



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

706-TES-CA-5446

**ANÀLISI DE LA CONTRIBUCIÓ A TALLANT DELS REFORÇOS
EXTERIORS AMB LAMINATS DE POLÍMERS REFORÇATS
AMB FIBRES (FRP) EN BIGUES DE FORMIGÓ ARMAT**

Autor/a

Gerard Talens Barbero

Tutor/a

Eva Oller Ibars

Departament

Enginyeria de la Construcció

Intensificació

Anàlisi i Projectes d'Estructures

Data

Juliol de 2012

RESUM

ANÀLISI DE LA CONTRIBUCIÓ A TALLANT DELS REFORÇOS EXTERIORS AMB LAMINATS DE POLÍMERS REFORÇATS AMB FIBRES (FRP) EN BIGUES DE FORMIGÓ ARMAT

Autor: Gerard Talens Barbero

Tutora: Eva Oller Ibars

Paraules clau: FRP; Tallant; Reforç; Bigues; Formigó armat; EBR

Els polímers reforçats amb fibres (FRP) s'utilitzen en reforços d'estructures de formigó per les seves propietats mecàniques, resistència a la corrosió, a la seves relacions resistència/pes i rigidesa/pes. A més, la seva adaptabilitat a qualsevol superfície permet una aplicació senzilla, ràpida, amb pocs mitjans auxiliars.

El reforç a flexió o confinament amb laminats de FRP és més habitual que a tallant, entre d'altres motius perquè es coneix millor el comportament d'aquest reforç sota esforços a flexocompressió mentre que en els reforços a tallant, al considerar-se diferents elements que contribueixen en la resistència última de l'element, no es coneix del cert el mecanisme resistent. Això fa que no existeixi consens en la formulació a tallant dels reforços amb laminat de FRP.

Els models existents actualment per al càlcul del reforç amb laminats de FRP estan basats en les normatives en vigor per formigó armat on el tallant d'esgotament per tracció en l'ànima es calcula com la suma de les contribucions del formigó i de l'armadura transversal. En el cas d'elements reforçats amb laminats de FRP, les recomanacions existents proposen calcular el tallant últim com la suma de les contribucions anteriors, és a dir, el tallant d'esgotament de la biga sense reforçar més la contribució del reforç disposat. Per tant, aquesta aproximació no considera una possible interacció entre el formigó, l'armadura transversal i els laminats de FRP, és a dir, que la presència de l'FRP modifiqui les contribucions del formigó i de l'armadura transversal.

A la tesina, s'ha realitzat en primer lloc una revisió de l'estat del coneixement de la resistència a tallant de bigues de formigó armat amb reforç extern de laminats de FRP. Les formulacions existents que proporcionen la contribució del FRP a la resistència a tallant difereixen bàsicament en la definició de la deformació del laminat, que depèn, també, de la configuració del reforç que produeix un mode de ruptura prematur o no. Per tal de fer un anàlisi comparatiu de les diferents formulacions, a partir de la literatura existent relativa a assajos experimentals a tallant amb bigues reforçades amb laminats de FRP i partint d'una altra base de dades existent elaborada per la Universitat de Minho (DABASUM), s'ha elaborat una àmplia base de dades que recull els assajos realitzats en els darrers anys pels diferents grups investigadors.

S'han aplicat els models de predicció estudiats als diferents assajos de la base de dades per a veure l'ajust d'aquests als resultats experimentals obtinguts. S'ha fet un anàlisi considerant tots els assajos (anàlisi global) i després uns anàlisis distingint entre el tipus de secció a reforçar (rectangular o en T) i la configuració del reforç a tallant (lateral, en U o d'embolcall complet). S'han comparat els indicadors estadístics i finalment s'ha avaluat cada model mitjançant el mètode "Demerit Points Classification" de Collins (2001), que consisteix en atorgar una puntuació en funció dels percentatges d'assajos associats a diferents rangs de ratis.

El model que millor s'ajusta és el de Mofidi et Chaallal (2011). No obstant, aquest model només calcula la contribució de l'FRP a tallant pels reforços als laterals de les bigues o en forma de U. Per tant, en aquesta tesina es fa una proposta d'extensió d'aquest model pels casos de reforç d'embolcall complet.

