colocació de la primera capa de congreny, (d) Congreny amb ajuda del corró de ranura, (e) Aplicació d'última capa del sistema epoxy. (Font: [2])

La realització de l'assaig consisteix en : posada en marxa la premsa, aplicació d'una petita càrrega axial ( de l'ordre de 15 a 20 kN) sobre la proveta. Això assegura el contacte amb les plaques d'acer i sensibilitza els instruments de medicació. Des seguida s'aplica la càrrega a la velocitat prèviament establerta. L'assaig finalitza quan es presenta la ruptura o quan els LVDT's arriben a la seva capacitat màxima de desplaçament.

El programa d'adquisició de dades registra durant tot l'assaig, els valors de càrrega i els desplaçaments mesurats a través de les galgues extensiomètriques i els LVDTs.

#### v) Comportament en compressió uniaxial

El mode de fallida està governat per la ruptura del FRP. La taula B.5 presenta la seva caracterització, així com localització, mentre que les figures B.42 i B.43 mostren els esquemes dels models de ruptura de les provetes assajades.

En general, la línia de ruptura va ser perpendicular a la fibra. Es va observar als assajos que la ruptura dels FRP de vidre és menys repentina i explosiva que la del FRP de carboni. En ambdós casos, la ruptura va ser predecible degut als sons originats per l'estallament inicial de les fibres indicant el inici de l'esquerdament del FRP. Altre característica del mode de ruptura de les provetes és que va haver una capa fina de formigó o morter adherida al FRP que indica que l'adherència entre el formigó i el FRP va ser satisfactòria. Per altre costat, en tots els casos la ruptura del FRP es va presentar lluny de la zona de solapat entre capes de FRP. En el cas del formigó d'alta resistència HF70, l'àrea de ruptura és major que en el cas del formigó de baixa resistència HF30, com s'observa a la figura B.42. Encara quan va haver desintegració del formigó a la zona de ruptura, les provetes van permanèixer relativament integrades al final dels assajos.

No obstant això, pels formigons confinats amb FRP de carboni, el mode de ruptura va ser de cop i explosiu, com es mostra a la figura B.42. En aquest cas, a més de la ruptura del FRP, el formigó es va trencar en trossos de forma cònica. En el cas del formigó d'alta resistència HF70, el mode de ruptura va ser encara més catastròfic, acompanyat per una gran explosió, i a la majoria dels casos, les provetes van quedar completament destrossades.

<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de vidrio</i>	
1 capa	Rotura en el tercio superior (hormigón desintegrado). Delaminación del FRP.
3 capas	Rotura en el centro (hormigón desintegrado). Delaminación del FRP.
6 capas	Rotura al centro y 1/3 superior (hormigón desintegrado). FRP delaminado.
<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de carbono</i>	
1 capa	Rotura explosiva. Ruptura del FRP en 2/3 partes de la altura de la probeta.
3 capas	Rotura explosiva. Ruptura del FRP en toda la altura de la probeta.
6 capas	Rotura explosiva y total. Rotura de la probeta en forma de cono.
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio</i>	
1 capa	Rotura diagonal del FRP.
3 capas	Rotura inferior y en 2/3 partes de la altura de la probeta. FRP delaminado.
6 capas	Rotura superior (hormigón desintegrado). Delaminación del FRP.
9 capas	Rotura al centro y 1/3 superior (hormigón desintegrado). FRP delaminado.
12 capas	Rotura al centro y 2/3 de la altura (hormigón desintegrado). FRP delaminado
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de carbono</i>	
1 capa	Rotura explosiva. Ruptura del FRP en toda la altura de la probeta.
3 capas	Rotura explosiva y total. Rotura de la probeta en forma de cono.
6, 9 y 12 capas	Rotura explosiva y total. Rotura de la probeta en forma de cono.

