ESTUDI DE L'ANCORATGE DE CFRP (CARBON FIBER REINFORCED POLYMER) EN EL REFORÇ D'ESTRUCTURES DE FORMIGÓ

Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

-MEMÒRIA-

TITULACIÓ:

Enginyeria Industrial

ALUMNE:

Jonatan Carol Ucelay

CURS:

2009/2010

CONVOCATÒRIA:

Gener 2009

DIRECTOR DEL PROJECTE:

Dr.Lluís Gil

Índex – Memòria

1. INTRODUCCIÓ 5

2. OBJECTE 6

3. SISTEMES DE REFORÇ FRP 7

3.1 Descripció sistemes de reforç FRP 7

3.1.1. Reforç amb materials preconformats 7
3.1.2. Reforç amb teixits de fibres 7
3.1.3. Reforç amb bandes preconformades doblegades en angle 8

3.2 Camps d'aplicació del reforç FRP 8
3.2.1. Reforç a flexió 8
3.2.2. Reforç a tallant 9
3.2.3. Confinament 10
3.2.4. Reforç de murs 10

3.3 Comparativa de sistemes de reforç FRP adherits externament . 11

3.4 Avantatges i desavantatges del reforç FRP 12
3.4.1. Avantatges 12
3.4.2. Desavantatges 13

3.5 Decisió estratègica en el reforç d'una estructura 14
3.5.1. Diagrama de fluxos del procés de reforç estructural 15

4. TEORIA DE MATERIALS COMPOSTOS 16

4.1 Procés de fabricació dels laminats de fibra de carboni 16

4.2 Propietats dels materials compostos 18
4.2.1. Propietats de les fibres 19
4.2.2. Propietats de la resina 20
4.2.3. Propietats dels materials 21

4.3 Mecànica de ruptura dels laminats FRP. Modes de col·lapse 22

5. INTRODUCCIÓ MÈTODES D'ASSAIG 24

5.1 Introducció dels materials de reforç d'estructures de formigó 24
5.1.1. Laminat preformat de fibra de carboni (MBrace LAMINADO) .. 24
5.1.2. Imprimació epoxi 25
5.1.3. Adhesiu epoxi tixotròpic 25

5.2 Descripció de la instal·lació d'assaig 26
5.2.1. Premsa universal 26
5.2.2. Marc de càrrega 27
5.2.3. Equipament d'adquisició de senyals 28
5.2.4. Equipament d'anàlisi de vibracions 28
5.2.5. Maquinària auxiliar 29

5.3 Obtenció dels modes de vibració 30
5.3.1. Equip Brüel Kjaer & Acceleròmetre 30
5.3.2. Procediment d'obtenció dels modes de vibració 30

5.4 Introducció a la extensometria i a les galgues extensomètriques ... 35
5.4.1. Introducció 35
5.4.2. Materials de les galgues 36
5.4.3. Geometria de les galgues 36
5.4.4. Problemes i defectes en galgues 37
5.4.5. Tipus d'informació que es vol obtenir en les mesures 40

6. PROCEDIMENTS D'ASSAIG 42

6.1 Objecte de l'assaig 42
6.2 Preparació de provetes 42
6.2.1. Formigonat de les bigues 42
6.2.2. Preparació de la superfície 43
6.2.3. Impregnació 44
6.2.4. Fixació dels laminats amb adhesiu epòxic 46
6.2.5. Col·locació de galgues sobre els laminats, soldadura de cables sobre galgues i connectors RJ45 48

6.3 Muntatge de l'assaig i resultats 52
6.3.1. Assaig biga 01 52
6.3.2. Assaig biga 02 56
6.3.3. Assaig biga 03 61
6.3.4. Assaig biga 04 67
6.3.5. Assaig biga 05 71
6.3.6. Assaig biga 06 75
6.3.7. Resum dels assaigs 79

7. GUIES DE DISSENY DE REFORÇ FRP 80

7.1 Comentaris normativa americana ACI440.2R-02 80
7.1.1. Compatibilitat de tensió 80
7.1.2. Bases de càlcul per al disseny del reforç amb FRP 80
7.1.3. Simbologia normativa ACI 440.R2-02 87

7.2 Comentaris normativa europea CEB-FIP Model 2001 89
7.2.1. General 89
7.2.2. Situació general 89
7.2.3. Modes de col·lapse – Estats Límits Últims 91
7.2.4. Anàlisi en E.L.U. 97
7.2.5. Simbologia normativa CEB-FIP Model 2001 104

7.3 Comentaris normativa italiana CNR-DT200/2004 106
7.3.1. Conceptes bàsics en el projecte de reforç i problemàtica especial 106
7.3.2. Reforçament d'estructures de formigó armat 112
7.3.3. Reforçament a flexió 116
7.3.4. Simbologia CNR-DT200/2004 121

8. CALCUL I DISSENY DE REFORÇ FRP 123

8.1 Càlculs segons la normativa americana ACI440.2R-02 123
8.2 Càlculs segons la normativa europea CEB-FIP Model 2001 127
8.3 Càlculs segons la normativa italiana CNR-DT200/2004 130

9. COMPARATIVA TEÒRICA I PRÀCTICA 133

9.1 Resultats dels assajos pràctics en el laboratori 133
9.2 Taula comparativa de valors: Laboratori – Normatives vigents 134
9.3 Taula comparativa d'errors: Laboratori – Normatives vigents 134

10. BIBLIOGRAFIA 135

Índex – Annex

I. ANNEX NORMATIVA AMERICANA ACI 440.R2-02 138

II. ANNEX FITXES COMERCIALS DELS MATERIALS 149

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 reforços amb FRP, degut a les propietats tant avantatjoses que presenten, entre altres, resistència a la corrosió i lleugeresa, que es tradueix en estalvi de transport i posada en obra.
A Espanya no es va començar a utilitzar fins al 1996 per reforçar varies bigues que havien estat malmeses al Pont del Dragó a Barcelona. A partir d'aquesta data va augmentar la seva utilització d'una manera notòria. En canvi, al laboratori Suïs anomenat l'EMPA ja s'estaven fent proves amb aquests a mitjans dels anys 80, però no es van realitzar assajos per veure la factibilitat fins al 1991 al pont Ibach a Lucerna (Suïsa).

Inicialment aquests tipus de reforços es realitzaven mitjançant el mètode de l'Hermite, que consistia en xapes d'acer adherides amb epoxi. Es va començar a estudiar la possibilitat de substituir aquest sistema pels desavantatges que presentava respecte als materials compostos, per tal d'eliminar la corrosió i reduir el pes, amb tot el que això comporta.

Els materials compostos representen la unió d'una matriu i unes fibres que actuen d'una manera conjunta i solidaria, on les propietats en conjunt són superiors a les que tenen ambdós per separat. Aquests es presenten en diferents formes comercials tals com; laminats, cordons, mantes flexibles unidireccionals i teixits bidireccionals que poden estar preimpregnats o no.

Cal comentar que el reforç amb material compost s'utilitza en estructures de formigó, ja que no és adient per reforçar estructures metàl·liques, per la possibilitat d'afavorir la corrosió galvànica per part del carboni, degut a les diferencies de potencial que es generen a l'estar aquest en contacte amb metalls.

A partir d'un copolímer (poliacrilonitril) i mitjançant una gran aportació d'energia en forma de calor (fins a 2.000ºC), s'obté un material versàtil per la seva lleugeresa i la seva capacitat mecànica, pel que s'ha utilitzat habitualment els últims anys en indústries aeronàutiques i aeroespacials, formant part integral dels elements mecànicament més compromesos en aeronaus.

La millora i abaratiment dels sistemes de fabricació han permès l'acostament a sectors que, tradicionalment, demanaven productes de costos sensiblement menors als de l'aeronàutica (construcció, automoció, indústria, etc..). Amb això, i en el cas de les estructures d'edificació i obra civil, s'ha

aconseguit la substitució de sistemes de reforç tradicionals (recrescuts d'estructures, disposició de pletines, etc..) per altres, basats en la posada en obra de laminats inicialment de fibra de vidre i aramida i, a l'actualitat, de fibra de carboni.

La utilitat d'aquest material és degut sobretot a la seva senzillesa de posada en obra i a unes característiques mecàniques (resistència a tracció i mòdul elàstic, principalment) que garanteixen una entrada en càrrega amb deformacions anàlogues a les del propi acer per armar, però amb la capacitat portant i durabilitat sensiblement superiors a les del metall portant original.

Es pot considerar l'ús dels laminats de fibra de carboni de manera similar al de les barres d'acer corrugat; complementant les barres longitudinals d'acer en les zones traccionades, o bé als cèrcols transversals en funcions de faixa armada o absorció de paquets de tallant, sempre tenint en compte que la capacitat de reforç de carboni es unidireccional en el sentit de les fibres.

Cal tenir en compte el fet de que els laminats de fibra de carboni presenten altes característiques mecàniques molt superiors a les del formigó i l'acer, pel que la majoria dels casos l'èxit de reforçament ve determinat més per l'estat i preparació de l'ancoratge que pel propi carboni.

2. OBJECTE

En el context de les normatives vigents actuals el projecte constarà d'un procediment pràctic, realitzat en un laboratori certificat, i d'un procediment teòric, dins del marc legislatiu de l'actual normativa americana ACI.

El procediment pràctic, constarà d'una sèrie d'assajos d'una biga de formigó armat, en diferents tipologies de càrrega. Aquests assajos es realitzen i es preparen en el laboratori de Resistència de Materials de l'E.T.S. d'Enginyeria Industrial de Terrassa, tenint a la disposició d'aquest projecte totes les eines necessàries per executar i instrumentalitzar tot l'exercici.

Els resultats obtinguts són processats i seran objecte d'estudi de comparació amb els procediments teòrics.

Serà objecte d'estudi també les actuals normatives vigents, tals com, la normativa americana, europea i italiana. Es realitzen comentaris i s'el·labora una guia per dissenyar el reforç dins el context de les proves realitzades al laboratori.

Per últim, es realitza una comparativa entre les proves realitzades al laboratori, i entre les actuals normatives vigents, a fi d'obtenir conclusions sobre l'estudi realitzat.

3. SISTEMES DE REFORÇ FRP

3.1 Descripció sistemes de reforç FRP

Els sistemes de reforç a base de "composites", consisteixen en l'enganxament extern sobre la superfície del formigó, d'uns materials amb unes prestacions mecàniques molt altes, principalment resistència a la tracció. D'aquesta forma, els materials compostos actuen com una armadura externa, que fa unes funcions molt similars a les que fa l'armadura interna d'acer.

3.1.1. Reforç amb materials preconformats

El material compost ve en forma de laminats en els que ja van les fibres com element resistent i una matriu de resina. Normalment tenen un espessor d'entre 1,2 i 1,4 mm i una amplada entre 5 i 20 mm. Es presenten en rotllos de longitud entre 100 i 500 ml que després es tallen a obra amb les dimensions desitjades.

Com a adhesiu per adherir els laminats al suport, s'utilitza una resina epoxi. Normalment ha de ser un adhesiu de dos components de consistència pastosa i alta tixotropia, per poder-lo col·locar en parets o sostres sense problemes de desenganxament del suport.

Les característiques que ha de tenir l'adhesiu que s'utilitzi per a aquesta finalitat són:

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

3.1.2. Reforç amb teixits de fibres

Els teixits en base de fibra de carboni o vidre són materials en els que no s'ha col·locat encara la matriu de resina. Tenen normalment entre el 95 i el 98% de les fibres en direcció longitudinal i entre el 2% i el 5% en la direcció transversal, per efectuar el cosit i impedir el desfilament dels longitudinals.

Els teixits tenen normalment un espessor d'entre 0,13 i 0,30 mm, amb gramatge d'entre 200 i 800 g/m^3. Es presenten amb amples d'entre 30 i 60 cm, en rotllos d'entre 40 i 100 m, que posteriorment es tallen a obra a les dimensions desitjades.

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

3.1.3. Reforç amb bandes preconformades doblegades en angle

Existeix un tercer tipus de sistema que es compon d'un producte laminat, igual al descrit en el primer sistema, però que ja ve doblegat en forma de "L" per adaptar-se a angles rectes. Aquesta forma és adequada per fer reforços a esforç tallant. Aquests laminats es presenten en peces de longituds adequades per adaptar-se a les dimensions més habituals de les bigues (entre 30 cm i 100 cm per cadascun dels braços).

La resina que s'utilitza per aquest sistema es la mateixa que la descrita en el sistema de laminats rectes.

3.2. Camps d'aplicació del reforç FRP

El sistema de reparació i reforç d'estructures de formigó mitjançant laminats de fibra de carboni ofereix una capacitat de resistència a flexió i tallant molt més elevada.

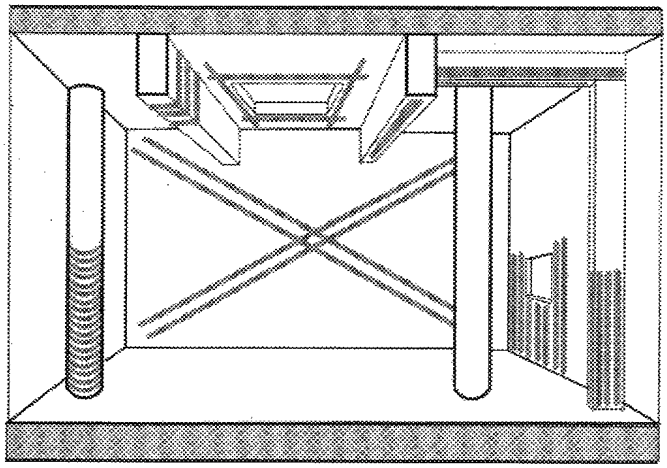


Fig. 3.1 – Esquema amb diversos tipus d'aplicació de reforç.

3.2.1 Reforç a flexió

Els laminats podem utilitzar-se per complementar la resistència a flexió de bigues, lloses, murs i altres elements a flexió. La capacitat a flexió de membres reforçats, pretensats i postensats poden augmentar fins a un 70%. En aquestes aplicacions el sistema de laminats de fibra de carboni s'instal·la al llarg de la

longitud de l'element a tractar de la mateixa manera que un reforç d'acer longitudinal.

Aquest reforç es pot aplicar sobre murs de formigó i maçoneria per a augmentar les resistències a càrregues fora del pla, càrregues de vent, pressió del sòl, pressió de fluids en tancs i voladures. En zones de moments negatius es pot aplicar el reforç en la part superior per augmentar la seva capacitat.

3.2.2. Reforç a tallant

És possible utilitzar-se també per a augmentar la capacitat a tallant de bigues, pilars i altres elements de formigó. Mitjançant un adequat reforç a tallant, es pot inclús arribar a duplicar la capacitat a tallant dels elements lligats, així com també, augmentar el seu comportament dúctil. En aquesta aplicació el laminat s'orienta transversalment de forma similar als estreps, lligadures o cèrcols d'acer.

Els laminats poden abraçar els pilars per a proporcionar una capacitat a tallant addicional a fi d'augmentar la resistència a càrregues sísmiques, càrregues de vent o moviments d'elements contigus deguts a la fluència i contracció d'aquests elements.

Fig. 3.2. – Exemples de diversos tipus d'aplicació de reforç a tallant.

Fig. 3.3. – Exemple d'aplicació real de reforç a tallant.

La envoltura en "U" consisteix en abraçar els costats i la part inferior de la secció amb l'objectiu d'augmentar la resistència a tallant de la biga en les zones sotmeses a alts esforços a tallant. El fet d'utilitzar aquest sistema de reforç

permet augmentar la capacitat a tallant de 200 a 400 N per cada mm de profunditat de la biga aproximadament.

3.2.3. Confinament

Un formigó confinat amb reforços de FRP externs exhibeixen un augment excepcional del seu comportament a compressió: la capacitat de càrrega pot pràcticament duplicar-se, mentre que la capacitat de deformació pot augmentar fins a 10 vegades.

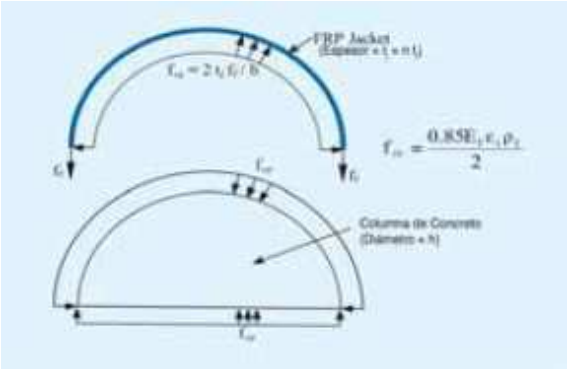


Fig. 3.4. – Esquema de treball del confinament.

Aquest efecte permet reforçar les estructures de formigó per a protecció antisísmica, de manera que augmenti la seva ductilitat de desplaçament en presència de condicions sísmiques. El confinament amb FRP pot també emprar-se per a fixar entroncaments en pilars.

3.2.4. Reforç de murs

És un tipus de reforç menys usual, tant en fàbrica d'obra com en formigó. Aquests murs poden estar sotmesos a esforços longitudinals (càrregues sísmiques, de vent, etc) com verticals (càrregues gravitatòries). Amb el sistema d'enganxat de teixits, col·locant en forma de creu de Sant Andreu s'aconsegueix millorar la capacitat portant dels murs contra qualsevol de les càrregues indicades anteriorment.

Taula 3.1 – Tipus de reforç per a cada aplicació.

Tipus d'esforç	Laminat	Fulla
Flexió	X	X
Tallant		X
Confinament		X

3.3. Comparativa de sistemes de reforç FRP adherits externament

A la següent taula es mostra una comparativa dels diferents tipus de reforç FRP; laminats, fulles i NSMR (Near Surface Mounted Rods), en el que es mostren les característiques més significatives.

Taula 3.2 – Taula comparativa de sistemes de reforç.

	Laminats	**Làmines o fulles**	**NSMR**
Forma	Tires rectangulars	Fina tela unidireccional o bidireccional	Laminats o tires rectangulars
Espessor	1,0 – 2,0 mm	0,1 – 0,5 mm	1,0 – 10,0 mm
Amplada	50 – 150 mm	200 – 600 mm	10 – 30 mm
Ús	Unió simple de perfils prefabricats amb adhesiu	Unió i impregnació de la fibra seca amb resina i curat in situ	Unió simple de perfils prefabricats amb adhesiu o morter de ciment en la ranura pre-serrada a la superfície del formigó.
Aplicacions i/o observacions	Per a forjats Unió amb adhesiu tixotròpic No són recomanades més d'una capa La rigidesa del laminat i l'ús d'adhesius tixotròpics permet certes irregularitats de la superfície Senzillesa en l'ús Qualitat garantida des de la fàbrica Adequat per reforçar en corbes o angles Necessita estar protegit contra el foc	Fàcil d'aplicar en superfícies corbes Resina amb baixa viscositat per unir i impregnar Es poden usar múltiples capes, més de 10 són possibles. Les irregularitats han de ser anivellades Pot ser combinat fàcilment amb sistemes d'acabats com el guix o la pintura Adequat per a tallants o reforçaments en curvatura Necessita estar protegit contra el foc	Depèn de la distància a l'armat Les ranures han de ser serrades a la superfície del formigó Les ranures han d'estar netejades cuidadosament abans de la unió Unió amb adhesiu tixotròpic És possible utilitzar morter de ciment per a la unió Adequat per a reforçament en curvatura Protecció mínima contra el foc

3.4. Avantatges i desavantatges del reforç FRP

3.4.1. Avantatges

Els compostos amb fibres tenen un límit elàstic més gran i una densitat més baixa que l'acer. Aquestes dues dades de propietats porta a que els compostos de fibres tinguin un rati resistència/pes més gran que l'acer i molts dels casos.

El baix pes dels compostos comporta que la maniobralitat i la instal·lació sigui significativament més fàcil que l'acer. Això és particularment important quan s'instal·la el material en zones de difícil accés.

La instal·lació d'aquests materials no requereixen d'estructura robusta per als operaris, mentre que per l'acer són necessàries estructures pesants.

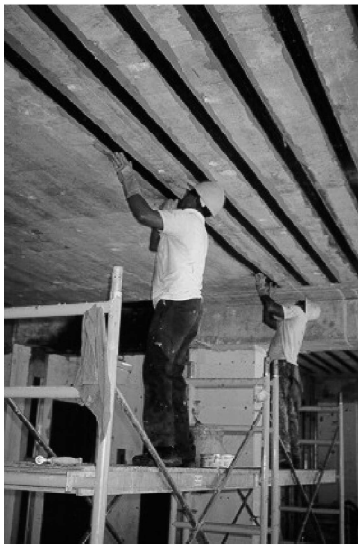


Fig. 3.5. – Exemple d'aplicació de laminats de fibra de carboni.

Generalment no són necessàries unions ni ancoratges per el cas del FRP, i això especialment important de cara a no danyar el propi material.

- No són necessàries juntes.
- El material pot adquirir les mateixes formes de les irregularitats de la superfície del formigó.
- El material pot seguir la forma d'un perfil corbat; l'acer necessita un pre-corbat per a seguir un radi.
- El material pot ser fàcilment instal·lat més enllà de serveis existents.
- No hi ha problema en superposar diferents làmines, quan s'ha de reforçar bidireccionalment, degut al baix espessor del material.

Els materials, fibres i resines, tenen durabilitat si estan ben especificats, i requereixen de molt poc manteniment. Si en servei són danyats, és relativament fàcil reparar-los, afegint-hi una nova capa.

L'ús de compostos de fibres no comporta significativament l'increment de pes de l'estructura ni de les dimensions de l'element.

En termes mediambientals l'impacte i sostenibilitat, els estudis demostren que l'energia requerida per produir materials FRP és menor que altres materials convencionals. Això també és degut a que és un material lleuger, i el transport causa el mínim impacte.

Aquests factors són molt importants de cara a la reparació de ponts, ja que es tracta d'un material molt fàcil i ràpid d'instal·lar i això suposa una reducció del temps de tancament d'autopistes o carreteres. A Suïssa el mercat dels materials FRP ja suposa un 90%, deixant en segon terme l'acer.

3.4.2. Desavantatges

El principal desavantatge del reforçament exterior d'estructures amb compostos de fibres és el risc d'incendi, vandalisme o danys accidentals, a menys que el reforç estigui protegit. Una preocupació particular per als ponts sobre carreteres és el risc de que vehicles de gran alçada puguin colpejar el reforç. Amb tot això, els danys produïts poden només reduir el factor de seguretat però no pot portar al cas de que es produís un col·lapse.

Encara no hi ha estudis ni experiències que parlin dels compostos de fibra a llarg termini, i per tant, la durabilitat en aquest sentit és desconeguda. Això pot ser una desavantatge de cara al disseny amb una estimació de llarga vida.

Una desavantatge dels reforços FRP que repercuteix bastant, és l'alt cost del material, però segons el tipus de projecte, aquest cost pot ser molt similar en comparació amb l'acer.

Una de les desavantatges de cara als clients és l'absència o la poca experiència i la qualificació dels operadors que han de portar a terme els treballs.

Fig. 3.6. – Operari en fase d'adhesió del laminat.

Per últim, cal esmentar les dificultats que es troben per dissenyar dins el marc d'una normativa estatal o internacional.

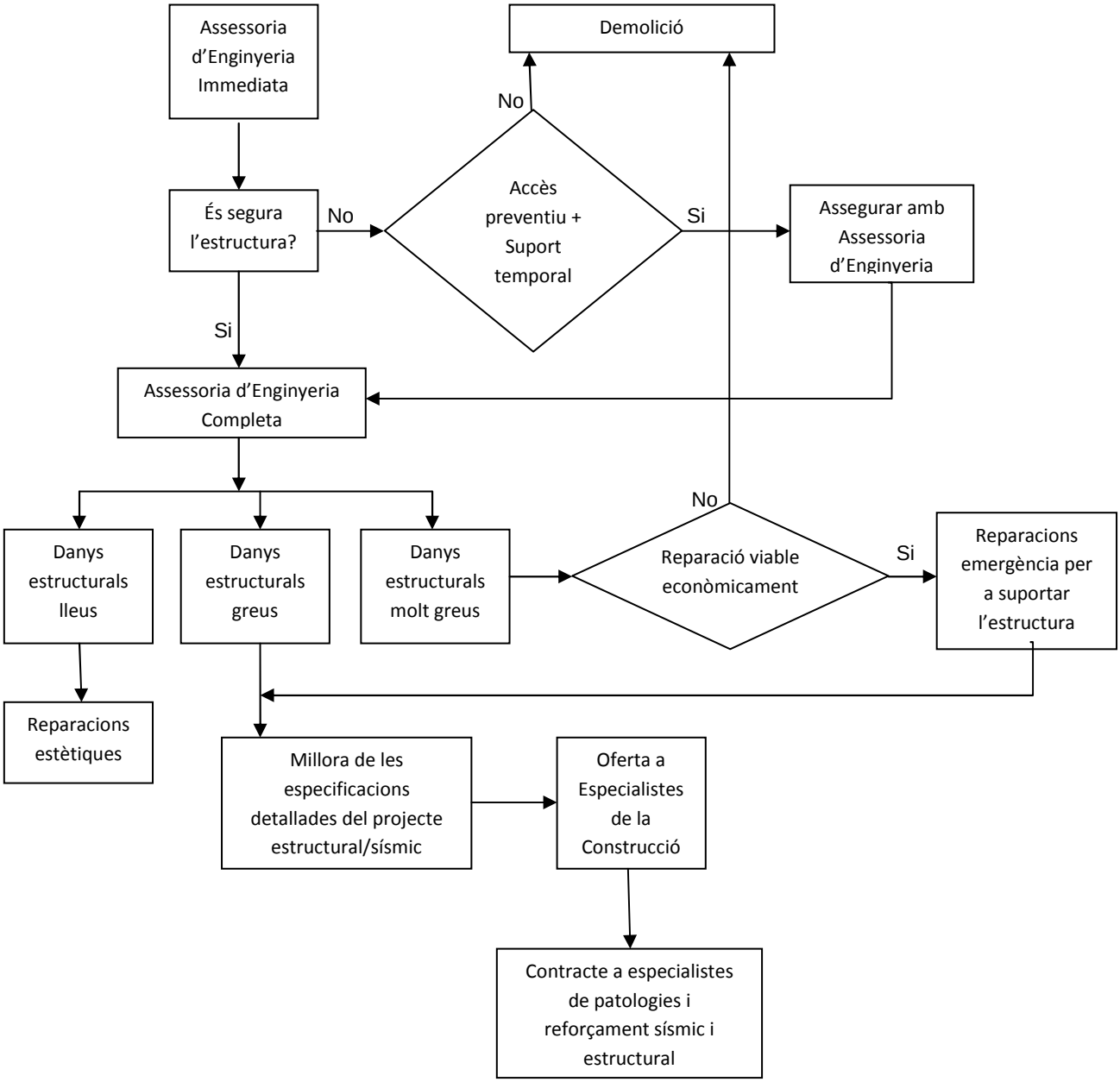
3.5. Decisió estratègica en el reforç d'una estructura

El reforçament d'una estructural és necessari, si hi ha un potencial risc de patir deformacions plàstiques o si s'arriben als límits de servei. Hi ha varies tècniques a utilitzar en el reforçament d'estructures, per exemple, infiltrar reforçaments de formigó, incrementar el tamany dels elements, o afegint nova estructura de reforç.

En la majoria d'intervencions, la totalitat de les deformacions estan controlades, però una desavantatge important del reforçament és la possibilitat de que s'incrementin les forces. També té l'inconvenient de que instal·lar noves estructures de reforç implica una indesitjable aparença arquitectònica. És per això, que promotors o propietaris es plantegin sèriament optar per reparacions més estètiques o que no interfereixi amb el plantejament arquitectònic.

Abans de prendre alguna decisió estratègica, convé plantejar algunes qüestions i valorar realment les necessitats de l'estructura.

3.5.1. Diagrama de fluxos del procés de reforç estructural



4. TEORIA DE MATERIALS COMPOSTOS

4.1. Procés de fabricació dels laminats de fibra de carboni

La fibra de carboni procedeix principalment de dues fonts, poliacrilonitril (PAN) i alquitrà, que es coneixen com a precursors. En general, les fibres de carboni es produeixen a partir de fibres precursores PAN en tres etapes: (1) estabilització; (2) carbonització, i (3) grafitació.

Les fibres de carboni que es produeixen a partir del precursor PAN tenen una resistència a la tracció de 2,3 a 3,2 GPa i un mòdul d'elasticitat en l'interval de 193 a 413 GPa. El mòdul d'elasticitat de les fibres de carboni PAN augmenta contínuament conforme augmenta la temperatura de pirròlisi fins arribar els 413 GPa. Per arribar a un mòdul d'elasticitat molt alt, les fibres de carboni han de tenir un alt grau d'orientació preferent axial dels plans basals del grafit paral·lela a l'eix de la fibra. Per una altra banda, la resistència a la tensió de les fibres de carboni PAN augmenta conforme augmenta la temperatura de pirròlisi fins a uns 1.200ºC i llavors decreix menys ràpidament conforme augmenta la temperatura. El descens de la resistència a la tensió a temperatures de pirròlisi cada vegada més elevades es creu que està causat per una major presència de fissures discretes tant en el volum del material com en la seva superfície.

La densitat de les fibres PAN carbonitzades i grafitades està usualment dintre de l'interval de 1,7 a 2,1 g/cm^3 mentre que el seu diàmetre final està en l'entorn de 7 a 10 µm.

Taula 4.1 - Propietats mecàniques d'elements comuns.

Material	Mòdul elàstic [GPa]	Límit elàstic (compressió) [MPa]	Límit elàstic (tracció) [MPa]	Densitat [kg/m^3]
Formigó	20-40	5-60	1-3	2.400
Acer	200-210	240-690	240-690	7.800
Fibra de Carboni*	200-800	NA	2.500-7.500	1.750-1.950

**Valors per a fibra de carboni en pla rectangular. Segons la matriu varien les propietats mecàniques.*

La fabricació d'aquests materials compostos es produeix dotant aquest material d'una secció, generalment rectangular en la construcció. El procés de fabricació dels laminats de fibra de carboni amb matrius termoestables de resina epoxi es denomina pultrusió.

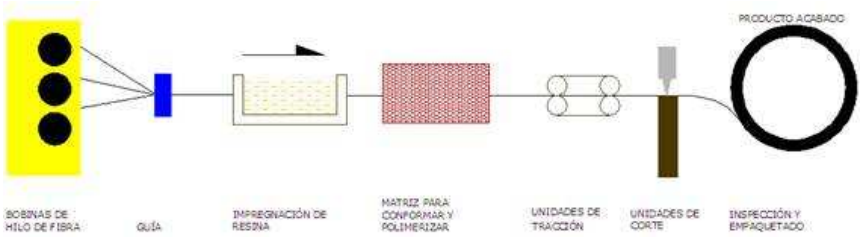


Fig. 4.1 – Esquema procés de fabricació per pultrusió.

La pultrusió és un procés de fabricació continu, de baix cost, automàtic i d'alt volum, en el qual les fibres impregnades amb resina són traccionades a velocitat constant per a obtenir un producte d'una secció predissenyada. Aquest procés és similar al d'extrusió de metalls a través d'un orifici, estirant del mateix enlloc de pressionar-lo a través d'aquest.

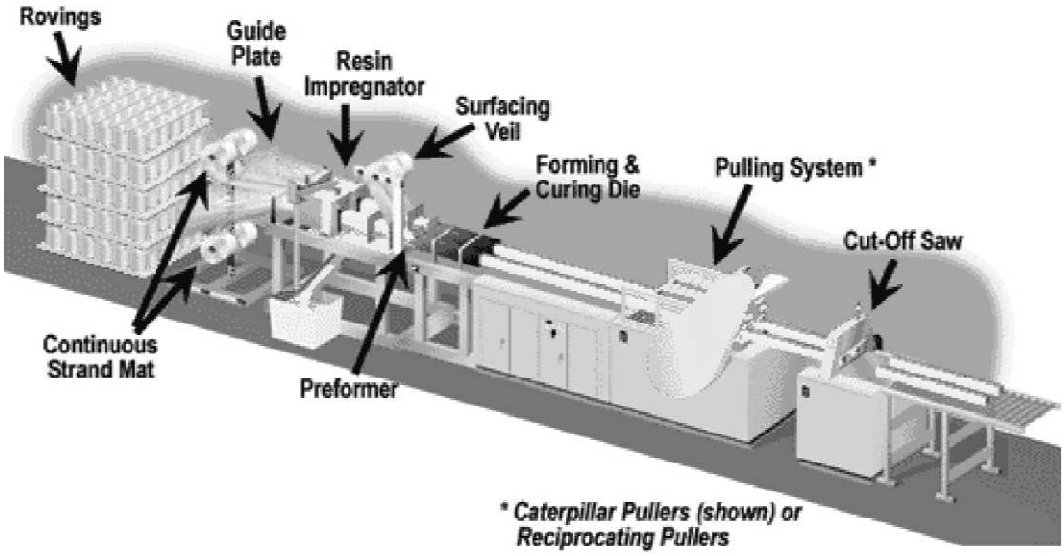


Fig. 4.2 – Operacions del procés de fabricació per pultrusió.

La primera etapa del procés, canalitza les fibres i les impregna en un bany de resina. Posteriorment, es passa el material impregnat per un motlle a una temperatura que assegura la correcta polimerització de la resina, controla el

seu contingut i dona la forma desitjada al perfil. Finalment, es talla en la longitud desitjada, s'inspecciona el producte acabat i es realitzen assajos de control de qualitat per certificar que la informació tècnica del producte és fiable.

El trenat és un terme utilitzat per l'enclavament de dos o més fils per formar una estructura integrada. L'enrotllament de filaments és un procés continu mitjançant el qual les fibres s'impregnen de resina matriu i embolicat al voltant d'un mandril. Durant aquest últim procés, el gruix, l'angle d'atac, i la fracció de volum de fibra són controlats. El producte final llavors, es cura utilitzant làmpades de calor. Els productes més comuns fabricats amb aquest tipus de procés són els tubs, canonades i tancs d'emmagatzematge.

4.2. Propietats dels materials compostos

Un material compost es defineix com la unió de dos o més materials físicament diferents i separables mecànicament, on la barreja es fa de tal forma, que la dispersió d'un material en l'altre pot fer-s'hi de manera controlada per arribar a unes propietats òptimes, obtenint com a resultat un nou material amb propietats superiors, i possiblement úniques en algun aspecte específic, en comparació amb els components originals per separat. La paraula "composites" es refereix usualment a reforços amb fibra de materials metàl·lics, polimèrics i ceràmics.

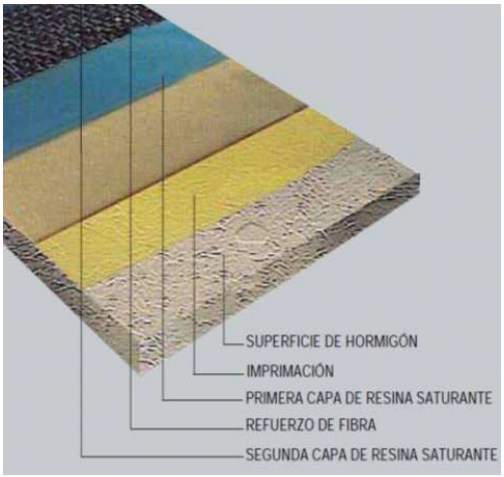


Fig. 4.3 – Detall de les diferents capes del FRP.

Les propietats del material compost dependran del tipus de material base del que estigui fabricat. Aquests s'utilitzen normalment de carboni degut a la relació prestació-preu. Entre els materials base que podem trobar (Grafit, Aramida, Vidre i Polièster), aquest té el mòdul d'elasticitat més alt, compatible amb la deformació del formigó armat. Sense incloure el Grafit degut al seu elevat

preu. És difícil obtenir una conclusió de quina de les fibres és estructuralment més eficient, ja que això dependrà de les condicions d'entorn.

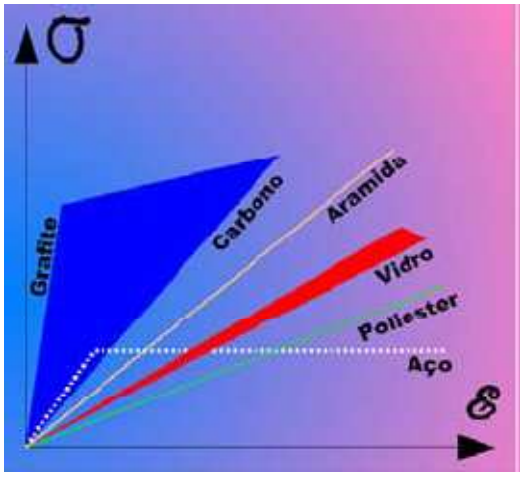


Fig. 4.4 – Gràfic deformació-tensió de diferents fibres.

4.2.1. Propietats de les fibres

Existeixen varis graus de fibres, la *taula 4.2* mostra varis tipus de fibres amb les seves propietats típiques. Fixant-nos en la taula podem extreure les següents conclusions: Les fibres de carboni tenen el mòdul d'elasticitat més elevat, per tant les fibres de vidre com les fibres 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, els quals poden reduir importantment la seva resistència. Les fibres de carboni tenen una deformació a ruptura molt baixa, per això no s'ha d'utilitzar en aplicacions on es requereixi una ductilitat important (reforç sísmic). Tant la rigidesa com la resistència a compressió són molt difícils d'estimar en les fibres, ja que l'assaig experimental és molt complicat.

És molt difícil extreure una conclusió a partir de la *taula 4.2*, de quin dels tres tipus de fibres és estructuralment més eficient, degut a que això dependrà de les condicions d'entorn, a més el pes del material compost dependrà de la concentració de fibres a la matriu.

Taula 4.2 - Propietats mecàniques de diferents fibres.

Tipus de fibres	Mòdul elàstic [GPa]	Límit elàstic (tracció) [MPa]	Deformació axial màx. En ruptura [%]	Densitat [g/cm^3]
Carboni (mòdul baix)	170	1.380	0,90	1,90
Carboni (mòdul alt)	380	1.720	0,40	2,00
Carboni (mòdul molt alt)	760	2.210	0,30	2,15
Vidre (E-glass)	81	3.450	4,88	2,60
Vidre (S-glass)	89	4.590	5,70	2,48
Aramida (alta tenacitat)	83	3.620	4,00	1,44
Aramida (mòdul alt)	131	3.620-4.140	2,80	1,44
Aramida (mòdul molt alt)	186	3.450	2,00	1,47

4.2.2. Propietats de la resina

Les propietats de les resines depenen de la seva estructura interna. Si es comparen les propietats mecàniques de la resina amb les fibres, es pot veure que la resina contribueix 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, mentre que més dúctil sigui la resina, la tenacitat del laminat augmentarà. La funció de la resina és la de transferir la càrrega d'una fibra a l'altre adjacent, pel que quan una fibra trenca, una resina dúctil contribueix millor la força a vàries fibres i no només a l'adjacent. Això vol dir que el material resistirà més fibres trencades, augmentant la tenacitat del material compost.

Taula 4.3 - Propietats mecàniques de diferents resines.

Tipus de resina	Resistència a tracció [MPa]	Mòdul d'elasticitat a flexió. [GPa]	Deformació [%]
Epoxi	103 – 172	4,83 – 6,21	< 2,0
Poliamida	48 – 83	2,76 – 5,52	1,73 – 3,2
Polièster	21 – 83	2,76 – 4,14	1,4 – 4,0
Termoplàstics	76 - 103	2,21 – 4,83	0,5 – 1,0

4.2.3. Propietats dels laminats

Una de les propietats que més es considerarà en el reforç a flexió, es la propietat de la resistència. Per una combinació de fibres i resines donades, existeixen dos paràmetres addicionals que afecten significativament la resistència del material compost. Aquests paràmetres són el percentatge de 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. Estudiem les resistències més importants a considerar:

- Resistència a tracció: La resistència longitudinal a tracció és 30 o 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 sol determinar principalment per la resistència aportada per la resina.
- 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 sí mateixa és més resistent a compressió que a 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 a tracció, degut a que les fibres a 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.
- Resistència a flexió: Aquesta 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 sotmesa a esforços a compressió. Durant la càrrega a flexió els esforços a tracció s'originen a partir de la flexió del membre reforçat en lloc d'una càrrega a tracció

directa. La resistència a flexió varia segons l'ordre de les capes que conformen el laminat, fet que no succeeix amb la tracció directa.

- Resistència a tallant: La resistència a tallant d'un laminat és molt baixa. Això és degut a que les fibres no poden resistir la deformació en la direcció de tallant màxim. Si la resistència a tallant és prioritària, llavors s'han de col·locar algunes capes a 45º per incrementar la resistència a tallant.

4.3. Mecànica de ruptura dels laminats FRP. Modes de col·lapse

La resistència a flexió de bigues de formigó reforçades amb FRP exterior perimetral ha sigut provada que obté un increment significatiu de la capacitat de càrrega última. Investigacions prèvies han demostrat que les bigues de formigó reforçades podem mostrar un nombre de modes de col·lapse. Basat en observacions experimentals, els modes de col·lapse característics de les làmines FRP per a bigues de formigó subjectes a càrregues a flexió poden ser classificades en dues categories:

- Fallada per ruptura o desenganxament

  a) Peladures o desenganxament de cantonades de la làmina amb o sense la formació de fissures de tallant associades.
  b) Formigó cobert de delaminacions amb la formació de fissures horitzontals, propagades des de la cantonada, en una capa entre el laminat extern i l'acer de tracció.
  c) Laminat de flexió desenganxat a la regió on la corba de moments és màxima.

- Fallada a flexió completa del compost

  a) El formigó es fissura a compressió

  b) El formigó es fissura a compressió precedit per l'acer de l'armat

  c) La fractura del laminat FRP adherit en tensió, el qual és precedit per l'acer de l'armat.

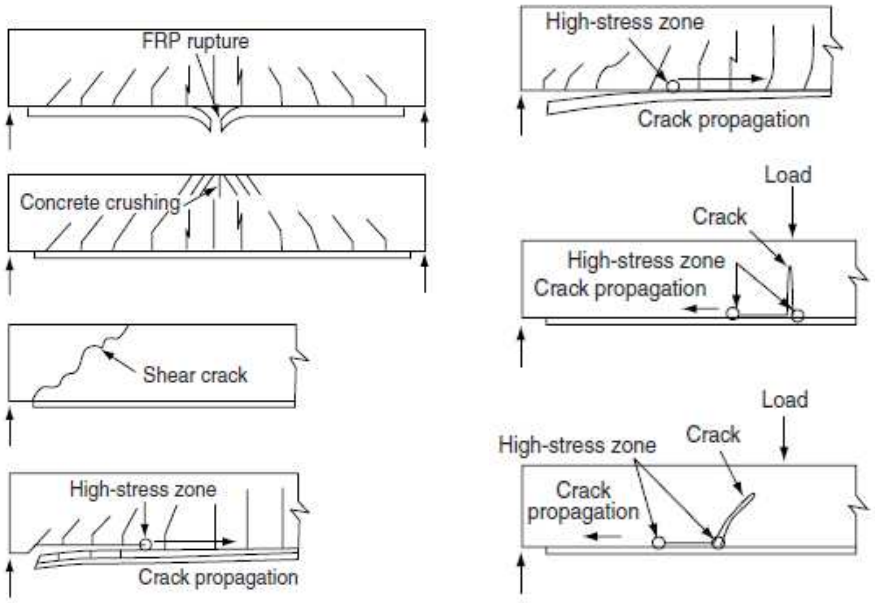


Fig. 4.5 – Gràfics de diferents modes de col·lapse o ruptura.