ABSTRACT

SHEAR CONTRIBUTION ANALYSIS OF EXTERNALLY STRENGTHENING WITH FIBRE REINFORCED POLIMERS (FRP) ON REINFORCED CONCRETE BEAMS

Autor: Gerard Talens Barbero

Tutora: Eva Oller Ibars

Key words: FRP; Shear; Strengthening; Beams; Reinforced concrete; EBR.

Fibre reinforced polymer (FRP) are used as external strengthening for concrete structures due to its excellent mechanical properties, as well as its corrosion resistances and light weight. Furthermore, its adaptation in all surface allows an easy, fast and limited labour application .

Flexural strengthening or confining with FRP sheets are more usual than reinforced concrete beams externally strengthened with FRP because models that explain reinforced concrete (RC) flexural strength are more developed and accepted whereas shear strengthening involves different contributions to the ultimate shear strength of the beam so shear strength behaviour is not clear in RC beams and FRP reinforced RC beams, what makes it difficult to reach an agreement to establish suitable design procedures.

Nowadays, the existing guides and recommendations propose calculating shear capacity by adding the contribution of the concrete and the passive reinforcement. In FRP reinforced elements, existing models propose calculating the new capacity by adding the external strength provided by the FRP to the shear capacity of the beam without reinforcement. Nevertheless, it is not considered a possible interaction between concrete, passive reinforcement and external strengthening.

In this thesis, a thorough literature review on shear of reinforced concrete beams with external FRP strengthening was performed to the acting mechanisms studied to date, which allowed the study of the existing models. The main difference between model is the calculation of the maximum strain of FRP, that depends on the type of reinforcement (if peeling or debonding can occur or not). From existing literature, related to experimental shear tests with RC beams externally reinforced with FRP and an existing database created by the University of Minho, it has been created a large database that contains realised tests by different investigation groups up to now.

The studied predicting models have been applied on the database's experimental tests to see the fitting of each model to the experimental results obtained. It has been analysed by a global analysis and afterwards by two analysis considering the cross-section of the reinforced beam (rectangular or T cross-section) and the configuration of the FRP laminate reinforcement (side, U-reinforcement or fully wrapped). By using the Demerit Points Classification from Collins (2001), which consists on giving a punctuation depending on the percentages of test associated to a ratio level, each model has been evaluated.

The best fitting model between all the studied models is the one from Mofidi et Chaallal (2011). However, This model only calculates the contribution of FRP strengthening for side and U-shape reinforcements. Therefore, in this thesis it is made a proposal for those cases of fully wrapped FRP reinforcement in order to extend these model.