Taula B.5. Caracterització i ubicació de la ruptura de la probeta i del FRP (Font: [2])


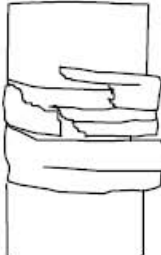
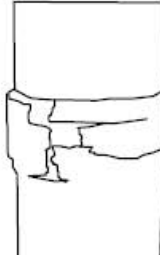


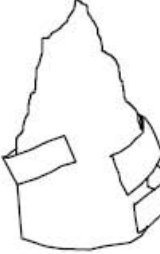




<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de vidrio</i>			
1 capa	3 capas	6 capas	Observaciones
			Rotura repentina y explosiva (leve). Rotura perpendicular a la fibra. Presencia de macrogrietas. La probeta permanece relativamente íntegra después del ensayo.
HFV30-1-1	HFV30-3-2	HFV30-6-1	
<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de carbono</i>			
1 capa	3 capas	6 capas	Observaciones
			Rotura repentina y explosiva (severa). Rotura del FRP a todo lo largo de la probeta.
HFC30-1-1	HFC30-3-1	HFC30-6-1	
<i>Comparación del modo de rotura de las probetas confinadas con FRP</i>			
FRP Vidrio		FRP carbono	
1 capa	6 capas	1 capa	6 capas
		Explosiva	Muy explosiva
			
HFV30-1-2	HFV30-6-1	HFC30-1-1	HFC30-6-1

Figura B.42a). Esquemes del mode de ruptura dels formigons confinats amb FRP (Font; [2])


<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio</i>				
1 capa	3 capas	6 capas	9 capas	12 capas
				
HFV70-1-2	HFV70-3-2	HFV70-6-2	HFV70-9-2	HFV70-12-3
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de carbono</i>				
1 capa	3 capas	6 capas	9 capas	12 capas
				
HFC70-1-2	HFC70-3-3	HFC70-6-2	HFC70-9-1	HFC70-12-2
<i>Comparación del modo de rotura de las probetas confinadas con FRP</i>				
FRP Vidrio		FRP carbono		
1 capa	12 capas	1 capa	12 capas	
				
HFV70-1-2	HFV70-12-3	HFC70-1-2	Muy explosiva HFC70-12-2	

Figura B.42b). Esquemes del mode de ruptura dels formigons confinats amb FRP (Font; [2])

Es notori el col·lapse total de l'extrem superior de les provetes quan el formigó és confinat amb FRP de carboni. Això és degut al caràcter explosiu de la ruptura.

En el cas del formigó H30 confinat amb 3 i 6 capes de FRP de vidre, la cara superior no va presentar fisuració degut a que la ruptura es va produir al centre de la proveta.

En els altres cassos, s'observa una desintegració parcial o total de l'extrem superior de la proveta, depenent de la localització de la ruptura.

<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de vidrio</i>				
1 capa	3 capas	6 capas		
				
HFV30-1-1	HFV30-3-2	HFV30-6-1		
<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de carbono</i>				
1 capa	3 capas	6 capas		
		Rotura total		
HFC30-1-1	HFC30-3-1			
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio</i>				
1 capa	3 capas	6 capas	9 capas	12 capas
				
HFV70-1-2	HFV70-3-2	HFV70-6-2	HFV70-9-1	HFV70-12-3
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de carbono</i>				
1 capa	3 capas	6 capas	9 capas	12 capas
	Rotura total	Rotura total	Rotura total	Rotura total
HFC70-1-2				

Figura B.43. Esquemes del mode de ruptura del extrem superior de les provetes (Font: [2])

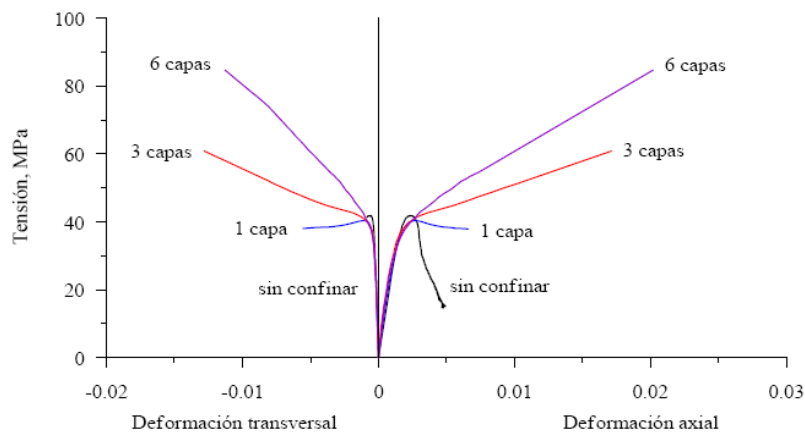


Figura B.44. Corbes tensió-deformació del HF30 confinades amb FRP de vidre (Font; [2])