Quan els laminats FRP s'apliquen només a la superfície inferior de tracció, les fallades per ruptura poden evitar la completa utilització de la capacitat a flexió de les bigues de formigó reforçades. Alguns dels estudis recents donaven les formules analítiques pel estripament prematur del laminat degut a la concentració de tensions a la cantonada o a la zona de fissures per flexió al formigó al tram mitjà de la biga.

5. INTRODUCCIÓ MÈTODES D'ASSAIG

5.1. Introducció dels materials de reforç d'estructures de formigó

5.1.1. Laminat preformat de fibra de carboni (Mbrace LAMINADO)

El laminat MBrace de BASF presenta una orientació de fibres unidireccionals i en format semirígid. Segons els requisits estructurals, aquest laminat pot ser de dos tipus, de baix mòdul elàstic o d'alt mòdul elàstic, amb resistències a tracció en ruptura semblants, i amb la diferència d'elongació última. La fibra de carboni presenta una corba tensió-deformació completament lineal fins la ruptura.

El camp d'aplicació d'aquests laminats són:

- ✓ Reforços a tracció en elements flexionats mitjançant adhesió en superfície.
- ✓ Errors de projecte o execució.
- ✓ Millores estructurals o modificacions degudes a canvis d'usos o canvis d'exigència en normatives.
- ✓ Millora del control de la fissuració i de la resistència a impactes i ones expansives.
- ✓ Millora de les capacitats de càrrega d'estructures de formigó: augment de la resistència a flexió de bigues, lloses i murs de formigó; augment de la resistència a tallant de bigues i murs de formigó; i augment de la capacitat de sils, tuberies i túnels de formigó.
- ✓ Restabliment de la capacitat d'estructures de formigó deteriorades: reemplaçament de l'armat corroït, reemplaçament de tendons postensats danyats, confinament de reparacions de formigó.
- ✓ Reforç per a protecció antisísmica: millora de la resistència i ductilitat de pilars de formigó; i confinament i resistència addicionals a les connexions de formigó.

Propietats més significatives dels laminats de fibra de carboni:

- ✓ Reducció de pes.
- ✓ Excel·lent relació resistència/pes.
- ✓ Total orientació de la fibra gràcies a la matriu epoxi.
- ✓ Baix espessor d'aplicació.
- ✓ Elevada capacitat de càrrega.
- ✓ Excel·lent resistència química.
- ✓ Fàcil i ràpidament aplicable.

5.1.2. Imprimació epoxi

És un compost epoxi de baixa viscositat, amb 100% sòlids, curat amb poliamides. S'utilitza per penetrar l'estructura porosa dels substrats cementicis i proporcionar una capa base d'alta adherència entre el formigó i el laminat.

Una de les avantatges més importants és que té tolerància a la humitat, i pot aplicar-se en alguns substrats humits. La baixa viscositat penetra fàcilment en la superfície porosa del formigó. El contingut del 100% de compostos epòxics sòlids, provoca que hi hagi menys COV (Compostos Orgànics Volàtils). Una propietat destacada és que pot ser aplicat a baixes temperatures, inclòs fins a 2ºC o inferiors.

5.1.3. Adhesiu epoxi tixotròpic

És un compost epòxic adhesiu de dos components que uneix el laminat de fibra de carboni amb el formigó mitjançant la imprimació de resina epòxica.

Una de les propietats més significatives és la elevada resistència que conté, aquesta és superior a la resistència del formigó per poder assegurar la unió. Altres propietats de l'adhesiu són la consistència plàstica i dúctil, la excel·lent adherència sobre metalls i formigó i la elevada tixotropia (canvis en la seva viscositat a causa d'esforços a cisalla).

Els camps d'aplicació més usuals són:

- ✓ Unions de formigó antic amb formigó nou.
- ✓ Unió de prefabricats.
- ✓ Unió de formigó amb acer, granit, etc.
- ✓ Col·locació de reforços en estructures.
- ✓ Unió de platines.
- ✓ Unió de dovelles de ponts.
- ✓ Ancoratge de perns i armadures.

5.2. Descripció de la instal·lació d'assaig

Els assajos s'han realitzat a les instal·lacions del Campus de Terrassa de la Universitat Politècnica de Catalunya, concretament al laboratori del LITEM, del departament de Resistència de Materials i Estructures de l'Enginyeria.

El laboratori compta amb un equipament especialitzat molt complert. De tots els elements disponibles, per això, s'han utilitzat: una premsa universal, un marc de càrrega, actuadors, equipament d'adquisició de senyals (Spider i MGC Plus), acceleròmetre Brüel Kjær, i maquinària auxiliar.

5.2.1. Premsa universal

La màquina emprada pels assajos a flexió es tracta d'una premsa universal electromecànica de 50KN, que inclou assajos pseudodinàmics i de fatiga a baixa freqüència.

Fig. 5.1 – Fotografia de la premsa universal de 50 KN.

5.2.2. Marc de càrrega

Estructura metàl·lica emprada per suportar les càrregues derivades de la premsa durant els assajos. Aquest marc s'usarà com a suport birrecolzat de la biga. El marc té unes dimensions de 2,5 x 2,5 m, i està dissenyat per assajos estàtics i dinàmics a escala real.

Fig. 5.2 – Fotografia del marc de càrrega.

5.2.3. Equipament d'adquisició de senyals

Per a la captura de les dades d'extensometria s'utilitzen tres sistemes Spider 8 amb capacitat de 8 canals cada un i dos concentradors de dades 814i amb capacitat per a 8 canals cada un, connectats aquest últims al MGCPlus.

El sistema MGCPlus també conté un receptor 815i per a rebre les dades de desplaçament enviats pels mesuradors de desplaçament lineal (LVDT). La senyal enviada pels sensors làser també es captura en el sistema MGCPlus per a que junt amb les senyals de càrrega i desplaçament enviades per l'actuador, així com totes les altres anomenades, s'emmagatzemin en un sol arxiu.

Fig. 5.3 – Fotografia de l'equip d'adquisició de senyals.

5.2.4. Equipament d'anàlisi de vibracions

A les instal·lacions es disposa d'un equip que conté software i instrumentació. Aquest equipament és de la marca Brüel Kjær i conté un martell i un acceleròmetre per a la detecció de vibracions.

Fig. 5.4 – Fotografies de l'equip; portàtil, martell i acceleròmetre.

5.2.5. Maquinària auxiliar

A part de tots els equips específics per als assajos, també s'han emprat d'altres que han ajudat a aconseguir els objectius. Aquestes màquines-eines són:

- Un carretó per al transport i càrrega de les bigues, així com el posicionament de les mateixes per a la correcta execució del assaig.

- Una màquina de taladrar automàtica amb adaptador per agitar la mescla dels components adhesius per a la unió formigó amb laminat de fibra de carboni.

- Un pont grua de 3,2 tn per al transport i maniobralitat de les bigues per a un correcte posicionament dins el marc de càrrega.

Fig. 5.5 – Fotografia de la màquina de taladrar automàtica.

Fig. 5.6 – Fotografia del pont grua de 3,2 tn.

5.3. Obtenció de modes de vibració

5.3.1. Equip Brüel Kjær + Acceleròmetre

El sistema d'obtenció dels modes de vibració consisteix en un equip format per un transductor (acceleròmetre), un preamplificador, un filtre, un detector, i una sortida.

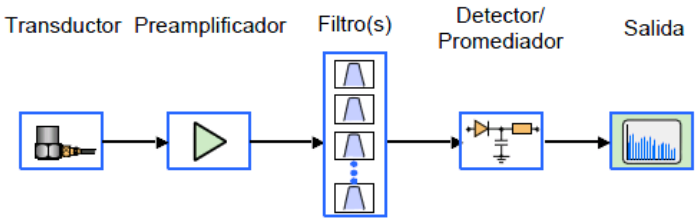


Fig. 5.7 – Esquema de funcionament de l'equip.

En els acceleròmetres s'usa un preamplificador per evitar que les càrregues d'alta impedància puguin devaluar la sensibilitat i la resposta freqüencial de l'aparell. Per a minimitzar aquests efectes la sortida del acceleròmetre està alimentat a través d'un preamplificador que converteix a una menor impedància.

Així també s'usa un filtratge per a reduir l'efecte "aliasing" de les mostres obtingudes, i processar posteriorment les senyals a la sortida mitjançant el promitjador.

L'acceleròmetre és un transductor que a dia d'avui és molt usat per a mesurar tot tipus de vibracions. Les seves característiques són més polivalents en comparació d'altres transductors de vibració. Aquests aparells tenen un gran

ample de freqüències i rangs dinàmics amb bona linealitat. És relativament robust i fiable, característiques que romanen estables durant al cap del temps.

El nucli de l'acceleròmetre és una peça de material piezoelèctric, normalment una ceràmica ferroelèctrica artificial polaritzada. Quan és tensionat mecànicament, comprimit o a tallant, genera una càrrega elèctrica a través de les seves cares polars el qual és proporcional a la força aplicada.

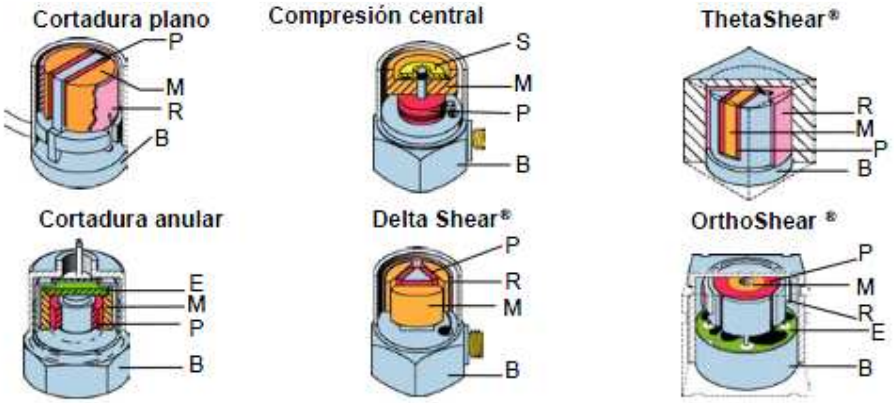


Fig. 5.8 – Tipus d'acceleròmetres. (P=Piezoelèctric, E=Electrònica,S=Molla, R=Anell de compressió, B=Base, M=Massa sísmica)

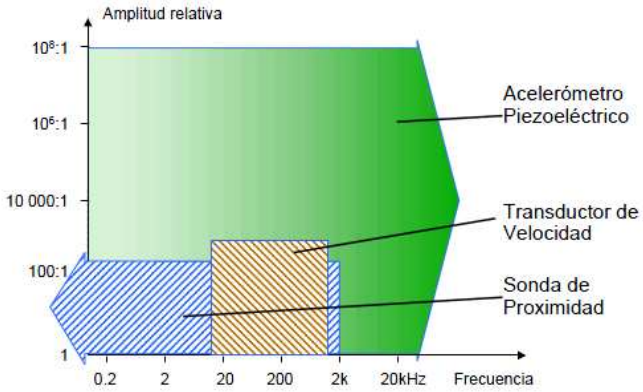


Fig. 5.9 – Rang de freqüències aplicades.

5.3.2. Procediment d'obtenció dels modes de vibració

Els modes de vibració s'obtenen mitjançant l'equip de mesura de vibracions amb martell incorporat, però abans de procedir amb l'assaig és convenient estipular com s'ha de realitzar i en quins punts s'han d'avaluar els

modes. A més punts assajats està clar que es podrà obtenir una major claredat dels modes de vibració de la biga, i per tant, aquest serà el punt a tenir en compte.

Per a aquests assajos en concret s'obtindran els modes de vibració de 96 punts, és a dir, la biga es dividirà en 5 files i 18 columnes en el sentit longitudinal de la mateixa, i es sumaran 5 punts més per al centre i 1 un punt més que serà pròxim al punt on s'aplicarà l'acceleròmetre. Amb aquest nombre de punts es considerarà suficient l'obtenció dels modes.

Fig. 5.10 – Marcatge de punts a la biga.

Un cop marcats els punts a colpejar pel martell es procedeix a l'arrencada del software específic, i a preparar l'equip. L'acceleròmetre no es podrà col·locar directament sobre la superfície del formigó, ja que degut a la rugositat i possibles bosses d'aire que pugui haver en el contacte podrien distorsionar greument les dades obtingudes. Per tant, serà necessari col·locar en el contacte entre acceleròmetre i formigó, un element elàstic i amb adaptació de forma amb els elements, per tal d'assegurar d'una unió sense obstacles. Aquest element pot ser una goma o millor una plastilina perquè el contacte sigui cohesionat i no s'alterin els resultats o no siguin distorsionats.

Fig. 5.11 – Contacte entre acceleròmetre i formigó.

Per últim, és necessari i molt important calibrar la sensibilitat del martell i el software per tal d'obtenir unes dades fiables amb el que s'està assajant. Tenint tots els elements preparats, ja es pot començar amb el procés que consistirà en realitzar un cop sec, deixant caure el martell, sobre els punts assenyalats prèviament.

Fig. 5.12 – Operació de vibrat de la biga.

Per a cada punt es realitzaran 3 cops, els quals el programa farà una mitjana del mode obtingut, i quedarà així registrar. Després de realitzar tots els punts el programa n'extreu uns gràfics de cada un d'ells.

És important que després de realitzar el cop es comprovi que les dades extretes siguin clares, per tant, el primer a avaluar és el cop amb el martell i que no presenti distorsions degudes a cops amb massa aplicació de força o la no correcta execució (no donar un cop sec).

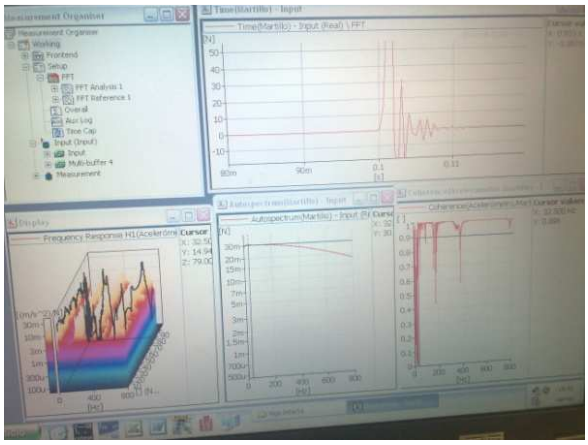


Fig. 5.13 – Obtenció dels modes en el software.

La segona part a avaluar és la cohesió dels resultats. Aquests s'han de mostrar amb poques variacions, han de presentar-se amb els mínims pics possibles, i que tots es concentrin bàsicament en la més baixa freqüència, segons el gràfic. (*fig. 5.13*)

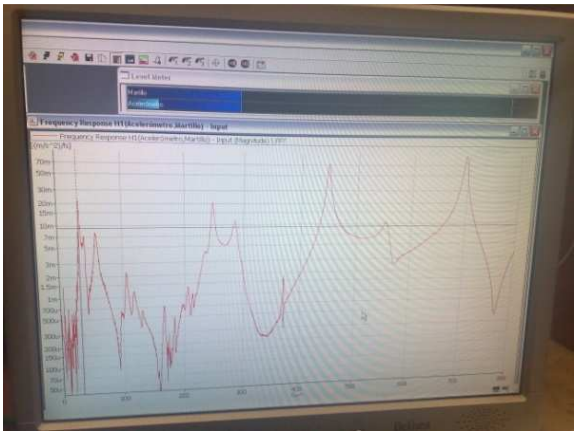


Fig. 5.14 – Captura de pantalla dels modes obtinguts.

La última part consistirà en veure cada mode obtingut (*fig. 5.14*) i que aquests no presentin gaires distorsions, és a dir, que els pics siguin el més continus possibles i que no estiguin gaire alterats. (s'ha de tenir en compte el soroll de fons que gairebé no es pot neutral·litzar)

5.4. Introducció a la extensometria i a les galgues extensomètriques

5.4.1. Introducció

L'any 1938 el científic americà Arthur Rudge estava investigant l'efecte dels terratrèmols sobre models de dipòsits d'aigua a escala reduïda. Per al seu treball, necessitava conèixer els valors de tensió a diversos punts del model. Els sistemes de mesurament coneguts fins aleshores resultaven inútils, perquè no suportaven les vibracions i, a més, no permetien realitzar les lectures. Per tant, es va recuperar una patent que consistia en un muntatge com el de la *fig. 5.15*, es va variant el pes P, i la resistència R varia de forma proporcional a la càrrega.

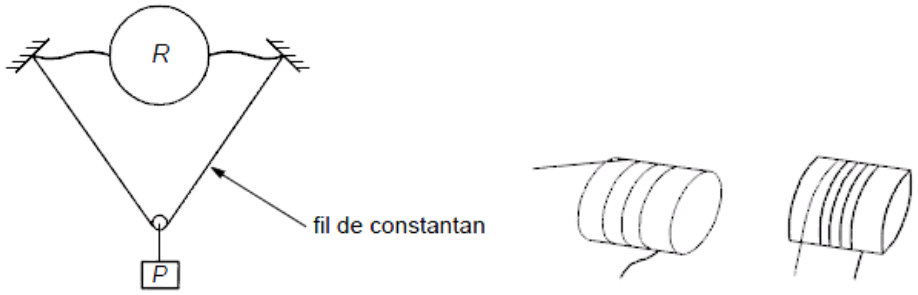


Fig. 5.15 – Muntatge referent a la patent recuperada.

El científic Rudge va veure en això una solució al seu problema, així doncs va enrotllar un fil de constantan al voltant d'un cilindre de paper i va prensar tot el conjunt. Després, amb un adhesiu adequat, va enganxar aquest nou element a la zona on li interessava conèixer la tensió.

Visualitzant el valor de la resistència mitjançant un oscil·loscopi, podia conèixer els valors de la deformació que experimentava el dipòsit i que es traslladava al fil conductor a través de l'adhesiu. Aquesta va ser la primera galga extensomètrica.

Actualment, les galgues segueixen el mateix principi de funcionament però estan molt més evolucionades. Les galgues estan constituïdes per un suport plàstic amb la reixeta conductora en una de les cares.

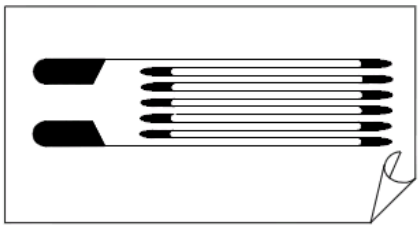


Fig. 5.16 – Esquema bàsic dels fils de la galga.

A continuació, es veu què succeeix a cadascun dels fils que formen la reixeta de la galga quan es produeix una deformació. Si el fil té, inicialment, una longitud L, i la seva resistència òhmica és R, en deformar-se passa a una longitud L+ΔL i la seva resistència es converteix en R+ΔR.

Per a certs materials es compleix que:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \varepsilon$$

És a dir, existeix una proporcionalitat entre les variacions de resistència del fil i la deformació que s'ha produït.

5.4.2. Materials de les galgues

Perquè la relació entre deformació i variacions de resistència sigui lineal, és necessari que el factor de galga K, es mantingui constant quan es deforma la galga. Això només ocorre en materials com ara el constantan (coure-níquel), alguns aliatges de níquel-crom i l'aliatge de ferro-crom-molibdè. Així doncs, els fils estan fets amb aquests elements metàl·lics. Per al cas de les galgues que s'ha d'utilitzar en altes temperatures, es fa servir reixetes d'aliatges de platí-tungstè, que poden treballar fins aproximadament 850ºC.

5.4.3. Geometria de les galgues

Existeixen dues grans famílies de galgues: les de fil i les de trama pel·licular de circuits impresos. Es pot dir que les de trama pel·licular solen oferir millors prestacions, perquè el mateix procés de fabricació permet optimitzar el disseny.

Quant a les formes de reixeta i de suport, n'existeix una gamma molt variada. Les més comunes són:

- Galga estàndard: La majoria de galgues tenen els terminals o fils de connexió en un extrem de la reixeta, que és de forma rectangular i que pot amidar entre 3 i 10 mm de llargària, però habitualment predominen les més pròximes a 10 mm.

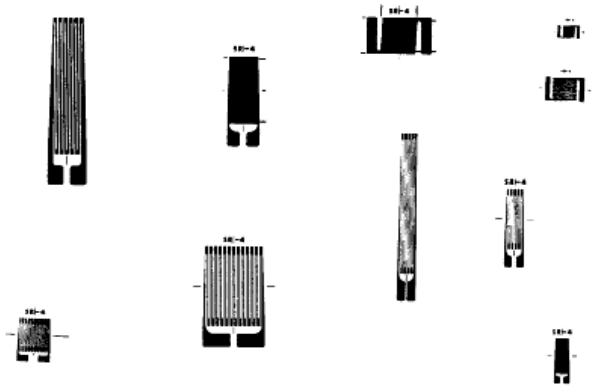


Fig. 5.17 – Exemple de galgues estàndard.

- Galgues de gran longitud: Permeten determinar el valor mitjà de la deformació al llarg de la reixeta de la galga. Són útils per mesurar materials heterogenis, com ara el formigó.
- Galgues sense suport: Consisteixen en una reixeta suportada per una cinta adhesiva provisional. S'encolen per mitjà de ciments ceràmics i permeten prendre mesures a temperatures fins a 800ºC.
- Rosetes: Poden estar constituïdes per dues, tres o quatre galgues, totes de característiques molt semblants, situades sobre un mateix suport. Les de dues galgues s'utilitzen quan es coneixen les direccions principals; les de tres, quan es desconeixen; i les de quatre, quan es vol obtenir una dada més, en previsió d'una possible fallada d'una de les galgues de la roseta tridimensional.

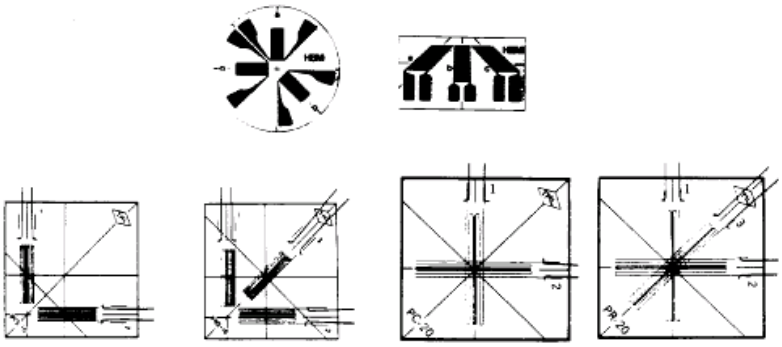


Fig. 5.18 – Exemple de galgues tipus roseta.

- Galgues miniatures: La llargària de la reixeta pot ser de 0,2 mm. S'utilitzen en casos de concentració de tensions, de gradients de tensió forts, o bé de fenòmens molt ràpids.
- Galgues per mesurar tensions residuals: Consisteixen en una roseta de tres direccions muntada sobre un suport circular amb una inclinació concreta del centre. Aquesta inclinació serveix per orientar un forat que es fa en el centre de la galga, una vegada col·locada i connectada. En realitzar-se el forat, s'alliberen les tensions residuals que pogués tenir el material. Aquestes galgues permeten mesurar les tensions residuals.

5.4.4. Problemes i defectes en galgues

5.4.4.1. Integració

Si una galga està mesurant una zona en què la deformació varia de manera
important, la lectura obtinguda correspon a la mitjana dels valors de deformació sota la reixeta de la galga, més exactament, a la integral de la deformació al llarg de la longitud de la reixeta. Així doncs, en aquests casos seria convenient utilitzar galgues de dimensions petites. Aquest problema també es presenta quan es mesuren les vibracions o els fenòmens transitoris (impactes). En aquests casos, una galga excessivament gran no determina la deformació màxima.

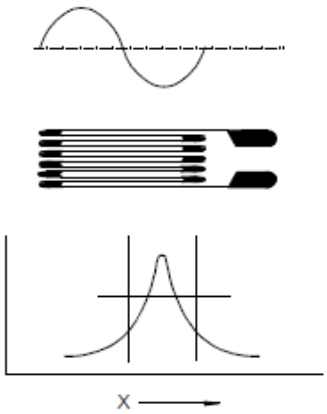


Fig. 5.19 – Mitjana de lectures obtinguda de la galga.

5.4.4.2. Derives

Encara a deformació constant, les galgues poden presentar variacions de resistència amb el temps.
Normalment aquests fenòmens són d'una importància negligible si no s'arriba a temperatures de l'ordre dels 200EC, a les quals s'accentuen fortament. L'ús d'una galga de compensació és l'únic remei possible.

5.4.4.3. Relaxació

En general, el terme relaxació s'aplica al fenomen d'una disminució de tensió, en qualsevol element o estructura, mentre la deformació es manté constant. Això és el que també succeeix a les galgues extensomètriques.

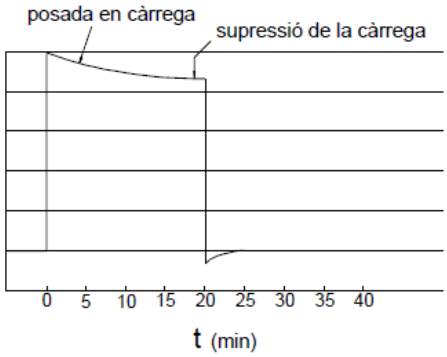


Fig. 5.20 – Baixada de tensió degut al fenomen de relaxació.

En aplicar una càrrega, la lectura de la galga adquireix un valor que va decreixent si es manté la càrrega constant. Aquest fenomen es deu, en part, al suport de la galga, però generalment el motiu fonamental és la cola que s'utilitza. Les coles ràpides, d'un sol component, usades a nivells de deformació importants, solen donar lloc a aquest fenomen, que també s'accentua si es treballa a temperatures elevades.

Els errors a què dóna lloc la relaxació en casos normals d'anàlisi de tensions solen ser desestimables; en canvi, però, per a mesuraments de precisió, o treballant a temperatures elevades, és un fenomen que s'ha de tenir en compte.

5.4.4.4. Histèresi

Aquí es tracten dos fenòmens d'origen diferent i que no contemplen la histèresi de l'element que s'ha de mesurar, que és un problema a part. D'una

banda, es pot produir histèresi tèrmica. En donar-li el corrent per primera vegada, la galga s'escalfa; aquest escalfament pot originar que el grau de polimerització de la cola augmenti i es detecti un no-retorn a zero. Una bona solució per a aquest problema, en el cas d'elements o de peces petites, consisteix a sotmetre'ls a temperatures d'aproximadament 30EC per sobre de les màximes que es preveuen a l'assaig. En el cas de peces o d'elements de grans dimensions, es pot recórrer a alimentar prèviament les galgues abans de prendre les mesures, fins i tot amb un voltatge lleugerament superior al que s'utilitza a l'assaig.

Un altre tipus d'histèresi es produeix en el suport de la galga i a la cola. El suport pot tenir una certa importància a les coles ràpides d'un sol component i amb enduriment en fred, especialment si s'arriba a nivells de deformació elevats.

5.4.4.5. Fatiga

La fatiga afecta els materials de la reixeta i s'arriba a produir petites esquerdes que, en propagar-se, originen variacions progressives de resistència a la galga. Els fabricants de galgues subministren, habitualment, dades sobre aquest tema, garantint el nombre de cicles que pot suportar una galga en un cert grau de deformació, per a una deriva de zero inferior a 100 µm/m.

5.4.4.6. Selecció de galgues

En l'elecció d'un determinat tipus de galga incideixen, principalment, els factors següents:

- Tipus d'informació que es vol obtenir en els mesuraments
- Material que es vol mesurar
- Lloc de col·locació
- Condicions i tipus d'assaig

5.4.5. Tipus d'informació que es vol obtenir en les mesures

Aquest factor incideix directament en la forma de la galga. Per mesurar la deformació en una sola direcció, s'utilitzen galgues unidireccionals.

Per determinar l'estat pla de tensió en un punt (es recorda que per fer-ho són necessàries tres dades), s'usen rosetes de tres direccions, ja sigui a 45º o bé a 120º.

A més, existeixen rosetes de dues direccions. Generalment, aquestes direccions són a 90º.
Finalment, hi ha diverses formes especials per mesurar: a) tensions residuals (es fa un forat a la zona central marcada amb un cercle i d'aquesta manera s'alleugereixen les tensions en els punts que es mesuren) tensions radials i tangencials en plaques (d'aplicació directa a transductors de pressió) ; i c) la distribució de tensions en una determinada línia (aquesta galga és simplement el resultat de diverses galgues unidireccionals encolades sobre el mateix suport).

En funció de la precisió que es vulgui aconseguir, s'escull un fil de secció rectangular amb reforços en els caps (hi ha una sensibilitat transversal més petita) o un fil de secció circular sense reforços en els caps (hi ha una sensibilitat transversal més gran).

El nivell de precisió que es vulgui obtenir en els mesuraments també fa que s'hagi d'escollir l'altre element constitutiu de la galga extensomètrica: el suport. Encara que hi ha certes discrepàncies entre els fabricants, una ordenació possible dels tipus de suport, quant a la seva precisió, podria ser, de millor a pitjor:

1 Resina fenòlica amb fibra de vidre
2 Epòxid
3 Poliamida
4 Poliester
5 Cel·lulosa

6. PROCEDIMENTS D'ASSAIG

6.1. Objecte de l'assaig

En l'estudi s'analitzen les dades obtingudes dels assajos de bigues reforçades amb FRP. Aquests assajos consten de 6 proves a flexió, i així obtenir el gràfic de tensió-deformació del formigó reforçat.

També és objecte de l'estudi la preparació prèvia als assajos, detallant els processos d'adhesió dels laminats, preparació de l'extensiometria aplicada a la biga, i de l'adquisició de senyals.

6.2. Preparació de provetes

La preparació de les provetes es realitza en varies etapes, que són les següents:

- Formigonat de les bigues.
- Preparació de la superfície.
- Impregnació.
- Fixació dels laminats amb adhesiu epòxic.
- Col·locació de galgues sobre els laminats, soldadura de cables sobre galgues i connectors RJ45.
- Muntatge de l'assaig i ruptura de la biga.

6.2.1. Formigonat de les bigues

Es fabriquen les bigues en dos tipus d'armat, V-01 i V-02, fent servir acer B500S, i formigó de qualitat H36, en dos longituds diferents, 3,50 i 5,50 metres.

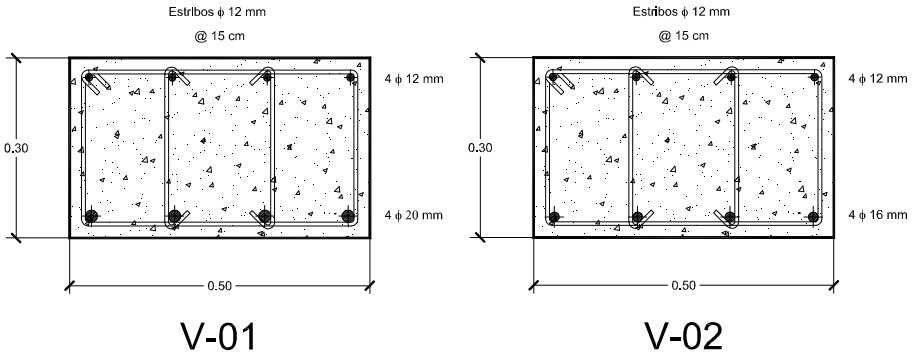


Fig. 6.1 – Croquis de l'armat de les bigues.

El formigonat es realitza a l'aire lliure amb normalitat, com es mostra en les següents imatges:

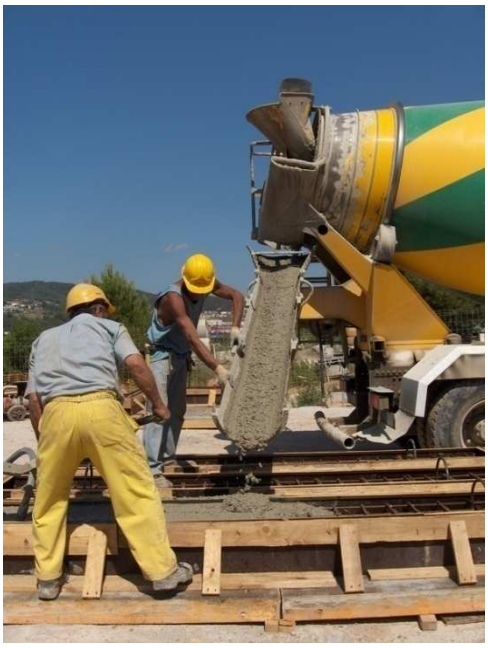


Fig. 6.2 – Preparació del formigonat a l'aire lliure.

6.2.2. Preparació de la superfície

La preparació de la superfície es desenvolupa amb un martell vibrador per arribar a donar una rugositat necessària a la zona sobre la que es fixaran els laminats.

Fig. 6.3 – Operacions de preparació de la superfície.

Per a una correcta adherència de l'epoxi que unirà el laminat amb la biga de formigó es necessària una lleugera rugositat a la superfície.

El procés de preparació de la superfície s'inicia definint la zona sobre la qual es col·locaran els laminats. En aquesta zona es realitzarà el despreniment de la capa superficial (< 1 mm) de la biga de formigó, amb la finalitat d'aconseguir la rugositat necessària per a la imprimació, sobre el que es col·locarà el film adhesiu per a unir el laminat a l'element de formigó armat.

6.2.3. Impregnació

La impregnació sobre formigó es realitza amb el producte de BASF, MBrace PRIMER, de manera que, el suport ha d'estar net, sec (humitat màxima 4%), ferm (resistència a tracció mínima 1,5 N/mm^2), rugós i lliure d'olis, desencofrants, pols, etc.

Fig. 6.4 – Conjunt MBrace PRIMER.

Per això, s'ha de tractar amb medis mecànics o per sorrejat, fins aconseguir la eliminació total de qualsevol impuresa o contaminant superficial.

El suport haurà de tenir una temperatura mínima de 5ºC.

- *Preparació de la mescla*

La imprimació MBrace PRIMER es presenta en dos components, i en proporcions adequades per a realitzar la mescla correctament.

S'ha d'abocar el component II dins el recipient del component I (recipient de treball). Mesclar cuidadosament amb un agitador a 400 r.p.m de velocitat de rotació màxima, durant 3 minuts com a mínim o fins a obtenir una mescla homogènia sense grumolls.

- *Aplicació*

S'ha de distribuir de forma uniforme sobre tota la superfície, amb l'ajuda d'un pinzell, garantint una impregnació completa de la porositat i cavitats del suport.

Per a l'aplicació de la fulla de fibra, es recomana esperar un període de 30 minuts aproximadament per a aplicar el següent producte del sistema MBrace.

Per a l'aplicació de MBrace Laminat es recomana esperar un període de 90 minuts abans de procedir amb l'aplicació de MBrace Adhesiu.

Les superfícies cobertes amb MBrace PRIMER hauran de ser cobertes com a màxim 48 hores després de la seva aplicació, per assegurar una completa adherència. En cas d'excedir aquest temps, es recomana llimar el parament i aplicar una nova capa de MBrace PRIMER.

6.2.4. Fixació dels laminats amb adhesiu epòxic

Per a l'aplicació de l'adhesiu epòxic, MBrace Adhesiu, el suport haurà d'estar net, sec, ferm, rugós i lliure d'olis, greixos, pintures, restes d'olis, desencofrants, pols, etc. Per això, s'ha de tractar amb medis mecànics o per sorrejat, fins aconseguir la eliminació total de qualsevol impuresa o contaminant superficial.

El suport haurà de tenir una temperatura mínima de 5ºC i una humitat màxima residual del 4%.

Fig. 6.5 – Conjunt MBrace Adhesiu.

La imprimació amb MBrace Adhesiu s'aplicarà sempre sobre superfícies prèviament imprimades amb MBrace PRIMER. L'aplicació de l'adhesiu sobre la imprimació es realitzarà no abans de 90 minuts ni després de 48 hores des de la seva aplicació.

L'adhesiu es presenta en proporcions adequades per a realitzar la mescla directament. Primer s'ha d'homogeneïtzar inicialment el component I per separat. Seguidament s'ha d'abocar el component II dintre del recipient del component I.

La mescla s'ha de fer intensament amb un agitador a 400 r.p.m. de velocitat de rotació màxima, durant 3 minuts com a mínim fins a obtenir la consistència desitjada.

Fig. 6.6 – Preparació de la mescla.

El següent pas consisteix en aplicar l'adhesiu sobre el suport i sobre el laminat. Sobre el suport i mitjançant l'ajuda d'una espàtula o rasa s'ha d'aplicar una capa de contacte d'aproximadament 1 mm d'espessor, cobrint-se petites irregularitats. D'existir grans cavitats hauran de tractar-se, prèviament, amb morter de reparació estructural.

Fig. 6.7 – Aplicació del MBrace Adhesiu.

Abans de finalitzar el procés s'haurà de retirar el film de plàstic protector abans d'aplicar el laminat. Sobre la capa estriada del MBrace Laminat s'ha d'aplicar una capa de 2-3 mm de MBrace Adhesiu. Es recomana l'ús de dispositius de fusta o metàl·lics, que a mode d'encofrat, garanteixen de forma precisa un espessor constant d'adhesiu.

Fig. 6.8 – Estat de la biga amb l'adhesiu aplicat.

Finalment, es col·loca el laminat en la seva ubicació final, pressionant fortament mitjançant un rodet de goma dura, fins aconseguir que vessi l'adhesiu sobrant pels laterals.

6.2.5. Col·locació de galgues sobre els laminats, soldadura de cables sobre galgues i connectors RJ45

La col·locació de les galgues requereix preparar la superfície dels laminats en els punts en els que es requereix fixar-les, el procediment general és el següent:

El primer pas és desengreixar perfectament amb un dissolvent tal com el CSM desengreixant o alcohol isopropílic GC-6. El desengreixant CSM és preferible sempre que sigui possible. Quan la superfície estigui lliure de greix es llima l'àrea de col·locació de la galga amb una llima 220 o 320 de carbur de sílice per a remoure qualsevol escama sobre el material base. S'aplica acondicionador A M-Prep fregant l'àrea de col·locació de la galga i mantenint la superfície humida mentre es frega, després es remouen els residus i l'acondicionador netejant suaument l'àrea d'enganxat de galga amb una gasa absorbent.

El procés d'humidificar i netejar ha de ser repetit, i posteriorment amb una llima 400 de carbur de sílice. Amb un llapis dur es pinta la marca d'alineament que es necessita sobre la proveta, després es rehumidifica la superfície amb acondicionador A i es frega en una direcció amb un bastonet de cotó fins que aquest ja no es descolori més amb el procés. Es remouen els residus i l'acondicionador netejant l'àrea d'enganxat de galga amb una gasa absorvent.

Durant el segon pas s'aplica Neutralitzador M-Prep sobre l'àrea d'enganxat de la galga mantenint la superfície humida distribuint amb un bastonet de cotó, es remou el neutralitzador netejant suaument a través de l'àrea d'enganxat de la galga, permetent que la gasa absorbeixi el neutralitzador.

Una vegada realitzats els passos anteriors ja es pot col·locar la galga, la qual s'extreu del seu embolcall transparent agafant la vora del suport de la galga amb unes pinces i es col·loca boca avall la cara a enganxar sobre una placa de vidre netejada químicament o en una caixa buida de galgues. Per incorporar una Terminal de soldat, s'ha de col·locar sobre la placa de manera adjacent a la galga, com es mostra en la *fig.6.9*. S'ha de deixar un espai d'aproximadament 2 mm entre el suport de la galga y la Terminal, i s'usa com a portador un tros de 100 mm de cinta PCT-2M per a instal·lació de galgues per ajudar a posicionar la galga i la Terminal. Es fixa un extrem de la cinta a la placa de vidre darrera de la galga i la terminal i es llisca sobre la terminal. Cuidadosament s'aixeca la cinta fins un angle d'aproximadament 45º respecte de la placa de vidre, portant-se la galga amb ella. Es posiciona l'acoblament cinta-galga de mode que les marques triangulars d'alineament de la galga queden sobre les línies marcades de la proveta. Es manté la cinta a un angle petit i es llisca l'acoblament sobre la superfície de la proveta.

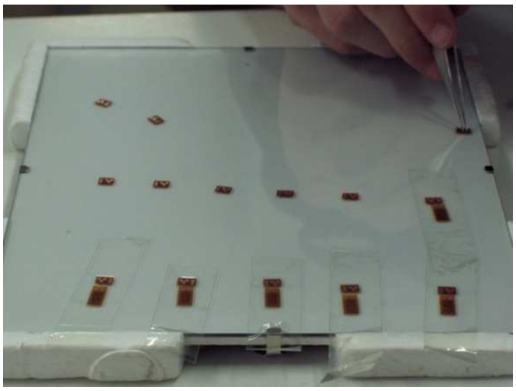


Fig. 6.9 – Preparació de les galgues.

Col·locada ja la galga en la seva posició, es prepara l'adhesiu AE-10 que cura a +20ºC en 6 hores, amb una capacitat d'elongació d'aproximadament el 6%.

Posteriorment amb adhesiu es cobreix la proveta, el suport de la galga i de la terminal, i immediatament després d'aplicar-lo sobre la galga i la proveta es llisca una gasa suaument sobre l'acoblament cinta-galga col·locant cap avall el suport de la galga sobre les marques d'alineament de la proveta, i es realitza una pressió ferma amb els dits sobre la galga, ja que l'adhesiu és bastant viscós. Per a un desenvolupament òptim de l'enganxat és desitjable una capa molt prima

d'adhesiu. Finalment es col·loca un coixinet de goma de silicona i una placa de suport sobre la instal·lació de la galga. La goma de silicona ha de ser suau i al menys de 3 mm d'espessor, això permetrà que la força de sujecció s'estengui uniformement sobre la galga; s'aplica força a través d'una abraçadora o d'un pes mort fins aconseguir una pressió uniforme de contacte de 35 a 135 KN/m^2.

Fig. 6.10 – Col·locació de les galgues sobre el laminat de fibra de carboni.

En la *fig.6.10* es mostren les galgues ja adherides als laminats; en aquest cas es prefereix primer col·locar les galgues sobre el laminat i després procedir a la fixació d'aquests sobre la biga de formigó amb la finalitat de facilitar el procediment. També és possible realitzar el procés d'enganxat de galgues sobre els laminats quan aquests es troben ja subjectats a la biga de formigó armat.

Una vegada que es tenen les galgues adherides al laminat, s'ha de procedir a la col·locació dels cables i connectors a cada galga, per la qual s'han de soldar els cables a les terminals de les galgues i es col·loquen els connectors RJ45 en disposició de tipus a tres cables per als adquiridors de dades Spider 8 i en disposició de quatre cables per a l'equip MGC Plus.