TAULA DE CONTINGUT

| | |
|---|-----------|
| RESUM..... | 1 |
| ABSTRACT..... | 2 |
| TAULA DE CONTINGUT..... | 3 |
| LLISTAT DE TAULES..... | 5 |
| LLISTAT DE FIGURES..... | 6 |
| NOTACIÓ..... | 8 |
| 1. INTRODUCCIÓ..... | 12 |
| 1.1 MOTIVACIÓ..... | 12 |
| 1.1.1 REFORÇ D'ESTRUCTURES..... | 12 |
| 1.1.2 TÈCNiques DE REFORÇ D'ESTRUCTURES..... | 12 |
| 1.1.3 REFORÇ D'ESTRUCTURES AMB FRP..... | 14 |
| 1.2 OBJECTIUS..... | 14 |
| 1.3 ESTRUCTURA DE LA TESINA..... | 15 |
| 2. REFORÇ EXTERN A TALLANT AMB LAMINATS DE FRP..... | 16 |
| 2.1 CARACTERÍSTIQUES DELS LAMINATS DE FRP..... | 16 |
| 2.1.1 GENERALITATS..... | 16 |
| 2.1.2 MATERIALS..... | 16 |
| 2.1.2.1 FIBRES..... | 17 |
| 2.1.2.2 MÀTRIS..... | 20 |
| 2.1.2.3 ADHESIUS..... | 21 |
| 2.1.2.4 MATERIAL COMPOST - FRP..... | 22 |
| 2.1.3 PROPIETATS MECÀNIQUES DELS FRP..... | 23 |
| 2.2 CONFIGURACIÓ DEL REFORÇ A TALLANT AMB LAMINATS DE FRP..... | 26 |
| 2.3 PROBLEMÀTIQUES ACTUALS..... | 27 |
| 2.4 RESISTÈNCIA A TALLANT DE LA BIGA SENSE REFORÇAR..... | 28 |
| 2.4.1 MÈTODE DE CàLCUL DE LA RESISTÈNCIA ÚLTIMA A TALLANT DE LA BIGA SENSE REFORÇAR SEGONS EHE (2008)..... | 28 |
| 2.4.2 MÈTODE DE CàLCUL DE LA RESISTÈNCIA ÚLTIMA A TALLANT DE LA BIGA SENSE REFORÇAR SEGONS EUROCODI 2 (2004)..... | 30 |
| 2.4.3 MÈTODE DE CàLCUL DE LA RESISTÈNCIA ÚLTIMA A TALLANT DE LA BIGA SENSE REFORÇAR SEGONS ACI 318-08 (2008)..... | 32 |
| 2.5 MODELS TEÒRICS PER AL CàLCUL DE LA CONTRIBUCIÓ DEL LAMINAT DE FRP A LA RESISTÈNCIA A TALLANT V_{FRP} | 34 |
| 2.5.1 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL FIB BULLETIN 14 (2001)..... | 35 |
| 2.5.2 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL ACI 440.2R-08 (2008)..... | 36 |
| 2.5.3 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL TR55 (2001).... | 37 |
| 2.5.4 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL CNR-DT200 (2004)..... | 37 |
| 2.5.5 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL CAN/CSA-S6-06 (2006)..... | 40 |
| 2.5.6 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL CIDAR (2006).. | 41 |

| | |
|--|------------|
| 2.5.7 CONTRIBUTIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS MOFIDI ET CHAALLAL (2011)..... | 42 |
| 2.5.8 CONTRIBUTIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS ALZATE (2012)..... | 43 |
| 2.5.9 ANÀLISI COMPARATIU DE LES DIFERENTS FORMULACIONS..... | 45 |
| 3. BASE DE DADES..... | 47 |
| 3.1 GENERALITATS | 47 |
| 3.2 DESCRIPCIÓ DE LA BASE DE DADES..... | 47 |
| 3.2.1 CARACTERÍSTIQUES GENERALS | 47 |
| 3.2.2 CARACTERÍSTIQUES DE LES BIGUES DE FORMIGÓ ARMAT | 48 |
| 3.2.2.1 BIGUES DE SECCIÓ RECTANGULAR..... | 48 |
| 3.2.2.2 BIGUES DE SECCIÓ EN T | 50 |
| 3.3 EXPERIMENTS DESCARTATS..... | 52 |
| 3.3.1 EXPERIMENTS DESCARTATS PER MANCA D'INFORMACIÓ | 52 |
| 3.3.2 EXPERIMENTS EN QUÈ SEGONS LA FORMULACIÓ TEÒRICA NO HAURIA CONTRIBUÏT EL REFORÇ..... | 52 |
| 3.3.3 EXPERIMENTS DESCARTATS PER RUPTURA A FLEXIÓ | 53 |
| 3.3.4 EXPERIMENTS DESCARTATS PER RESULTATS EXTREMS..... | 53 |
| 4. ANÀLISI COMPARATIU DELS MODELS EXISTENTS | 54 |
| 4.1 MÈTODE D'ANÀLISI | 54 |
| 4.2 ANÀLISI GLOBAL..... | 55 |
| 4.2.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)..... | 60 |
| 4.3 ANÀLISI SEGONS TIPUS DE SECCIÓ..... | 61 |
| 4.3.1 ANÀLISI DE LES BIGUES DE SECCIÓ RECTANGULAR..... | 61 |
| 4.3.1.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)..... | 67 |
| 4.3.2 ANÀLISI DE LES BIGUES DE SECCIÓ EN T..... | 68 |
| 4.3.2.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)..... | 73 |
| 4.4 ANÀLISI SEGONS EL TIPUS DE REFORÇ..... | 74 |
| 4.4.1 ANÀLISI DE LES BIGUES REFORÇADES EN U | 74 |
| 4.4.2 ANÀLISI DE LES BIGUES REFORÇADES EN S..... | 80 |
| 4.4.2.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)..... | 85 |
| 4.4.3 ANÀLISI DE LES BIGUES REFORÇADES EN W..... | 86 |
| 4.4.3.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)..... | 90 |
| 5. PROPOSTA DE FORMULACIÓ..... | 92 |
| 5.1 PROPOSTA DE FORMULACIÓ BASADA EN MOFIDI ET CHAALLAL (2011) | 92 |
| 5.2 ANÀLISI DE LA FORMULACIÓ PROPOSADA | 94 |
| 5.2.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS | 95 |
| 6. CONCLUSIONS..... | 97 |
| REFERÈNCIES..... | 100 |
| ANNEX 1: BASE DE DADES..... | 102 |