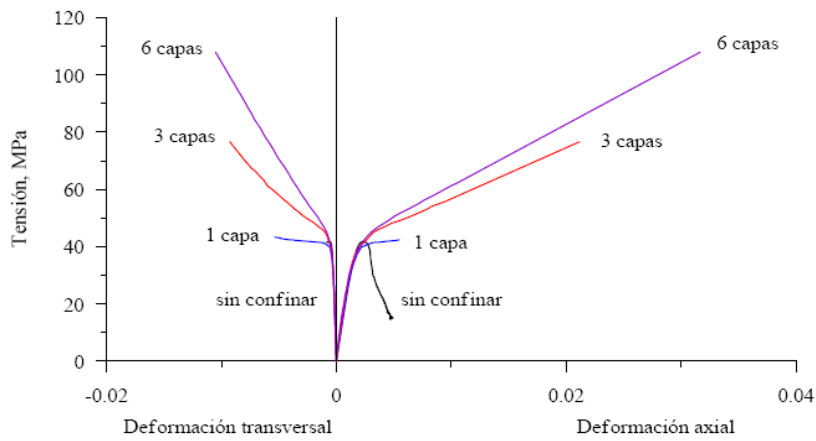


Figura B.45. Corbes tensió-deformació del HF30 confinades amb FRP de carboni (Font; [2])

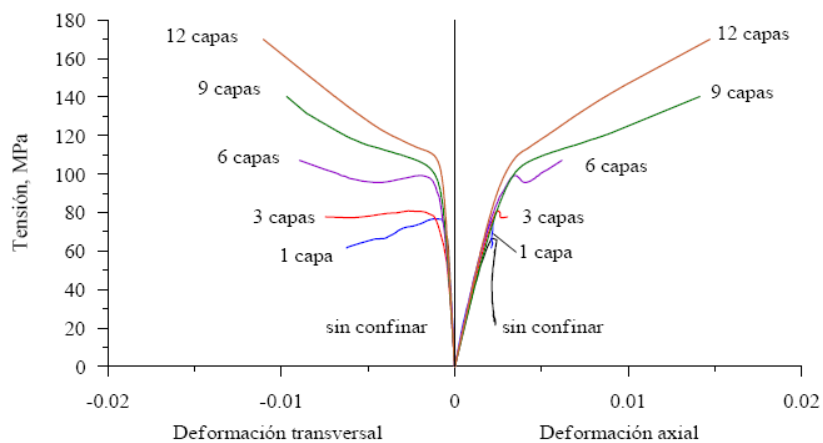


Figura B.46. Corbes tensió-deformació del HF70 confinades amb FRP de vidre (Font; [2])

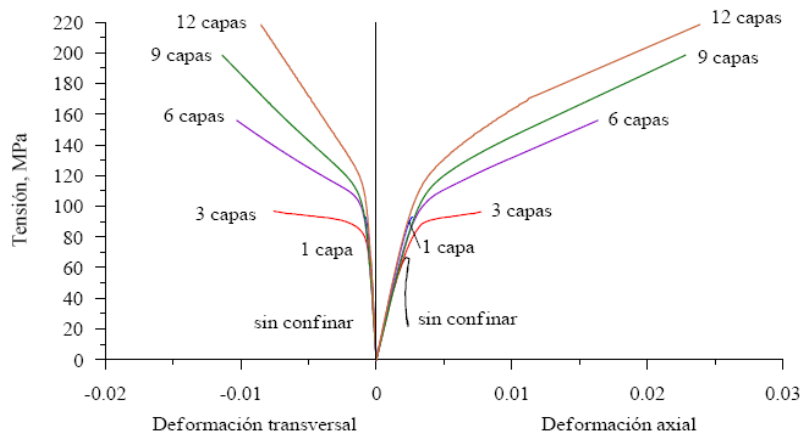


Figura B.47. Corbes tensió-deformació del HF70 confinades amb FRP de carboni (Font: [2])

De les figures B.44 a B.47, es pot dir que el comportament tensió-deformació del formigó confinat amb FRP pot dividir-se en tres regions.