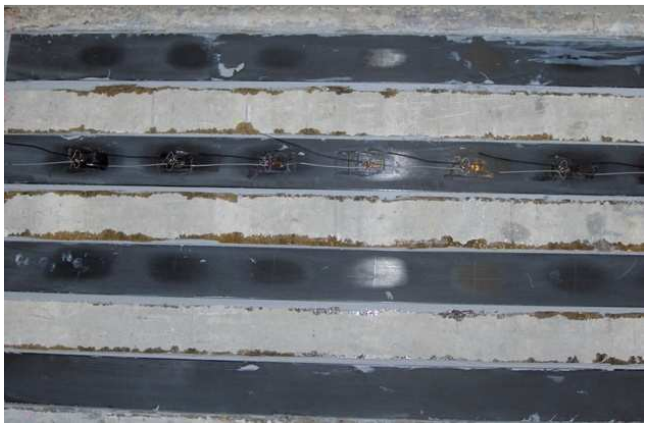


Fig. 6.11 – Soldat de cables.

En la *fig.6.12* es mostra una connexió a tres cables. L'ús dels connectors RJ45 ens permet major marge de maniobra, al col·locar-los queden llestos per a connectar els cables una vegada que la biga està en la seva posició final previ a l'assaig.

Fig. 6.12 – Connexió RJ45 (3 cables) i estat general de l'aplicació.

Es pot apreciar que la col·locació dels connectors ens permet realitzar qualsevol revisió o correcció de cada una de les terminals.

En les següents imatges es detalla la configuració de galgues usada en els assajos, col·locant 40 galgues sobre els laminats.

Fig. 6.13 – Vista general de la configuració de galgues.

Fig. 6.14 – Vista general dels connectors RJ45..

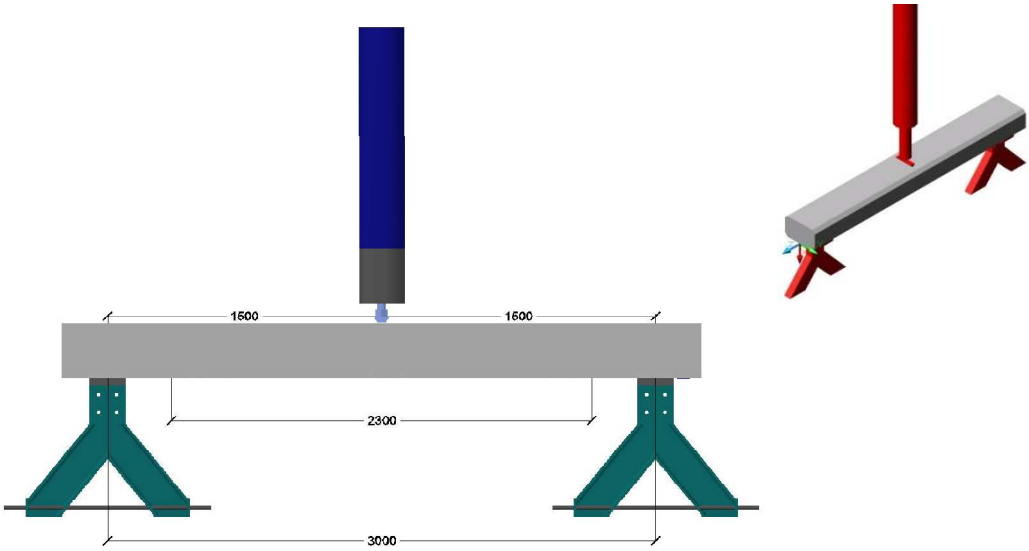
6.3. Muntatge de l'assaig i resultats

6.3.1. Assaig biga 01

El primer assaig es realitza sobre una biga de 3,5 metres de longitud, del tipus V-02 (*veure fig.6.1*), i sense col·locar cap tipus de reforç estructural, a fi d'obtenir la informació de la càrrega última resistent. Els extrems s'assentaran sobre un suport de neoprè amb dimensions 200 x 200 x 40 mm.

Fig. 6.15 – Muntatge de la biga a l'assaig i recolzament elastomèric a l'extrem.

L'esquema de muntatge de l'assaig és el següent:



La biga 01 és l'espècimen de control, pel qual es realitza l'assaig per a determinar la resistència última de l'element i poder comparar-lo amb els assajos posteriors (biga 02 i 03 amb reforç de fibra de carboni). L'esquema de càrrega és de tres punts, dos suports simples i una càrrega puntual en el centre de l'element.

Es col·loquen mesuradors de desplaçament lineal (LVDT) en els suports i en el centre de la biga per a determinar la relació càrrega-desplaçament en el punt de màxim desplaçament, centre de la biga.

Fig. 6.16 – Vista del mesurador de desplaçament lineal (LVDT).

L'actuador de càrrega té una capacitat de 500 KN adequat en el seu extrem amb un semi rodet per aplicar la càrrega.

El procés de càrrega es realitza mitjançant control de desplaçament amb la finalitat d'obtenir el comportament posterior a la càrrega màxima resistent.

En la *fig.6.17* s'aprecia l'aparició de les fissures per flexió a la part central amb una separació entre sí d'aproximadament 120 mm. Les dues fissures centrals parteixen de la cara inferior amb direcció vertical i acaben en la zona de compressió màxima aproximadament 220 mm a partir de la cara inferior.

Fig. 6.17 – Apreciació de les primeres fissures.

Les dues fissures subseqüents es formen a 130 mm a partir de les centrals, en direcció vertical fins una longitud d'aproximadament 170 mm, a partir de la qual s'inclinen fins al punt d'aplicació de la càrrega, creuant-se amb les dues primeres fissures centrals.

Les fissures mostrades a la *fig.6.17* corresponen a una càrrega de 140 KN, amb un desplaçament vertical de 9 mm, el qual significa un 77,7% de la càrrega màxima resistent.

Fig. 6.18 – Fissures en càrrega màxima.

En la *fig.6.18* es mostren les fissures que es formen després d'assolir la càrrega màxima de 180 KN amb una fletxa de 45 mm en el centre de la biga.

Posterior a l'assoliment de càrrega màxima, la biga manté una capacitat portant decreixent dels 180 KN fins els 150 KN (83,3%) amb una fletxa màxima de 112 mm, moment en el que es produeix el col·lapse de la biga, a l'arribar la ruptura de l'armat de la cara inferior.

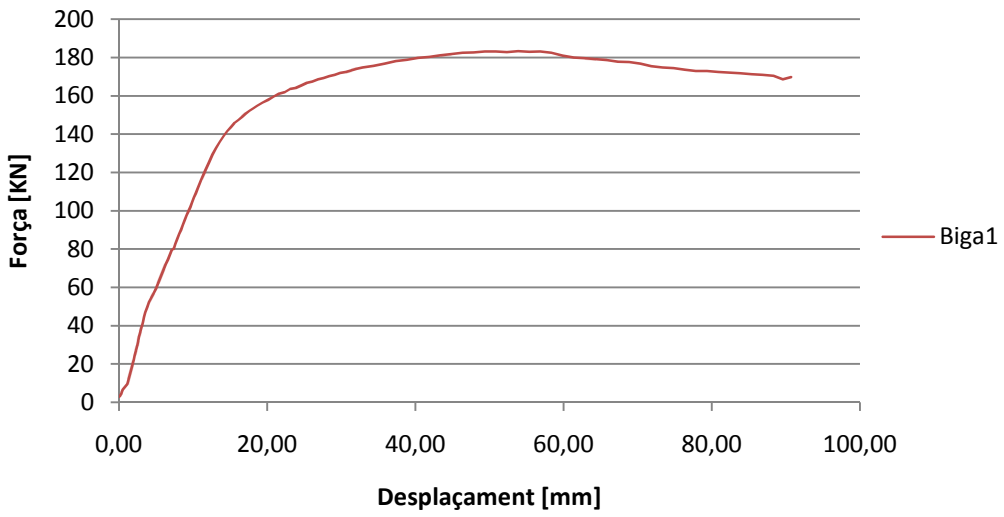
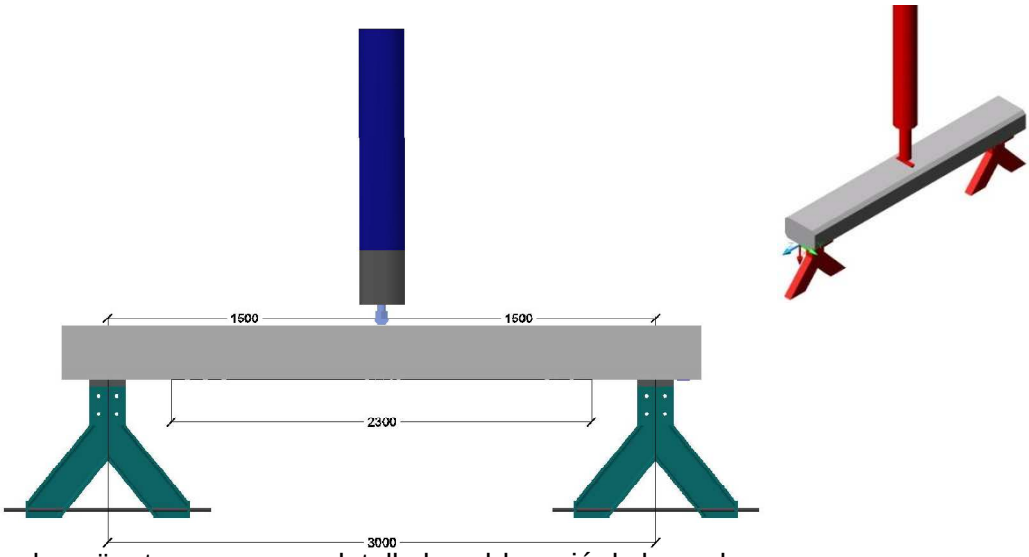


Fig. 6.19 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 01

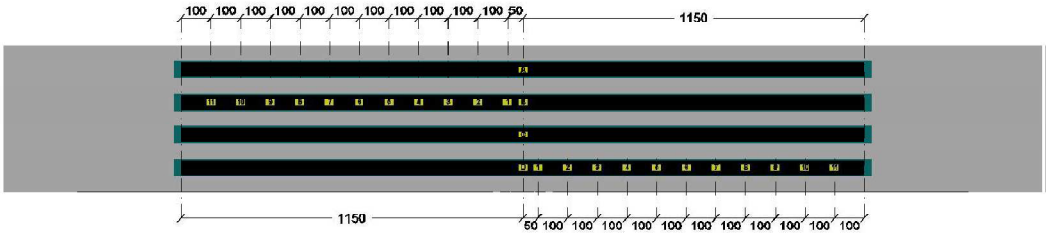
6.3.2. Assaig biga 02

El segon assaig es realitza sobre una biga de 3,5 metres de longitud, del tipus V-02 (*veure fig.6.1*), reforçada estructuralment amb laminats de fibra de carboni (CFRP), a fi d'obtenir la informació de la càrrega última resistent. Els extrems s'assentaran sobre un suport de neoprè amb dimensions 200 x 200 x 40 mm.

L'esquema de muntatge de l'assaig és el següent:



En el següent esquema es detalla la col·locació de les galgues:



Conformat amb 4 laminats distribuïts separadament en 50 mm, col·locant sobre cada laminat 12 galgues extensomètriques CEA-06-250UN-350 amb una distribució simètrica, més dues galgues addicionals en el centre de la longitud dels laminats no instrumentats.

Aquesta biga està instrumentada amb 26 galgues com es mostra en la *fig.6.20*, també es col·loquen 4 mesuradors de desplaçament lineal en la posició L/4, dos a cada costat i un en cada suport; i dos sensors làser per a mesures de desplaçament per triangulació en el centre de la biga, un a cada costat.

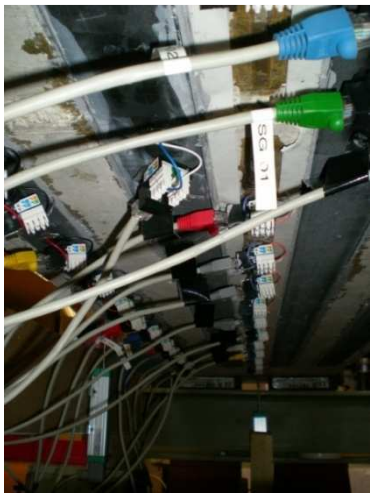


Fig. 6.20 – Muntatge de les galgues.

Aquest assaig es realitza mitjançant el control de càrrega de 0 a 150 KN i el control de desplaçament fins a la ruptura de la biga, per poder obtenir el comportament posterior de la càrrega màxima resistent.

Per a la captura de les dades d'extensometria es van usar tres sistemes Spider 8 amb capacitat de 8 canals cada un i dos concentradors de dades 814i amb capacitat per a 8 canals cada un, connectats aquest últims a un MGCPlus.

El sistema MGCPlus també conté un receptor 815i per a rebre les dades de desplaçament enviats pels mesuradors de desplaçament lineal (LVDT). La senyal enviada pels sensors làser també es captura en el sistema MGCPlus per a que junt amb les senyals de càrrega i desplaçament enviades per l'actuador, així com totes les altres anomenades, s'emmagatzemin en un sol arxiu.

Com s'ha comentant anteriorment,l'assaig s'inicia amb control de càrrega i durant la primera part del procés, des de 0 fins els 80 KN, s'aprecia un comportament lineal entre la càrrega i el desplaçament central i no s'aprecien fissures a simple vista.

A l'assolir els 90 KN es poden apreciar les primeres fissures, una a cada costat a partir del centre, a una distància de 110 mm. Als 105 KN i 4 mm de fletxa central s'observen 6 fissures a cada costat del centre a les següents distàncies; 110 mm, 240 mm, 380 mm, 550 mm, 710 mm, 850 mm; la distància mitjana entre fissures per a aquest estat de càrrega és de 150 mm.

En la *fig.6.21* es poden apreciar les fissures corresponents a l'estat de càrrega de 105 KN, a partir d'aquest valor les fissures s'obren proporcionalment

al increment de càrrega fins arribar al valor de la càrrega màxima resistent de 245,6 KN, moment en el que es desadhesionen els laminats. A la *fig.6.21* s'aprecia el moment de despreniment dels laminats i es pot veure que la configuració de les fissures roman igual a l'estat anterior.

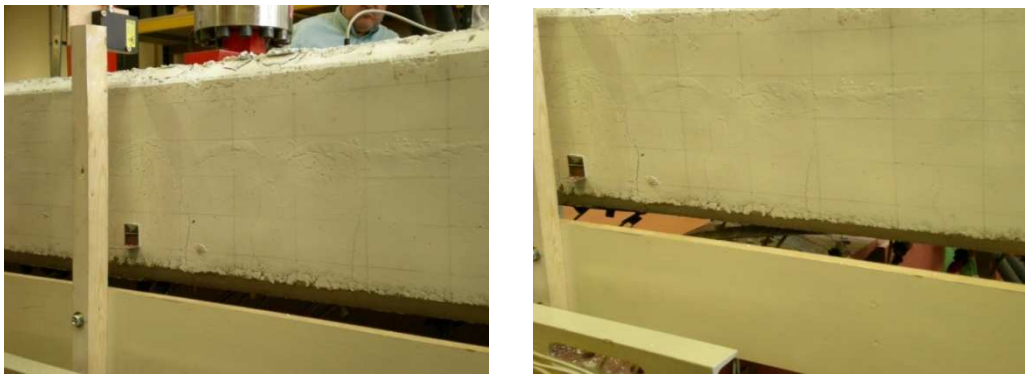


Fig. 6.21 – Fissures en càrrega P=105 KN.

En la *fig.6.22* es pot veure que s'han desadherit els laminats arrencant amb ells una capa de formigó, el que demostra que l'adhesiu ha sigut capaç de transmitir les forces de tracció a la biga.

Fig. 6.22 – Despreniment dels laminats.

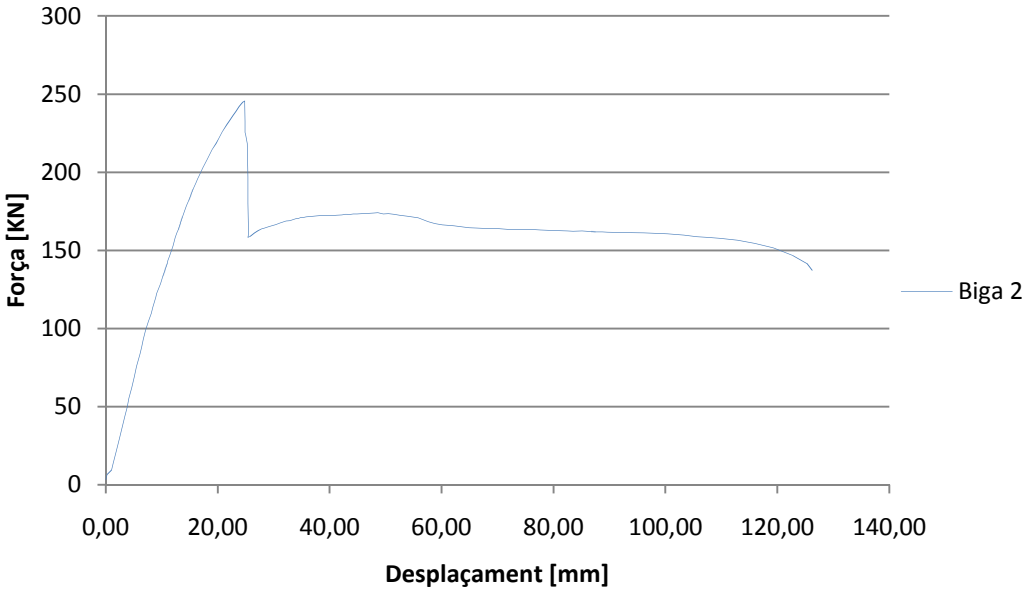


Fig. 6.23 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 02

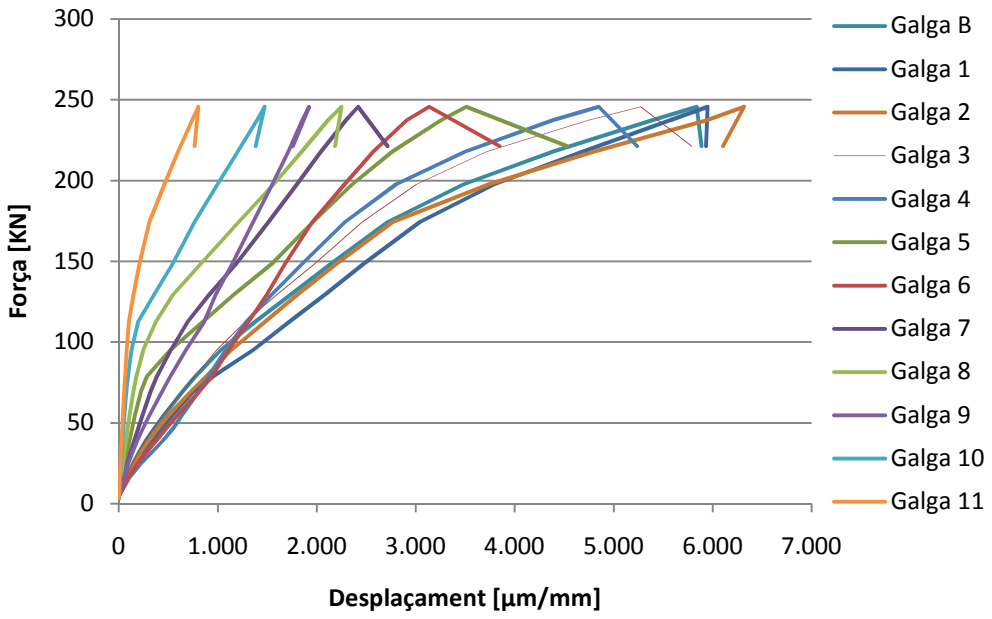


Fig. 6.24 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 02 (Galgues laminat interior)

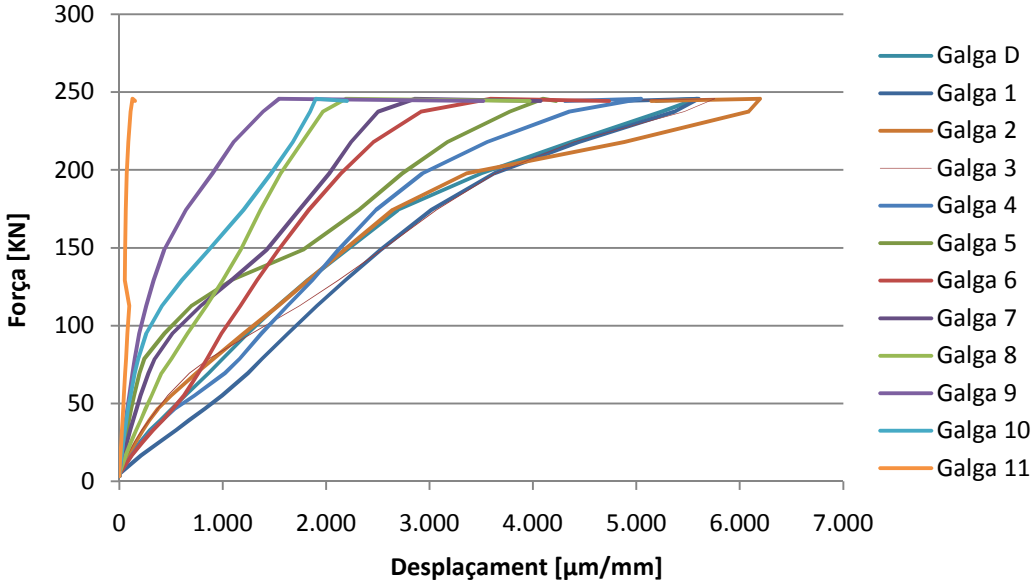


Fig. 6.25 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 02 (Galgues laminat exterior)

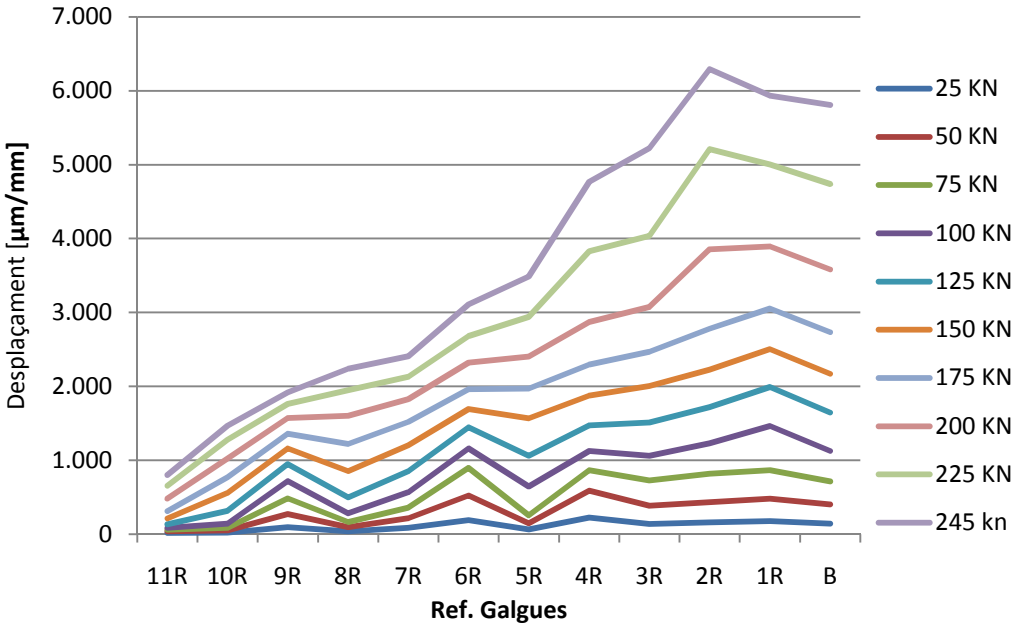


Fig. 6.26 – Gràfic Strain Iso-load Biga 02 (Galgues laminat interior)

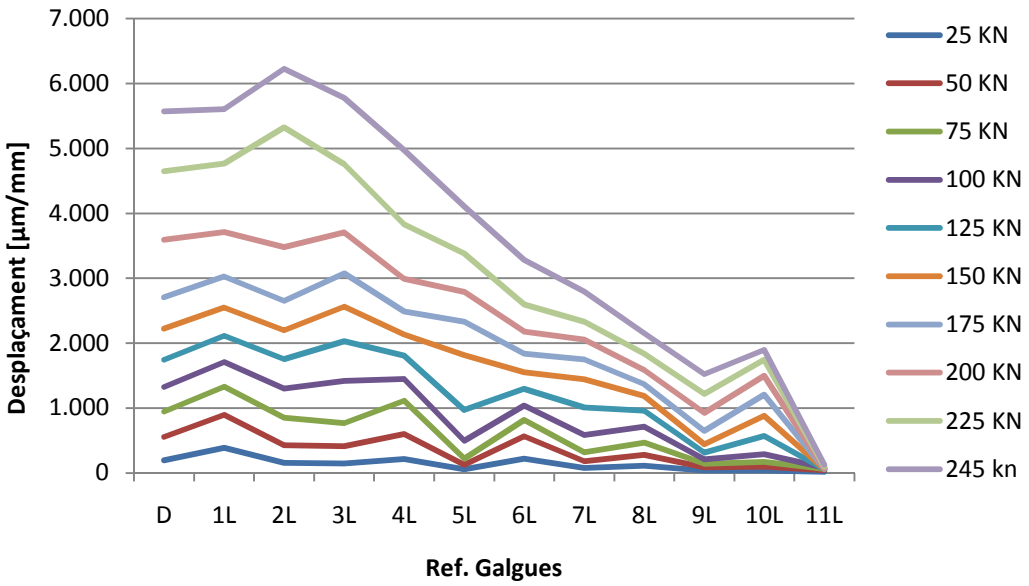


Fig. 6.27 – Gràfic Strain Iso-load Biga 02 (Galgues laminat exterior)

6.3.3. Assaig biga 03

El tercer assaig es realitza sobre una biga de 3,5 metres de longitud, del tipus V-02 (*veure fig.6.1*), reforçada estructuralment amb laminats de fibra de carboni (CFRP), a fi d'obtenir la informació de la càrrega última resistent. Els extrems s'assentaran sobre uns rodets d'acer.

L'esquema de muntatge de l'assaig és el següent:

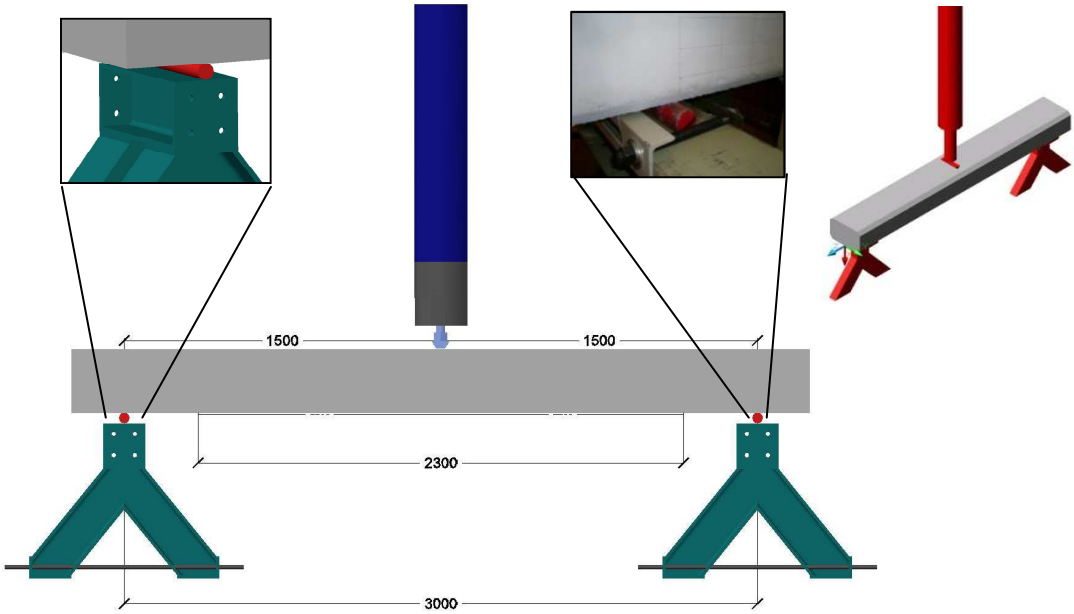
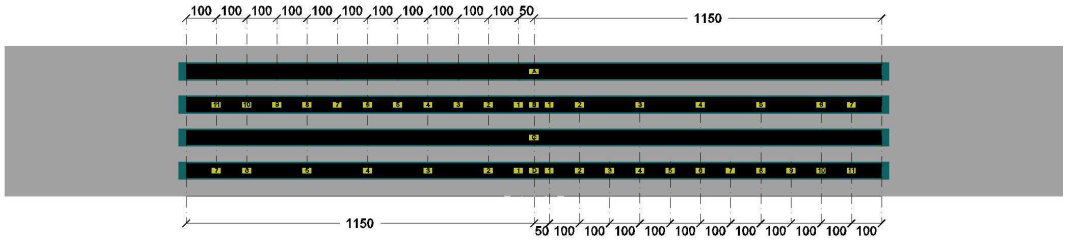


Fig. 6.28 – Vista general muntatge de l'assaig.

La biga és instrumentada amb 40 galgues extensomètriques CEA-06-250UN-350, 26 d'elles amb la mateixa configuració que la biga 02, i les 14 galgues restants distribuïdes simètricament sobre un laminat lateral i un central com es mostra en els següents esquemes:



También es col·loquen 4 mesuradors de desplaçament lineal en la posició L/4, dos a cada costat i un en cada suport; i dos sensors làser per a mesures de desplaçament per triangulació en el centre de la biga, un a cada costat.

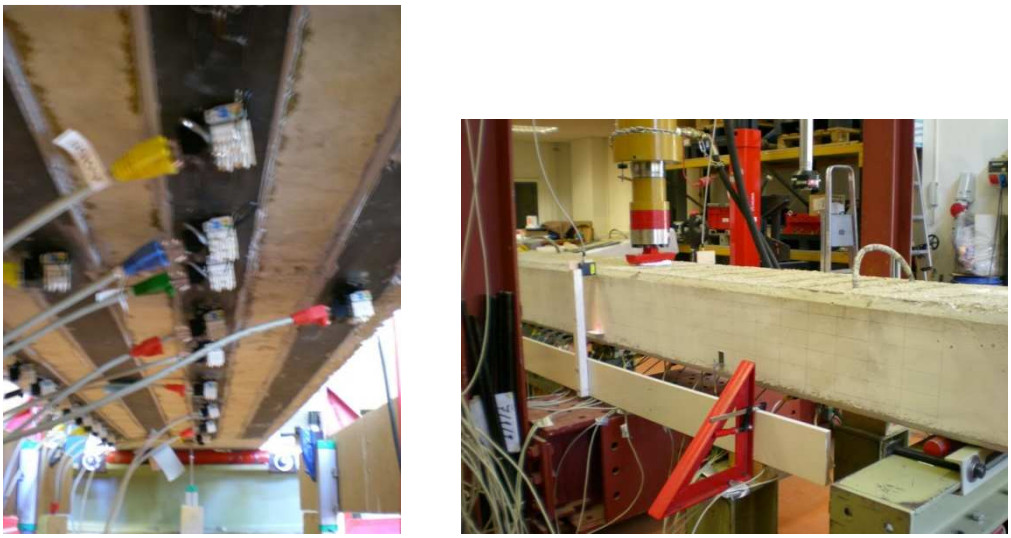


Fig. 6.29 – Muntatge de les galgues i configuració general de l'assaig.

Aquest assaig es realitza mitjançant el control de càrrega de 0 a 150 KN i el control de desplaçament fins a la ruptura de la biga, per poder obtenir el comportament posterior de la càrrega màxima resistent.

Per a la captura de les dades d'extensometria es van usar tres sistemes Spider 8 amb capacitat de 8 canals cada un i dos concentradors de dades 814i amb capacitat per a 8 canals cada un, connectats aquest últims a un MGCPlus.

El sistema MGCPlus també conté un receptor 815i per a rebre les dades de desplaçament enviats pels mesuradors de desplaçament lineal (LVDT). La senyal enviada pels sensors làser també es captura en el sistema MGCPlus per a que junt amb les senyals de càrrega i desplaçament enviades per l'actuador, així com totes les altres anomenades, s'emmagatzemin en un sol arxiu.

Com s'ha comentant anteriorment,l'assaig s'inicia amb control de càrrega i durant la primera part del procés, des de 0 fins els 70 KN, s'aprecia un comportament lineal entre la càrrega i el desplaçament central i no s'aprecien fissures a simple vista.

A l'assolir els 85 KN es poden apreciar les primeres fissures, una a cada costat a partir del centre, a una distància de 100 mm. Als 100 KN i 5 mm de fletxa central s'observen 6 fissures a cada costat del centre a les següents distàncies; 100 mm, 250 mm, 370 mm, 540 mm, 720 mm, 860 mm; la distància mitjana entre fissures per a aquest estat de càrrega és de 143 mm.

A partir de l'estat de càrrega de 105 KN es poden apreciar fissures. A partir d'aquest valor les fissures s'obren proporcionalment al increment de càrrega fins arribar al valor de la càrrega màxima resistent de 222,4 KN, moment en el que es desadhesionen els laminats. A la *fig.6.30* s'aprecia el moment de despreniment dels laminats i es pot veure que la configuració de les fissures roman igual a l'estat anterior.

En la *fig.6.30* es pot veure que s'han desadherit els laminats arrencant amb ells una capa de formigó, el que demostra que l'adhesiu ha sigut capaç de transmitir les forces de tracció a la biga.

Fig. 6.30 – Despreniment dels laminats.

Fig. 6.31 – Estat de la biga després del col·lapse.

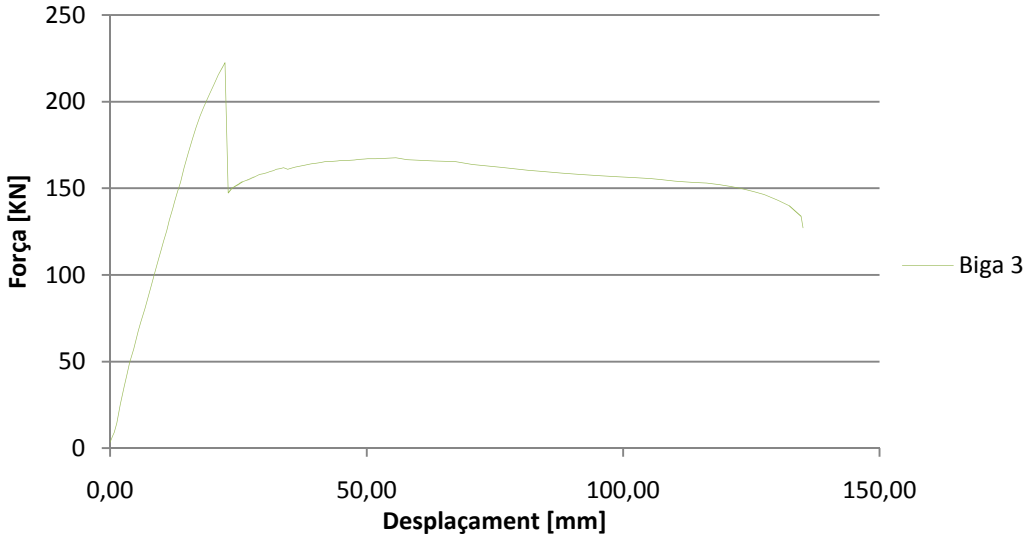


Fig. 6.32 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 03

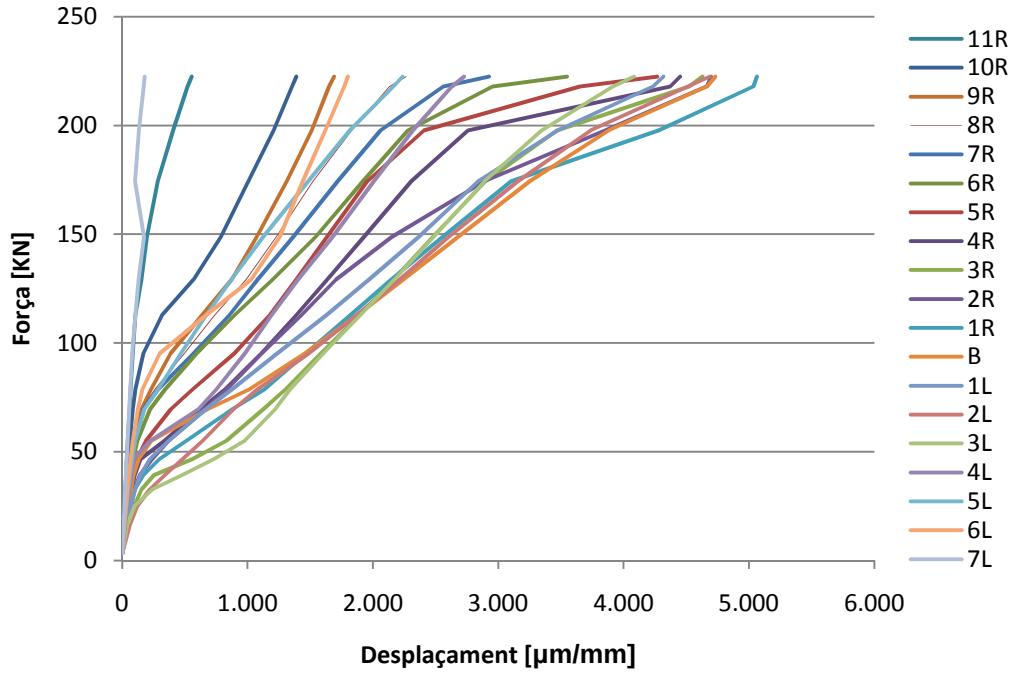


Fig. 6.33 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 03 (Galgues laminat interior)

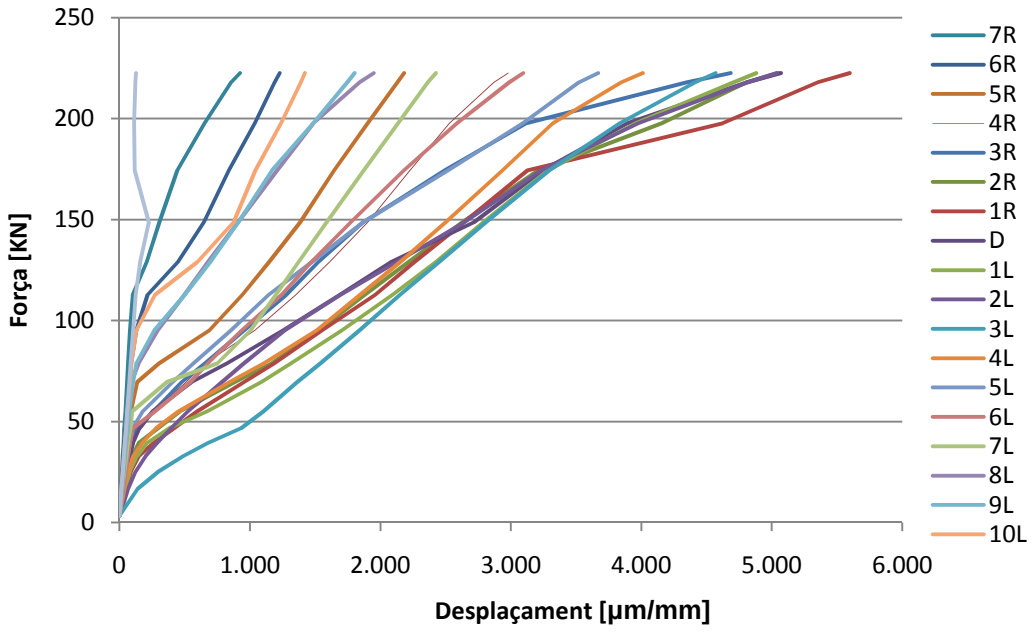


Fig. 6.34 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 03 (Galgues laminat exterior)

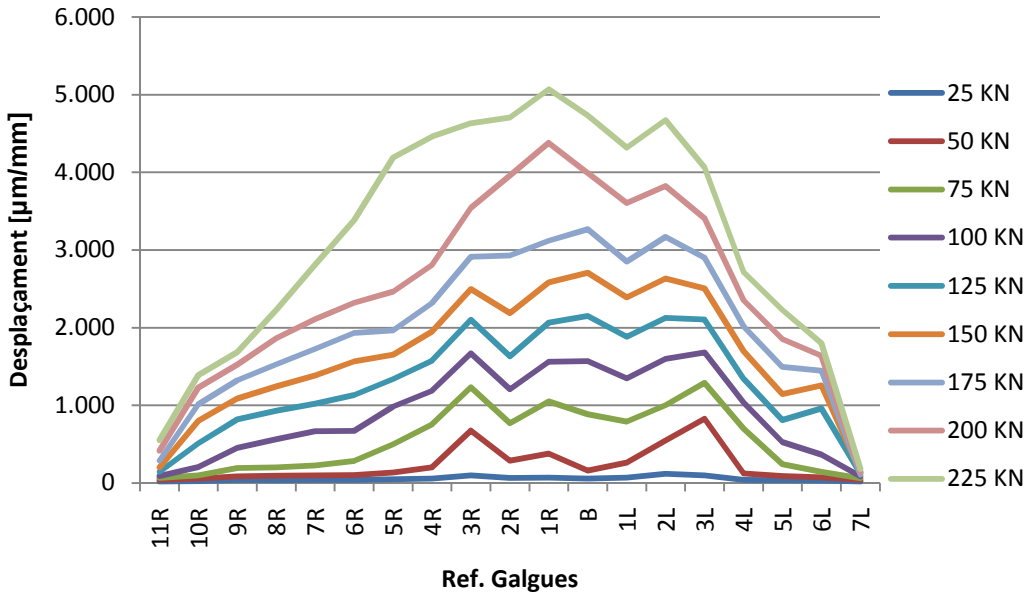


Fig. 6.35 – Gràfic Strain Iso-load Biga 03 (Galgues laminat interior)

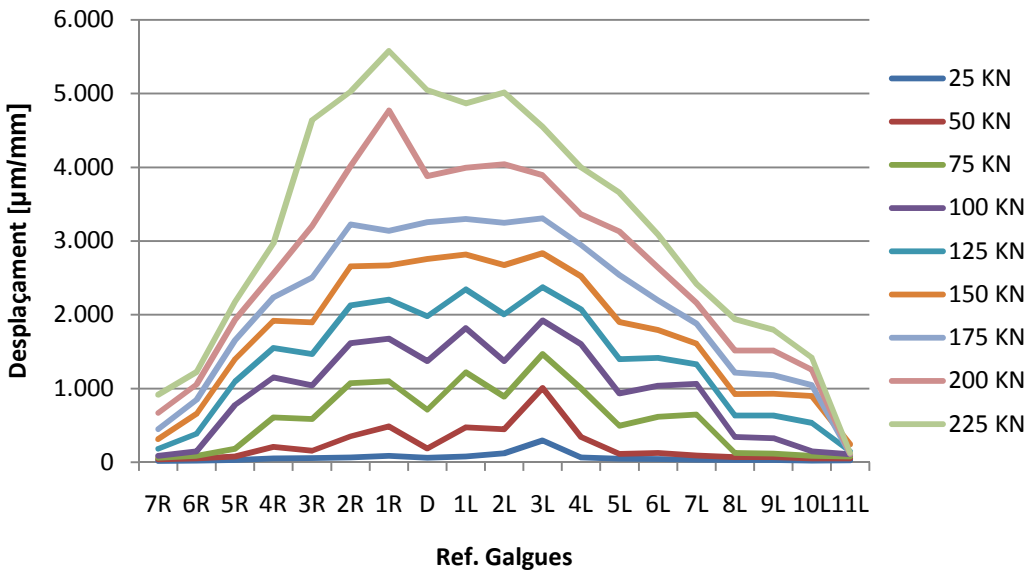
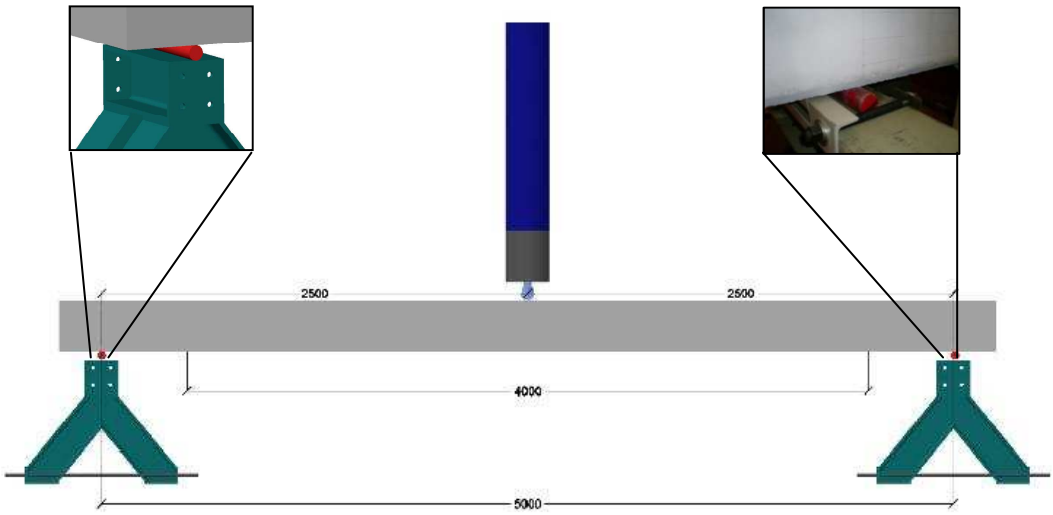


Fig. 6.36 – Gràfic Strain Iso-load Biga 03 (Galgues laminat exterior)

6.3.4. Assaig biga 04

El quart assaig es realitza sobre una biga de 5,5 metres de longitud, del tipus V-02 (*veure fig.6.1*), reforçada estructuralment amb laminats de fibra de carboni (CFRP), a fi d'obtenir la informació de la càrrega última resistent. Els extrems s'assentaran sobre uns rodets d'acer.