LLISTAT DE TAULES

| | |
|--|-----------|
| 2. REFORÇ EXTERN A TALLANT AMB LAMINATS DE FRP | 16 |
| Taula 2.1 Característiques mecàniques dels diferents tipus de fibres (Feldman 1989, Kim 1995)..... | 20 |
| Taula 2.2 Propietats mecàniques dels diferents tipus de matrius (Alzate, 2012)..... | 21 |
| Taula 2.3 Propietats mecàniques dels adhesius epoxídics curats, del formigó i de l'acer (Täljsten, 1994) | 22 |
| Taula 2.4 Propietats mecàniques de laminats de FRP i d'acer convencional | 24 |
| Taula 2.5 Resum dels paràmetres considerats en cada formulació..... | 46 |
| 3. BASE DE DADES | 47 |
| Taula 3.1 Resum de paràmetres de geometria, propietats dels materials i configuració de càrregues | 48 |
| Taula 3.2 Resum de paràmetres de geometria, propietats dels materials i configuració de càrregues per a bigues de secció rectangular | 50 |
| Taula 3.3 Resum de paràmetres de geometria, propietats dels materials i configuració de càrregues per a bigues de secció en T | 52 |
| 4. ANÀLISI COMPARATIU DELS MODELS EXISTENTS | 54 |
| Taula 4.1 Intervals de classificació dels resultats i puntuació associada pel Mètode de Collins (2001)..... | 55 |
| Taula 4.2 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada | 55 |
| Taula 4.3 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi global dels assajos | 61 |
| Taula 4.4 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada | 62 |
| Taula 4.5 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues de secció rectangular | 67 |
| Taula 4.6 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada | 68 |
| Taula 4.7 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues de secció en T..... | 73 |
| Taula 4.8 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada | 74 |
| Taula 4.9 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues reforçades en forma de U (U)..... | 79 |
| Taula 4.10 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada | 80 |
| Taula 4.11 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues reforçades lateralment (S)..... | 85 |
| Taula 4.12 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada | 86 |
| Taula 4.13 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues reforçades en embolcall complert (W)..... | 91 |
| 5. PROPOSTA DE FORMULACIÓ | 92 |
| Taula 5.1 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada | 94 |
| Taula 5.2 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues reforçades en embolcall complert (W)..... | 95 |