A la primera regió el comportament és molt similar al formigó sense confinar, no obstant això, la corba ascendeix més enllà de la tensió màxima del formigó sense confinar, sobretot en el formigó d'alta resistència. En aquesta regió, les tensions i deformacions produïdes sobre el formigó degut al confinament, són molt petites.

Quan s'incrementa el microesquerdament, es presenta una zona de transició on el FRP que exerceix pressió lateral sobre el formigó que neutralitza la degradació de la secció de formigó.

Finalment, a la tercera regió, el formigó comença a esquerdar-s'hi i s'activa totalment el FRP, incrementant la capacitat de resistència, capacitat d'absorció d'energia i ductilitat de les provetes. La resposta en aquesta regió és principalment depenent de la rigidesa del FRP. En tots els casos de multicapes de FRP, la pendent del règim post-esquerdament (tercera regió de la corba), s'incrementa amb el nombre de capes.

#### B.2.3.4. CONCLUSIONS

##### a) Confinament amb tub d'acer

Serie	$e$ mm	$f'_{cmax}$ MPa	$\epsilon_{max}$ $\mu\epsilon$	$E_i$ GPa	$f'_{cmax}/f_c$	$\epsilon_{max}/\epsilon_c$
	0	$f'_c = 35$	$\epsilon_c = 2190$	$E_c = 22.8$	1.0	1.0
H30	1.8	70	37890	14.1	2.0	17.3
	4.5	114	41610	17.0	3.3	19.0
	7.6	146	41950	17.1	4.2	19.2
	0	$f'_c = 68$	$\epsilon_c = 2250$	$E_c = 33.7$	1.0	1.0
H70	1.8	95	6370	24.3	1.4	2.8
	4.5	133	10610	26.8	1.9	4.7
	7.6*	168	17800	28.1	2.5	7.9
	0	$f'_c = 59$	$\epsilon_c = 2030$	$E_c = 29.9$	1.0	1.0
HE70	1.8	104	6590	23.6	1.7	3.2
	4.5	140	11370	23.4	2.4	5.6
	7.6	176	17680	25.2	3.0	8.7

\* Un solo valor

Taula B.6. Resultats dels assajos de formigó confinat amb tub d'acer (Font: [2])



e; Espessor del tub d'acer,  $f'_{cmax}$ ; Tensió màxima del formigó sense confinar,  $\epsilon_{max}$ ; Deformació màxima,  $f'_{cmax}$ ; Tensió màxima del formigó confinat,  $E_i$ ; Mòdul inicial. Les dades corresponen al promig de dos assajos.

Els resultats de la taula mostren un significant increment en resistència i capacitat de deformació degut a l'efecte de confinament. S'observa que aquest increment és major quan el formigó és confinat amb espessors de tub d'acer majors. No obstant això, s'observa que el guany és major en el formigó de baixa resistència.

Amb relació al mòdul elàstic, es pot dir que hi ha un lleuger increment quan s'utilitzen majors espessors de tub d'acer. Això pot atribuir-s'hi al increment de la rigidesa degut al confinament. No obstant això, aquests valors són inferiors al corresponent mòdul elàstic del formigó sense confinar degut a que s'han determinat els mòduls de les provetes confinades utilitzant els desplaçaments totals en lloc del desplaçament del terç central.

La deformació corresponent a la tensió màxima s'incrementa en funció de l'espessor del tub d'acer de confinament. A més, les pendents dels trams descendents (règim post-pic) de les corbes tensió-deformació axial són menors amb el increment de l'espessor del tub d'acer.

El confinament és dependent de la condició de càrrega. Es van arribar a majors valors de càrrega quan les provetes van ser carregades únicament sobre la superfície de formigó i utilitzant el tub d'acer com una restricció circumferencial.

L'aspecte de les provetes després dels assajos presenta, a la majoria, un tipus de fallida caracteritzada pel pandeig local. En el cas dels assajos amb càrrega aplicada únicament a la secció de formigó, a les provetes confinades amb tubs d'acer de menor espessor, el pandeig es localitza en un dels extrems de la proveta. A mesura que s'incrementa l'espessor del tub d'acer, el pandeig es presenta pel centre de l'altura de la proveta. En el cas dels assajos amb aplicació de càrrega sobre tota la secció, el pandeig es localitza en un extrem de la proveta, sent més notori a les provetes de menor espessor.