L'esquema de muntatge de l'assaig és el següent:



La biga 04 s'assaja amb un esquema de càrrega puntual de forma estàtica fins assolir 25 KN, en aquest instant es marquen les esquerdes sobre la biga per poder posicionar les galgues en el següent pas; després es repara la biga amb 4 laminats de 4,0 metres de longitud distribuïts equidistantment en la cara inferior de la biga, i es col·loquen galgues extensomètriques sobre els laminats en la ubicació de cada esquerda.

L'esquema de la biga 04 està conformat amb 4 laminats distribuïts amb una separació lliure de 50 mm, col·locant sobre cada laminat central 12 galgues extensomètriques CEA-06-250UN-350, més dues galgues addicionals en el centre de la longitud dels laminats laterals.

Es col·loquen mesuradors de desplaçament lineal (LVDT) en els suports i en el centre de la biga per a determinar la relació càrrega-desplaçament en el punt de màxim desplaçament, centre de la biga.

L'actuador de càrrega té una capacitat de 500 KN adequat en el seu extrem amb un semi rodet per aplicar la càrrega.

El procés de càrrega es realitza mitjançant control de desplaçament amb la finalitat d'obtenir el comportament posterior a la càrrega màxima resistent.

En la *fig.6.37* s'aprecia l'aparició de les fissures per flexió a la part central amb una separació entre sí d'aproximadament 155 mm. Les dues fissures centrals parteixen de la cara inferior amb direcció vertical i acaben en la zona de compressió màxima aproximadament 200 mm a partir de la cara inferior.

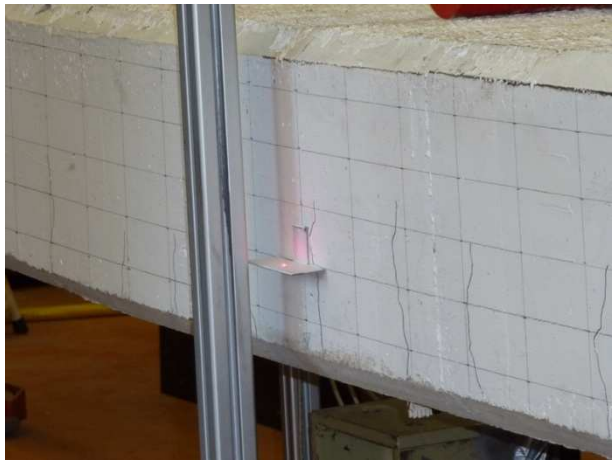


Fig. 6.37 – Apreciació de les primeres fissures a la part central.

Les fissures subseqüents es formen a 150 mm a partir de les centrals, en direcció vertical fins una longitud d'aproximadament 160 mm.

En la *fig.6.38* es mostren les fissures que es formen després d'assolir la càrrega màxima de 152 KN amb una fletxa de 63 mm en el centre de la biga.

Fig. 6.38 – Fissures en càrrega màxima.

Posterior a l'assoliment de càrrega màxima, la biga manté una capacitat portant decreixent dels 152 KN fins els 92 KN (60,5%) amb una fletxa màxima de 210 mm, moment en el que es produeix el col·lapse de la biga, a l'arribar la ruptura de l'armat de la cara inferior.

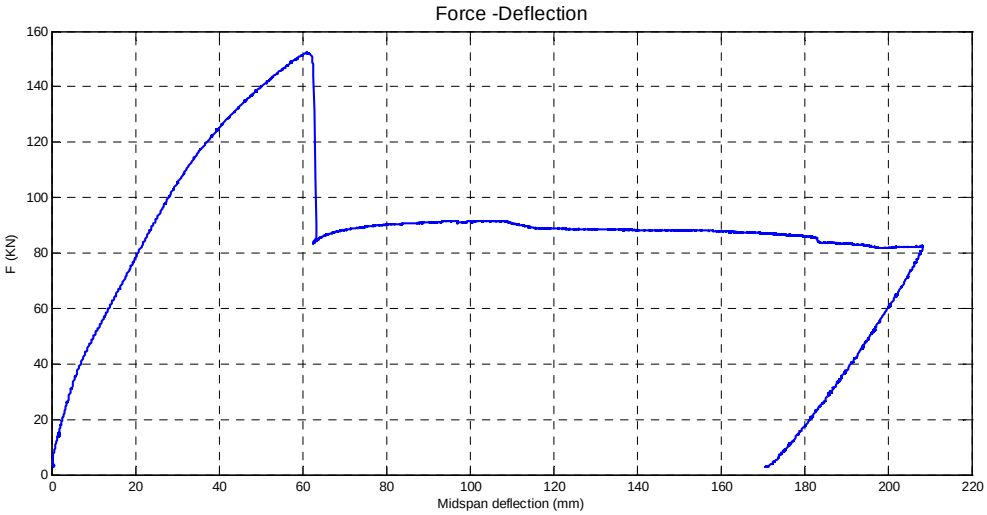


Fig. 6.39 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 04

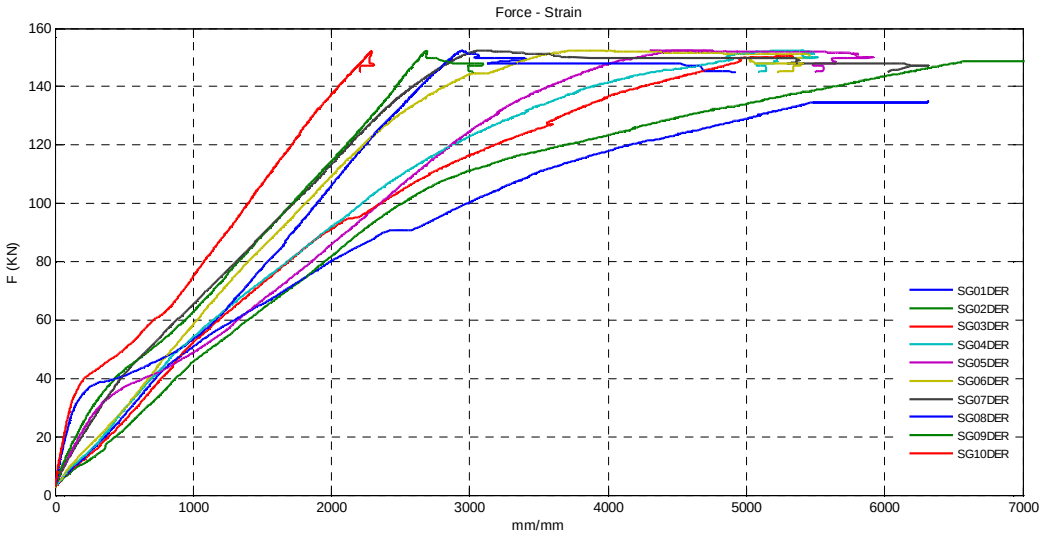


Fig. 6.40 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 04 (Galgues laminat interior)

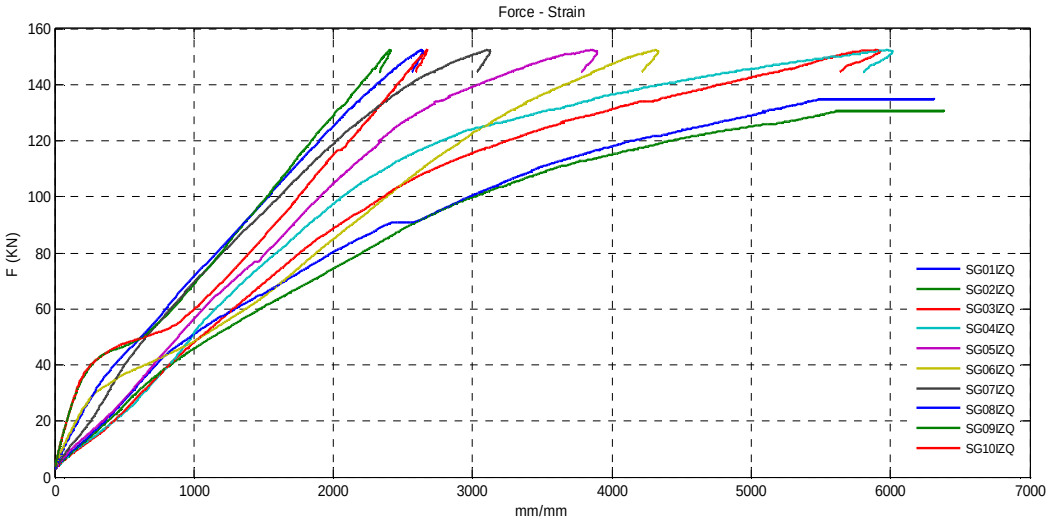


Fig. 6.41 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 04 (Galgues laminat exterior)

6.3.5. Assaig biga 05

El cinquè assaig es realitza sobre una biga de 5,5 metres de longitud, del tipus V-02 (*veure fig.6.1*), reforçada estructuralment amb laminats de fibra de carboni (CFRP), a fi d'obtenir la informació de la càrrega última resistent. Els extrems s'assentaran sobre uns rodets d'acer.

L'esquema de muntatge de l'assaig és el següent:

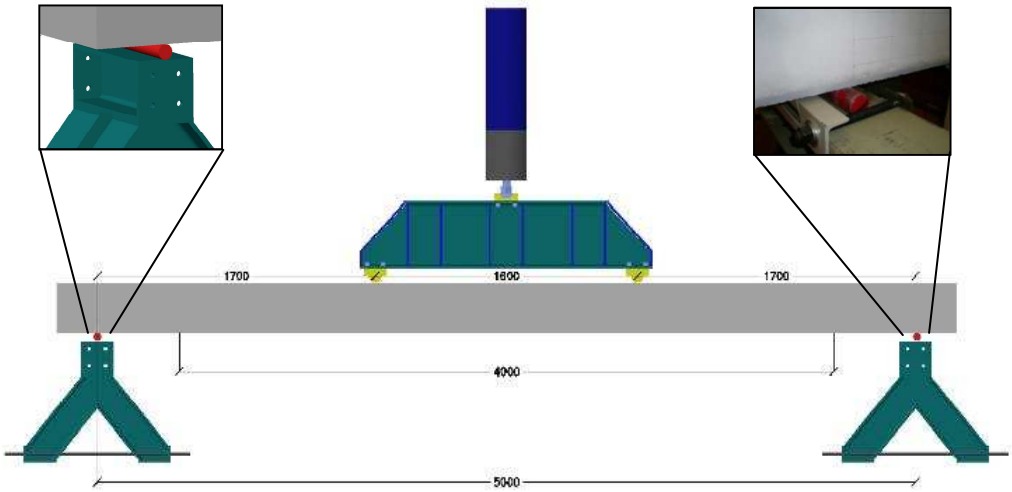


Fig. 6.42 – Vista general configuració assaig.

La biga 05 s'assaja amb un esquema de càrrega de quatre punts fins assolir 25 KN, en aquest instant es marquen les esquerdes sobre la biga per poder posicionar les galgues en el següent pas; després es repara la biga amb 4 laminats de 4,0 metres de longitud distribuïts equidistantment en la cara inferior de la biga, i es col·loquen galgues extensomètriques sobre els laminats en la ubicació de cada esquerda.

Aquest assaig es realitza mitjançant el control de càrrega de 0 a 150 KN i el control de desplaçament fins a la ruptura de la biga, per poder obtenir el comportament posterior de la càrrega màxima resistent.

Aquesta biga està instrumentada amb 26 galgues com es mostra en la *fig.6.43*, també es col·loquen 4 mesuradors de desplaçament lineal en la posició L/4, dos a cada costat i un en cada suport; i dos sensors làser per a mesures de desplaçament per triangulació en el centre de la biga, un a cada costat.

Fig. 6.43 – Vista configuració de galgues.

Per a la captura de les dades d'extensometria es van usar tres sistemes Spider 8 amb capacitat de 8 canals cada un i dos concentradors de dades 814i amb capacitat per a 8 canals cada un, connectats aquest últims a un MGCPlus.

El sistema MGCPlus també conté un receptor 815i per a rebre les dades de desplaçament enviats pels mesuradors de desplaçament lineal (LVDT). La senyal enviada pels sensors làser també es captura en el sistema MGCPlus per a que junt amb les senyals de càrrega i desplaçament enviades per l'actuador, així com totes les altres anomenades, s'emmagatzemin en un sol arxiu.

Com s'ha comentant anteriorment,l'assaig s'inicia amb control de càrrega i durant la primera part del procés, des de 0 fins els 140 KN, s'aprecia un comportament lineal entre la càrrega i el desplaçament central i no s'aprecien fissures a simple vista.

A l'assolir els 150 KN es poden apreciar les primeres fissures, una a cada costat a partir del centre, a una distància de 150 mm.

En la *fig.6.44* es poden apreciar les fissures corresponents a l'estat de càrrega de 150 KN, a partir d'aquest valor les fissures s'obren proporcionalment al increment de càrrega fins arribar al valor de la càrrega màxima resistent de 207,3 KN, moment en el que es desadhesionen els laminats. A la *fig.6.45* s'aprecia el moment de despreniment dels laminats i es pot veure que la configuració de les fissures roman igual a l'estat anterior.

Fig. 6.44 – Fissures en càrrega P=150KN.

En la *fig.6.45* es pot veure que s'han desadherit els laminats arrencant amb ells una capa de formigó, el que demostra que l'adhesiu ha sigut capaç de transmetre les forces de tracció a la biga.

Fig. 6.45 – Despreniment dels laminats.

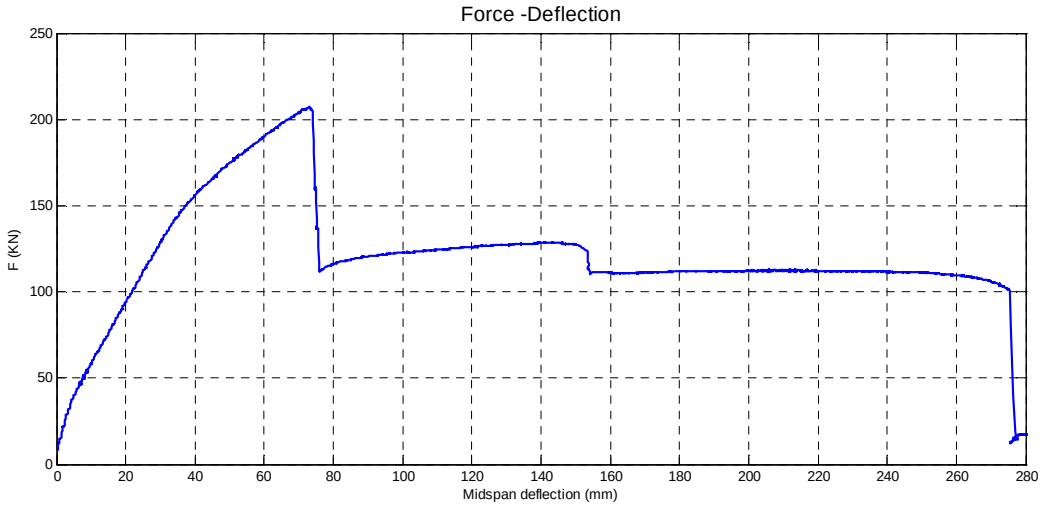


Fig. 6.46 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 05

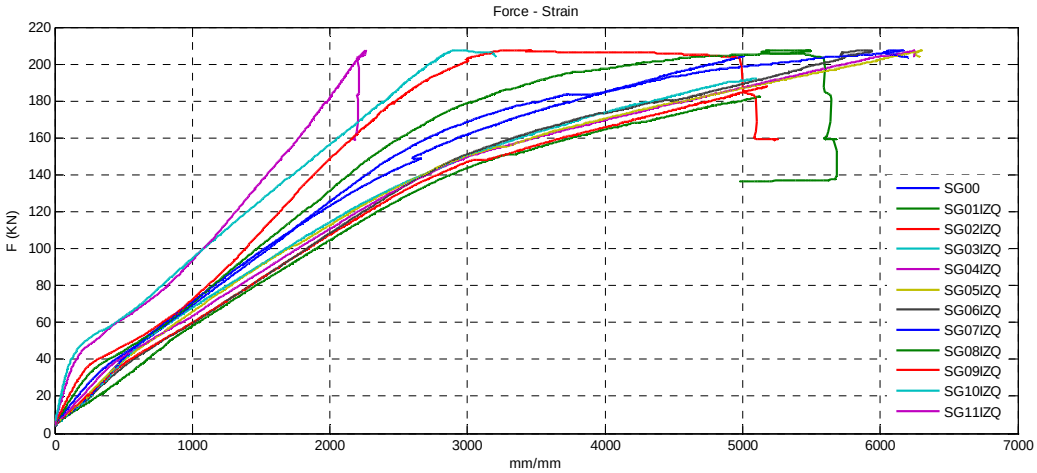


Fig. 6.47 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 05 (Galgues laminat interior)

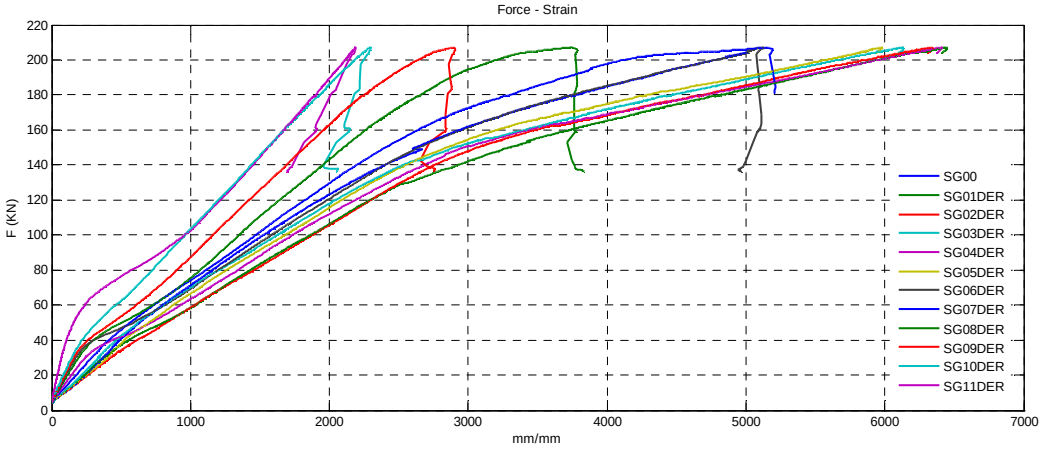
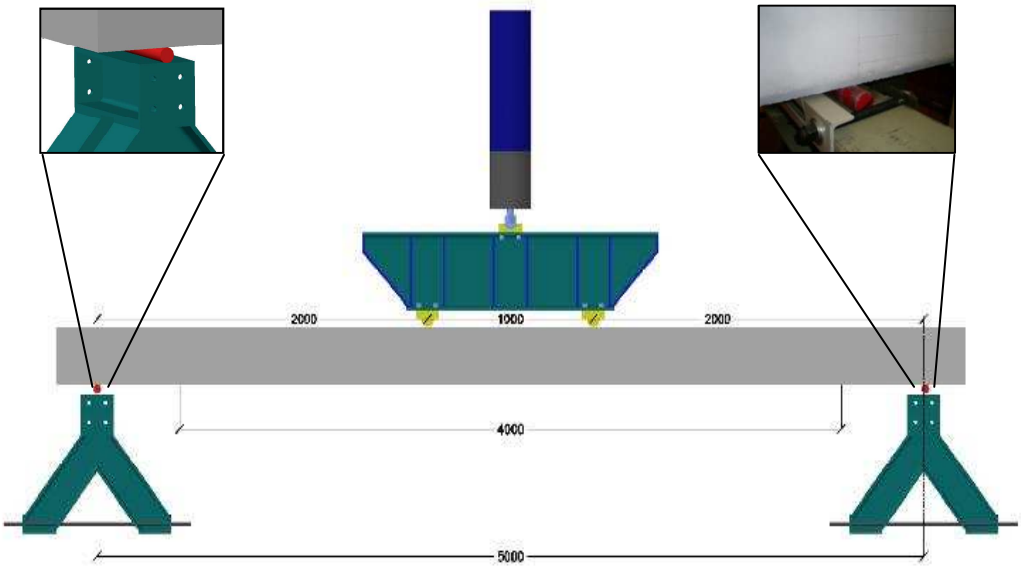


Fig. 6.48 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 05 (Galgues laminat exterior)

6.3.6. Assaig biga 06

El sisè assaig es realitza sobre una biga de 5,5 metres de longitud, del tipus V-02 (*veure fig.6.1*), reforçada estructuralment amb laminats de fibra de carboni (CFRP), a fi d'obtenir la informació de la càrrega última resistent. Els extrems s'assentaran sobre uns rodets d'acer.

L'esquema de muntatge de l'assaig és el següent:



La biga 06 s'assaja amb un esquema de càrrega de quatre punts fins assolir 25 KN, en aquest instant es marquen les esquerdes sobre la biga per poder posicionar les galgues en el següent pas; després es repara la biga amb 4 laminats de 4,0 metres de longitud distribuïts equidistantment en la cara inferior de la biga, i es col·loquen galgues extensomètriques sobre els laminats en la ubicació de cada esquerda.

Aquest assaig es realitza mitjançant el control de càrrega de 0 a 150 KN i el control de desplaçament fins a la ruptura de la biga, per poder obtenir el comportament posterior de la càrrega màxima resistent.

Aquesta biga està instrumentada amb 26 galgues, també es col·loquen 4 mesuradors de desplaçament lineal en la posició L/4, dos a cada costat i un en cada suport; i dos sensors làser per a mesures de desplaçament per triangulació en el centre de la biga, un a cada costat.

Per a la captura de les dades d'extensometria es van usar tres sistemes Spider 8 amb capacitat de 8 canals cada un i dos concentradors de dades 814i amb capacitat per a 8 canals cada un, connectats aquest últims a un MGCPlus.

El sistema MGCPlus també conté un receptor 815i per a rebre les dades de desplaçament enviats pels mesuradors de desplaçament lineal (LVDT). La senyal enviada pels sensors làser també es captura en el sistema MGCPlus per a que junt amb les senyals de càrrega i desplaçament enviades per l'actuador, així com totes les altres anomenades, s'emmagatzemin en un sol arxiu.

Com s'ha comentant anteriorment,l'assaig s'inicia amb control de càrrega i durant la primera part del procés, des de 0 fins els 130 KN, s'aprecia un comportament lineal entre la càrrega i el desplaçament central i no s'aprecien fissures a simple vista.

A l'assolir els 135 KN es poden apreciar les primeres fissures, una a cada costat a partir del centre, a una distància de 150 mm.

En la *fig.6.49* es poden apreciar les fissures corresponents a l'estat de càrrega de 135 KN, a partir d'aquest valor les fissures s'obren proporcionalment al increment de càrrega fins arribar al valor de la càrrega màxima resistent de 180,5 KN, moment en el que es desadhesionen els laminats. A la *fig.6.49* s'aprecia el moment de despreniment dels laminats i es pot veure que la configuració de les fissures roman igual a l'estat anterior.

En la *fig.6.49* es pot veure que s'han desadherit els laminats arrencant amb ells una capa de formigó, el que demostra que l'adhesiu ha sigut capaç de transmetre les forces de tracció a la biga.

Fig. 6.49 – Fissures a l'estat de càrrega P=135KN i despreniment dels laminats.

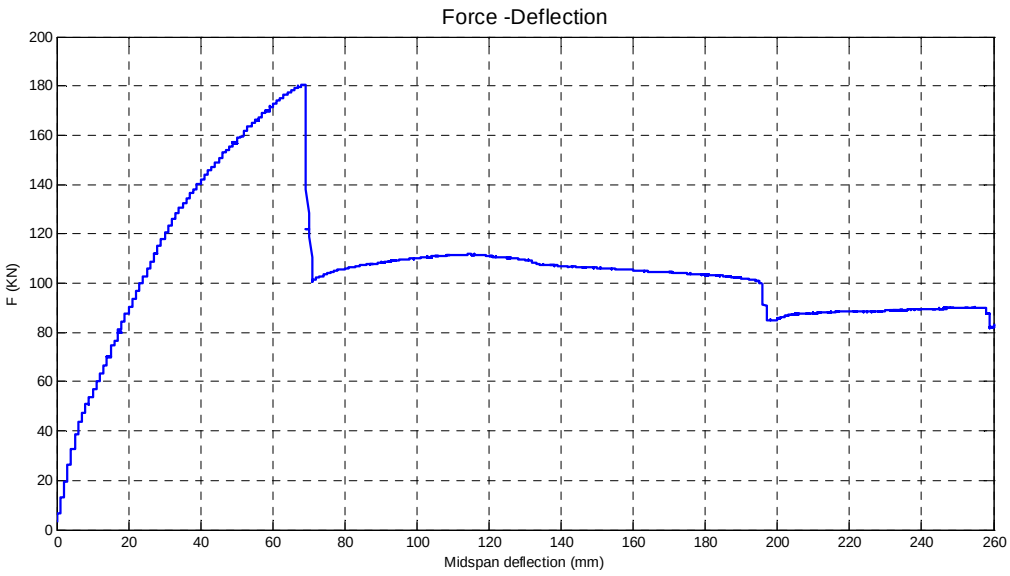


Fig. 6.50 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 06

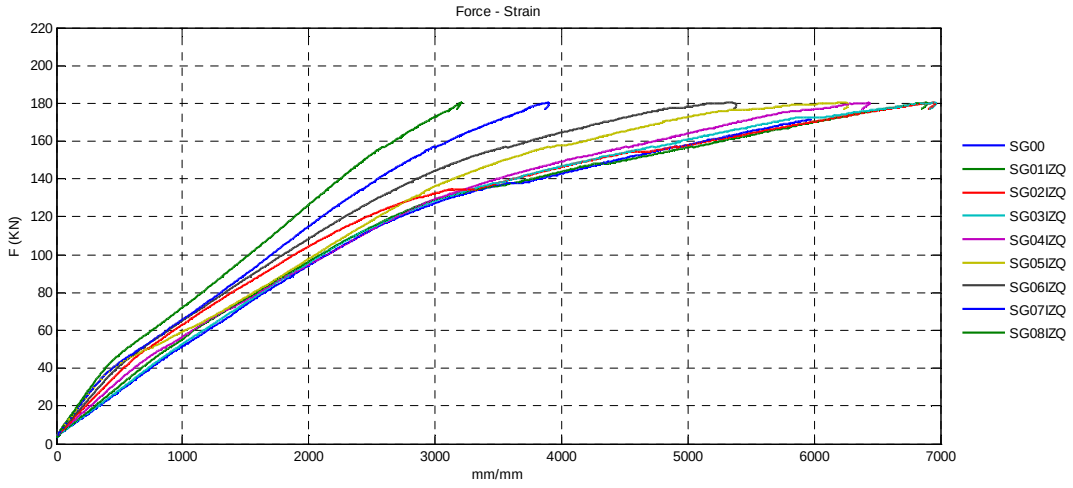


Fig. 6.51 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 06 (Galgues laminat interior)

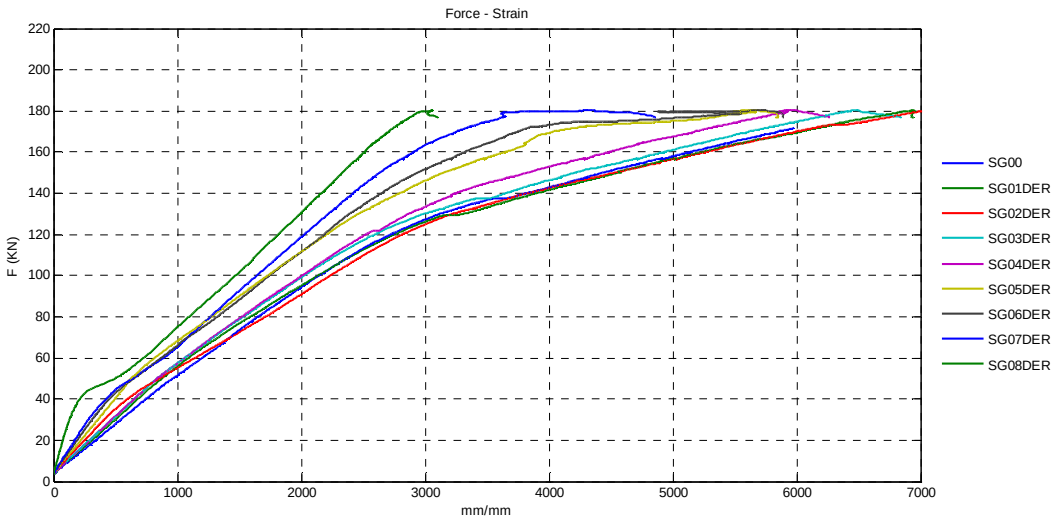


Fig. 6.52 – Gràfic Força-Desplaçament Biga 06 (Galgues laminat exterior)

6.3.7. Resum dels assaigs

A continuació es mostren els gràfics corresponents als assajos realitzats. El que es mostra a la *fig. 6.53* és referent a les bigues de longitud 3,5 metres amb càrrega puntual; i el gràfic de la *fig. 6.54* és referent a les bigues de longitud 5,5 metres amb càrrega puntual i càrrega a dos punts.

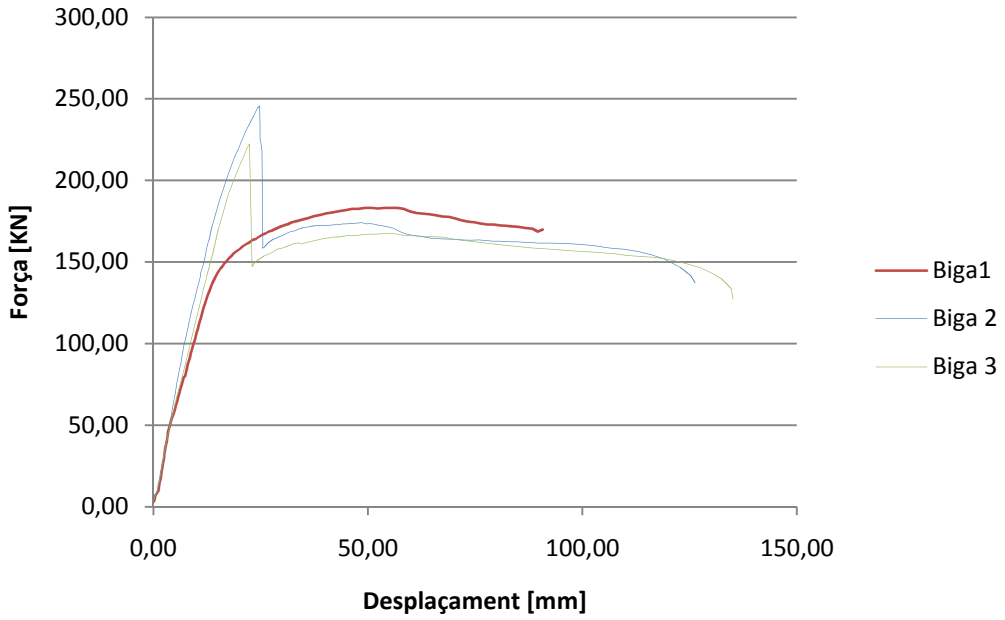


Fig. 6.53 – Gràfic Força-Desplaçament de les bigues 01, 02 i 03

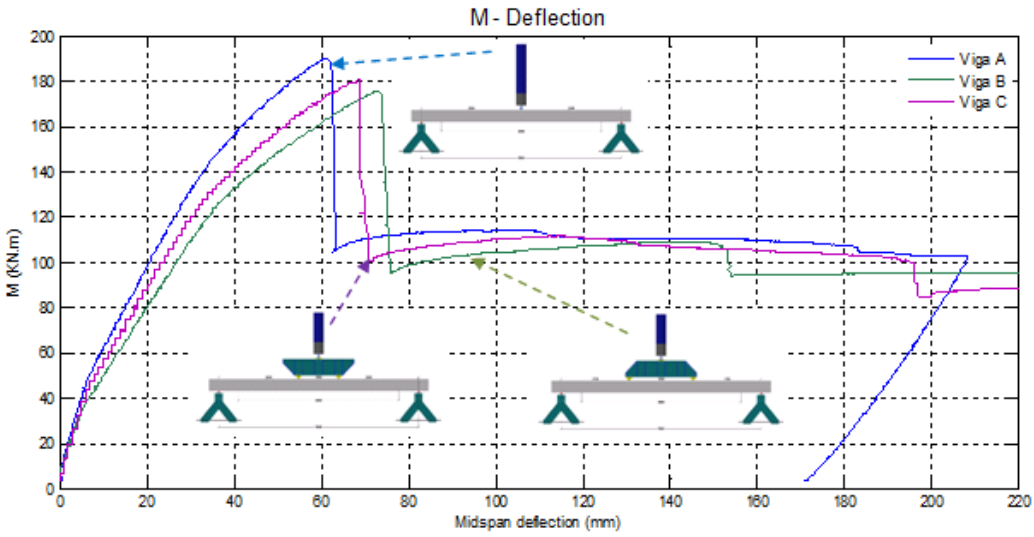


Fig. 6.54 – Gràfic Força-Desplaçament de les bigues 04 (A), 05 (B) i 06 (C).

7. GUIES DE DISSENY DE REFORÇ FRP

7.1. Comentaris normativa americana ACI 440.2R-02

7.1.1. Compatibilitat de tensió

La filosofia de disseny està basada en la hipòtesi que una secció plana abans de la deformació segueix sent plana després, i reflexa també una distribució de tensions lineal sobre la secció.

L'anàlisi de compatibilitat de tensió és usat per a l'anàlisi d'elements reforçats amb FRP. Si és demostrat pel material assajat que el màxim esforç a compressió del formigó és més gran que 3.500×10^{-6}, el valor més gran hauria de ser usat per l'anàlisi. El valor de l'esforç màxim de compressió és important quan es calcula el rati del mode de fallida equilibrat de reforçament (ruptura del FRP i aplastament del formigó simultanis), ρ_{frpb} i es valora el mode de fallida de l'element.

7.1.2. Bases de càlcul per al disseny del reforç amb FRP

En els càlculs de disseny es tindran en compte les recomanacions que dona la normativa americana ACI 440.2R-02.

7.1.2.1. <u>Factors de resistència</u>

La normativa ACI recomana l'ús d'un factor de resistència, ϕ, que depèn de l'ús que se li vulgui donar a l'element estructural. El factor s'aplica a la capacitat nominal de la biga. La ACI 440.2R-02 també específica l'ús d'un factor de reducció de resistència (similar al factor de seguretat del material), ψ_f, el qual s'aplica només a sistemes FRP. El factor de reducció de resistència és aplicat a l'esforç en el material FRP per obtenir la capacitat nominal de l'element estructural. Els següents factors provenen de la normativa americana, per al disseny d'estructures de formigó reforçades amb FRP:

Capacitat a flexió (per reforçament a tracció) (ACI 440-2R-02:9-5)

$$\phi = \begin{cases} 0.9 & \text{for a ductile failure when the member fails after steel yielding and } \varepsilon_s > 0.005 \\ 0.7 & \text{for a brittle failure when the member fails prior to steel yielding and } \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \\ 0.7 + \dfrac{0.2(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{for a semiductile failure when the member fails after steel yielding and } \varepsilon_s > \varepsilon_{sy} \text{ but } \varepsilon_s < 0.005 \end{cases}$$

$$\psi_f = 0.85 \text{ for FRP bond-critical designs}$$

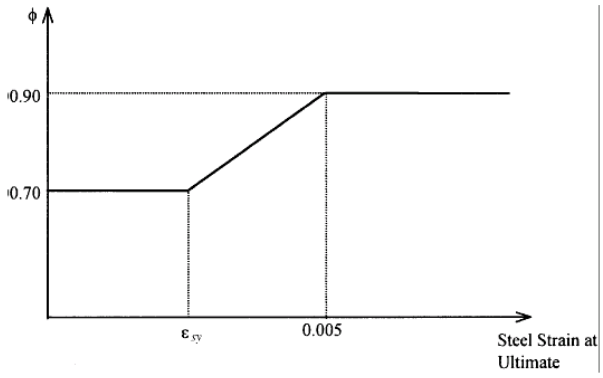


Fig. 7.1 – Representació gràfica del factor de reducció per la ductilitat.

7.1.2.2. Efectes ambientals

La resistència de disseny, f_{fu}, i la tensió de ruptura de disseny, ε_{fu}, s'obtenen de la resistència última i de la última tensió de ruptura multiplicant-los per un factor de reducció ambiental, C_E, que depèn del tipus de sistema FRP usat i del tipus de servei de l'estructura, tal com es mostra a la següent taula:

Taula 7.1 – Coeficients parcials mediambientals.

Exposure Condition	FRP System Type	Environmental Reduction Factor, C_E
Interior (FRP system in an indoor environment)	Carbon–epoxy	0.95
	Glass–epoxy	0.75
	Aramid–epoxy	0.85
Exterior (FRP system exposed to the elements)	Carbon–epoxy	0.85
	Glass–epoxy	0.65
	Aramid–epoxy	0.75
Especially aggressive environments (chemical exposure, wastewater)	Carbon–epoxy	0.85
	Glass–epoxy	0.50
	Aramid–epoxy	0.70

7.1.2.3. Reforç a compressió en elements a flexió

En aquests moments, els sistemes FRP no s'haurien d'utilitzar per a reforçaments a compressió d'elements a flexió. Si un sistema de reforçament FRP està en zona de compressió, no s'hauria d'assumir que aquest està suportant càrrega, i a més hauria d'estar ben lligat amb el formigó per evitar possibles vinclaments locals, el qual pot provocar una ruptura prematura.

7.1.2.4. Límits de reforç

Hi ha uns límits imposats per evitar el col·lapse de l'estructura adherida o altres modes de fallida del sistema degut a altres agents com el vandalisme, cops, foc, etc. Es recomana que l'estructura sigui capaç de resistir un cert nivell de càrrega sense el reforç FRP. Es presenta la següent equació:

$\phi R_n \geq (1{,}2S_{DL} + 0{,}8S_{LL})_{new}$

S_{DL} : Efectes de les càrregues permanents

S_{LL} : Efectes de les càrregues variables

7.1.2.5. Propietats de disseny del material

Tant per dissenyar la tensió última de reforç com la deformació de ruptura, s'ha d'aplicar el factor de reducció ambiental.

$f_{fu} = C_E . f_{fu}^*$

$\varepsilon_{fu} = C_E . \varepsilon_{fu}^*$

7.1.2.6. Reforç a flexió

Resistència Nominal

La normativa ACI 4402R.02 recomana un factor de reducció ϕ, amb un addicional factor de reducció pel reforç aplicat a la contribució de flexió del FRP (ψ_f = 0,85).

$\phi M_n \geq M_u$

Modes de col·lapse

A la normativa ACI es parlen de diferents tipus de fallida:

1. Desadhesió del FRP al formigó.
2. Plasticitat de l'acer tensionat seguit de la ruptura del laminat.
3. Plasticitat de l'acer tensionat seguit del trencament del formigó.
4. Ruptura del formigó en compressió abans de plastificar el reforç d'acer.
5. Delaminació del formigó degut a la tensió de tallant.

La ruptura del formigó s'aconsegueix si la deformació de compressió en l'element de formigó és màxima ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ = 0,003).

La ruptura del laminat de FRP s'aconsegueix si aquest ha de suportar la deformació de ruptura ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$).

La delaminació o desadhesió del FRP arriba quan la força en el FRP no pot ser sostinguda per l'adhesiu. El coeficient següent s'aplica a la tensió que ha de suportar el laminat, per poder així evitar la desadhesió.

$$\kappa_m = \begin{cases} \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(1 - \dfrac{nE_f t_f}{360{,}000}\right) \leq 0.90 \text{ for } nE_f t_f \leq 180{,}000 \\ \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(\dfrac{90{,}000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 \text{ for } nE_f t_f > 180{,}000 \end{cases}$$

n : nombre de capes

t_f : espessor nominal del laminat

Nivells de deformació en el reforç de FRP

Per determinar el punt on es produeix la ruptura del FRP o a on es desenganxa el laminat, s'aplica la següent expressió:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu}$$

Nivell de tensió al FRP

Aquest nivell de tensió és el màxim que es pot produir al reforç de FRP abans que es produeixi la fallida a flexió de la secció:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

Càrrega de servei

L'efecte del reforç extern de FRP a la càrrega de servei, pot ser avaluat mitjançant la secció transformada.

Per evitar deformacions inelàstiques de l'element de formigó reforç amb FRP, l'armat interior hauria de ser previst de rendiments que estiguin per sota de la càrrega de servei. La tensió a l'acer sota càrregues de servei hauria de ser limitat al 80% del rendiment de reforç.

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$

Ruptura de fluència i límits de tensió de fatiga

Per evitar la ruptura de fluència del reforç de FRP sota tensió sostinguda o fallida degut a la tensió cíclica i fatiga del reforç de FRP, s'ha de comprovar els nivells al reforç de FRP sota aquestes condicions de tensió.