LLISTAT DE FIGURES

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓ | 12 |
| Figura 1.1 Mètodes de reforç estructural convencionals: Addició de perfils metàl·lics (imatges superiors) i encamiset de formigó (imatge inferior) (Francisco Hostalet, 2012) . | 13 |
| 2. REFORÇ EXTERN A TALLANT AMB LAMINATS DE FRP | 16 |
| Figura 2.1 Propietats de diferents tipus de fibra i de l'acer convencional (Carolin, 2003). | 17 |
| Figura 2.2 Exemple de fibra de vidre (Casas, 2012)..... | 18 |
| Figura 2.3 Exemple de fibra d'aramida (Casas, 2012)..... | 18 |
| Figura 2.4 Exemple de fibra de carboni (Casas, 2012)..... | 19 |
| Figura 2.5 Variació de la resistència i del mòdul elàstic segons el volum de fibres..... | 25 |
| Figura 2.6 Diagrames tensió-deformació de les fibres de carboni (CFRP), aramida (AFRP), vidre (GFRP) i de l'acer convencional (FIB Bulletin 14, 2001) | 25 |
| Figura 2.7 Secció dels tipus de reforços de bigues amb FRP | 26 |
| Figura 2.8 Alçat dels tipus de reforços en bigues amb FRP | 26 |
| Figura 2.9 Deformació longitudinal de l'ànima. | 28 |
| Figura 2.10 Nomenclatura de les propietats geomètriques en el reforç de bigues amb laminats de FRP | 35 |
| 4. ANÀLISI COMPARATIU DELS MODELS EXISTENTS | 54 |
| Figura 4.1 Gràfica de dispersió per al FIB Bulletin 14 (2001) | 56 |
| Figura 4.2 Gràfica de dispersió per al ACI 440.2R-08 (2008)..... | 57 |
| Figura 4.3 Gràfica de dispersió per al TR55 (2001)..... | 57 |
| Figura 4.4 Gràfica de dispersió per al CNR-DT200 (2004)..... | 58 |
| Figura 4.5 Gràfica de dispersió per al CAN/CSA-S6-06 (2006)..... | 58 |
| Figura 4.6 Gràfica de dispersió per al CIDAR (2006) | 59 |
| Figura 4.7 Gràfica de dispersió per a Mofidi et Chaallal (2011)..... | 59 |
| Figura 4.8 Gràfica de dispersió per a Alzate (2012) | 60 |
| Figura 4.9 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi global..... | 61 |
| Figura 4.10 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al FIB Bulletin 14 (2001) | 63 |
| Figura 4.11 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al ACI 440.2R-08 (2008)..... | 63 |
| Figura 4.12 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al TR55 (2001) | 64 |
| Figura 4.13 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al CNR-DT200 (2004) | 64 |
| Figura 4.14 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al CAN/CSA-S6-06 (2006) | 65 |
| Figura 4.15 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al CIDAR (2006) | 65 |
| Figura 4.16 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per a Mofidi et Chaallal (2011) | 66 |
| Figura 4.17 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per a Alzate (2012) | 66 |
| Figura 4.18 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues de secció rectangular..... | 67 |
| Figura 4.19 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al FIB Bulletin 14 (2001) | 69 |
| Figura 4.20 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al ACI 440.2R-08 (2008) | 69 |
| Figura 4.21 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al TR55 (2001)..... | 70 |
| Figura 4.22 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al CNR-DT200 (2004) | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.23 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al CAN/CSA-S6-06 (2006) | 71 |
| Figura 4.24 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al CIDAR (2006)..... | 71 |
| Figura 4.25 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per a Mofidi et Chaallal (2011) | 72 |
| Figura 4.26 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per a Alzate (2012) | 72 |
| Figura 4.27 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues de secció en T | 73 |
| Figura 4.28 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al FIB Bulletin 14 (2001) | 75 |
| Figura 4.29 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al ACI 440.2R-08 (2008) | 75 |
| Figura 4.30 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al TR55 (2001)..... | 76 |
| Figura 4.31 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al CNR-DT200 (2004) | 76 |
| Figura 4.32 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al CAN/CSA-S6-06 (2006) | 77 |
| Figura 4.33 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al CIDAR (2006) | 77 |
| Figura 4.34 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per a Mofidi et Chaallal (2011) | 78 |
| Figura 4.35 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per a Alzate (2012) | 78 |
| Figura 4.36 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues reforçades en forma d'U (U) | 79 |
| Figura 4.37 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al FIB Bulletin 14 (2001) | 81 |
| Figura 4.38 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al ACI 440.2R-08 (2008) | 81 |
| Figura 4.39 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al TR55 (2001)..... | 82 |
| Figura 4.40 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al CNR-DT200 (2004) | 82 |
| Figura 4.41 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al CAN/CSA-S6-06 (2006) | 83 |
| Figura 4.42 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al CIDAR (2006)..... | 83 |
| Figura 4.43 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per a Mofidi et Chaallal (2011) | 84 |
| Figura 4.44 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per a Alzate (2012)..... | 84 |
| Figura 4.45 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues reforçades lateralment (S) | 85 |
| Figura 4.46 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al FIB Bulletin 14 (2001) | 87 |
| Figura 4.47 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al ACI 440.2R-08 (2008) | 87 |
| Figura 4.48 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al TR55 (2001)..... | 88 |
| Figura 4.49 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al CNR-DT200 (2004) | 88 |
| Figura 4.50 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per a CAN/CSA-S6-06 (2006) | 89 |
| Figura 4.51 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al CIDAR (2006)..... | 89 |
| Figura 4.52 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per a Alzate (2012)..... | 90 |
| Figura 4.53 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues reforçades en embolcall complet (W) | 91 |