#### i) Confinament amb FRP

Hormigón	Nº Capas	$f'_{cmax}$ MPa	$\epsilon_{max}$ µε	$E_i$ GPa	$f'_{cmax}/f_c$	$\epsilon_{max}/\epsilon_c$	$\epsilon_{tmax}$ µε	$\epsilon_{tmax}/\epsilon_t$
	0	$f'_c = 42$	$\epsilon_c = 2390$	$E_c = 25.0$	1.0	1.0	$\epsilon_t = 635$	1.0
	FRPV							
	1	41	2530	27.6	1.0	1.1	880	1.4
	3	61	17120	34.0	1.5	7.2	12810	20.2
HF30	6	85	20190	32.3	2.0	8.4	11290	17.8
	FRPC							
	1	46	9200	26.8	1.1	3.8	8840	13.9
	3	77	21160	28.2	1.8	8.8	9270	14.6
	6	108	31620	29.0	2.6	13.2	10500	16.5
	0	$f'_c = 69$	2400	$E_c = 35$	1.0	1.0	$\epsilon_t = 435$	1.0
	FRPV							
	1	79*	2350	39.2	1.1	1.0	1090	2.5
	3	83*	2650	37.5	1.2	1.1	2030	4.7
	6	107*	6180	40.1	1.5	2.6	8940	20.5
	9	140*	14120	38.2	2.0	5.9	9690	22.3
HF70	12	170	14710	40.2	2.5	6.1	11030	25.3
	FRPC							
	1	94*	2690	40.7	1.3	1.1	870	2.0
	3	98*	7760	35.4	1.4	3.2	8210	18.9
	6	156	16340	37.3	2.3	6.8	10300	23.7
	9	199*	22810	35.8	2.9	9.5	11370	26.1
	12	217	23870	41.7	3.1	9.9	8500	19.5

\* Promedio de 2 valores

Taula B. 7. Resultats dels assajos de formigó confinat amb FRP (Font: [2])

e; Espessor del tub d'acer,  $f'_{cmax}$ ; Tensió màxima del formigó sense confinar,  $\varepsilon_{max}$ ; Deformació màxima,  $f'_{cmax}$ ; Tensió màxima del formigó confinat,  $E_i$ ; Mòdul inicial. Les dades corresponen al promig de dos assajos.

Els resultats de la taula B.7 mostren un significat increment de la tensió i deformació degut al confinament amb FRP. No obstant això, el confinament és més eficient en el formigó de baixa resistència. Pel mateix tipus de formigó, el confinament amb FRP de carboni és més eficient que amb FRP de vidre. Existeix un lleu increment del mòdul d'elasticitat degut a l'efecte de confinament.

En el cas de formigons de baixa resistència HF30, no existeix increment de la tensió quan és confinat amb 1 capa de FRP de vidre. No obstant això, per 3 capes hi ha un increment del 50%, mentre que per 6 capes la tensió s'incrementa en 100%, és a dir, duplica el seu valor.

En el cas del formigó de baixa resistència HF30 confinat amb FRP de carboni, s'observa un increment del 10% en la tensió quan és confinat amb 1 capa. Per 3 capes hi ha un increment del 80%, mentre que per 6 capes el increment en la tensió és del 160%. La comparació d'aquests resultats permet establir que la eficiència de confinament és dependent del tipus de FRP, sent major en el cas del confinament amb FRP de carboni.

L'efecte més important del confinament amb FRP és la deformació axial a ruptura. La deformació axial dels formigons confinats amb FRP, és considerablement major que la deformació corresponent al formigó sense confinar. Per altre costat, si considerem el valor de  $\varepsilon_{max} / \varepsilon_c$  com un índex de ductilitat, es pot establir que la ductilitat s'incrementa al incrementar-s'hi el número de capes de FRP. Aquest increment és més significat en el cas dels FRP de carboni que en el cas dels FRP de vidre. Això es pot atribuir al major mòdul d'elasticitat i resistència a tracció del FRP de carboni. Per altre costat, el increment del índex de ductilitat és major en el cas del formigó de baixa resistència HF30 en comparació amb el formigó d'alta resistència HF70.