Aquests nivells haurien d'estar sota el rang de la resposta elàstica de l'element. La resistència que pot suportar a efectes de tensió per diferents tipus de fibres són per vidre, aramida i carboni de 0.30, 0.47 i 0.90, respectivament.

Límit sostingut de tensió ≥ $f_{f,s}$

7.1.2.7. Reforç per a seccions rectangulars

Tensió última

El procediment de càlcul utilitzat per arribar a la resistència última hauria de satisfer la deformació de compatibilitat i força d'equilibri. El problema i error de procediment inclou seleccionar i assumir profunditat a la línea neutra, c, calculant el nivell de deformació a cada material utilitzant la compatibilitat de deformació, calculant l'associat nivell de tensió a cada material, i comprovant les forces internes d'equilibri. Si la força resultant no equilibra la profunditat de la línea neutra, aquesta ha de ser revisada i el procediment repetit.

Càlcul de la línea neutra:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu}$$

El nivell de tensió efectiu al reforç de FRP pot ser trobat del nivell de deformació al FRP, assumint un comportament elàstic ideal:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

El nivell de deformació a l'acer pot ser trobat utilitzant la deformació de compatibilitat:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{d-c}{h-c}\right)$$

La tensió a l'acer es calcula del nivell de deformació a l'acer assumint comportament elastoplàstic:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

Amb el nivell de deformació i tensió al reforç de FRP i acer, determinat per la profunditat assumida de la línea neutra, la força d'equilibri interna pot ser comprovada utilitzant:

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c' \beta_1 b}$$

$\gamma = 0{,}85$

β_1 = (ACI 318-99)

per a calcular el moment nominal de la secció amb reforç exterior FRP, s'usa l'expressió següent:

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2}\right)$$

el factor de reducció ψ_f té un valor de 0,85.

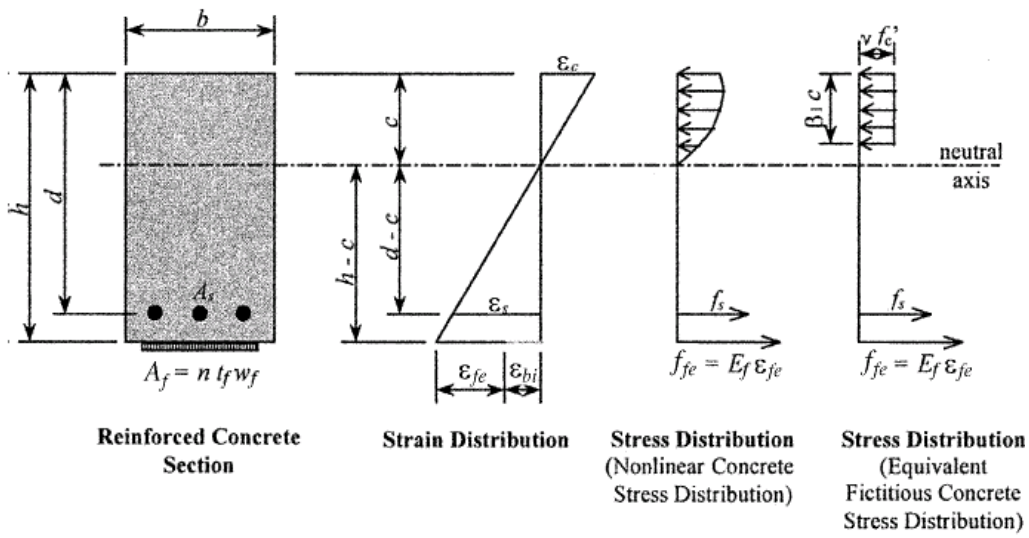


Fig. 7.2 – Deformació interna i distribució de tensió per una secció rectangular sota flexió a l'última etapa.

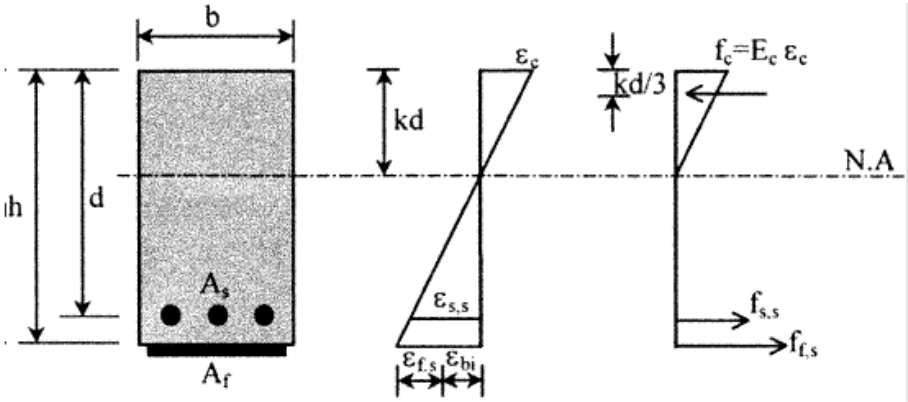


Fig. 7.3 – Deformació elàstica i distribució de tensió.

Tensió a l'acer sota càrregues de servei

El nivell de tensió al reforç d'acer pot ser calculat basant-nos en un anàlisi elàstic de ruptura del reforç de la secció de formigó.

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3}\right)\right](d - kd)E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3}\right)(d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3}\right)(h - kd)}$$

Tensió al FRP sota càrregues de servei

La següent equació serveix per calcular el nivell de tensió al reforç de FRP:

$$f_{f,s} = f_{s,s}\left(\frac{E_f}{E_s}\right)\frac{h - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f$$

7.1.3. Simbologia normativa ACI 440.R2-02

A_f	Àrea del reforç exterior FRP [mm^2]
A_g	Àrea bruta de la secció [mm^2]
A_s	Àrea reforç acer [mm^2
A_{st}	Àrea total del reforç longitudinal [mm^2]
b	Amplada de la secció rectangular
d	Distància de l'extrem de la fibra a compressió fins la línea neutra [mm]
c	Distància de la fibra neutra [mm]
C_E	Factor de reducció ambiental
E_C	Mòdul d'elasticitat del formigó [MPa]
E_f	Mòdul d'elasticitat del FRP [MPa]
E_s	Mòdul d'elasticitat de l'acer [MPa]
f_c	Tensió de compressió al formigó [MPa]
f_c'	Resistència específica a compressió del formigó [MPa]
f_f	Nivell de tensió al reforç de FRP [MPa]
$f_{f,s}$	Nivell de tensió al reforç de FRP causat per un moment sense el rang elàstic de l'element [MPa]
f_{fe}	Tensió efectiva al FRP [MPa]
f_{fu}*	Resistència a tracció del FRP segons fabricant [MPa]
f_{fu}	Resistència a la tensió última de disseny del FRP [MPa]
I_{cr}	Moment d'inèrcia de la secció transformada
k	Rati de la profunditat de la fibra neutra a la profunditat de reforç a la cara de la fibra neutra
k_f	Rigidesa per unitat d'amplada per plec de reforç de FRP [N/mm]
k_1	Factor de modificació aplicat a k_v per la resistència del formigó
k_2	Factor de modificació aplicat a k_v pel règim d'embolicadura
L_e	Longitud activa del laminat de FRP [mm]
L_{df}	Longitud de desenvolupament del sistema de FRP [mm]
M_{cr}	Moment de ruptura [N.mm]
M_n	Moment nominal [N.mm]
M_s	Moment sense el rang elàstic de l'element [N.mm]
M_u	Moment d'esgotament de la secció [N.mm]
p^*_{fu}	Tensió última de reforç per unitat de superfície del plec, pel reforç de FRP [N/mm]
S_{DL}	Efecte de les càrregues mortes
s_f	Espai del reforç
S_{LL}	Efecte de les càrregues vives
t_f	Gruix del laminat o plec de FRP [mm]
w_f	Amplada del laminat o plec de FRP
ε_b	Nivell de deformació al substrat de formigó desenvolupat per un moment a flexió
ε_{bi}	Nivell de deformació al substrat de formigó a l'hora de la instal·lació del FRP

ε_c	Nivell de deformació al formigó
ε_{cu}	Deformació màxima a compressió utilitzada al formigó
ε_f	Nivell de deformació al reforç de FRP
ε_{fe}	Nivell de deformació efectiva al reforç de FRP
ε_{fu}	Deformació de disseny a ruptura del reforç de FRP
ε_{fu}^*	Deformació última del reforç de FRP
ε_s	Deformació de l'acer
ϕ	Factor de reducció
k_a	Factor d'eficiència pel reforç de FRP
k_m	Coeficient depenent del reforç per la flexió
ρ_f	Rati de reforç de FRP
ρ_g	Rati de l'àrea del reforç longitudinal d'acer fins l'àrea de la secció transversal de l'element comprimit
ψ_f	Factor de reducció addicional del reforç de FRP

7.2. Comentaris normativa europea CEB-FIP Model 2001 / Eurocode 2 TG 93

7.2.1. General

Els reforçaments d'elements de formigó, alguns com bigues i columnes, han de ser reforçades a flexió a través de compostos epoxy FRP a les seves zones de tensió, en la direcció paral·lela de les fibres on hi ha les més altes tensions. L'anàlisi per a E.L.U. a flexió per a alguns elements ha de seguir uns procediments ben establerts per al reforçament d'estructures de formigó, provinents de: (a) la contribució del reforçament FRP extern es té en compte adequadament, i (b) també es prendrà especial atenció a la qüestió del vincle entre el formigó i el FRP.

Les corbes ideals de tensió-deformació del formigó, acer i FRP són representades a la *fig.7.4* Aquestes corbes, juntament amb el cas que el lliscament a la interfície del formigó pot ser ignorat (en el cas el qual és justificat per a molts adhesius estructurals aplicats a espessors de l'ordre de 1.0 – 1.5 mm, en casos de fenòmens viscoelàstics, com ara la fluència de tall axial i interlaminar, així com la relaxació, són insignificants), constitueixen la base per a l'anàlisi del reforç en E.L.U. d'elements de formigó reforçats a flexió.

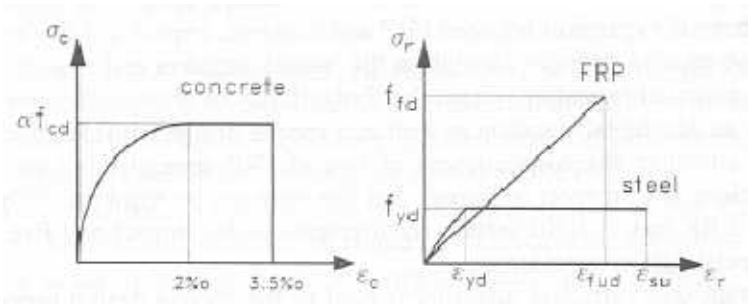


Fig. 7.4 – Corbes de disseny de tensió-deformació en E.L.U.

Fonamental per a l'anàlisi d'aquests elements és la identificació de tots els modes de fallada possibles. Aquests són descrits més endavant, després d'una breu presentació sobre l'efecte de la càrrega inicial actuant en l'element al temps de reforçament.

7.2.2. Situació general

L'efecte de la càrrega inicial previ al reforçament s'hauria de considerar en el càlcul de l'element reforçat. Basat en la teoria de la elasticitat i amb el moment de servei M_0 (no són aplicats factors de seguretat a les càrregues) actuant en la secció crítica del formigó armat durant el reforçament, la distribució

de càrregues de l'element pot ser recalculat. Com que el M_0 és normalment més gran que el moment de fissuració M_{cr} , els càlculs són basats en la secció fissurada (*fig.7.5*).

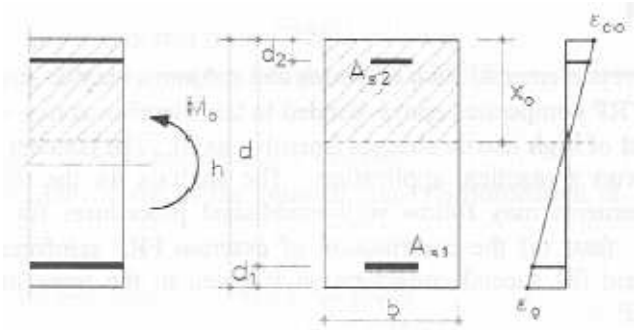


Fig. 7.5 – Esquema general de tensions de la secció fissurada.

Si M_0 és menor que M_{cr} , la seva influència en el càlcul de l'element reforçat pot ser fàcilment negligible.

Basat en la secció fissurada transformada, la profunditat de l'eix neutre x_0 es pot obtenir amb:

$$\frac{1}{2}bx_0^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_0)$$

A on, $\alpha_s = E_s/E_c$. La deformació del formigó ε_{c0} a la fibra superior pot ser expressada com:

$$\varepsilon_{c0} = \frac{M_0 x_0}{E_c I_{c0}}$$

On I_{02} és el moment d'inèrcia de la secció transformada fissurada:

$$I_{02} = \frac{bx_0^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_0)^2$$

Basat en la compatibilitat de deformacions, la deformació del formigó ε_0 a la fibra extrema de tensions pot ser derivada com:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0}\frac{h - x_0}{x_0}$$

Aquesta deformació equival a la deformació inicial de l'eix al nivell del FRP EBR, requerit del recàlcul de l'element reforçat.

7.2.3. Modes de col·lapse – Estats Límits Últims

Els modes de fallada d'un element de formigó reforçat a flexió amb reforç exterior FRP s'han de dividir en dues classes: (a) aquells a on tota l'acció composta del formigó i FRP és mantingut fins que el formigó arriba a la fissuració a compressió o el FRP falla a tensió (tals modes de fallada poden també caracteritzar-se com "clàssics") i (b) aquells en què l'acció composta es perd abans de la classe de (a) fallada, per exemple, degut al *peeling-off* del FRP. A sota es dóna una breu descripció de cada mode de fallada.

7.2.3.1. Acció composta total

- Plastificació de l'acer seguit de la fissuració del formigó

La resistència a la flexió pot ser assolida amb la plastificació de l'armadura a tracció seguida per l'esclafament del formigó a la zona de compressió, mentre que el FRP està intacte.

- Plastificació de l'acer seguir d'una fractura del FRP

Per a ratis baixos de l'acer i el FRP, la fallada a flexió pot donar-se amb la plastificació de l'armadura de tracció seguit per una fractura a tensió del FRP.

- Esclafament del formigó

Per a ratis alts de reforçament, la fallada de l'element de formigó armat pot ser a causa de l'esclafament a compressió del formigó abans que plastifiqui l'acer. Aquest mode és fràgil i certament indesitjable. El FRP en aquest cas és de poca utilitat, i per tant, s'han de considerar mitjans per augmentar la capacitat de compressió del formigó. (p.ex. confinament)

7.2.3.2. Pèrdua de l'acció composta

Modes de col·lapse degut a l'adhesió o desadhesió

L'adhesió és necessària per a transferir forces del formigó al FRP, per tant, els modes de fallada d'adhesió cal tenir-los en compte. La fallada d'adhesió en el cas de l'EBR implica la completa pèrdua de l'acció composta entre el formigó i el reforçament de FRP, i es produeix a la interfície entre el EBR i el substrat del formigó. D'una altra manera, les desadhesions localitzades comporten una fallada local en la zona d'adhesió entre el formigó i l'EBR. En aquest cas la reducció en la resistència d'adhesió entre el formigó i el reforçament FRP està limitada a una area reduïda, per exemple, una pèrdua en la longitud de l'adhesió de 2 mm pròxim al trencament en un element a flexió.

Per tant, la desadhesió localitzada no és en si una manera de fallada el qual pugui causar una pèrdua de la capacitat de càrrega d'un element amb EBR.

Quan les adhesions localitzades es propaguen, i l'acció composta es perd de tal manera que el reforç de FRP no és capaç de suportar més càrregues, aquesta fallada s'anomena *peeling-off*. Si no hi ha una redistribució de tensions des del reforç exterior de FRP al reforçament integrat, és possible que el peeling-off provoqui un trencament sobtat i fràgil.

La fallada per desadhesió pot produir-se a diferents interfícies entre el formigó i el reforçament de FRP, com es descriu més a sota. (*fig.7.6*)

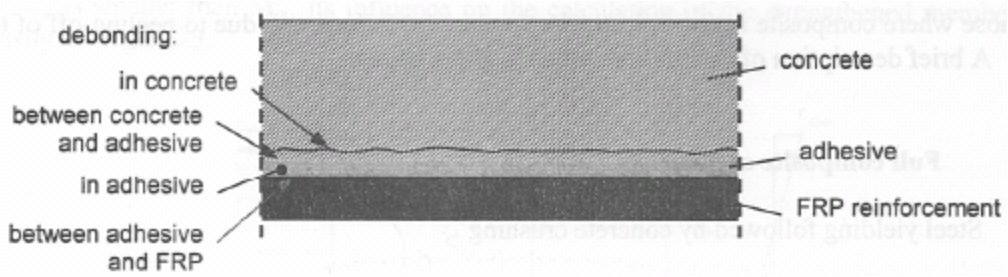


Fig. 7.6 – Modes de col·lapse de desadhesió entre formigó i FRP.

Desadhesió en el formigó pròxim a la superfície o al llarg d'una capa debilitada, per exemple, al llarg de la línia de l'armadura d'acer integrada.

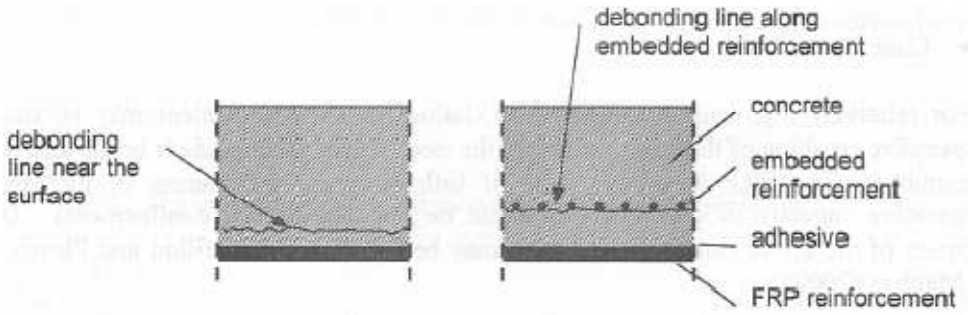


Fig. 7.7 – Modes de col·lapse de desadhesió entre formigó i FRP.

- Desadhesió de l'adhesiu (fallada de cohesió)

Com la resistència a tracció i a tallant de l'adhesiu (resina epoxy) és sovint més gran que la resistència a tracció i tallant que el formigó, la fallada es produirà normalment en el formigó. En aquest cas una fina capa de formigó (uns pocs mil·límetres d'espessor) romandrà en el reforç de FRP. La desadhesió podria produir-se a través de l'adhesiu si la seva resistència cau per sota la del

formigó (per exemple, a altes temperatures o quan la resistència del formigó és inusualment baixa).

- Desadhesió a les interfícies entre formigó i adhesiu o adhesiu i FRP (fallada d'adhesió)

Les fallades d'adhesió en les interfícies entre formigó i adhesiu o adhesiu i FRP es produiran només si no hi ha suficient preparació de superfície durant el procés d'aplicació de FRP, perquè la resistència de cohesió de les resines epoxy és més baixa que la resistència d'adhesió.

- Desadhesió dins el FRP (fallada interlaminar a tallant)

Com que el FRP és en si mateix un material compost, la desadhesió podria produir-se també dins el FRP, entre les fibres i la resina. Aquest mecanisme de fallada, com bé podria estar explicat a mecànica de fractures, es produirà un cop la propagació de l'esquerda en el FRP és enèrgicament més convenient que en el formigó. Aquest podria ser el cas amb formigons d'elevada resistència. No obstant, la fallada interlaminar és un mode de fallada secundària, que es produeix després que la ruptura adhesiva ha iniciat en el formigó, i per tant, normalment no es determina la resistència adhesiva.

Comportament adhesiu

El comportament de l'adhesiu entre el FRP adherit externament i el formigó pot ser analitzat en assajos d'adhesió, tal com s'il·lustra en l'esquema simplificat. (*fig.7.8*)

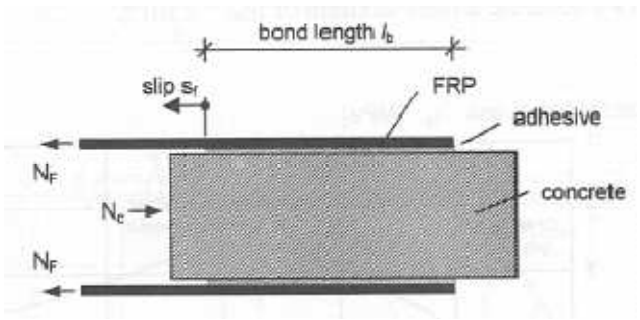


Fig. 7.8 – Esquema d'esforços entre adhesiu i formigó-FRP.

Una distribució típica de les tensions a tallant al llarg de la longitud de l'adhesiu per a diferents nivells de càrrega és el que es mostra en la *fig.7.9* per una placa de CFRP de 50 mm d'ample i 1,2 mm d'espessor, amb una longitud d'adhesiu de 250 mm. Per a nivells de càrrega baixos les tensions a tallant estan principalment concentrades a prop de l'extrem carregat, però com la càrrega s'incrementa, les tensions es mouen cap a l'extrem descarregat. A diferència de l'assaig simplificat d'adhesió, la distribució exacta en el cas de l'element reforçat a flexió està influenciat, així com les tensions normals perpendiculars, per l'àrea adhesiva, les quals són causades pels efectes de flexió.

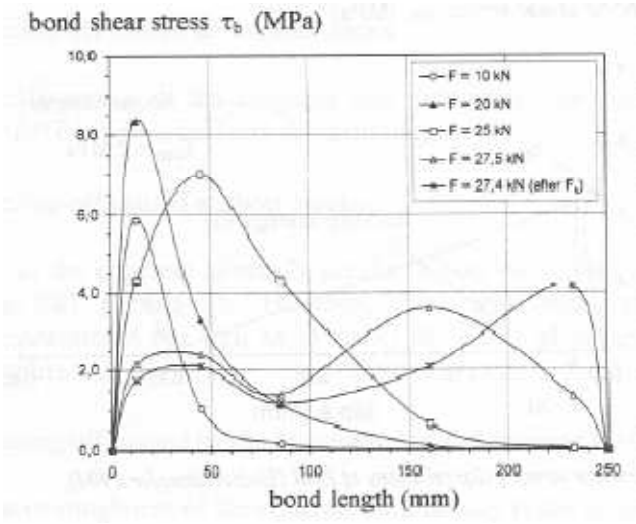
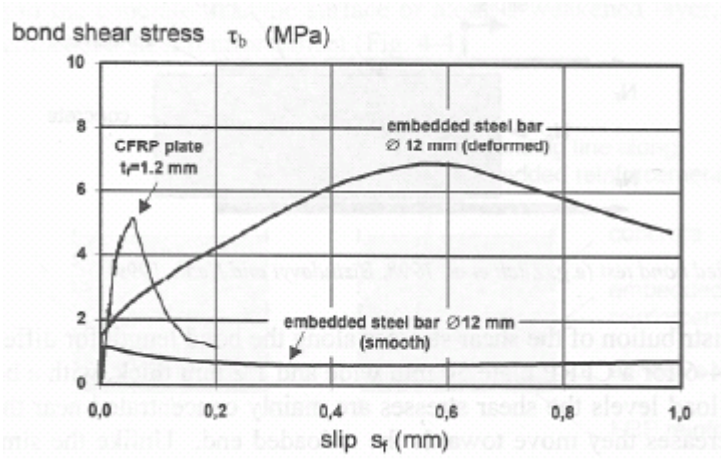


Fig. 7.9 – Distribució de tensions a tallant en diferents punts del laminat i diferents nivells de càrrega.

El comportament de l'adhesiu entre el formigó i el reforçament pot estar caracteritzat per la relació *shear-slip*. Això es relaciona amb l'esforç tallant que és transferit a nivell local entre formigó i reforçament al desplaçament, això és l'*slip*, entre els dos materials. La relació *shear-slip* per a diferents tipus de reforçament es mostren a la *fig.7.10*. L'adhesiu d'EBR és molt rígid comparat amb els adhesius de les barres d'acers integrades, però la capacitat total de càrrega de l'adhesiu és molt menor.

Per als casos de disseny, el comportament *shear-slip* pot ser simplificat i modelat d'acord a varis graus de complexitat. Com a un exemple, es mostra el model Holzenkämpfer (1994) a la *fig.7.10*, per a una resistència a tracció del formigó de f_{ctm} = 2 MPa.



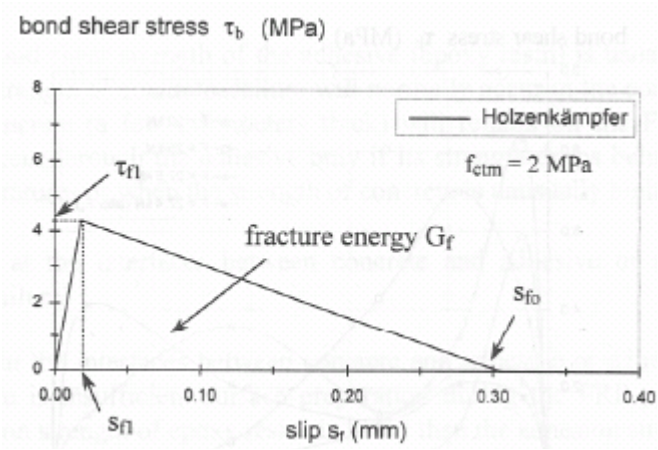


Fig. 7.10 – Comportament shear-slip, model de Holzenkämpfer (1994).

<u>*Comportament adhesiu d'elements de formigó armat reforçats amb FRP*</u>

Molts col·lapses observats en proves d'elements de formigó armat amb EBR són causats pel *peeling-off* del element EBR. Com s'ha discutit abans, el punt més dèbil a l'adhesiu entre l'EBR i el formigó és en la capa del formigó pròxima a la superfície. Per tant, seguidament, ens centrarem en els modes de fallada de l'adhesiu relatius a la superfície del formigó. Depenent del punt d'inici del procés de desadhesió, els següents modes de col·lapse poden ser identificats com (*fig.7.11*):

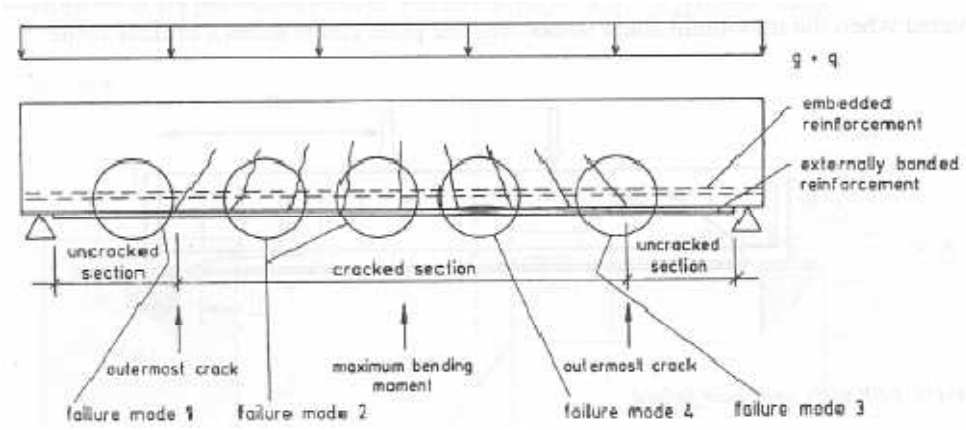


Fig. 7.11 – Modes de col·lapse en bigues reforçades amb FRP de formigó armat.

- Mode 1: *peeling-off* a la zona no fissurada d'ancoratge

El FRP pot estripar-se a la zona d'ancoratge com a resultat d'una fractura de l'adhesiu a tallant a través del formigó.

- Mode 2: *peeling-off* causat per esquerdes a flexió

Esquerdes per flexió (verticals) en el formigó poden propagar-se horitzontalment i així causar un estripament del FRP en regions allunyades de l'ancoratge.

- Mode 3: *peeling-off* causat per esquerdes a tallant

La fissuració a tallant en el formigó generalment apareix tant en la direcció vertical com horitzontal, el qual pot portar a un estripament del FRP. Però, en elements amb suficient reforç intern (i exterior) a tallant (així com en làmines) l'efecte de l'obertura de l'esquerda vertical en *peeling-off* és insignificant.

- Mode 4: *peeling-off* causat per imperfeccions en la superfície del formigó

Les imperfeccions o rugositat de la superfície del formigó pot comportar a desadhesions del FRP, que pot propagar-se i causar *peeling-off*.

Fallada a tallant en l'extrem del FRP

Proves realitzades per alguns investigadors, per exemple, (Oehlers and Moran 1990, Jansze 1997), han indicat que quan les làmines adhesives externes es paren a una certa distància dels suports (com en la majoria dels casos d'aplicacions de reforç) una esquerda vertical pròxima podria iniciar a l'extrem del laminat i llavors créixer com una esquerda inclinada de tallant. (*fig.7.12*) . No

obstant això, en virtut dels estreps interns, l'esquerda de tallant pot ser detinguda i el laminat adherit separat del formigó al nivell del reforçament longitudinal en forma de despreniment. L'últim mode de col·lapse també s'anomena *rip-off* del formigó. Ambdós mecanismes de fallada seran activats quan la tensió màxima de tallant, pròxim a l'extrem final del laminat arribi al valor crític.

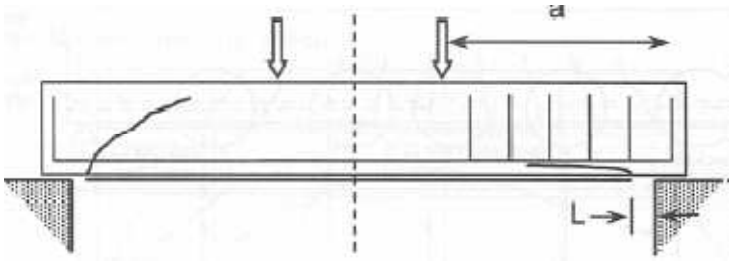


Fig. 7.12 – Modes de col·lapse a tallant en l'extrem de la biga.

7.2.4. Anàlisi en E.L.U.

7.2.4.1. Acció composta completa

Plastificació de l'acer seguit de l'esclafament del formigó

D'acord amb el mode de col·lapse plastificació de l'acer i esclafament del formigó, el qual és el més desitjable, el col·lapse de la secció crítica es produeix per la plastificació de l'acer de tracció seguit per l'esclafament del formigó, mentre el FRP es queda intacte. El disseny de la secció reforçada a moment flector està calculat en base als principis de disseny del formigó armat. Primer de tot, la profunditat de l'eix neutre, x, està calculat a partir de la compatibilitat de deformacions i la força interna d'equilibri, i llavors el moment de disseny s'obté per l'equilibri de moments. L'anàlisi hauria de tenir en compte que l'element de formigó armat pot no estar completament carregat quan el reforçament es porta a cap, i per tant, s'hauria de considerar una deformació inicial ε_0 a l'extrem de la fibra de tracció. (*fig.7.13*)

La capacitat del moment flector de disseny es pot calcular mitjançant:

Càlcul de la profunditat de l'eix neutre, x:

$$0{,}85\Psi f_{cd} bx + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_{fu} \varepsilon_f$$

A on:

$$\Psi = 0{,}8$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu}\frac{x - d_2}{x}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\frac{h - x}{x} - \varepsilon_0$$

Capacitat del moment flector de disseny:

$$M_{Rd} = A_{s1}f_{yd}(d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2}(\delta_G x - d_2)$$

A on:

$$\delta_G = 0{,}4$$

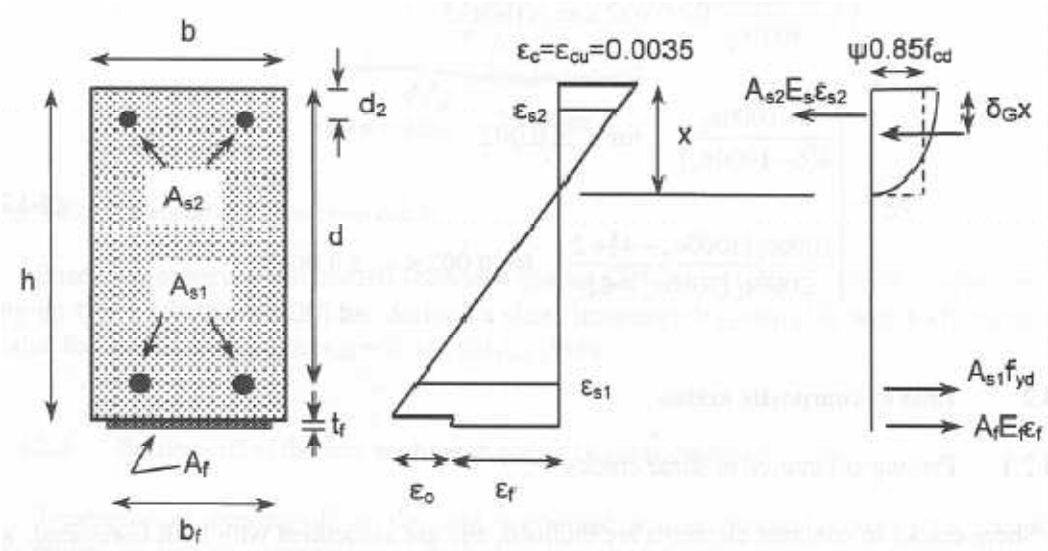


Fig. 7.13 – Distribució de tensions d'una biga a flexió.

Per a que les equacions anteriors siguin vàlides, s'haurien de comprovar les següents premisses: (a) plastificació de l'armat i (b) la deformitat del FRP està limitada a la deformació última, ε_{fud}:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu}\frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud}$$

Plastificació de l'acer seguit de trencament del FRP

El mode de fallada provocat per la plastificació de l'acer / trencament del FRP és teòricament possible. No obstant això, és molt probable que la desadhesió del FRP prematura precedirà a la fractura del FRP i per tant aquest mecanisme no s'activarà. Exhaustivament, podem dir aquí que l'anàlisi d'aquest mecanisme es pot realitzar al llarg de les línies de la secció anterior.

$$\Psi = \begin{cases} 1000\varepsilon_c\left(0{,}5 - \dfrac{1000}{12}\varepsilon_c\right) & per\ a\ \varepsilon_c \leq 0{,}002 \\ 1 - \dfrac{2}{3000\varepsilon_c} & per\ a\ 0{,}002 \leq \varepsilon_c \leq 0{,}0035 \end{cases}$$

$$\delta_G = \begin{cases} \dfrac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & per\ a\ \varepsilon_c \leq 0{,}002 \\ \dfrac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} & per\ a\ 0{,}002 \leq \varepsilon_c \leq 0{,}0035 \end{cases}$$

7.2.4.2. Pèrdua de l'acció composta

Peeling-off causat per fissures a tallant

Les fissures a tallant en elements de formigó són inclinades, i estan associades en la direcció horitzontal, w, i vertical, v, desplaçaments d'obertura, degut principalment al bloqueig total i els mecanismes d'acció de passador. Anàlogament al que s'ha descrit a la secció 4.3.2.3, el desplaçament d'obertura vertical pot causar *peeling-off*. Però, encara que el desplaçament d'obertura sigui horitzontal i causi *peeling-off,* s'indueixen tensions directes en la capa de formigó entre el FRP i l'armadura d'acer integrada. Si el *peeling-off* s'inicia o no, en aquest cas (per a un determinat desplaçament horitzontal de l'obertura de la fissura) dependrà d'una sèrie de paràmetres, incloent-hi els següents:

(a) Desplaçament vertical de la obertura de fissura
(b) La rigidesa a flexió i a tallant del FRP
(c) La resistència del formigó

Tot i que els casos de *peeling-off* causats per fissures a tallant no han sigut investigats amb detall per la comunitat científica, el model de Blaschko (1997) proposa que, el *peeling-off* en fissures a tallant poden ser previngudes limitant l'acció de forces a tallant a la resistència V_{Rd1} d'elements de formigó armat sense reforç a tallant (aproximació Eurocodi 2) amb les següents modificacions per a una resistència a tallant característica del formigó τ_{Rk} i el rati de reforçament longitudinal equivalent ρ_{eq}.

$$\tau_{Rk} = 0{,}15 f_{ck}^{1/3}$$

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \frac{E_f}{E_s}}{bd}$$

En el cas que la capacitat de disseny a tallant decaigués el requerit, s'hauria de provenir d'un mitjà apropiat per enfortir a tallant.

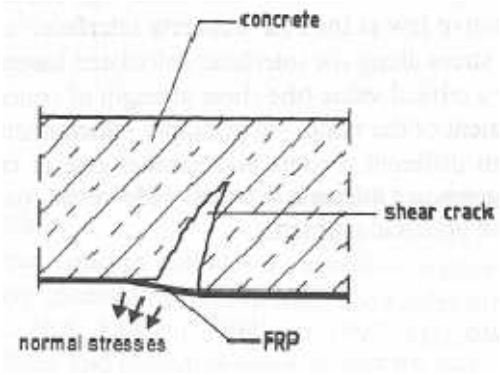


Fig 7.14 – Aparició de la fissura a tallant.

Basat en resultats experimentals (en formigons C25/30 a C30/37, prefabricats de CFRP), Matthys (2000) ha derivat una resistència a tallant $V_{Rp} = \tau_{Rp} bd$, amb un valor característic de resistència a tallant de $\tau_{Rk} = 0{,}38 + 151\rho_{eq}\ (MPa)$.

<u>*Peeling-off a l'ancoratge final i fissures de flexió*</u>

El tractament de *peeling-off* a l'ancoratge final i les fissures a flexió es poden fer d'acord a diversos criteris, que es descriuen breument a continuació.

- Verificació de l'ancoratge final, limitació de la tensió en el FRP

Aquesta aproximació implica dos passos independents: el primer, l'ancoratge final hauria de ser verificat basat en les tensions a tallant – llei constitutiva de lliscament a la interfície FRP-formigó. Llavors, s'hauria d'aplicar una limitació de tensions al FRP per assegurar que el col·lapse de l'adhesiu no serà prematura, des de l'ancoratge que serà previngut. En particular, aquest procediment s'ha seguit fins ara amb una sèrie de directrius de projectes disseny, degut principalment a la seva simplicitat. Però, representa una simplificació del comportament real, com la tensió del FRP corresponent a l col·lapse de l'adhesiu que no és un valor fix, sinó que depèn d'una sèrie de

paràmetres, incloent la relació moment-tallant, la tensió en l'armat i la distribució de les esquerdes.

- Verificació d'acord amb la línia envolvent de les tensions a l'FRP

En aquesta aproximació el *peeling-off* està tractat com una forma unificada tant en l'ancoratge final com en qualsevol punt al llarg de la interfície FRP-formigó basat en l'esforç a tallant de la interfície – llei del lliscament i línia envolvent de les tensions en el FRP. La principal avantatge d'aquesta aproximació és que el *peeling-off* al final i les esquerdes a flexió són tractades amb el mateix model, mentre que la principal desavantatge és la seva complexitat, el qual fa difícil aplicar-ho en un model pràctic d'enginyeria.

- Verificació de l'ancoratge final i la transferència de força del FRP/formigó

D'acord amb la tercera aproximació (Matthys 2000), haurien de ser seguits dos passos independents (com en el primer pas). En el primer, l'ancoratge final hauria de ser verificat basant-se en l'esforç a tallant – llei constitutiva de lliscament en la interfície FRP-formigó. En el segon pas, hauria de ser verificat que l'esforç tallant al llarg de la interfície, calculat basant-se en les condicions d'equilibri simplificat, es manté per sota d'un valor crític (la resistència a tallant del formigó). Una desavantatge d'aquesta aproximació és el tractament del mateix fenomen (*peeling-off* al final del FRP i lluny d'ell) amb diferents models i un altre que estigui basat en la distribució d'esforços per a una biga homogènia, no fissurada. Però, una major avantatge és la simplicitat de l'aplicació en problemes pràctics.

Fallada de final de tallant

Jansze (1997) va emprar el concepte de *envergadura de tallant fictícia*, il·lustrat a la *fig.7.15*, per a calcular la resistència a tallant de bigues seguint les línies del Model Code (CEB 1993).

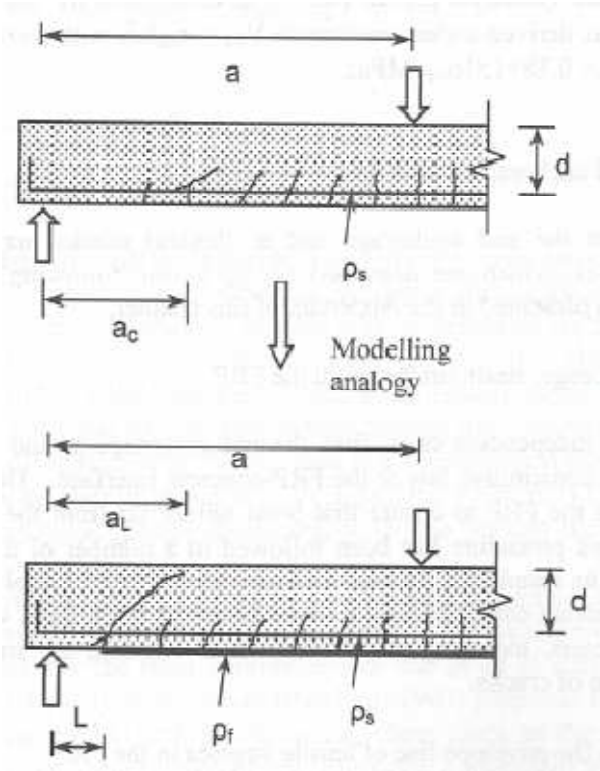


Fig. 7.15 – Concepte d'envergadura de tallant fictícia.

Les equacions resultants són les següents:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} bd$$

$$\tau_{Rd} = 0{,}15 \sqrt[3]{3\frac{d}{a_L}} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \sqrt[3]{100 \rho_s f_{ck}}$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{\left(1 - \sqrt{\rho_s}\right)^2}{\rho_s} d L^3}$$

$$a > L + d, \qquad a_L < a$$

En les equacions d'amunt *L* (en mm) és la distància del final del FRP al suport, *a* (en mm) és l'envergadura del tallant, i $\rho_s = A_{s1}/bd$.

El concepte de l'envergadura fictícia del tallant prové una aproximació simplificada d'enginyeria per al col·lapse del final de tallant del FRP. El lector hauria d'anotar que els models han estat desenvolupats també, basant-se en el càlcul analític de les tensions normals i tangencials al final del FRP. Però, cal dir

que alguns models són més complicats d'utilitzar, i la seva descripció no es donen en aquest Butlletí.

Peeling-off causat per un desnivell de la superfície del formigó

La desadhesió en el FRP degut a un possible desnivell de la superfície del formigó (*fig.7.16*) és un altre mecanisme de col·lapse que no ha estat estudiat amb profunditat. L'evidència experimental suggereix que el mecanisme pot ser evitat adoptant determinades normes d'execució pràctiques i limitacions en la superfície rugosa del formigó. Moltes d'aquestes limitacions es refereixen a rugositats màximes del formigó sobre una longitud donada, i depèn del tipus de FRP i dimensions (p.ex. espessors). En les especificacions dels fabricants de sistemes de reforçament per FRP s'haurien de veure els detalls específics.