5. PROPOSTA DE FORMULACIÓ..... 92

| | |
|--|----|
| Figura 5.1 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per a Mofidi et Chaallal - Talens (2012)..... | 95 |
| Figura 5.2 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues reforçades en embolcall complet (W) amb Mofidi et Chaallal - Talens (2012)..... | 96 |

Notació

LLETRES ROMANES MAJÚSCULES

| | |
|-------------------|--|
| A_{FRP} | Àrea de reforç del laminat de FRP disposada. |
| A_s | Àrea d'armadura longitudinal inferior. |
| A'_s | Àrea d'armadura longitudinal superior. |
| A_{st}, A_{sw} | Àrea d'armadura transversal. |
| A_α | Àrea per unitat de longitud de cada grup d'armadures que formen un angle α amb la directriu de la peça (mm^2/mm). |
| $B_{slab T}$ | Amplada de l'ala referida a bigues de secció en T. |
| C | Aplicació de FRP contínua. |
| D | Aplicació de FRP discontinua. |
| E_{cm} | Mòdul de deformació longitudinal secant del formigó a 28 dies. |
| E_c | Mòdul de deformació longitudinal tangent del formigó a 28 dies. |
| E_{FRP} o E_f | Mòdul elàstic del laminat de FRP. |
| E_{fib} | Mòdul elàstic de les fibres. |
| E_m | Mòdul elàstic de la matriu. |
| E_s | Mòdul elàstic de l'acer. |
| E_{sv} | Mòdul elàstic de l'acer de reforç a tallant. |
| H | Cantell de la biga. |
| $H_{slab T}$ | Cantell de l'ala referit a bigues de secció en T. |
| H_w | Cantell de l'ànima |
| L_e | Longitud d'adherència efectiva del reforç d'FRP. |
| S | Reforç lateral (Side bonded). |
| S+ | Reforç lateral amb ancoratges. |
| U | Reforç en U. |
| U+ | Reforç en U amb ancoratges. |
| V_{cu} | Contribució del formigó a la resistència a tallant (EHE-08, 2008). |

| | |
|---------------|---|
| V_f | Contribució de les fibres FRP a l'esforç tallant de la biga. Esforç analític segons les diferents normes. |
| V_{fib} | Volum de fibres |
| V_{FRP} | Contribució del reforç amb laminat de FRP a la resistència a tallant. |
| $V_{FRP,exp}$ | Contribució del reforç amb laminat de FRP a la resistència a tallant experimental. |
| V_m | Volum de la matriu |
| V_{rd} | Valor de la resistència de càlcul a esforç tallant. |
| $V_{Rd,c}$ | Contribució del formigó al tallant (Eurocodi 2, 2010). |
| $V_{Rd,max}$ | Resistència màxima a tallant segons Eurocodi 2 (2010). |
| $V_{Rd,s}$ | Contribució de l'armadura transversal a la resistència a tallant (Eurocodi 2, 2010). |
| V_{su} | Contribució de l'armadura transversal (estreps) a tallant (EHE-08, 2008). |
| W | Reforç d'embolcall complet (Wrapped). |
| W+ | Reforç d'embolcall complet amb ancoratges. |