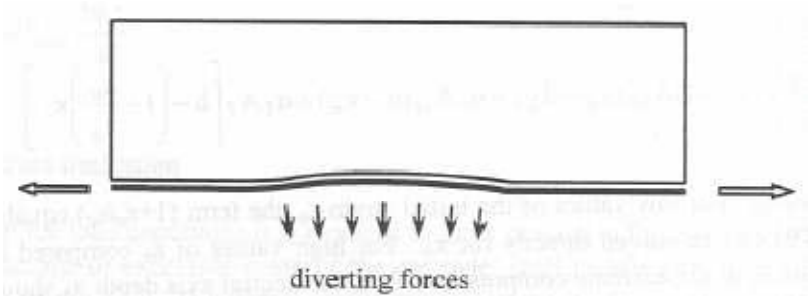


Fig 7.16 – Peeling-off causat per desnivells en la superfície.

7.2.5. Simbologia normativa CEB-FIP Model 2001/Eurocode 2 TG93

A_c	Àrea de la secció de formigó [mm^2]
A_f	Àrea del reforçament de FRP [mm^2]
A_1	Àrea total de les armadures longitudinals [mm^2]
A_{s1}	Area de les armadures de tracció [mm^2]
A_{s2}	Area de les armadures de compressió [mm^2]
E_C	Mòdul d'elasticitat del formigó [MPa]
E_f	Mòdul d'elasticitat del FRP [MPa]
E_{fib}	Mòdul d'elasticitat de la fibra [MPa]
E_{fk}	Mòdul d'elasticitat característic FRP [MPa]
E_m	Mòdul d'elasticitat de la matriu [MPa]
E_s	Mòdul d'elasticitat de l'acer [MPa]
$F_{max,d}$	Valor de projecte de la màxima força de tracció transmissible del reforç FRP [MPa]
G_a	Mòdul d'elasticitat tangencial de l'adhesiu [MPa]
G_c	Mòdul d'elasticitat tangencial del formigó [MPa]
I_0	Moment d'inèrcia de la secció de formigó armat fissurada i no reforçada
I_{02}	Moment d'inèrcia de la secció de formigó armat fissurada i reforçada
I_c	Moment d'inèrcia de la secció homogeneïtzada
I_f	Moment d'inèrcia del reforç FRP respecte el propi eix
I_{cr}	Moment d'inèrcia de la secció transformada
M_{Rd}	Moment resistent de projecte de la secció reforçada amb FRP
M_{Sd}	Moment de flexió sol·licitat de projecte
M_0	Moment de flexió sol·licitat de projecte, després de l'aplicació del reforç
M_1	Moment de flexió sol·licitat de projecte, després de l'aplicació del reforç i càrregues
N_{Sd}	Esforç normal sol·licitat de disseny
b_f	Ample del reforç FRP
d	Cantell útil de la secció
f_{bd}	Resistència de disseny de l'adhesió del reforç FRP al formigó
f_{bk}	Resistència característica de l'adhesió del reforç FRP al formigó
f_c	Resistència a compressió del formigó
f_{cd}	Resistència de disseny a compressió del formigó
f_{ck}	Resistència característica a compressió del formigó
f_{ctm}	Resistència a tracció del formigó
f_{fd}	Resistència de disseny del reforç FRP
f_{fk}	Resistència característica del reforç FRP
f_y	Resistència de l'acer
f_{yd}	Resistència de disseny de l'acer
h	Alçada de la secció
t_f	Espessor del reforç de FRP

ε_0	Nivell de deformació al substrat de formigó desenvolupat per un moment a flexió
ε_c	Nivell de deformació al formigó
ε_f	Nivell de deformació al reforç de FRP
ε_{fdd}	Nivell de deformació al reforç de FRP compatible amb la delaminació
ε_{fe}	Nivell de deformació efectiva al reforç de FRP
ε_s	Deformació de l'acer
σ_c	Tensió en el formigó
σ_f	Tensió en el reforç FRP
σ_s	Tensió en l'acer
ρ_f	Rati de reforç de FRP

7.3. Comentaris normativa italiana CNR-DT200/2004

7.3.1. Conceptes bàsics en el projecte de reforç i problemàtica especial

La normativa italiana descriu una sèrie de requisits que s'han de portar a terme a l'hora de projectar un reforç.

Els **requisits fonamentals** són:

1. Els riscs que podrien patir les estructures a reforçar han de ser cuidadosament identificats, eliminats o pal·liats.
2. La configuració de l'armadura ha de ser sensible a aquests riscs.
3. S'ha d'evitar la forma de col·lapse que no mostri senyals d'advertència.
4. Elecció de materials adequats.
5. Projecte adequat, amb especial atenció als detalls de construcció.
6. Establir el context de cada operació, els procediments de control per al disseny, la producció, l'aplicació i l'ús.

El reforç de la estructura ha de ser dissenyada tal que la degradació no ha de reduir la vida útil més de l'esperat, tenint en compte les condicions ambientals, i el programa de manteniment.

Els **requisits de durabilitat** són:

1. S'ha tenir en compte l'ús de la estructura reforçada.
2. Les condiciones ambientals previstes.
3. La composició, propietats i rendiment dels materials existents i nous, així com el productes utilitzats per a l'aplicació d'aquest últim.
4. La elecció de la configuració de l'armadura i els detalls de construcció.
5. La qualitat de la mà d'obra i el nivell de control.
6. Les mesures especials de protecció, per exemple, contraincendis o a l'impacte.

El nivell de qualsevol tipus de degradació dels reforços ha de ser estimat amb precisió. Es possible fer estimacions sobre la base de models teòrics, investigacions experimentals, la experiència deduïda en projectes anteriors o en base a una combinació d'ells.

7.3.1.1. <u>Principis generals del disseny del reforç</u>

La verificació dels elements que han de ser reforçats s'han de realitzar respecte el govern de l'Estat Límit de Servei (E.L.S.) i respecte l'Estat Límit Últim (E.L.U.), tal com indica la normativa vigent.

S'ha d'examinar pel mètode dels coeficients parcials, que en totes les situacions previsibles, l'adopció dels valors de disseny (o càlcul) de les accions, tensions i resistència, no pot violar cap límit d'estat.

Els valors de càlcul es deriven de les característiques a través dels coeficients parcials adequats, els valors del quals, per a l'estat límit, estan codificats en la legislació.

Coeficients parcials i accions de càlcul

Als efectes dels controls de seguretat i identificació de les accions de càlcul es refereix a la vida útil de la estructura que tindria en el cas que fos de nova construcció.

Propietats del material i del producte

Els valors de les propietats han d'haver estat determinats a partir de proves de laboratori normalitzades. També, les propietats mecàniques de resistència i deformació del material es quantifiquen pels valors característics corresponents.

Els únics paràmetres de rigidesa (mòdul d'elasticitat) dels materials o productes utilitzats en el reforçament i la dels materials existents, són avaluats a través dels valors corresponents a la mitjana.

En el cas del sistema impregnat in situ, el coeficient de reducció α_{fe} i α_{ff} , aplicat respectivament, al mòdul d'elasticitat i resistència de les fibres, no se li pot atribuir un valor més gran de 0,90.

7.3.1.2. Coeficients parcials

Coeficient parcial γ_m de material i de producte

Per a un Estat Límit Últim, els possibles valors que es poden atribuir a γ_m per a un material o producte de compost fibroreforçat són els que es mostren a la taula següent, distingint casos de ruptura del material o delaminació:

Taula 7.2 – Coeficients parcials de material.

Modalità di collasso	Coefficiente parziale	Applicazione tipo A[1]	Applicazione tipo B[2]
Rottura	γ_f	1.10	1.25
Delaminazione	$\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

[1] Sistemi di rinforzo certificati in accordo a quanto indicato al capitolo 2 di queste Istruzioni (§ 2.5).
[2] Sistemi di rinforzo non certificati in accordo a quanto indicato al capitolo 2 di queste Istruzioni (§ 2.5).

Per tal de limitar els estats d'operació, es suggereix assignar un valor unitari de tots els coeficients de $\gamma_m = \gamma_f$ del material i del producte de compost fibroreforçat, a expeció dels casos indicats.

Coeficient parcial γ_{Rd} per al model de resistència

Per a l'Estat Límit Últim es suggereixen valors diferents dels coeficients parcials γ_{Rd} dels models de resistència, tal com es mostren a la taula:

Taula 7.3 – Coeficients parcials per model de resistència.

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

7.3.1.3. Problemes especials del projecte i els seus factors de conversió

A continuació es presenten alguns valors de referència que s'ha d'atribuir al factor de conversió η, les qüestions que poden afectar a la durabilitat i el comportament del FRP en condicions particulars.

Accions ambientals i factors de conversió ambientals η_a

1) Les propietats mecàniques (com per exemple, la resistència a tracció, la deformació i el mòdul d'elasticitat últim) d'alguns sistemes de FRP es degraden sota certes condicions mediambientals, com alcalins, humitat, temperatures extremes, cicles tèrmics, radiació ultraviolada, etc.
2) Conseqüències de les condicions alcalines. L'aigua retinguda en els porus del formigó pot causar la degradació de la resina i les àrees de la interfície. La corrupció de la resina a causa d'un atac alcalí sol ser més greu que la que causa la humitat.
3) Efectes de la humitat. Els principals efectes de l'absorció de la humitat són la reducció de la temperatura vítria, reducció de la resistència i la reducció de la rigidesa. L'absorció de la humitat depèn del tipus de resina, la composició i la qualitat de les plaques, el gruix, les condicions de la maduració, la resina de la interfície de fibra i les condicions de transformació. En el medi marí, on els efectes osmòtics pot causar la formació de bombolles en la resina, es recomana la utilització de revestiments de protecció.
4) Efectes de les temperatures extremes i els cicles tèrmics. Amb l'augment de la temperatura es manifesta una disminució del mòdul d'elasticitat normal de la resina. Si la temperatura supera la de transició vítria, el nivell

de rendiment de compostos de FRP disminueix de manera significativa. Cicles tèrmics, en general, són lents als efectes nocius, encara que poden fomentar la formació d'esquerdes en els sistemes que utilitzen resina d'alt mòdul.

5) Efectes dels cicles de congelació i descongelació. En general, l'exposició als cicles de congelació i descongelació no afecta sobre el rendiment de les fibres, redueix el lloc de la resina i la interfície entre la fibra i resina, a causa de l'aparició de separacions entre elles. Per a temperatures inferiors a 0 °C, els sistemes basats en resina de polímer pot millorar el seu rendiment mitjançant el desenvolupament de grans valors de resistència i la rigidesa. Els efectes de la degradació produïda pels cicles tèrmics poden ser amplificades per presència d'humitat: el caràcter cíclic favorable per al creixement i la propagació d'esquerdes causada per la presència de solucions salines en ambient humit.
6) Efectes de la radiació ultraviolada (UV). Poques vegades la radiació UV degrada el rendiment de les propietats mecàniques de sistemes basats en FRP, si bé algunes resines poden patir, com a resultat d'ells, de certa fragilitat i també l'erosió de la superfície. En general, els pitjors efectes vinculats a l'exposició UV és la penetració de la humitat i altres agents agressius a través de la superfície danyada. Els sistemes basats en FRP poden ser protegits en aquesta direcció amb l'addició d'adequats additius en la resina i / o amb l'ús de revestiments adequats.
7) La taula suggereix per alguns tipus de materials i condicions d'exposició, els valors de factor de conversió η_a. Representen estimacions conservadores basades en la durabilitat dels diferents tipus de fibra. Les xifres del quadre poden ser augmentades en un 10% (en cada cas, $\eta_a < 1$) on s'utilitzen recobriments de protecció. La mitigació dels efectes de l'exposició a riscos ambientals estan comprovats a nivell experimental i sempre que aquests recobriments es van mantenir durant tota la durada d'ús del sistema FRP.

Taula 7.4 – Coeficients parcials per condició d'exposició.

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Mètodes de càrrega i el factor de conversió pels efectes de llarga durada η_l

(1) Les propietats mecàniques (per exemple, resistència a la tracció, la deformació última i el mòdul d'elasticitat) d'alguns sistemes basats en FRP degradades per l'efecte de la viscositat, de la relaxació i la fatiga.

(2) Efectes de la viscositat i la relaxació. En un sistema basat en una base FRP la viscositat i la relaxació depenen de les propietats de les resines i de la fibra del reforç. En general, les resines termoestables (polièster insaturat, èsters de vinil, resines epoxy i fenòliques) són menys viscoses que els termoplàstics (polipropilè, niló, policarbonat, etc). Atès que la presència de fibres disminueix la viscositat de les resines, aquests fenòmens són més pronunciats quan la càrrega s'aplica a través de les fibres o quan el compost es caracteritza per una fracció baixa en volum de les fibres. La viscositat pot ser reduïda, assegurant que, en funcionament, un nivell de tensions prou baix. Sistemes basats en CFRP són menys susceptibles al trencament per viscositat; els basats en fibres d'aramida, són moderadament susceptibles; i les fetes de fibres de vidre són els més susceptibles.

(3) Efectes de la fatiga. El rendiment de FRP basat en sistemes en termes de fatiga és generalment molt bo. Ells depenen de la composició de la matriu i, en la moderació, el tipus de de fibra. En compostos de fibra unidireccional són típicament alguns defectes i, per tant contrarestar eficaçment la formació d'esquerdes. A més, la propagació d'esquerdes el treball d'aquesta es veu obstaculitzada de les fibres presents en les zones adjacents.

(4) Per evitar la ruptura del reforç d'FRP sota tensió sostinguda en el temps o en les càrregues cícliques, els possibles valors que s'atribueix al factor de conversió η_l en la verificació per un estat límit de servei, és suggerit a la *taula 7.5*.

Taula 7.5 – Coeficients parcials per model de càrrega.

Modalità di carico	Tipo di fibra / resina	η_1
Persistente (viscosità e rilassamento)	Vetro / Epossidica	0.30
	Arammidica / Epossidica	0.50
	Carbonio / Epossidica	0.80
Ciclico (fatica)	Tutte	0.50

Resistència a les accions causades per l'impacte i l'explosió

(1) El comportament d'un sistema basat en FRP sotmès a les accions causades per l'impacte o explosió encara està en estudi. Els primers indicis suggereixen orientar l'elecció cap als sistemes basats en fibra d'aramida (més resistent als impactes) i / o fibres de vidre en lloc dels sistemes basats en fibra de carboni.

Resistència a les accions derivades d'actes de vandalisme

(1) Els materials compostos reforçats amb fibra són particularment sensibles a la corrosió i al desgast produïts per eines de tall.

(2) Les aplicacions de reforç en les zones obertes al públic, es predisposa d'adequar mesures de protecció del sistema de reforç. No obstant això, s'ha de comprovar la seguretat de l'element estructural fent referència a la situació després d'un possible acte de vandalisme, en l'absència de reforç. Amb aquesta finalitat, en contra de l'E.L.U., s'adopta la combinació d'accions per a situacions quasipermanents amb els valors dels coeficients parcials dels materials per a situacions excepcionals.

7.3.1.4. Límits del reforçament en cas d'exposició al foc

(1) Els materials compostos reforçats amb fibra són particularment sensibles a l'exposició a altes temperatures, una situació que pot produir-se per exemple en cas d'incendi. Quan la temperatura medi ambient excedeix la temperatura de transició vítrea de la resina (o la temperatura de fusió en el cas de materials semicristal·lins), la resistència i la rigidesa del sistema d'FRP disminueix dràsticament. En els casos de FRP aplicat externament en els elements de formigó o maçoneria, l'exposició a altes temperatures també produeix un ràpid deteriorament de l'adherència del FRP/suport, donant lloc a la delaminació de la compost i la pèrdua d'eficàcia del reforç.

(2) En condicions d'exposició al foc, les propietats mecàniques del sistema basat en FRP aplicat a l'exterior pot ser millorat considerablement en

augmentar el gruix de la capa de protecció utilitzat. Es suggereix l'ús de revestiments que redueixin la propagació de les flames i la creació de fum. No obstant això, es recomana l'ús dels certificats de sistemes d'aïllament.

(3) En el cas d'exposició al foc, per evitar el col·lapse de l'estructura reforçada amb FRP, fins que no hi hagi més informació disponible sobre el comportament real dels revestiments i dels diferents tipus de resines en aquestes condicions, es recomana incloure la contribució de forma conservadora el reforç necessari.

(4) Es suggereix que la combinació d'accions per a situacions excepcionals (incendi), tal com es defineix per la normativa vigent, faci referència les situacions enumerades a continuació, en la qual el valor de càlcul de l'efecte de l'acció tèrmica indirecta vingui denotat com a E_d.

- <u>Situació excepcional en presència de l'armadura</u> ($E_d \neq 0$), en el cas en que el mateix reforç hagi estat dissenyat per un temps determinat d'exposició al foc. En aquest cas s'han de considerar les accions de l'exercici sobre l'estructura per la combinació més freqüent. La capacitat dels elements, degudament reduïda per tenir en compte el temps d'exposició al foc, ha de ser calculada amb uns coeficients parcials relatius a les situacions excepcionals, com preveu la legislació vigent (per al compost reforçat amb fibra $\gamma_f = 1$).

- <u>Situació després de l'esdeveniment excepcional</u> ($E_d = 0$), en l'absència de reforç. En aquest cas, s'han de considerar les accions sobre l'estructura per a una combinació quasipermanent. La capacitat dels elements, degudament reduïda per tenir en compte el temps d'exposició al foc, es calcularà amb els coeficients parcials relatius a les situacions excepcionals.

7.3.2. Reforçament d'estructures de formigó armat

7.3.2.1. <u>Avaluació de la resistència a la delaminació</u>

<u>Mecanismes de ruptura per delaminació</u>

(1) En el reforç d'elements de formigó armat mitjançant laminats o teixits de material compost, el paper de l'adherència entre el formigó i els materials compostos és de gran importància, i per tant el mecanisme de fractura per delaminació (pèrdua d'adherència) és del tipus fràgil. En l'esperit del criteri de jerarquia de la resistència tal mecanisme de ruptura no ha de precedir al col·lapse per flexió o per tallant de l'element reforçat.

(2) La pèrdua d'adherència entre el compost i el formigó pot cobrir el laminat o el teixit compost aplicat a l'interior de la biga de formigó armat per al reforçament a flexió. En línia amb la *fig. 7.17,* la delaminació pot produir-se a l'interior de l'adhesiu, entre el formigó i l'adhesiu, en el formigó o a l'interior del reforç.

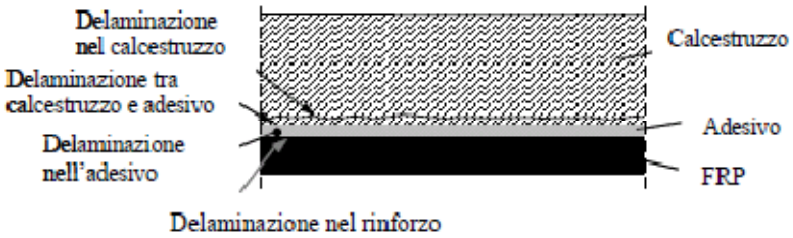


Fig 7.17 – Modes de col·lapse per delaminació.

(3) Els modes de col·lapse per delaminació del laminat o del teixit per al reforç a flexió poden ser classificats en les següents categories, representat esquemàticament a la *fig. 7.18*.

- Modalitat 1 : Delaminació d'extremitat.
- Modalitat 2 : Delaminació intermitja, causada per les esquerdes per flexió a la biga.
- Modalitat 3 : Delaminació causada per les esquerdes diagonals de tallant.
- Modalitat 4 : Delaminació causada per la irregularitat i rugositat de la superfície del formigó.

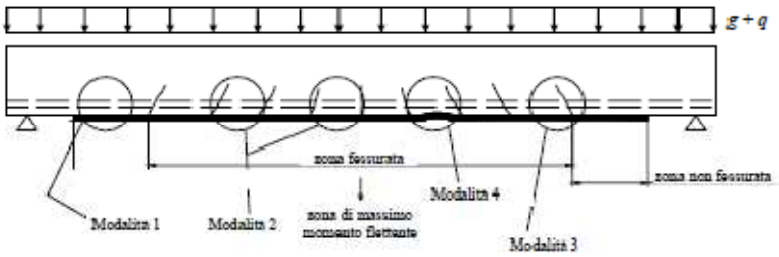


Fig 7.18 – Modes de col·lapse en bigues reforçades amb FRP de formigó armat.

<u>*Verificació de la seguretat contra la delaminació*</u>

(1) La verificació de la seguretat contra el col·lapse per delaminació requereix de la validació de la força màxima de transmissió de l'armadura del formigó i l'avaluació de les tensions. La primera avaluació resulta necessària per a la verificació a E.L.U., i la segona verifica l'estat tensional en servei.

(2) En referència a la típica prova d'adherència, com la que es representa esquemàticament a la *fig. 7.19*, el valor últim de la força suportable del reforç FRP, abans d'assumir la delaminació, depèn, de tots en igualtat de condicions, la longitud, del valor l_b , de la zona de servitud. Aquest valor augmenta amb l_b, a fi d'assolir un màxim corresponent a una longitud ben definida, l_e.

La longitud l_e ve definida com la longitud òptima d'ancoratge, i per tant, correspon a la longitud mínima d'aquesta, el que assegura la transmissió dels màxims esforços d'adherència.

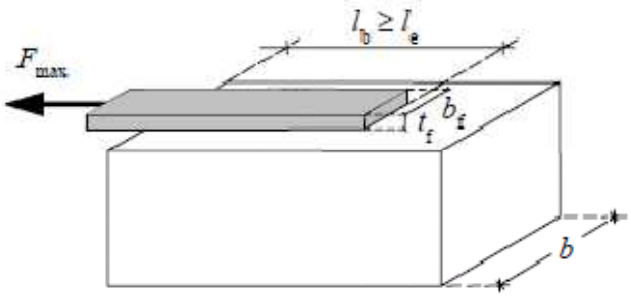


Fig 7.19 – Distribució d'esforços entre laminat i formigó.

(3) La longitud òptima d'ancoratge, l_e, pot ser estimada de la manera següent:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f.t_f}{2.f_{ctm}}} \qquad \text{[mm]}$$

On E_f i t_f , són respectivament, el mòdul d'elasticitat normal a la direcció de la força i l'espessor del compost fibroreforçat, i f_{ctm} és la resistència mitja a tracció del formigó que constitueix el suport.

(4) L'energia específica de fractura, τ_{Fk}, de la unió adherència del reforç amb el formigó es pot expressar com:

$$\Gamma_{Fk} = 0{,}03.k_b.\sqrt{f_{ck}.f_{ctm}} \qquad \text{[força en N, longitud en mm]}$$

On f_{ck} és la resistència característica del formigó.

El valor proporcionat per l'expressió anterior s'entén com el valor característic. A més, k_b, és un factor del tipus geomètric, el qual valor és funció de l'amplada de la biga reforçada, b, i la del reforç, b_f :

$$k_b = \sqrt{\frac{2-\frac{b_f}{b}}{1+\frac{b_f}{400}}} \geq 1 \qquad \text{[longitud en mm]}$$

Sempre que b_f / b ≥ *0,33* (per b_f / b > *0,33* qualsevol valor de k_b corresponent a $b_f / b = 0,33$)

Resistència a l'E.L.U. per delaminació d'extremitat (modalitat 1)

(1) Pel que fa a la delaminació que participa en les primeres capes de formigó i en les longituds d'ancoratge major o igual a la òptima, la tensió de disseny del reforç, f_{dd}, o el valor de la tensió màxima a la qual el reforç pot treballar en la secció terminal d'ancoratge – una vegada que es produeix la transmissió de l'esforç del formigó al reforç de FRP – sosté:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 . E_f . \Gamma_{Fk}}{t_f}}$$

Essent $\gamma_{f,d}$, el coeficient parcial, i γ_c el coeficient parcial del formigó.

(2) En el cas que la longitud d'ancoratge, l_b, sigui menor que la òptima, l_e, la tensió de disseny ha de ser adequadament reduïda d'acord amb la relació:

$$f_{fdd,rid} = f_{fdd} \cdot \frac{l_b}{l_e} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_e}\right)$$

Resistència a E.L.U. per delaminació intermitja (modalitat 2)

(1) Per tal d'evitar que el mecanisme de delaminació d'acord amb el mode 2, es pot produir que la variació de la tensió en el reforç de FRP $\Delta\sigma_f$ entre dues esquerdes consecutives no excedeixi d'un valor límit, $\Delta\sigma_R$. Aquest últim depèn, en general, de les característiques dels vincles d'adhesió, la distància entre les esquerdes i el nivell de tensió σ_f en el reforç.

(2) Una altra alternativa és utilitzar un procediment simplificat per verificar que en E.L.U. la tensió en el compost fibroreforçat no excedeix del valor màxim, $f_{fdd,2}$, segons la següent expressió:

$$f_{fdd,2} = k_{cr} \cdot f_{fdd} = \frac{k_{cr}}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 . E_f . \Gamma_{Fk}}{t_f}}$$

En el qual, per falta de dades específiques, el coeficient k_{cr}, es pot suposar 3,0. El corresponent valor de la deformació de disseny del compost fibroreforçat, ε_{fdd}, val:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f}$$

7.3.3. Reforçament a flexió

7.3.3.1. Generalitats

(1) El reforç a flexió és necessari per als elements estructurals sotmesos a un moment flector de disseny major que el corresponent a la resistència. En particular, es discutirà més endavant en el cas de la flexió en línia, com la que ocorre en presència de l'eix d'esforç coincident amb un eix de simetria de la secció transversal de l'element reforçat.

(2) El reforç a flexió amb materials compostos pot ser realitzat per una o més làmines, o una o més capes de teixit solapats a l'element a reforçar.

7.3.3.2. Anàlisi del comportament en E.L.U.

Generalitats

(1) El disseny en E.L.U. requereix que el dimensionament del reforç de FRP en la forma que el moment sol·licitant de disseny, M_{sd}, i el moment resistent de disseny de la secció reforçada, M_{Rd}, satisfaci la desigualtat:

$M_{sd} \leq M_{Rd}$

(2) Les hipòtesis fonamentals en les que es basa l'anàlisi en E.L.U. de la secció de formigó armat reforçat amb FRP són les següents:

- La secció recta es manté plana fins a la ruptura, en el mode en que el diagrama de deformació sigui lineal.
- Adherència perfecta entre els components materials (acer-formigó, FRP-formigó)
- Incapacitat del formigó a resistir esforços de tracció.
- Compliment dels reglaments vigents tan de l'acer com del formigó.
- Compliment del compost fibroreforçat amb comportament elàstic lineal fins a ruptura.

(3) Se suposa que la ruptura per flexió es manifesta quan es verifica una de les següents condicions:

Assoliment de la màxima deformació plàstica en el formigó comprimit, ε_{cu}, definit per la normativa vigent.

Assoliment de la deformació màxima en el reforç de FRP, ε_{fd}, calculat com:

$$\varepsilon_{fd} = min\left\{\eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd}\right\}$$

On ε_{fk}, és la deformació característica a ruptura del reforç, γ_f , i η_a, són els coeficients definits, i ε_{fdd}, és la deformació màxima per delaminació intermitja.

Estat de l'estructura en l'aplicació del reforç

(1) En la hipòtesi en que el reforç de FRP sigui aplicat en un element sotmès a una sol·licitació preexistent, el que correspon a un moment M_0 ,s'ha de procedir a la valoració de l'estat de deformació inicial quan M_0 sigui major que el moment de fissuració. En cas contrari, l'estat de deformació inicial es pot menysprear.

(2) Els càlculs es realitzen suposant un comportament elàstic lineal dels dos materials que constitueixen la biga, en particular, la incapacitat del formigó per a suportar la tensió a tracció.

(3) La deformació és significativa en l'extremitat comprimida, ε_{co}, i en aquella part tensada ε_o, quan s'aplica el reforç de FRP. Poden ser obtingudes en base a la linealitat del diagrama de la deformació normal a la secció plana, en funció de la característica mecànica i geomètrica de la secció reactiva.

Resistència de disseny a flexió de l'element reforçat amb FRP

(1) Les dues equacions que s'utilitzaran per a la resolució del problema consisteixen en equilibrar el canvi en la direcció de la biga i l'equilibri a l'eix de rotació que passa pel centre de gravetat de l'armadura tensada o paral·lel a l'eix neutre.

(2) Podem distingir dos tipus de fractura, d'acord a la dilatació màxima del reforç FRP (zona 1) o la màxima contracció del formigó (zona 2).

(3) En la zona 1 la ruptura apareix per assoliment de la deformació (dilatació) elàstica de disseny a la fibra; en qualsevol diagrama de deformació corresponent a aquesta modalitat de ruptura té com a punt fix del valor límit de deformació de la fibra, ε_{fd}, definit de la relació abans indicada.

Les deformacions normals que competeixen a les diverses fibres de la secció plana, s'estenen paral·lelament a l'eix neutre, poden ser calculades, mitjançant la linealitat del diagrama, a través de les següents relacions:

a) (FRP)

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$$

b) (formigó a la part comprimida)

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0).\frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu}$$

c) (acer a compressió)

$$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0).\frac{x - d_2}{(h - x)}$$

d) (acer a tracció)

$$\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0).\frac{d - x}{(h - x)}$$

On ε_{cu} és la deformació límit que el formigó pot suportar a compressió.

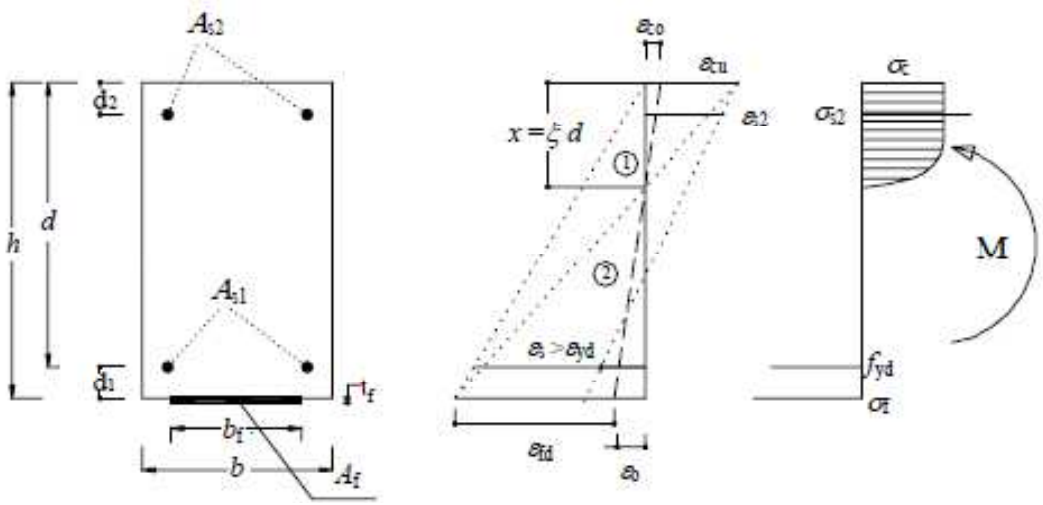


Fig 7.20 – Distribució de tensions en una biga reforçada amb FRP.

Generalment no cal comprovar la quantitat de deformació produïda a partir de l'acer treballant en E.L.U., perquè pels valors habituals dels límits de deformació de les fibres ε_{fd}, i el formigó ε_{cu}, els valors de disseny no s'assoleixen. En el cas en que la deformació última de l'acer establerta en la normativa vigent sigui superada, s'ha de tenir en compte el càlcul de la posició de l'eix neutre i conseqüentment el del moment resistent.

(4) En la zona 2, la ruptura es produeix per esclafament del formigó amb acer tensat, mentre que la deformació límit de les fibres no s'ha assolit encara, en aquest cas es fixa la deformació màxima del formigó comprimit, ε_{cu}, en funció de la qual s'obté, per linealitat, la deformació normal en els altres materials. Una vegada més les deformacions normals corresponents a les diverses fibres de la secció plana de l'element, extenses paral·lelament a l'eix neutre, poden ser calculades mitjançant la linealitat del diagrama a través de les següents relacions:

e) (FRP)

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x}.(h-x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$$

f) (formigó a la part comprimida)

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$$

g) (acer a compressió)

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu}.\frac{x-d_2}{x}$$

h) (acer a tracció)

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu}.\frac{d-x}{x}$$

(5) Per a ambdós tipus de ruptura (eix neutre a la zona 1 o en la zona 2), la posició x, de l'eix neutre es determina a partir de l'equació d'equilibri a la traslació al llarg de l'eix neutre de la biga:

$$0 = \psi.b.x.f_{cd} + A_{s2}.\sigma_{s2} - A_{s1}.f_{yd} - A_f.\sigma_f$$

El valor del moment resistent, M_{Rd}, pot ser determinat a partir de l'equació d'equilibri a la rotació interna a l'eix que passa pel centre de gravetat de l'armadura d'acer i paral·lel a l'eix neutre.

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}}\left[\psi.b.x.f_{cd}.(d-\lambda.x) + A_{s2}.\sigma_{s2}.(d-d_2) + A_f.\sigma_f.d_1\right]$$

On el coeficient parcial γ_{Rd} es pot suposar 1,0.

(6) Si els acers estan en fase elàstica, les seves tensions de treball s'obtenen multiplicant les corresponents deformacions pels mòduls d'elasticitat normal; en cas contrari es suposaran al límit resistent, f_{yd}. A les zones 1 i 2 la quantitat de deformació produïda per les barres d'acer a tracció és sempre superior a la de disseny, ε_{yd}.

(7) Ja que el reforç de FRP té un comportament elàstic-lineal fins a la ruptura, la seva tensió de treball pot ser calculada com el producte de la corresponent deformació per el mòdul d'elasticitat normal del component fibroreforçat (en la direcció de l'eix de la biga).

(8) Per evitar que a l'E.L.U. l'acer traccionat entri en camp elàstic, el coeficient adimensional $\xi = x/d$, no ha de sobrepassar el valor límit ξ_{lim} proporcionat per la següent relació:

$$\xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}}$$

7.3.4. Simbologia CNR-DT200/2004

A_c	Àrea de la secció de formigó [mm^2]
A_f	Àrea del reforçament de FRP [mm^2]
A_{fw}	Àrea reforç a tallant del FRP [mm^2]
A_1	Àrea total de les armadures longitudinals [mm^2]
A_{s1}	Area de les armadures de tracció [mm^2]
A_{s2}	Area de les armadures de compressió [mm^2]
E_C	Mòdul d'elasticitat del formigó [MPa]
E_f	Mòdul d'elasticitat del FRP [MPa]
E_{fib}	Mòdul d'elasticitat de la fibra [MPa]
E_m	Mòdul d'elasticitat de la matriu [MPa]
E_s	Mòdul d'elasticitat de l'acer [MPa]
$F_{max,d}$	Valor de projecte de la màxima força de tracció transmissible del reforç FRP [MPa]
G_a	Mòdul d'elasticitat tangencial de l'adhesiu [MPa]
G_c	Mòdul d'elasticitat tangencial del formigó [MPa]
I_0	Moment d'inèrcia de la secció de formigó armat fissurada i no reforçada
I_1	Moment d'inèrcia de la secció de formigó armat fissurada i reforçada
I_c	Moment d'inèrcia de la secció homogeneïtzada
I_f	Moment d'inèrcia del reforç FRP respecte el propi eix
I_{cr}	Moment d'inèrcia de la secció transformada
M_{Rd}	Moment resistent de projecte de la secció reforçada amb FRP
M_{Sd}	Moment de flexió sol·licitat de projecte
M_0	Moment de flexió sol·licitat de projecte, després de l'aplicació del reforç
M_1	Moment de flexió sol·licitat de projecte, després de l'aplicació del reforç i càrregues
$N_{Rcc,d}$	Resistència a compressió de la biga de formigó armat confinat amb FRP
N_{Sd}	Esforç normal sol·licitat de disseny
b_f	Ample del reforç FRP
d	Cantell útil de la secció
f_{bd}	Resistència de disseny de l'adhesió del reforç FRP al formigó
f_{bk}	Resistència característica de l'adhesió del reforç FRP al formigó
f_c	Resistència a compressió del formigó
f_{cd}	Resistència de disseny a compressió del formigó
f_{ck}	Resistència característica a compressió del formigó
f_{fd}	Resistència de disseny del reforç FRP
f_{fk}	Resistència característica del reforç FRP
f_y	Resistència de l'acer
f_{yd}	Resistència de disseny de l'acer
h	Alçada de la secció
k_{eff}	Coeficient d'eficiència del confinament

t_f	Espessor del reforç de FRP
w_f	Amplada del laminat de FRP
ε_0	Nivell de deformació al substrat de formigó desenvolupat per un moment a flexió
ε_c	Nivell de deformació al formigó
ε_f	Nivell de deformació al reforç de FRP
ε_{fdd}	Nivell de deformació al reforç de FRP compatible amb la delaminació
ε_{fe}	Nivell de deformació efectiva al reforç de FRP
ε_s	Deformació de l'acer
σ_c	Tensió en el formigó
σ_f	Tensió en el reforç FRP
σ_s	Tensió en l'acer
ρ_f	Rati de reforç de FRP

8. CALCULS I DISSENY DE REFORÇ FRP

8.1. Càlculs segons la normativa americana ACI440.R2-02

8.1.1. Dades inicials

Geometria

Amplada de la biga = 500 mm
Cantell efectiu biga = 270 mm
Alçada de la biga = 300 mm

Propietats dels materials

Formigó

f'_c = límit elàstic del formigó = = 36 N/mm^2
β_1 = 1,09-0,008·(f'_c) = 0,80 *(expressió de l'ACI-318)*
w_c = 2.500 kg/m^3
E_c = mòdul elàstic formigó = $w_c^{1,5}.0,043\sqrt{f'_c}$ = 32.250 N/mm^2

Acer

f_y = límit elàstic acer = 500 N/mm^2
A_s = Superfície barres d'acer = 804 mm^2
ρ_s = quantia acer = $\frac{A_s}{b.d}$ = 0,006
E_s = mòdul elàstic acer = 200.000 N/mm^2

CFRP

n = nombre de plegaments = 1 uts.
t_f = espessor plegament = 1,2 mm
w_f = amplada laminat = 200,00 mm
f_{fu}* = límit elàstic CFRP = 2.500 N/mm^2
ε_{fu}* = deformació unitària FRP = 0,0150 mm/mm
E_f = mòdul elàstic FRP = 165.000 N/mm^2
C_E = coefficient mediambiental = 0,95
f_{fu} = límit elàstic FRP = C_E . f_{fu}* = 2.375 N/mm^2
ε_{fu} = deformació unitària FRP = C_E · ε_{fu}* = 0,0143 mm/mm
A_f = n· t_f · w_f = área CFRP = 240,00 mm^2

ρ_f = quantia CFRP = $\frac{A_f}{b.d}$ = 0,0018

8.1.2. Càlcul estat de tensions en biga fissurada

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 \cdot \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \cdot \left(\frac{h}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right) =$$

= 0,2641

$\alpha_s = E_s / E_c = 6{,}20$

x_0 l'extraiem de la següent expressió:

$$\frac{b \cdot {x_0}^2}{2} = \alpha s \cdot A_s \cdot (d - x_0).$$

x_0 = 64,08 mm

$$I_{cr} = \frac{b.{x_0}^3}{3} + \alpha_s . A_{s1} . (d - x_0)^2 = 2{,}55 \ .10^8 \text{ mm}^4$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - kd)}{I_{cr} E_c} = 0{,}0000$$

8.1.3. Càlcul del coeficient de dependència del sistema FRP

Per al càlcul del coeficient de dependència primer hem de calcular l'expressió següent per a determinar la fórmula a utilitzar:

$n.E_f.t_f$ = 198.000 N/mm

degut a que tenim un valor més baix que 180.000 utilitzarem la expressió de la part superior:

$$\kappa_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(1 - \frac{nE_f t_f}{360{,}000}\right) \leq 0.90 \text{ for } nE_f t_f \leq 180{,}000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(\frac{90{,}000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 \text{ for } nE_f t_f > 180{,}000 \end{cases}$$

k_m = 0,532

8.1.4. Càlcul de la profunditat de l'eix neutre

En primer lloc s'extreu un valor per a la realització de posteriors càlculs i poder fer les iteracions pertinents. La primera aproximació serà:
c = 0.20d = 54 mm

8.1.5. Càlcul del nivell de tensions del reforçament FRP

$\varepsilon_{fe} = 0{,}003\left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu} = 0{,}0076$
$\varepsilon_{fe} = 0{,}076 \leq 0{,}0076$

8.1.6. Càlcul del nivell de tensions de les barres d'acer

$\varepsilon_s = \left(\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}\right)\left(\frac{d-c}{h-c}\right) = 0{,}0067$

8.1.7. Càlcul del nivell de tensions de les barres d'acer i FRP

$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$
$f_s = 500\ N/mm^2 \leq 500\ N/mm^2 \rightarrow f_s = f_y = 500\ N/mm^2$
$f_{fe} = E_f\ \varepsilon_{fe} = 1.250\ N/mm^2$

8.1.8. Càlcul de les forces internes resultants i comprovació de l'equilibri

$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f'_c \beta_1 b} = 57{,}21\ mm \neq 54\ mm$

degut a que la profunditat de l'eix neutre són diferents, no hi ha equilibri, s'haurà d'ajustar iterant per igualar-les. Per tant, iterant obtenim:

$c = 57{,}21\ mm$; $\varepsilon_s = 0{,}0066$; $f_s = f_y = 500\ N/mm^2$; $\varepsilon_{fe} = 0{,}0076$; $f_{fe} = 1.250\ N/mm^2$

8.1.9. Càlcul de la resistència a flexió de disseny de la secció

$\phi M_n = \phi\left[A_s f_s\left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) + \psi A_f f_{fe}\left(h - \frac{\beta_1 c}{2}\right)\right] = 152{,}97\ KN.m$

$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \dfrac{0.20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{for } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

Ja que s'ha obtingut que ε_s = 0,0066, per tant s'utilitzarà la primera expressió de les tres, que es $\phi = 0{,}9$

Per tant,

M_n = 169,97 KN.m

8.2. Càlculs segons la normativa europea CEB-FIP Model 2001

8.2.1. Dades inicials

Geometria

Amplada de la biga = 500 mm
Cantell efectiu biga = 270 mm
Alçada de la biga = 300 mm

Propietats dels materials

<u>Formigó</u>

f'_c = límit elàstic del formigó = = 36 N/mm^2
γ_C = 1,60
$f_{cd} = f'_c / \gamma_C$ = 22,50 N/mm^2
w_c = 2.500 kg/m^3
E_c = mòdul elàstic formigó = $w_c^{1,5}.0{,}043\sqrt{f'_c}$ = 32.250 N/mm^2
ε_{CU} = 0,0035 mm/mm

<u>Acer</u>

f_y = límit elàstic acer = 500 N/mm^2
f_{yd} = 434,78 N/mm^2
A_{s1} = Superfície barres d'acer inferior= 804 mm^2
A_{s2} = Superfície barres d'acer superior= 452 mm^2
ρ_s = quantia acer = $\frac{A_s}{b.d}$ = 0,006
E_s = mòdul elàstic acer = 200.000 N/mm^2

<u>CFRP</u>

n = nombre de plegaments = 1 uts.
t_f = espessor plegament = 1,2 mm
w_f = amplada laminat = 200,00 mm
f_{fu}* = límit elàstic CFRP = 2.500 N/mm^2
ε_{fu}* = deformació unitària FRP = 0,0150 mm/mm
E_f = mòdul elàstic FRP = 165.000 N/mm^2
C_E = coefficient mediambiental = 0,95
f_{fu} = límit elàstic FRP = $C_E . f_{fu}$* = 2.375 N/mm^2
ε_{fu} = deformació unitària FRP = $C_E \cdot \varepsilon_{fu}$* = 0,0143 mm/mm

$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f$ = área CFRP = 240,00 mm^2

ρ_f = quantia CFRP = $\frac{A_f}{b.d}$ = 0,0018

$\delta_G = 0{,}4$

$\psi = 0{,}8$

$M_0 = 0$ (*)

**En aquest cas és negligible degut a que la biga no es fissura pel pes propi.*

8.2.2. Càlcul estat de tensions abans d'aplicar el reforç: Situació inicial

$\alpha_s = E_s / E_c = 6{,}20$

Per obtenir la posició de l'eix neutre, es farà servir l'expressió següent:

$$\frac{1}{2}bx_0^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_0)$$

Abans s'hauran d'obtenir els següents paràmetres:

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_0 x_0}{E_c I_0} = 0{,}00\ mm/mm$$

$$I_0 = \frac{1}{3}bx_0^3 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_0)^2 = 2{,}58exp^{+8}\ \text{mm}^4$$

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co}\frac{h - x_0}{x_0} = 0{,}00\ mm/mm$$

Per tant, ara ja es pot obtenir la posició de l'eix neutre:
$x_0 = 62{,}02\ mm$

8.2.3. Càlcul estat de tensions amb el reforç: Anàlisis E.L.U.

Per obtenir la posició de l'eix neutre, es farà servir l'expressió següent:

$$0{,}85\Psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_f E_{fu}\varepsilon_f$$

Abans s'hauran d'obtenir els següents paràmetres:

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu}\frac{x - d_2}{x} = 0{,}0021\ mm/mm$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 = 0{,}0105\ mm/mm$$

Per tant, ara ja es pot obtenir la posició de l'eix neutre:
$x = 75{,}11\ mm$

8.2.4. Càlcul de la resistència a flexió de disseny de la secció

Per a calcular el moment resistent últim s'ha d'emprar la següent expressió:

$M_{Rd} = A_{s1}f_{yd}(d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2}(\delta_G x - d_2)$= 189,14 KN.m

Per a que l'equació de dalt sigui vàlida s'han de comprovar els següents paràmetres:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu}\frac{d - x}{x} = 0{,}0091 \geq \frac{f_{yd}}{E_s} = 0{,}0022\ mm/mm$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 = 0{,}0105 \leq \varepsilon_{fud} = 0{,}015\ mm/mm$$

Per tant,

M_{Rd} = 189,14 KN.m

8.3. Càlculs segons la normativa italiana CNR-DT200/2004

8.3.1. Dades inicials

Geometria

Amplada de la biga = 500 mm
Cantell efectiu biga = 270 mm
Alçada de la biga = 300 mm
Recobriment inferior = d_1 = 30 mm
Recobriment superior = d_2 = 30 mm

Propietats dels materials

Formigó

f'_c = límit elàstic del formigó = = 36 N/mm^2
γ_C = 1,60
$f_{cd} = f'_c / \gamma_C$ = 22,50 N/mm^2
w_c = 2.500 kg/m^3
E_c = mòdul elàstic formigó = $w_c^{1,5}.0{,}043\sqrt{f'_c}$ = 32.250 N/mm^2
ε_{CU} = 0,0035 mm/mm
f_{ctm} = 3,27 N/mm^2
$f_{ctd} = f_{ctm} / \gamma_C$ = 1,43 N/mm^2

Acer

f_y = límit elàstic acer = 500 N/mm^2
f_{yd} = 434,78 N/mm^2
A_{s1} = Superfície barres d'acer inferior= 804 mm^2
A_{s2} = Superfície barres d'acer superior= 452 mm^2
ρ_s = quantia acer = $\frac{A_s}{b.d}$ = 0,006
E_s = mòdul elàstic acer = 200.000 N/mm^2

CFRP

n = nombre de plegaments = 1 uts.
t_f = espessor plegament = 1,2 mm
b_f = amplada laminat = 200,00 mm

f_{fu}* = límit elàstic CFRP = 2.500 N/mm^2
ε_{fu}* = deformació unitària FRP = 0,0150 mm/mm
E_f = mòdul elàstic FRP = 148.500 N/mm^2
E_{fud} = mòdul elàstic últim FRP = 165.000 N/mm^2
η_a = coefficient mediambiental = 0,95
f_{fu} = límit elàstic FRP = 0,9 . f_{fu}* = 2.250 N/mm^2
ε_{fu} = deformació unitària FRP = $C_E \cdot \varepsilon_{fu}$* = 0,0143 mm/mm
$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f$ = área CFRP = 240,00 mm^2
γ_f = 1,10
$\gamma_{f,d}$ = 1,20
ρ_f = quantia CFRP = $\frac{A_f}{b.d}$ = 0,0018
δ_G = 0,4
ψ = 0,8
M_0 = 0 (*)

**En aquest cas és negligible degut a que la biga no es fissura pel pes propi.*

8.3.2. Càlcul estat de tensions

Per determinar l'estat de tensions s'haurà de buscar els valors dels paràmetres de delaminació i fissuració.

$$\varepsilon_o = \frac{M_0}{0{,}9d.E_s.A_{s2}} = 0{,}00\ mm/mm$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1$$

$$\Gamma_{Fk} = 0{,}03.k_b.\sqrt{f_{ck}f_{ctm}} = 0{,}3363\ \text{N/mm}^2$$

$$f_{fdd,2} = \frac{k_{cr}}{\gamma_{f,d}\cdot\sqrt{\gamma_c}}.\sqrt{\frac{2.E_f.\Gamma_{Fk}}{t_f}} = 570{,}13\ \text{N/mm}^2$$

$$k_{cr} = 3{,}0$$

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} = 0{,}0038\ \text{mm/mm}$$

$\varepsilon_{fd} = min\left\{\eta_a.\frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd}\right\}$ = 0,0038

Per obtenir la posició de l'eix neutre, es farà servir l'expressió següent, juntament amb els paràmetres de deformació dels elements:

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x}.(h - x) - \varepsilon_0$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu}\frac{x - d_2}{x}$$

$$0 = \psi.b.x.f_{cd} + A_{s2}.E_s.\varepsilon_{s2} - A_{s1}.f_{yd} - A_f.E_f.\varepsilon_f$$

Llavors la profunditat de l'eix neutre serà:

x = 68,04 mm

i per tant, les deformacions unitàries són:

ε_f = 0,0119
ε_{s1} = 0,0104
ε_{s2} = 0,0020
$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ = 0,0035

8.3.3. Anàlisis E.L.U. : Moment últim resistent

Per a calcular el moment resistent últim s'ha d'emprar la següent expressió:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}}.[\psi].b.x.f_{cd}.(d - \lambda.x) + A_{s2}.E_s.\varepsilon_{s2}.(d - d_2) + A_f.E_f.\varepsilon_f.d_1 =$$

M_{Rd} = 183,08 KN.m

9. COMPARATIVA TEÒRICA I PRÀCTICA

L'objecte d'aquest apartat és el de extreure'n conclusions sobre els resultats obtinguts tant dels assajos com dels càlculs teòrics en base les normatives vigents.

En la pràctica s'han realitzat un total de 6 assajos amb diferents tipologies de càrrega i longituds de biga, mentre que teòricament s'han realitzat diferents càlculs amb la mateixa tipologia assajada en diferents normatives estatals, com són la normativa ACI 440.2R-02 americana, la normativa CEB-FIP Model 2001/Eurocode 2 TG93, i la normativa CNR-DT200/2004 italiana.

9.1. Resultats dels assajos pràctics en el laboratori

Un cop realitzats els assajos en el laboratori, es poden extreure els resultats de la força màxima que ha sigut capaç de resistir la biga en un E.L.U.

El resum dels resultats és el següent:

- ✓ B01 – Biga de 3,5 metres amb càrrega puntual sense reforç FRP
  Força màxima resistent = 180,00 KN

- ✓ B02 – Biga de 3,5 metres amb càrrega puntual amb reforç FRP
  Força màxima resistent = 245,60 KN

- ✓ B03 – Biga de 3,5 metres amb càrrega puntual amb reforç FRP
  Força màxima resistent = 222,40 KN

- ✓ B04 – Biga de 5,5 metres amb càrrega puntual amb reforç FRP
  Força màxima resistent = 152,00 KN

- ✓ B05 – Biga de 5,5 metres amb càrrega a 2 punts amb reforç FRP
  Força màxima resistent = 207,30 KN

- ✓ B06 – Biga de 5,5 metres amb càrrega a 2 punts amb reforç FRP
  Força màxima resistent = 180,50 KN

9.2. Taula comparativa de valors: Laboratori – Normatives vigents

En la següent taula es resumeixen els valors extrets dels assajos, i els valors calculats segons la normativa vigent corresponent.

Ref.	Assaig Laboratori [KN]	Normativa Americana [KN]	Normativa Europea [KN]	Normativa Italiana [KN]
B02	245,6	226,6*	252,2*	244,1*
B03	222,4			
B04	152,0	136,0*	151,3*	146,5*
B05	207,3	200,0*	222,5*	215,4*
B06	180,5	170,0*	189,1*	183,1*

**Valors extrets dels càlculs segons la normativa vigent (veure apartat 8)*

9.3. Taula comparativa d'errors: Laboratori – Normatives vigents

En la següent taula es resumeixen els valors dels errors de la taula anterior, comparant així el grau de dispersió entre normatives i els assajos pràctics.

Ref.	Assaig Laboratori	Normativa Americana [%]	Normativa Europea [%]	Normativa Italiana [%]
B02	-	7,73	2,69	0,61
B03	-	1,88	13,39	9,75
B04	-	10,52	0,46	3,61
B05	-	3,52	7,33	3,91
B06	-	5,82	4,76	1,44
Error [%]	-	**5,89**	**5,73**	**3,86**

10. BIBLIOGRAFIA

Normativa consultada

- EHE-08. *"Instrucción de Hormigón Estructural"*
- ACI 318-08. *"Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary".* Reported by ACI Committee 318.
- ACI 440.2R-02. *"Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures".* Reported by ACI Committee 440.
- CEB-FIP Bulletin 14 Model 2001. Task group 9.3 FRP. *"Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures".*
- CEB-FIP Model Code 1990. *"Design Code".*
- CNR-DT 200/2004. *"Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".*

Llibres i guies

- *"Composites for Construction. Structural Design with FRP Materials".* Lawrence C. Bank. 2006
- *"Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. Design Manual".* ISIS CANADA. 2001.
- *"Hormigón armado".* 14è Edició. P. Jiménez Montoya, A.G. Meseguer, F. Morán.2004
- *"Manual per al reforç d'estructures de formigó amb laminats de fibres de carboni".* Francesc Puigvert. 2009. Fitxes Tècniques del Col·legi d'Enginyers Tècnics Industrials de Barcelona.
- *"Extensometria. Volum I".* Edicions UPC-ETSEIB. 1992. Mateu Martín, Francesc Roure, Jesús Sanz.

Reports i Tesis

- *"Design guidance for strengthening concret structures using fibre composite materials".* Technical Report No. 55. Report of a Concrete Society Committee.

- *"Fibre Reinforced Polymers in Civil Engineering. Flexural Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Near Surface Mounted CFRP Rods".* Hakan Nordin. 2003.

- *"Flexural analysis and design of reinforced concrete beams with externally bonded FRP reinforcement".* N. Pesic & K.Pilakoutas. University of Sheffield. 2003.

- *"Refuerzo de estructuras mediante fibra de carbono."* Sesión técnica monogràfica nº 1. ACIES (Asociación de Consultores Independientes de Estructuras de Edificación)

Documentació digital en xarxa

- Pàgina web de l'empresa SIKA, http://www.sikaconstruction.com

- Pàgina web de l'empresa BASF CONSTRUCCION, http://www.basf-cc.es

-ANNEX-

I. ANNEX NORMATIVA AMERICANA ACI 440.R2-02

DISSENY I CONSTRUCCIÓ D'UNIONS EXTERNES DE SISTEMES FRP (ACI 440.2R-21)

Capítol 9 – Resistència a flexió

La unió del reforç FRP a la superfície de tensió d'un element de formigó a flexió amb fibres orientades al llarg de la seva longitud proporcionarà un increment de resistència a flexió. Els increments seran d'un 10 a un 160% en la seva totalitat, segons documentació extreta de Meier i Kaiser 1991. Si es té en compte la ductilitat, i els límits de servei, no obstant, els increments són entre un 5 al 40%.

Aquest capítol no s'aplica a sistemes FRP utilitzats a millorar la resistència a flexió dels elements en les esperades regions plàstiques articulades en el moment dúctil de la estructura resistint càrregues sísmiques. El disseny d'aquestes aplicacions, si s'utilitza, hauria d'examinar el comportament de la estructura reforçada, tenint en compte que les seccions resistents tenen una rotació i capacitats corbades molt més reduïdes. En aquest cas, l'efecte de la càrrega cíclica inversa en el reforçament FRP hauria de ser investigat.

9.1 Consideracions generals

Aquest capítol presenta una orientació sobre el càlcul de l'efecte de la resistència a flexió en la adició d'un reforç FRP longitudinal a la secció tensada d'una biga de formigó armat. Un exemple específic en aquest capítol es la aplicació a una secció rectangular existent reforçada en la zona de tensió amb acer sense pretensar. Els conceptes generals exposats ara present, per tant, poden expandir-se a formes no rectangulars (Seccions en T i Seccions en I) i a elements amb reforçament d'acer comprimit. En el cas dels elements pretensats, la compatibilitat de deformació, respecte l'estat de tensió en l'element tensat, haurien d'utilitzar-se per avaluar la contribució del FRP. Altres modes controlats de trencament dels tendons pretensats haurien de ser considerats també.

9.1.1 Hipòtesis -

Les següents hipòtesis s'apliquen tenint en compte la resistència a flexió d'una secció reforçada amb un sistema extern aplicat de FRP:

- Els càlculs de disseny estan basats en les dimensions reals, reparacions internes de reforç d'acer, i propietats del material de l'element existent que està sent reforçat.

- Els esforços en el reforç i en el formigó son directament proporcionals a la distància des de l'eix neutre, és a dir, una secció plana abans de la càrrega segueix plana després.

- No hi ha desplaçament relatiu entre el reforç extern de FRP i el formigó.

- La deformació a tallant en la capa adhesiva és despreciable, ja que la capa és molt fina i les variacions d'espessor són lleugeres.

- La capacitat màxima d'ús d'esforç a compressió en el formigó és 0,003.

- La resistència a tracció del formigó és considera nul·la, i el comportament tensió-deformació del reforç de FRP és elàstic i lineal.

S'hauria d'entendre que mentre que algunes d'aquestes hipòtesis són necessàries pel bé de la facilitat de càlcul, aquestes no reflecteixen precisament el comportament fonamental real del reforçament a flexió de FRP. Per exemple, hi haurà deformació a tallant a la capa adhesiva causada pel desplaçament relatiu entre el FRP i el substrat. La inexactitud de les hipòtesis no afectaran, per tant, significativament la resistència a flexió calculada d'un element reforçat. Un factor de reducció addicional (presentat a la secció 9.2) compensarà de manera conservadora alguna d'aquestes discrepàncies.

9.1.2 Resistència a tallant de la secció

Quan el reforç FRP és usat per a augmentar la resistència a flexió d'un element, és important verificar que l'element serà capaç de resistir les forces tallants associades amb l'increment de la resistència a flexió. Potencialment una fallida a tallant de la secció hauria de ser considerada per comparar el disseny de la secció a tallant amb la requerida. Si una resistència a tallant addicional és necessària, poden ser usats laminats FRP orientats transversalment a la secció per a resistir forces tallants com les descrites al capítol 10.

9.1.3 Tensió existent en la biga

A menys que totes les càrregues en un element, incloent el seu pes propi i alguna força pretensada, siguin eliminades abans de la instal·lació del reforç FRP, la biga la qual el FRP és aplicat estarà tensionada. Aquestes tensions haurien de ser considerades com a tensions inicials i haurien de ser excloses de la tensió en el FRP. El nivell de tensió inicial als costats de la biga ε_{bi} pot ser determinat amb l'anàlisi elàstic del conjunt, considerant totes les càrregues que

hi seran, durant la instal·lació del sistema FRP. Es recomana que l'anàlisi elàstic del conjunt existent sigui en base a les propietats a ruptura de la secció.

9.2 Resistència nominal

La aproximació del càlcul requereix que la resistència a flexió de disseny d'una biga excedeixi el seu moment requerit tal com s'indica a la equació (9-1). La resistència a flexió de disseny ϕM_n es refereix a la resistència nominal d'una biga multiplicada per un factor de reducció, i el moment resistent necessari M_u es refereix als efectes de càrrega calculats de les càrregues reduïdes. Aquesta guia recomana el moment resistent requerit per la ACI 318-99. Ademés, la guia recomana l'ús dels factors de reducció requerits per la ACI 318-99 amb un factor de reducció de resistència addicional del 0,85 aplicat a la contribució de flexió del reforç FRP únicament (ψ=0,85). Veure equació (9-2) per a una il·lustració de l'ús del factor de reducció addicional. Aquest factor de reducció addicional vol dir que es té en compte el baix rendiment del reforç FRP, comparat amb l'armadura d'acer.

$$\phi M_n \geq M_u$$

La resistència a flexió nominal d'un conjunt de formigó reforçat amb FRP pot ser determinat en base la compatibilitat de tensions, equilibri de forces internes, i el control del mode de fallida.

9.2.1 Modes de fallida – La resistència a flexió d'una secció depèn del control del mode de fallida. Els següents modes de fallida haurien de ser investigats en una secció reforçada amb FRP.

- Fissuració del formigó en compressió abans de la deformació de l'armadura de reforç.
- Deformació de l'acer en tensió seguit per una ruptura del laminat FRP.
- Deformació de l'acer en tensió seguit per fissuració del formigó.
- Delaminació tensional a tallant del revestiment del formigó.
- Deslligament del FRP de l'element de formigó.

La fissuració del formigó se suposa que es produeix si la tensió de compressió en el formigó arriba a la seva tensió màxima d'ús. ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ = 0,003). La ruptura del laminat de FRP se suposa que es produeix si la tensió del FRP arriba a la seva tensió de ruptura de disseny ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$) abans que el formigó arribi a la seva tensió màxima d'ús.

La delaminació al recobriment o el deslligament del FRP pot produir-se si la força al FRP no pot ser suportada per l'element. A fi de prevenir deslligaments

del laminat de FRP, s'hauria de limitar el nivell de tensió desenvolupat al laminat. La següent equació (9-2) dóna una expressió per al coeficient k_m :

$$\kappa_m = \begin{cases} \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(1-\dfrac{nE_ft_f}{2{,}000{,}000}\right) \le 0.90 \text{ for } nE_ft_f \le 1{,}000{,}000 \\ \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(\dfrac{500{,}000}{nE_ft_f}\right) \le 0.90 \text{ for } nE_ft_f > 1{,}000{,}000 \end{cases} \quad \text{(9-2) U.S.}$$

$$\kappa_m = \begin{cases} \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(1-\dfrac{nE_ft_f}{360{,}000}\right) \le 0.90 \text{ for } nE_ft_f \le 180{,}000 \\ \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(\dfrac{90{,}000}{nE_ft_f}\right) \le 0.90 \text{ for } nE_ft_f > 180{,}000 \end{cases} \quad \text{(9-2) SI}$$

El terme k_m expressat en la eq. (9-2), és un factor no més gran que 0,9 que pot ser multiplicat per la tensió de ruptura del laminat FRP fins arribar al límit de tensió per prevenir el deslligament. El nombre de plegaments "n" utilitzats en aquesta expressió és el nombre de plegaments del reforçament a flexió FRP al llarg de la biga a on el moment que està sent calculat. Aquest terme reconeix que els laminats amb rigidesa més gran són més propenses a la delaminació. Així, com que la rigidesa del laminat augmenta, el límit de tensió es torna més estricte. Pels laminats amb una rigidesa nE_ft_f més gran que 180.000 N/mm, k_m limita la força en el laminat com a oposició al nivell de tensió. Això posa un nivell superior en el total de la força que pot ser desenvolupada en el laminat FRP, amb independència del nombre de plegaments. La amplada del laminat FRP no està inclosa en el càlcul de la rigidesa, nE_ft_f, perquè un increment en l'amplada del FRP representa un increment en la seva àrea de lligament.

El terme k_m està basat només en una tendència general reconeguda i en la experiència d'enginyers practicant el disseny dels sistemes FRP. Noves investigacions sobre els vincles mecànics del reforçament a flexió FRP haurien de resultar en mètodes més precisos per predir la delaminació, resultant el perfeccionament de la eq. (9-2). Nous desenvolupaments de la equació són probables que no només comptin amb la rigidesa del laminat sinó també amb la rigidesa del conjunt de la biga. El comitè recomana l'ús de la eq. (9-2) per limitar la tensió en el FRP i prevenir la delaminació.

9.2.2 Nivell de tensió en el reforç FRP – És important determinar el nivell de tensió en el reforç FRP en el E.L.U., perquè els materials FRP són linealment elàstics fins a la fallida, el nivell de tensió en el FRP dictarà el nivell de tensió desenvolupat al FRP. El màxim nivell de tensió que es pot aconseguir en el reforç FRP es regirà per qualsevol nivell de tensió desenvolupat en el FRP al punt el qual el formigó s'aixafa, el punt en el que el FRP trenca, o en el punt en

que el FRP es deslliga de l'element. Aquesta tensió màxima or el nivell de tensió efectiu en el reforç FRP al E.L.U. es pot trobar a la eq. (9-3).

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu}$$

On ε_{bi} és la tensió inicial de l'element com es descriu en la secció 9.1.3.

9.2.3 Nivell de tensions en el reforç FRP – El nivell efectiu de tensions en el reforç FRP és el màxim nivell de tensió que es pot produir en el reforç abans de que la secció falli a flexió. Aquest nivell efectiu de tensió es pot trobar com el nivell de tensió en el FRP, assumint un comportament perfectament elàstic.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

9.3 Ductilitat

L'ús del FRP exterior per al reforçament a flexió reduirà la ductilitat de l'element original. En alguns casos, la pèrdua de la ductilitat és negligible. Seccions que experimenten una pèrdua significant de ductilitat, tanmateix, s'haurien de dirigir. Per mantenir un suficient grau de ductilitat, el nivell de tensió en l'acer al E.L.U. ha de ser verificat. Una ductilitat adequada s'aconsegueix si la tensió a l'acer al punt de fissuració del formigó o col·lapse del FRP, incloent la delaminació o deslligament, és al menys 0,005, segons la definició d'una secció tensada controlada, tal com figura en el capítol 2 del ACI 318-99.

L'enfocament adoptat per aquesta guia segueix la filosofia d'ACI 318-99 Apèndix B, on una secció de aixa ductilitat ha de compensar amb una major reserva de força. La reserva major de força s'aconsegueix mitjançant l'aplicació d'un factor de reducció de 0,70 a les seccions fràgils, front al 0,90 per a les seccions dúctils.

Per tant, s'ha d'utilitzar un factor de reducció de la força donada per la Eq. (9-5), on ε_s és la tensió a l'acer al E.L.U.

$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \dfrac{0.20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{for } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

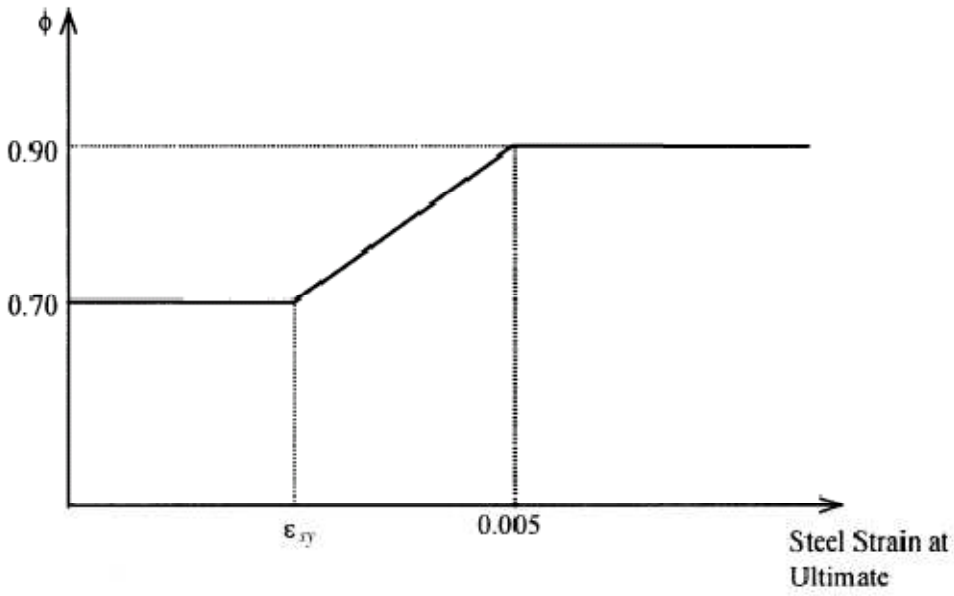
Aquesta equació estableix el factor de reducció de 0,90 per a seccions dúctils i 0,70 per a seccions fràgils on l'acer no plastifica, i proporciona una transició lineal per al factor de reducció entre aquests dos extrems (Figura 9.1).

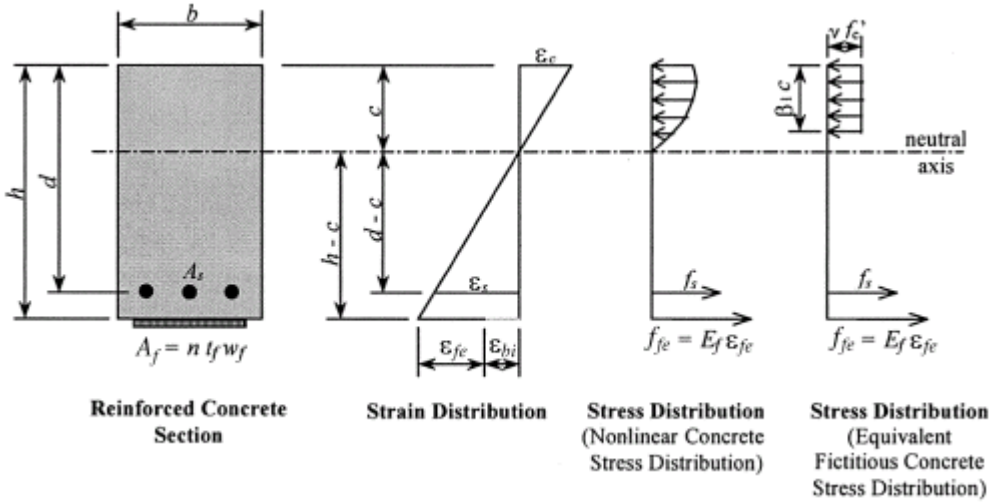
9.4 Capacitat de servei

La capacitat de servei d'un element (deflexions, esquerdes) sota càrregues de servei han de satisfer les disposicions aplicables de la ACI 318-99. L'efecte del reforç exterior de FRP en el servei pot ser avaluat mitjançant la l'anàlisi de secció transformada.

Per evitar deformacions inelàstiques del formigó armat amb FRP extern, l'existent armadura d'acer ha de ser previst per a la plastificació sota nivells de càrrega de servei. Les tensions a l'acer sota càrrega de servei s'ha de limitar al 80% de la tensió plàstica, com es mostra en la Eq. (9-6).

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$





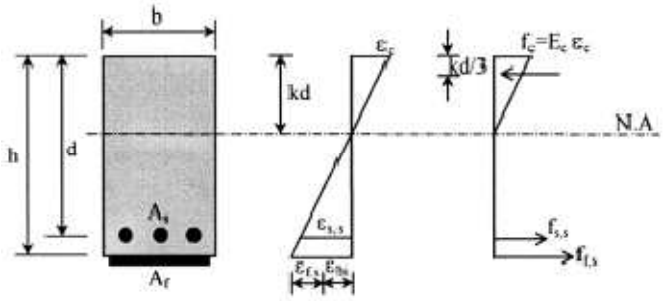
9.5 Ruptura a fluència i límits de tensió a fatiga

Per evitar la ruptura a fluència sota tensions sostingudes o fallida deguda a tensions cícliques i fatiga al reforç FRP, els nivells de tensió en el reforç FRP sota aquestes condicions de tensió han de ser verificats. Degut a que aquests nivells de tensió seran dins el rang de resposta elàstica de l'element, les tensions poden ser calculades utilitzant un anàlisi elàstic.

En el punt 3.4, es descriuen el fenomen de trencament per fluència i la fatiga característiques dels materials de FRP , i és examinada la resistència als seus efectes per diversos tipus de fibres.

Com s'indica en el punt 3.4.1, la investigació ha indicat que el vidre, aramida i fibres de carboni poden mantenir 0,30, 0,47 i 0,91 vegades la seva resistència màxima, respectivament, abans de trobar un problema de ruptura a fluència (Yamaguchi et al. 1997). Per evitar la fallida d'un element reforçat amb FRP a causa d'un trencament a fluència i fatiga del FRP, els límits de tensió per a aquestes condicions han d'imposar-se en el reforç de FRP. El nivell de tensió en el reforç FRP pot ser calculat utilitzant un anàlisi elàstic i un moment aplicat per totes les càrregues sostingudes (càrregues mortes i la part de la càrrega sostinguda útil), a més del màxim moment induït en un cicle de càrrega a fatiga (Fig. 9.2). La tensió sostinguda s'ha de limitar segons allò expressat per la Eq. (9-7) per mantenir la seguretat. Valors per als nivells de tensió cíclica sostinguda afegida per a la seguretat es donen a la Taula 9.1. Aquests valors es basen en els límits de tensió anteriorment establerts en la secció 3.4.1 amb un factor de seguretat imposat de 1/0,6.

Tensió cíclica sostinguda afegida≥$f_{f,s}$



	Fiber type		
Stress type	Glass FRP	Aramid FRP	Carbon FRP
Sustained plus cyclic stress limit	$0.20f_{fu}$	$0.30f_{fu}$	$0.55f_{fu}$

9.6 Aplicació de una secció rectangular reforçada separadament

Per il·lustrar els conceptes presentats en aquest capítol, aquesta secció descriu l'aplicació d'aquests conceptes a una secció rectangular reforçada separadament (no pretensada.

9.6.1 Resistència última - Figura 9.2 il·lustra la tensió interna i la distribució de tensions per a una secció rectangular sota flexió al E.L.U.

El procediment de càlcul utilitzat per arribar a la resistència última ha de satisfer la compatibilitat de tensions i l'equilibri de forces i ha de considerar el govern de modes de fallida. Diversos procediments de càlcul es poden derivar per satisfer aquestes condicions. El procediment de càlcul descrit aquí és un procediment que il·lustra un mètode d'assaig i error.

El procediment d'assaig i error consisteix a seleccionar una suposada profunditat de l'eix neutre, c, calculant el nivell de tensió en cadascun dels materials utilitzant la compatibilitat de tensions, calculant el nivell de tensió associat en cada material; i verificant l'equilibri de forces internes. Si les forces resultants interiors no estan equilibrades, la profunditat de l'eix neutre s'ha de revisar i repetir, per tant, el procediment.

Per a qualsevol profunditat de l'eix neutre c, el nivell de tensió en el reforç FRP pot ser calculat a partir de la Eq. (9-3) presentada a la secció 9.2.2 i reimprès de la següent manera per conveniència. Aquesta equació considera que regeixen els modes de fallida de la suposada profunditat de l'eix neutre. Si el primer terme els controls de la equació, controls de fissuració del formigó, fallida

a flexió de la secció. Si els controls del segon terme, controls de fallida del FRP (trencament o deslligament), controls de fallida a flexió de la secció.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu}$$

El nivell efectiu de tensió en el reforç FRP es troba del nivell de tensió en el FRP, assumint un comportament perfectament elàstic.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

Basat en el nivell de tensió en el reforç FRP, el nivell de tensió en la tensió de l'acer no pretensat es troba de la Eq. (9-8) utilitzant la compatibilitat de tensions.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{d-c}{h-c}\right)$$

La tensió en l'acer es calcula a partir del nivell de tensió en l'acer suposant un comportament elastoplàstic.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

Amb la tensió i el nivell de tensió en el FRP i amb el reforç de l'acer determinat per la suposada profunditat de l'eix neutre, l'equilibri de forces internes es pot comprovar usant la Eq. (9-10).

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c' \beta_1 b}$$

Els termes γ i β_1 en la Eq. (9-10) són paràmetres que defineixen un bloc de tensions rectangular en el formigó equivalent a la distribució real de tensions no lineals. Si l'aplastament del formigó és el mode de fallida de control (abans o després de la plastificació de l'acer), γ i β_1 poden ser presos com els valors associats amb el bloc de tensions Whitney (γ=0,85 i β_1 de la secció 10.2.7.3 del ACI 318-99). Si el trencament del FRP, delaminació del recobriment, o el mode de control deslligament del FRP es produeix, el bloc de tensions Whitney donarà raonablement resultats precisos. Un bloc de tensions més precís per a un nivell real de tensions assolit en el formigó en l'estat límit últim, E.L.U., poden ser

utilitzats. A més, els mètodes que consideren una distribució de tensions no lineals en el formigó també poden utilitzar-se.

La profunditat real de l'eix neutre, c, es troba simultàniament satisfent la Eq. (9-3), (9-4), (9-8), (9-9) i (9-10), la qual cosa estableix l'equilibri de forces internes i la compatibilitat de tensions.

La resistència a flexió nominal de la secció amb reforç extern de FRP pot ser calculat a partir de la Eq. (9-11). Un factor de reducció addicional ψ_f s'aplica a la contribució de la resistència a flexió del reforç de FRP. Es recomana un factor ψ_f=0,85.

$$M_n = A_s f_s\left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) + \psi_f A_f f_{fe}\left(h - \frac{\beta_1 c}{2}\right)$$

9.6.2 Tensions en l'acer sota càrregues de servei - El nivell de tensions en l'acer de reforç es pot calcular sobre la base d'un anàlisi elàstic de la secció de formigó reforçat, com indica la Eq. (9-12).

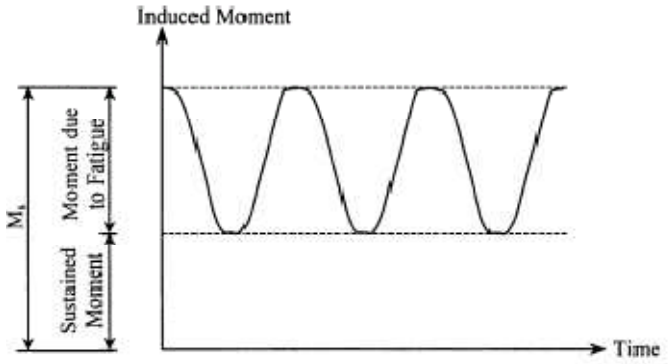
$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f\left(h - \frac{kd}{3}\right)\right](d - kd)E_s}{A_s E_s\left(d - \frac{kd}{3}\right)(d - kd) + A_f E_f\left(h - \frac{kd}{3}\right)(h - kd)}$$

La distribució de la tensió i la tensió en la secció del formigó armat es mostra a la Fig. 9.3. Similar al formigó armat convencional,la profunditat de l'eix neutre en servei *kd* pot ser calculat prenent el primer moment de les àrees de la secció transformada. L'àrea transformada del FRP es pot obtenir multiplicant la superfície del FRP per la proporció modular del FRP al formigó. Encara que aquest mètode no té en compte la diferència en el nivell de tensió inicial del FRP, el nivell de tensió inicial no té gran influència en la profunditat de l'eix neutre en el rang de resposta elàstica de l'element.

Les tensions en l'acer sota càrregues de servei calculades a partir de la Eq. (9-12)s'han de comparar contra els límits descrits a la secció 9.4.

9.6.3 Tensions en l'acer sota càrregues de servei – El nivell de tensions en el reforç FRP pot ser calculat utilitzant la Eq. (9-13) amb $f_{s,s}$ de la Eq. (9-12) i M_s en la Eq. (9-12) igual al moment a causa de totes les càrregues sostingudes (càrregues mortes i la part sostinguda de la càrrega útil), així com el màxim

moment induït en un cicle de càrrega de fatiga, com es mostra en la Fig. 9.4. Equació (9-13) dóna el nivell de tensions en el reforç de FRP aplicat en virtut d'un moment en el rang de resposta elàstica de l'element.



$$f_{f,s} = f_{s,s}\left(\frac{E_f}{E_s}\right)\frac{h-kd}{d-kd} - \varepsilon_{bi}E_f$$

Les tensions en el FRP sota càrregues de servei calculades a partir de la Eq. (9-13)s'han de comparar contra els límits descrits a la secció 9.5.

II. ANNEX FITXES COMERCIALS DELS MATERIALS

Sistema Integral para el Refuerzo de Estructuras MBrace®

Hojas de fibras, Laminados, Resinas

BASF
The Chemical Company

MBrace®

Sistema Integral para el Refuerzo de Estructuras. Los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibra (FRP, por sus siglas en inglés) se han utilizado durante casi 30 años en aplicaciones aeroespaciales y manufactureras que requieren pesos ligeros y propiedades estructurales de alta resistencia a la tracción y a la corrosión. El rendimiento de los materiales FRP viene siendo comprobado durante años en aplicaciones de ingeniería civil tales como estructuras de cubiertas refuerzos internos de hormigón emparrillados y especialmente como refuerzo de adhesión externa.

La gran eficacia de los materiales FRP en todas las aplicaciones anteriores se debe a sus propiedades de baja fluencia, además de tener menos espesor y ser más ligeros que el acero y poseer una resistencia a la tensión 10 veces superior.

Los materiales de FRP se han utilizado en todas estas aplicaciones porque presentan baja fluencia y comparados con el acero, son de menor espesor, más ligeros y con una resistencia a tracción 10 veces superior. El Sistema Integral para el Refuerzo de Estructuras MBrace® es un sistema de refuerzo adherido a la parte exterior de estructuras de hormigón y mampostería que está siendo cada vez más aceptado al comprobar sus propiedades en gran cantidad de proyectos.

Hojas de Fibra

El sistema de refuerzo MBrace® se elabora a base de Hojas de Fibra en obra a partir de sus dos componentes principales: fibra y polímero.

1. La fibra llega a la obra en forma de tejido flexible que se adapta a la estructura y se satura con epoxi no curado (componente polimérico).

2. A medida que el epoxi endurece, se forma un compuesto de FRP rígido perfectamente adaptado a la estructura que se adhiere monolíticamente a la misma mediante la resina epoxi.

Esta técnica, conocida como “composición in-situ”, ofrece características de flexibilidad, facilidad de construcción y tiempos de instalación cortos que disminuyen los costos de mano de obra y los tiempos de parada.

Fácil de instalar

La instalación del Sistema Integral para el Refuerzo de Estructuras MBrace® está a cargo de contratistas experimentados y capacitados quienes lo aplican mediante la técnica de “ colocación in-situ”. Si bien es cierto que el proceso de instalación varía según las características específicas del proyecto y del sistema a aplicar, hay una secuencia de pasos comunes.

Usos Típicos

Mejora de las capacidades de carga de estructuras de hormigón

- Aumento de la resistencia a flexión de vigas, losas y muros de hormigón
- Aumento de la resistencia a cortante de vigas y muros de hormigón
- Aumento de la capacidad de silos, tuberías y túneles de hormigón

Reestablecimiento de la capacidad de estructuras de hormigón deterioradas

- Reemplazo del armado corroído
- Reemplazo de tendones postensados dañados
- Confinamiento de reparaciones de hormigón

Corrección de errores de diseño o de construcción

- Reemplazo de armado faltante

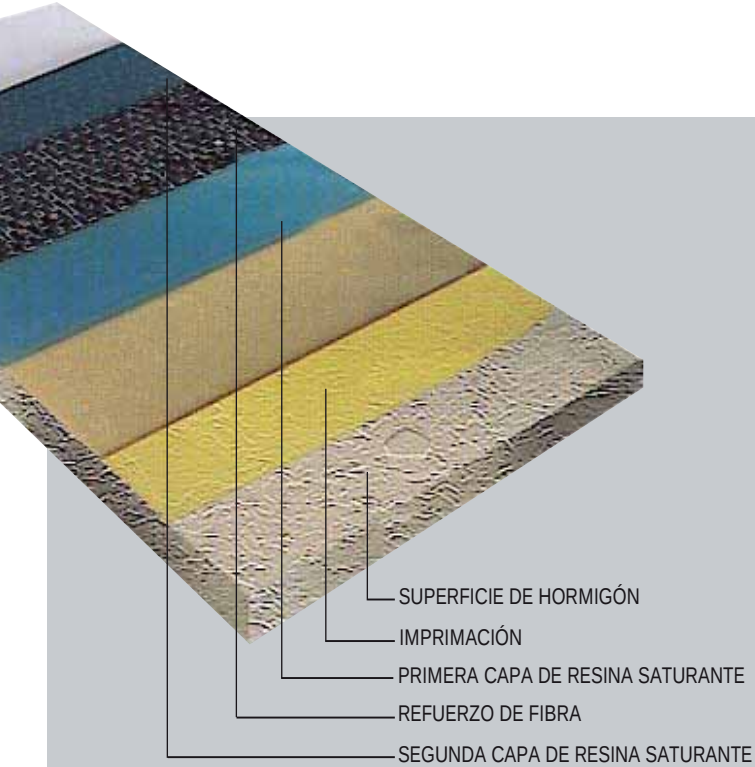
Refuerzo para protección antisísmica

- Mejora de la resistencia y ductilidad de pilares de hormigón
- Confinamiento y resistencia adicionales a las conexiones de hormigón

Ventajas

- Alta resistencia y rigidez
- Peso ligero
- Gran durabilidad y resistencia a la corrosión
- Tiempos de instalación cortos
- Posibilidad de instalación en áreas de acceso limitado
- No altera la apariencia
- Posibilidad de adaptar el producto alrededor de superficies de geometría compleja

Componentes del sistema MBrace®



MBrace® Primer
Imprimación epoxi de baja viscosidad para sellar los poros del hormigón

MBrace® Primer W
Imprimación epoxi para soportes húmedos (≤ 7%)

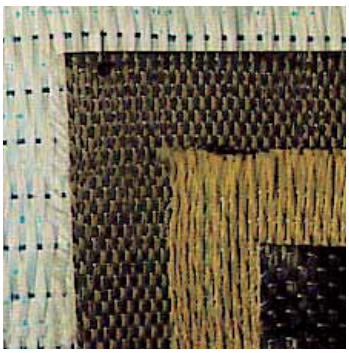
MBrace® Adhesivo
Pasta epoxídica espatulable para regularización de la superficie y adhesivo del MBrace® Laminado

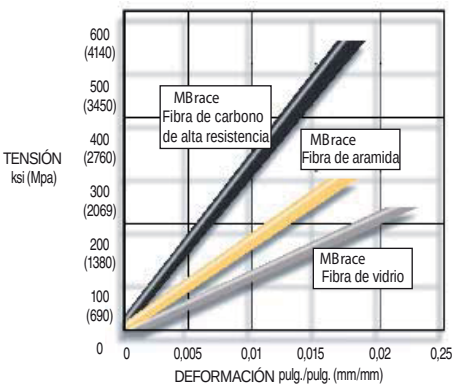
MBrace® Saturante
Impregnación epoxi para fijación y encapsulamiento de MBrace® Hoja de Fibra

Hojas de fibra MBrace®
Tejidos de fibra de carbono, de vidrio y de aramida

Laminados MBrace®
Laminados preformados de fibra de carbono

MBar®
Barras pultrusas de fibra de carbono





MBrace®
Fibra de aramida
- Alta resistencia
- Excelente resistencia química
- Baja conductividad, alta resistencia a la rotura por fluencia
- Temperaturas de utilización: -180ºC a + 180ºC
- Excelente resistencia al impacto

MBrace®
Fibra de vidrio
- Alta resistencia
- Alargamiento a la rotura relativamente alto
- Baja conductividad
- Resistentes al álcali en contacto directo con hormigón

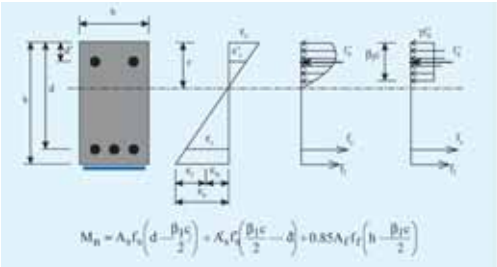
MBrace®
Fibra de carbono alta resistencia
- Alta resistencia
- Muy alta resistencia y rigidez
- Excelente resistencia química a la humedad
- Alta resistencia a la fatiga y a la rotura por fluencia

MBrace® Laminado
- Instalación rápida y fácil
- Presentación en rollos de fácil manejo
- Durable
- Ligero
- Alta relación resistencia/peso
- Diferentes módulos elásticos

El Instituto Americano del Hormigón (ACI), ha publicado recientemente sus primeras recomendaciones para la utilización de sistemas de FRP para el refuerzo de estructuras de hormigón. Basado en gran parte en la Guía de Diseño de MBrace de 1997, la guía ACI 440.2R-02 es un documento completo que cubre el diseño, construcción y aspectos de control de calidad de los sistemas de FRP.

Refuerzo a flexión

El MBrace® puede utilizarse para complementar la resistencia a flexión de vigas, losas, muros y otros elementos a flexión. La capacidad a flexión de miembros reforzados, prentensados y postensados puede aumentar hasta en un 70%. En estas aplicaciones el sistema MBrace® se instala a lo largo de la longitud del elemento a tratar de la misma manera que un refuerzo de acero longitudinal.



El sistema MBrace® puede aplicarse sobre muros de hormigón y mampostería para aumentar sus resistencia a cargas fuera del plano, tales como aquellas debidas a vientos, presión del suelo, presión de fluidos en tanques y voladuras.

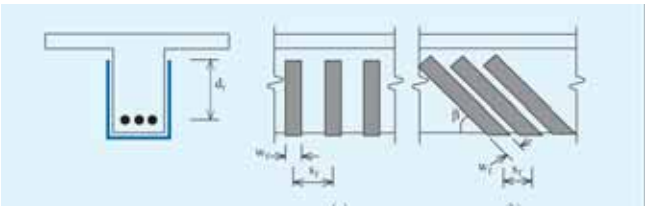
En zonas de momentos negativos, se puede colocar el refuerzo en la parte superior del elemento para aumentar la capacidad. El poco espesor del sistema MBrace® permite instalar alfombras, mosaicos y otros tipos de acabados directamente sobre el sistema y sin necesidad de cambios significativos en la elevación del suelo.

Una de las ventajas evidentes de utilizar refuerzos MBrace® en losas es la capacidad de instalar fácilmente refuerzos en dos direcciones para losas armadas en dos sentidos. Gracias al poco espesor de las láminas MBrace® no se requieren perfilados especiales en la intersección de dos tiras de refuerzo.

La naturalez ligera y flexible del sistema MBrace® permite efectuar instalaciones en vigas y losas de una manera sencilla, eficaz, económica, y con mucha mayor seguridad a la ofrecida por las planchas de acero.

Refuerzo cortante

El refuerzo MBrace® puede utilizarse para aumentar la capacidad a cortante de vigas, pilares y otros elementos de hormigón. Mediante un adecuado refuerzo a cortante, se puede incluso llegar a duplicar la capacidad a cortante de los elementos atados así como también aumentar su comportamiento dúctil. En esta aplicación, el refuerzo MBrace® se orienta transversalmente de forma similar a estribos, ligaduras o zunchos de acero.



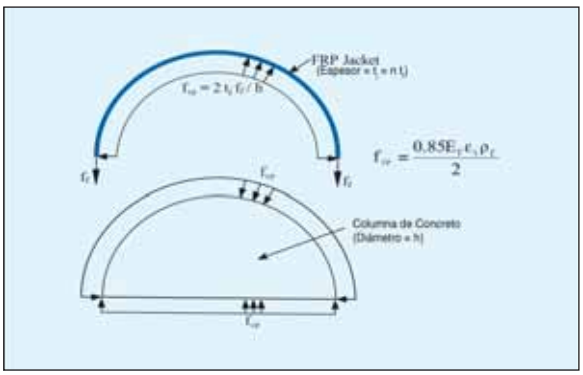
El refuerzo a cortante con MBrace® se puede colocar como tiras individuales de refuerzo. En algunos casos, se pueden realizar rozas en las alas o en la losa con lo que el refuerzo puede envolver por completo la sección.

MBrace® puede también envolverse alrededor de pilares para proporcionar una capacidad a cortante adicional a fin de aumentar la resistencia a cargas sísmicas, cargas de viento o movimientos de elementos contiguos debidos a la fluencia y contracción de dichos elementos.

Envoltura en “U”. Este procedimiento sencillo consiste en envolver los lados y parte inferior de la sección a fin de aumentar la resistencia a cortante de la viga en las zonas sometidas a altos esfuerzos a cortante. El uso del refuerzo MBrace® en la envoltura en “U” permite aumentar la capacidad a cortante, 200 a 400 N por cada mm de profundidad de la viga.

Confinamiento

Un hormigón confinado con refuerzos de FRP externos exhiben un aumento excepcional de su comportamiento a compresión: la capacidad de carga puede prácticamente duplicarse, mientras que la capacidad de deformación puede aumentar hasta 10 veces. Tal efecto permite reforzar las estructuras de hormigón para protección antisísmica, de manera que aumente su ductilidad de desplazamiento en presencia de condiciones sísmicas. El confinamiento don FRP puede también emplearse para fijar empalmes en pilares (un problema común en regiones sísmicas donde se requiera empalmes a tracción pero donde sólo haya empalmes a compresión).



Otras aplicaciones

El Sistema Integral para el refuerzo de estructuras MBrace® ofrece una amplísima adaptabilidad pudiendo aplicarse externamente donde quiera que se requiera un refuerzo interno adicional.

- Alivio de los esfuerzos de cargas explosivas en muros de mampostería y hormigón
- Refuerzo alrededor de cortes de losas y muros
- Refuerzo de tuberías, silos y tanques, a fin de aumentar la tolerancia a la presión
- Refuerzo de bóvedas, túneles, chimeneas y arcos incluso de mampostería

Comprometidos con la **Excelencia**

El sistema MBrace® se presenta con el soporte más completo de la industria. Contando con todo lo necesario para la instalación exitosa de MBrace® ; desde el apoyo para la especificación y diseño, aplicadores especialistas, ensayos de campo y más. Con un grupo de ingenieros dedicados y una fuerza de ventas específica, el sistema integral para el refuerzo de estructuras MBrace® es un enfoque completo que permite llevar la tecnología más innovadora a la industria de la construcción.

Valor

El sistema MBrace® ofrece una alternativa a la adhesión de placas de acero, al aumento de la sección con hormigón y al postensado externo. MBrace® puede satisfacer los retos más complejos en reparaciones efectivas en costo, siendo fácil de aplicar, versátil y duradero.

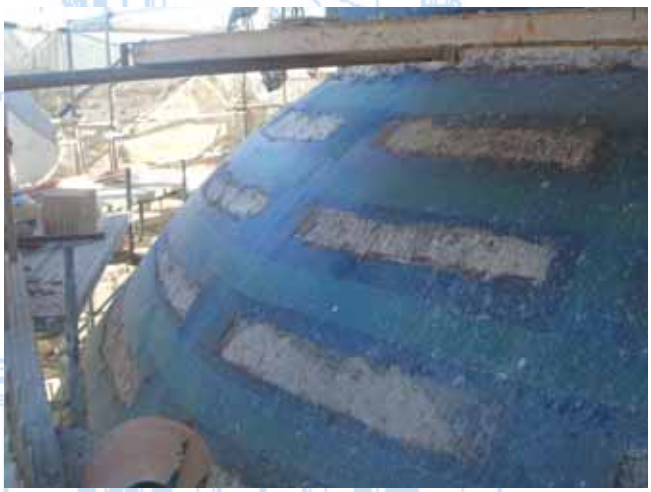
Soporte del Diseño

El sistema MBrace® incluye el soporte de ingeniería para su proyecto. Está disponible una Guìa de Diseño que incluye los procedimientos de diseño, características de materiales, información para la especificación y detalles estándar.

IGLESIA DEL SALVADOR (SEVILLA)

Segundo templo más grande de la capital andaluza después de la Catedral que se remonta, tal y como la conocemos hoy al s. XVII por lo que ha sufrido inclemencias meteorológicas de todo tipo que han ido mermando poco a poco la estructura. Quizá uno de los fenómenos que más le afectó, fue un importante seísmo registrado en las costas portugesas en el siglo XVIII que hizo que los materiales constructivos que formaban la estructura, se separan de tal modo que dejaron de trabajar monolíticamente. Como medida preventiva, el Ayuntamiento de Sevilla, la Consejería de Cultura de la junta de Andalucía y el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte han determinado la rehabilitación del templo para evitar daños irremediables en caso de nuevos movimientos sísmicos, que podrían llevar incluso al levantamiento de los arcos que forman las bóvedas por falta de contacto entre los elementos constructivos con la consiguiente desestabilización de la estructura.
Se considera como mejor solución por su aportación estructural, por su facilidad de colocación y por su durabilidad, el Sistema Integral para el refuerzo de estructuras MBrace aplicando más de 3000 metros en total tanto de fibras de aramida, de vidrio y de carbono.

Solución definitiva para tesoros que deben perdurar toda la vida.



Soluciones inteligentes de BASF Construction Chemicals

Sea cual sea su problema constructivo, sea cual sea la estructura que usted esta construyendo, BASF Construction Chemicals tiene una solución inteligente para ayudarle a tener éxito.

Nuestras marcas líderes en el mercado ofrecen la más amplia gama de tecnologías desarrolladas para ayudarle a construir un mundo mejor.

Emaco® - Sistemas de Reparación de Hormigón.
MBrace® - Sistema de Refuerzo Estructural.
Masterflow® - Morteros fluidos para Rellenos estructurales y de alta Precisión.
Masterflex® - Sistemas para el sellado de Juntas.
Masterseal® - Recubrimientos e impermeabilizantes.
Concresive® - Morteros en base resinas, adhesivos y sistemas de inyección.
Conica® - Pavimentos deportivos.
Conideck® - Revestimientos para pavimentos en parkings interiores y exteriores.
Coniroof® - Sistemas de impermeabilización de cubiertas en base de resinas de poliuretano.
Conibridge® - Sistemas de impermeabilización de tableros de puente en base de resinas de poliuretano.
Mastertop® - Soluciones para pavimentos decorativos e industriales.
Ucrete® - Soluciones de pavimentación con altas prestaciones.
PCI® - Colocación de azulejos en base cemento y sistemas de impermeabilización.

Cataluña-Baleares
Ed. Oficinas, 5ª planta
CIM Vallès
08130 Sta. Perpètua de Mogoda (BCN)
Tel. 938 620 023/68
Fax 938 620 019

Andalucía
P.I. San Nicolás
C/Principal, nave 3,
41500 Alcalá de Guadaira (Sevilla)
Tel. 955 630 265
Fax 955 631 674

País Vasco-Cantabria-Asturias
Avda. Txori. Erri, 46, P.I. Berreteaga Pab. 6 Md. D,
48150 Sondika (Bizkaia)
Tel. 944 531 021
Fax 944 532 860

Galicia
Avda. Hispanidad, 75 1º oficina D
36203 Vigo (Pontevedra)
Tel. 986 423 811
Fax 986 413 414

Aragón-Navarra-Rioja
Bari, 31,
Edif. Technocenter-Beta. oficina 317
Polígono Plaza
50197 Zaragoza
Tel. 876 768 010
Fax 876 768 011

Castilla-León
Paseo Arco Ladrillo, 64
Centro Madrid, port. 3, oficina 7
47008 Valladolid
Tel. 983 226 603
Fax 983 226 538

Centro
Duero, 23,
P.I. Las Acacias
28840 Mejorada del Campo (Madrid)
Tel. 913 138 340/41/42
Fax 913 138 306

Levante
Pol. Ind. Catarroja
En Proyecto, 32 Parc. 29
46470 Catarroja (Valencia)
Tel. 961 267 358/705
Fax 961 265 053

Extremadura
Benito Toresano, 2
06800 Mérida
Tel. 649 957 909
Fax 649 805 734

Toledo-Cuenca-Ciudad Real
Avda. de la Constitución, 17, Esc. 2-5ª
45600 Talavera de la Reina (Toledo)
Tel. 925 827 728
Fax 925 827 728

BASF Construction Chemicals España, S.L.
Basters, 15 - 08184 - Palau-Solità i Plegamans (Barcelona)
Tel.: 93 862 00 00 - Fax: 93 862 00 20
www.basf-cc.es - basf-cc@basf-cc.es

Edición: Marzo 2007

BASF es el líder mundial de la industria química: The Chemical Company. Su cartera de productos abarca desde productos químicos, plásticos, productos para la industria transformadora, productos fitosanitarios y química fina, hasta petróleo y gas natural. Como socio de confianza para prácticamente todos los sectores, las soluciones inteligentes de sistemas de BASF y los productos de alto valor ayudan a sus clientes a lograr su propio éxito. BASF apuesta por las nuevas tecnologías y las utiliza para abrir nuevas oportunidades de mercado. Combina el éxito económico con la protección del medio ambiente y con la responsabilidad social, contribuyendo así a un futuro mejor. BASF cuenta aproximadamente con 95.000 empleados y contabilizó unas ventas de más de 52 mil millones de euros en 2006.
Encontrará más información acerca de BASF en Internet en la página www.basf.com

BASF
The Chemical Company

BASF

The Chemical Company

MBrace® Primer

Imprimante epóxico de baja viscosidad para el Sistema Compuesto de Refuerzo MBrace®

USOS RECOMENDADOS

MBrace Primer es el primer componente del Sistema MBrace que se aplica en las superficies de concreto, mampostería y acero para proporcionar una excelente adhesión del Sistema MBrace al substrato.

Emplazamiento

- Vertical
- Horizontal
- Exterior
- Interior

Substratos

- Concreto
- Mampostería
- Acero

DESCRIPCION

MBrace Primer es un compuesto epóxico de baja viscosidad, con 100% de sólidos, curado con poliaminas. Es el primer componente que se aplica en el Sistema MBrace y se utiliza para penetrar la estructura porosa de los substratos cementicios y proporcionar una capa base de alta adherencia para el Sistema MBrace.

VENTAJAS

- Tiene tolerancia a la humedad, puede aplicarse en algunas substratos húmedos
- Baja viscosidad, penetra fácilmente en la superficie porosa del concreto
- 100% de compuestos epóxicos sólidos, muy bajo olor y COV (Compuestos Orgánicos Volátiles)
- Adecuado para aplicación a baja temperatura, puede ser aplicado hasta a temperaturas de 2ºC (35ºF) o superiores

FORMAS DE APLICACION

Preparación de la superficie

1. El substrato debe estar completamente curado, limpio, sano y seco. Cualquier área dañada, desconchada, delaminada o áreas con daños por corrosión deben ser reparadas antes de la aplicación del sistema Mbrace.
2. Para substratos de concreto y mampostería, prepare el substrato por medios mecánicos para remover de la superficie recubrimientos, lechada y cualquier contaminante de la superficie y para proporcionar el perfil de superficie correcto. El perfil de la superficie del Concreto (CSP) debe ser como mínimo 3 según ICRI (similar a una lija de papel de grado 80).
3. Para substratos de acero limpie a chorro con material abrasivo hasta obtener una superficie «Blanca Metálica» de conformidad con la Especificación de la Sociedad para Recubrimientos Protectores (SSPC) SP-5-89 o NACE No. 1, usando un abrasivo limpio, seco para obtener un perfil mínimo de 0.076 mm (3.0 mils).

Mezclado

1. La relación de mezclado de las partes por volumen es de 3 a 1, es decir 3 Partes de A por 1 Parte de B, y por peso es de 100 a 30, es decir 100 Partes de A por 30 partes de B. Mezcle solamente la cantidad de material que vaya a usar dentro del tiempo trabajable del material. Los tiempos aproximados de trabajabilidad para una unidad de 3.8 litros (1 gal) son:

10ºC (50ºF)	75 min
25ºC (77ºF)	20 min
32ºC (90ºF)	10 min

2. Mida la relación de cada componente con cuidado y después agregue la Parte B (endurecedor) a la Parte A (resina).
3. Mezcle la Parte A con la Parte B usando una mezcladora mecánica de baja velocidad de rotación (600 rpm) con paletas de mezclado (tipo el mezclador Jiffy). Raspe con cuidado los lados y el

MBrace®

fondo del recipiente mientras esté mezclando. Mantenga la paleta por debajo de la superficie del material para evitar oclusión de aire. Para obtener una mezcla homogénea demorará aproximadamente 3 minutos, que no debe tener estrías ni grumos .

Aplicación

1. Aplique el producto sobre las áreas que van a recibir el sistema MBrace® usando un rodillo de pelo de 3/8 de pulgadas o con una brocha de cerdas a un espesor de película húmeda de aproximadamente 3 mils.

Limpieza

Limpie todo el equipo y las herramientas con T-471, metil etil cetona o acetona. Siga las precauciones de salud y contra incendio indicadas por el fabricante del solvente.

Manutención

Inspecciones periódicamente el material aplicado y repare las áreas localizadas que lo necesiten. Consulte a su representante local de BASF Construction Chemicals para obtener información adicional, o visite nuestro sitio www.basf-cc-la.com.

LIMITACIONES

- Aplique MBrace Primer solamente cuando la temperatura ambiente se encuentre entre 2 y 50ºC (35 a 120ºF).
- Los componentes subsecuentes del Sistema MBrace deberán aplicarse dentro de las 48 horas de haber aplicado el imprimante al substrato para asegurar una adhesión adecuada.
- La adecuada aplicación del producto es responsabilidad del usuario. Toda visita de campo realizada por el personal de BASF Construction Chemicals tiene como fin único el hacer recomendaciones técnicas y no el supervisar o proporcionar control de calidad en el lugar de la obra.

DATOS TECNICOS

Composición: MBrace Primer es un epóxico curado con poliaminas bicomponente.

Propiedades de manipulación

Contenido VOC *EPA Método 24*	84.1 g/l (0.71 lb/gal)
Punto de inflamación *Pensky-Martens, taza cerrada*	
Parte A	95ºC (204ºF)
Parte B	> 93ºC (200ºF)
Viscosidad (mezcla)	
10ºC (50ºF)	1,200 cps
25ºC (77ºF)	400 cps
32ºC (90ºF)	200 cps
Peso de la mezcla	1003 g/l (9.2 lb/gal)

Propiedades físicas

Densidad	1102 kg/m^3 (68.8 pcf)
Espesor, instalado (aprox)	0.075 mm (3 mils)

Propiedades de tensión (1)

Límite de deformación	14.5 MPa (2100 psi)
Esfuerzo de deformación	2.0%
Módulo elástico	717 MPa (105 ksi)
Resistencia máxima (rotura)	17.2 MPa (2,500 psi)
Esfuerzo de rotura	40%
Indice de Poisson	0.48

Propiedades de compresión (2)

Límite de deformación	26.2 MPa (3,800 psi)
Esfuerzo de deformación	4.0%
Módulo elástico	670 MPa (97 ksi)
Resistencia máxima (rotura)	28.3 MPa (4,100 psi)
Esfuerzo de rotura	10%

Propiedades de flexión (3)

Límite de deformación	24.1 MPa (3,500 psi)
Esfuerzo de deformación	4.0%
Módulo elástico	595 MPa (86.3 ksi)
Resistencia máxima (rotura)	24.1 MPa (3,500 psi)
Esfuerzo de rotura	Gran deformación sin rotura

Propiedades funcionales (4)

Coeficiente de Expansión Térmica (CTE)	35 x 10^{-6} /ºC (20 x 10^{-6}/ºF)
Conductividad Térmica	0.20 W/m ºK (1.39 Btu in/hr ft² ºF)
Temperatura vítrea de transición, T_g	77ºC (171ºF)

(1) En base a pruebas realizadas en muestras curadas de conformidad con el Método de la ASTM D 638 a 20ºC (72ºF) y una humedad relativa de 40%.

(2) En base a pruebas realizadas en muestras curadas de conformidad con el Método de la ASTM D 695 a 20ºC (72ºF) y una humedad relativa de 40%.

(3) En base a pruebas realizadas en muestras curadas de conformidad con el Método de la ASTM D 790 a 20ºC (72ºF) y una humedad relativa de 40%.

EMPAQUE

MBrace Primer está disponible en unidades de 3.8 l (1 gal). Cada unidad viene envasada de la siguiente forma:

	Volumen	Envase	Peso
Parte A	2.84 l (3 qts)	Balde 7.57 l Balde (2 gal)	3.18 kg (7 lbs)
Parte B	0.95 l (1 qt)	Lata 0.95 l Lata (1 qt)	0.91 kg (2 lbs)

ALMACENAMIENTO

MBrace Primer tiene una vida útil de 18 meses para sus dos componentes cuando se almacenan en una área fresca y seca a una temperatura de entre 10 y 32ºC (50 y 90ºF). Almacene lejos de la luz directa solar, flamas o

The Chemical Company

cualquier otro material riesgoso.

Color: Parte A es ámbar, Parte B es transparente y la mezcla es ámbar.

RENDIMIENTO

Los índices de rendimiento en las superficies de concreto y mampostería pueden variar en función de la densidad y porosidad de los substratos.

Superficie	Rendimiento
Acero	6.1 a 8.0 m²/l (250 a 325 ft²/gal)
Concreto	4.9 a 6.1 m²/l (200 a 250 ft²/gal)
Mampostería (Concreto)	3.8 a 4.9 m²/l (150 a 200 ft²/gal)
Mampostería (Arcilla)	4.9 a 6.1 m²/l (200 a 250 ft²/gal)

El rango de cobertura en el concreto y mampostería dependerá de la densidad y porosidad del substrato.

SEGURIDAD

Riesgos

La inhalación de vapores puede causar daño. El producto contiene resinas epóxicas y agentes de cura. Puede causar sensibilidad en la piel u otras reacciones alérgicas.

Precauciones

Mantenga alegado de fuentes de calor, chispas o llamas. Cuando esté en áreas confinadas con mala ventilación, utilice un quipo protector respiratorio aprobado y utilice todas las precauciones para evitar la formación de incendios o explosiones. Deberá seguir todas las advertencias indicadas en la etiqueta hasta que los envases estén comercialmente limpios y reacondicionados.

Primeros auxilios

En caso de contacto con la piel, lave con jabón y agua. Para los ojos, enjuague inmediatamente (los segundos cuentan) con agua durante 15 minutos y llame a un médico. Si es ingerido, llame inmediatamente a un médico.

Estos productos son para uso profesional e industrial únicamente y deberán ser instalados por personal calificado y debidamente entrenado. Los instaladores deberán seguir las indicaciones de instalación.

Para mayor información, consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para este producto, o al representante local de BASF Construction Chemicals.

BASF Construction Chemicals Latin America

Argentina	Brasil	Chile	Colombia	Costa Rica	Ecuador	México	Perú	Puerto Rico	Rep Dominicana	Venezuela
(54-34-8843-3000)	(55-11-6108-5555)	(56-2-444-9760)	(57-1-321-7210)	(506-440-9110)	(593-2-256-6011)	(52-55-2122-2200)	(511-385-0109)	(787-258-2737)	(809-957 9303)	(58-212-762-5471)

® Marca registrada de BASF Aktiengesellschaf
© 2006 BASF Construction Chemicals Latin America

BASF
The Chemical Company

MBrace PRIMER

FT 2.6.01

(MBrace RESIN 50)

Imprimación epoxi para el sistema compuesto de refuerzo estructural a base de fibra de carbono.

Campo de aplicación

- Imprimación previa a la aplicación de MBrace SATURANTE, y MBrace ADHESIVO en sistemas de refuerzo de estructuras con fibra de carbono.
- MBrace PRIMER puede usarse sobre soportes de hormigón, acero y mampostería.
- Sobre soportes de hormigón, el producto sella la porosidad y las oquedades del soporte, evitando la oclusión de burbujas de aire y garantizando una adherencia óptima del refuerzo.
- Sobre soportes de acero, la imprimación funciona como un excelente adhesivo, además de ser una eficaz protección contra la oxidación.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

Propiedades

- **Excelente adherencia.**
- **Excelente penetración debido a su baja viscosidad.**
- **Contenido en sólidos del 100%. No contiene disolventes.**

Base del material

Resina epoxi, en dos componentes, fluida y exenta de disolventes.

Modo de utilización

(a) Soporte:

Sobre hormigón:

El soporte debe estar limpio, seco (humedad máxima 4% según CM-GERÄT), firme (Resistencia a tracción mínima 1,5 N/mm^2), rugoso y libre de aceites, grasas, pinturas, restos de aceites, desencofrantes, polvo, etc.

Para ello, se debe tratar con medios mecánicos o por chorreado de arena, hasta conseguir la eliminación total de cualquier impureza o contaminante superficial.

El soporte deberá tener una temperatura mínima de +5ºC y encontrarse un mínimo de 3ºC por encima del correspondiente punto de rocío.

Sobre acero:

La superficie debe estar limpia, seca y libre de contaminantes. El soporte deberá ser tratado con un abrasivo hasta quedar limpio y seco y con una rugosidad mínima de 75 micras.

El soporte deberá tener una temperatura mínima de +5ºC y encontrarse un mínimo de 3ºC por encima del correspondiente punto de rocío.

(b) Mezcla: MBrace PRIMER se presenta en proporciones adecuadas para realizar la mezcla directamente. No se recomiendan en ningún caso las mezclas parciales.

Verter el componente II, dentro del recipiente del componente I (recipiente de trabajo). Mezclar cuidadosamente con un taladro provisto de agitador (tipo M-17) a 400 r.p.m. de velocidad de rotación máxima, durante 3 minutos como mínimo o hasta obtener una masa homogénea sin grumos.

(c) Aplicación: Distribuir de forma uniforme sobre toda la superficie, con la ayuda de una brocha o un rodillo, garantizando una impregnación completa de la porosidad y las oquedades del soporte.

(d) Tiempo de espera entre aplicaciones sucesivas.

Para la aplicación de MBrace HOJA DE FIBRA, se recomienda esperar un periodo de 30 minutos aproximadamente (en función de las temperaturas ambientales) para aplicar el siguiente producto del sistema MBrace.

Para la aplicación de MBrace LAMINADO se recomienda esperar un periodo de 90 minutos (aproximadamente) antes de proceder con la aplicación de MBrace ADHESIVO.

Las superficies tratadas con MBrace PRIMER deberán ser cubiertas como máximo 48 horas después de su aplicación, para asegurar una completa adherencia. En caso de exceder este tiempo, se recomienda lijar el paramento y aplicar una nueva mano de MBrace PRIMER.

Limpieza de herramientas y útiles de trabajo
En estado fresco puede limpiarse con PREPARACIÓN BETTOR UNIVERSAL. En el caso de que el material esté endurecido sólo puede limpiarse mecánicamente.

Consumo
El consumo habitual sobre soporte de hormigón es de 200 g/m² a 300 g/m². El consumo sobre superficies metálicas es de aproximadamente 180 g/m².

Este consumo es teórico y dependen de la rugosidad y de las condiciones particulares de cada obra. Para determinar los consumos exactos deben hacerse ensayos representativos en obra.

Presentación
Conjuntos de 1 Kg.

Almacenaje
Puede almacenarse hasta 18 meses en lugar fresco y seco y en sus envases originales cerrados.

Manipulación y transporte
Para la manipulación de este producto deberán observarse las medidas preventivas habituales en el manejo de productos químicos, por ejemplo no comer, fumar ni beber durante el trabajo y lavarse las manos antes de una pausa y al finalizar el trabajo.

Puede consultarse la información específica de seguridad en el manejo y transporte de este producto en la Hoja de Datos de Seguridad del mismo.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final del producto.

Debe tenerse en cuenta
- Para garantizar el éxito del refuerzo, se debe asegurar una unión perfecta entre el compuesto MBrace y el soporte, con objeto de conseguir una perfecta transmisión de esfuerzos entre el elemento y el compuesto resistente. Un fallo de adherencia entre el soporte y el compuesto, o entre los componentes del compuesto conduce, prematuramente, a un fallo del refuerzo.
- No aplicar sobre soportes húmedos o con temperaturas por debajo de +5ºC.
- No deben realizarse mezclas parciales de los contenidos de los envases de ambos componentes.
- No añadir agua, disolventes ni otras sustancias que puedan afectar a las propiedades del material endurecido.
- Respetar los tiempos máximos de espera entre la aplicación de los diferentes productos que conforman el sistema MBrace.
- No preparar una cantidad de mezcla superior a la que podrá aplicarse durante el periodo de trabajo. El tiempo disponible para realizar el trabajo, la temperatura y la complejidad del material determinará cuál es la cantidad de material que puede prepararse de una vez.
- Con tiempo caluroso manténgase el material frío y protegido de la luz solar directa. El periodo real de trabajo en época de calor se puede prolongar de mantener el material frío, tanto antes como después de mezclarlo, y si se introduce en un recipiente con una mezcla de agua fría y hielo.
- Antes de realizar la mezcla comprobar la identificación correcta de los envases de los diferentes componentes.

Datos Técnicos

Características	Método de ensayo	Unidades	Valores
Densidad de la mezcla (a +20 ºC):	UNE-EN ISO 2811-1	g/cm^3	aprox. 1,1
Pot-life (a +25ºC):	UNE-EN ISO 2555:2000	minutos	aprox. 20
Temperatura de aplicación (soporte y material):	-	ºC	mínimo +5 máximo +30
Ensayos a tracción: Resistencia a tracción: Deformación en rotura:	DIN 53504	 N/mm^2 %	 aprox. 22,9 ± 4 aprox. 18,2 ± 7
Ensayos a flexión: Rotura a tracción: Módulo a flexión:	UNE-EN ISO 178:2003/ /A1:2005	 N/mm^2 N/mm^2	 No rompe aprox. 233
Ensayos a flexión: Rotura a tracción: Módulo a flexión:	pr EN 13412: 2005 ASTM D695	 N/mm^2 N/mm^2	 No rompe aprox. 875
Adherencia:	UNE-EN ISO 4624:2003	N/mm^2	7 ± 2 (rotura por hormigón)

Los tiempos de endurecimiento están medidos a 20ºC y 65% de H.R. Temperaturas superiores acortan los tiempos de endurecimiento e inferiores los alargan. Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean datos de control pueden solicitarse "Especificaciones de Venta" del producto a nuestro Departamento Técnico.

NOTA:
La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.
Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.
Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.
BASF Construction Chemicals España, S.A. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.
Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.
Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reingresar el valor de la mercancía suministrada.
Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.
Edición 15/11/2006 La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición.

BASF Construction Chemicals España, S.A.
Basters, 15
08184 PALAU-SOLITÀ i PLEGAMANS (Barcelona)
Telf.: 93 862 00 00 - Fax 93 862 00 20
Internet: http://www.basf-cc.es

BASF
The Chemical Company

CONCRESIVE 1460

FT 2.1.15

Adhesivo epoxi tixotrópico.

Campo de aplicación
- Unión de hormigón viejo con nuevo.
- Pegado de prefabricados.
- Unión de hormigón con acero, granito, etc.
- Colocación de refuerzos en estructuras.
- En general, para cualquier problema de unión.
- Pegado de pletinas.
- Unión de dovelas de puentes.
- Anclaje de pernos o armaduras.
- Adhesivo para bandas de sellado de juntas.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

Propiedades
- **Consistencia plástica y dúctil.**
- **Excelente adherencia sobre metales y hormigón.**
- **Elevadas resistencias.**
- **Elevada tixotropía.**

Base del material
Adhesivo epoxi de dos componentes.
Modo de utilización
(a) Soporte: Debe ser firme (resistencia a tracción mínima de 1,5 N/mm²) y estar limpio, libre de aceites y grasas, seco y exento de lechada de cemento.

Debe (estar seco (humedad máxima del 4% según CM-GERÄT). Los soportes viejos se deben limpiar mecánicamente con chorro de arena, abujardado o decapado térmico.

Eliminar el óxido en los aceros. La superficie de los metales debe chorrearse con arena y tratarse con disolvente.

(b) Mezcla: CONCRESIVE 1460 se suministra listo para su uso, en las proporciones adecuadas para la mezcla. Añadir el Componente II dentro del Componente I y mezclar con taladro a bajas revoluciones provisto de agitador hasta conseguir una mezcla homogénea.
No son, en ningún caso, recomendables las mezclas parciales. Se evitará en lo posible la oclusión de aire.

(c) Aplicación: Aplicar uniformemente con paleta o llana. En las superficies rugosas hay que asegurarse que se cubren todos los huecos.

Es recomendable aplicar CONCRESIVE 1460 sobre las dos superficies a unir y aplicar presión para asegurar el contacto.

Limpieza de herramientas
En estado fresco, con PREPARACIÓN BETTOR UNIVERSAL, una vez endurecido sólo puede eliminarse mecánicamente.

Consumo
Depende fundamentalmente del método de aplicación, así como las características del soporte. En general el consumo será aproximadamente de 1,5 a 2 Kg de CONCRESIVE 1460 por m² de superficie.

Presentación
CONCRESIVE 1460 se suministra en conjuntos de 5 Kg.

Almacenaje
Aproximadamente 24 meses en sus envases originales cerrados y en lugar fresco y seco.

Manipulación y transporte
Para la manipulación de este producto deberán observarse las medidas preventivas habituales en el manejo de productos químicos, por ejemplo no comer, fumar ni beber durante el trabajo y lavarse las manos antes de una pausa y al finalizar el trabajo.

Puede consultarse la información específica de seguridad en el manejo y transporte de este producto en la Hoja de Datos de Seguridad del mismo.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del consumidor final del producto.

Debe tenerse en cuenta

- No aplicar sobre soportes a temperaturas inferiores a +10°C ni superiores a +30°C.
- No añadir agua, arena ni otras sustancias que puedan afectar a las propiedades del material.
- Antes de realizar la mezcla comprobar la identificación correcta de los envases de los diferentes componentes.

Datos Técnicos

Características	Métodos de ensayo	Unidades	Valores
Densidad de la mezcla:	-	g/cm³	aprox. 1,7
Pot-life:	-	minutos	aprox. 60
Tiempo abierto:	UNE-EN 1346	minutos	aprox. 30
Tiempo de endurecimiento:	-	horas	aprox. 24
Temperatura de aplicación (soporte y material):	-	°C	de + 10 a + 30
Resistencia a flexotracción (tras 7 días):	UNE-EN 12190	N/mm²	aprox. 22,0
Resistencia a compresión (tras 7 días):	UNE-EN 12190	N/mm²	aprox. 45,0
Adherencia sobre hormigón:	UNE-EN 1542	N/mm²	>2,5 (rotura en hormigón)
Tensión de cizallamiento a: 50º: 60º: 70º:	UNE-EN 12188	 N/mm² N/mm² N/mm²	 aprox. 35,0 aprox. 32,6 aprox. 26,1
Adherencia acero-acero:	UNE-EN 12188	N/mm²	aprox. 17,9

Los tiempos de endurecimiento están medidos a 20ºC y 65% de H.R. Temperaturas superiores y/o H.R. inferiores pueden acortar estos tiempos y viceversa. Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean datos de control pueden solicitarse las "Especificaciones de venta" del producto a nuestro Departamento Técnico.

NOTA:
La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.
Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.
Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.
BASF Construction Chemicals España, S.A. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.
Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.
Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reingresar el valor de la mercancía suministrada.
Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.
Edición 23/08/2006 La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición.

BASF Construction Chemicals España, S.A.
Basters, 15
08184 PALAU-SOLITÀ i PLEGAMANS (Barcelona)
Telf.: 93 862 00 00 - Fax 93 862 00 20
Internet: http://www.basf-cc.es

BASF
The Chemical Company

MBrace LAMINADO

FT 2.6.07

Laminado preformado de fibra de carbono para refuerzo de elementos estructurales.

Descripción
La tecnología MBrace para refuerzo estructural, consiste en la adhesión superficial de compuestos preformados a base de fibra de carbono, de elevadas prestaciones resistentes a tracción.

Mediante la adhesión en superficie de elementos con excelente comportamiento a tracción, se consigue incrementar el comportamiento de elementos flexionados.

Los laminados MBrace presentan una orientación de fibras unidireccional, en formato semirígido y en rollos de 150 metros, precisando de un devanador para su desenrollado cómodo y seguro. Según los requisitos estructurales vinculados al refuerzo, se presenta **MBrace LAMINADO LM,** de bajo módulo elástico, y **MBrace LAMINADO HM** de alto módulo elástico. Ambos alcanzan resistencias a tracción en rotura parecidas, difiriendo, debido a su rigidez, en la elongación última.

La fibra de carbono empleada en el sistema MBrace presenta una curva tensión-deformación completamente lineal hasta rotura, sin presentar problemas de rotura prematura bajo cargas mantenidas.

Campo de aplicación
- Refuerzos a tracción en elementos flexionados mediante adhesión en superficie.
- Errores de proyecto o ejecución.
- Mejoras estructurales o modificaciones debidas a cambios de usos o cambios de exigencia en normativas.
- Mejora del control de la fisuración y de la resistencia a impactos y ondas expansivas.
- Las aplicaciones más habituales de refuerzo son: vigas, puentes, losas, forjados en tableros de puentes, estructuras y superficies de aparcamientos, refuerzo de muros, depósitos, etc.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

Componentes del sistema
El sistema de Laminados MBrace a base de fibra de carbono está compuesto por una serie de productos diseñados específicamente para su aplicación.

- **MBrace PRIMER**: para garantizar la adherencia y anclaje del refuerzo con el soporte del elemento a reparar.
- **MBrace ADHESIVO**: para regularizar el soporte, adherir y transferir esfuerzos entre el soporte y el compuesto resistente.

Propiedades
- **Reducido peso. No es preciso apuntalar.**
- **Excelente relación resistencia/peso.**
- **Total orientación de la fibra gracias a la matriz epoxi.**
- **Bajo espesor de aplicación.**
- **Elevada capacidad de carga.**
- **Excelente resistencia química.**
- **Fácil y rápidamente aplicable.**

Base del material
Fibra de carbono embebida en matriz epoxi. El proceso de fabricación de los laminados incorpora la fibra de carbono en una matriz epoxi, mediante un procedimiento completamente industrializado y de estricto control de calidad. Esto permite garantizar las propiedades resistentes de los refuerzos realizados mediante el módulo elástico, la resistencia a rotura y la elongación última.

Modo de utilización
(a) Soporte: La resina adhesiva MBrace ADHESIVO, debe aplicarse sobre MBrace PRIMER después de 90 minutos y antes que hayan transcurrido 48 horas desde su aplicación. El soporte deberá tener una temperatura mínima de +5ºC y sin presencia de humedad. Comprobar que en el momento de la aplicación la temperatura del soporte se encuentra por lo menos 3ºC por encima del correspondiente punto de rocío.
En caso de que el soporte presente irregularidades superiores a 5 mm deberán suavizarse mecánicamente antes de la aplicación de la imprimación o bien regularizarse. Para la regularización podrá emplearse APOSAN o bien una mezcla de MBrace ADHESIVO y arena de cuarzo seca.

(b) Aplicación: Extender MBrace ADHESIVO sobre el soporte imprimado con MBrace PRIMER.

Sobre una mesa o similar, proceder a la limpieza del MBrace LAMINADO mediante un paño limpio impregnado con acetona.

Sobre la cara estriada del MBrace LAMINADO aplicar una capa de 2-3 mm de adhesivo y colocar en su posición definitiva presionando con un rodillo de goma o elemento similar.

Presentación
Rollos de 150 m.

MBrace Laminado LM		MBrace Laminado HM	
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
50	1,2 y 1,4	50	1,4
60	1,2 y 1,4	60	1,4
80	1,2 y 1,4	80	1,4
90	1,4	90	1,4
100	1,2 y 1,4	100	1,4
120	1,4	120	1,4

Almacenaje
Almacenar los materiales en lugar fresco y seco, lejos de la luz directa del sol, las llamas u otros peligros.

Manipulación y transporte
Para la manipulación de este producto deberán observarse las medidas preventivas habituales en el manejo de productos químicos, por ejemplo no comer, fumar ni beber durante el trabajo y lavarse las manos antes de una pausa y al finalizar el trabajo.

Puede consultarse la información específica de seguridad en el manejo y transporte de este producto en la Hoja de Datos de Seguridad del mismo.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final del producto.

Debe tenerse en cuenta
- Para garantizar el éxito del refuerzo, se debe asegurar una unión perfecta entre el compuesto MBrace y el soporte, tal que permita una correcta transmisión de esfuerzos entre el elemento y el compuesto resistente. Un fallo de adherencia entre el soporte y el compuesto, o entre los componentes del compuesto conduce irrevocablemente a un fallo del refuerzo.
- No aplicar sobre soportes húmedos o con temperaturas por debajo de +5ºC.
- Según la tipología de refuerzo a realizar, y de acuerdo a las guías y recomendaciones de diseño vigentes, se limitará la eficiencia de los materiales compuestos mediante los adecuados coeficientes minoradores.

Datos Técnicos

Características	Métodos de ensayo	Unidades	MBrace Laminado LM	MBrace Laminado HM
Densidad:	-	g/cm^3	aprox.1,6	aprox. 1,6
Volumen de fibra:	-	%	68	68
Módulo de elasticidad característico:	EN 2561	GPa	158	190
Módulo de elasticidad medio:		GPa	165	200
Resistencia a tracción última característica:		N/mm^2	2200	2900
Resistencia a tracción última media:		N/mm^2	2500	3300
Elongación a rotura característica:		%	1,3	1,4
Elongación a rotura media:		%	1,5	1,65
Los valores medios son indicativos. Sólo están garantizados los valores característicos.				

NOTA:
La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.
Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.
Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.
BASF Construction Chemicals España, S.A. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.
Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.
Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reingresar el valor de la mercancía suministrada.
Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.
Edición 09/08/2006 La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición.

BASF Construction Chemicals España, S.A.
Basters, 15
08184 PALAU-SOLITÀ i PLEGAMANS (Barcelona)
Telf.: 93 862 00 00 - Fax 93 862 00 20
Internet: http://www.basf-cc.es