LLETRES ROMANES MINÚSCULES

| | |
|------------|--|
| b | Amplada de la biga. |
| b_0 | Amplada de l'ànima segons el punt 44.2.1 de la EHE-08 (2008). |
| bf | Amplada del laminat de FRP per al CNR-DT200 (2004). |
| b_{web} | Amplada de l'ànima de la biga. |
| b_w | Amplada de l'ànima més estreta de la secció en la zona traccionada (Eurocodi 2, 2010). |
| d | Cantell útil de la biga. |
| d_f | Cantell útil de la biga reforçat amb laminat de FRP. |
| f_{cd} | Resistència de càlcul del formigó a compressió. |
| f_{ck} | Resistència característica del formigó a compressió. |
| f_{cm} | Resistència mitja del formigó a compressió a 28 dies. |
| $f_{ct,m}$ | Resistència mitja a tracció. |

| | |
|----------------------------|--|
| f_{cv} | Resistència efectiva del formigó a tallant en N/mm^2 de valor $f_{cv}=f_{ck}$ amb f_{cv} no major que $15 N/mm^2$ en cas de control indirecte del formigó. |
| f_{fib} | Resistència a tracció de les fibres. |
| f_{fe}, f_{fed}, f_{ffd} | Resistència efectiva a tracció de l'FRP en la direcció de les fibres. |
| f_{fu} | Resistència última a tracció de l'FRP en la direcció de les fibres. |
| f_m | Resistència a tracció de la matriu (resines). |
| $f_{y\alpha d}, f_{ywd}$ | Resistència de càlcul de l'armadura A_α . |
| h_f | Alçada del reforç. |
| k_v | Coeficient de seguretat per a l'adherència. |
| k_1 | Factor de modificació en relació amb la resistència del formigó. |
| k_2 | Factor de modificació en relació amb la configuració del reforç de l'FRP. |
| $l_e, l_b, l_{t,max}$ | Longitud d'adherència efectiva del reforç d'FRP. |
| n | Nombre de capes de fibres FRP. |
| r | Factor de reducció proporcionat pel fabricant. |
| r_c | Radi de curvatura de les cantonades de la biga. |
| s | Separació entre armadures. |
| S_{FRP} | Espaiat entre les fibres FRP. |
| t_{fib} | Espessor de les fibres. |
| t_{FRP} | Espessor del laminat de FRP. |
| W_{FRP} | Amplada del laminat de FRP. |
| z | Braç mecànic; $0,9 \cdot d$ en cas de falta de càlculs més precisos. |

LLETRES GREGUES MAJÚSCULES

| | |
|---------------|--|
| Γ_{FK} | Energia de fractura (en N i mm). |
| Ψ_f | Coeficient de seguretat addicional per a les fibres FRP. |

LLETRES GREGUES MINÚSCULES

| | |
|------------------------------------|---|
| α_f, β | Angle entre la direcció del laminat de FRP i l'eix longitudinal de la biga. |
| ϵ_{fed} o ϵ_{fd} | Deformació de disseny efectiva de la fibra FRP. |
| ϵ_{fe} | Deformació mitja efectiva de la fibra FRP. |
| ϵ_{fu} | Deformació última del laminat de FRP. |
| ϵ_x | Deformació longitudinal de l'ànima, expressada en tant per mil |
| θ | Angle de les fissures a tallant respecte l'eix longitudinal de la biga. |
| θ_e | Angle de referència de les fissures degut a la relació amb altres esforços d'ELU. |
| ϕ | Factors de reducció de resistència a tallant. |
| ρ_f | Quantia del reforç de fibres FRP. |
| ρ_l | Quantia d'armadura longitudinal principal de tracció, passiva i activa adherent, ancorada a una distància igual o major que d a partir de la secció d'estudi calculada. |
| ρ_s | Quantia d'armadura longitudinal inferior. |
| ρ_{sv} | Quantia d'armadura de tallant |
| σ'_{cd} | Tensió axial mitjana l'ànima de la secció. |

ABREVIATURES

| | |
|------|---|
| AFRP | Polímers reforçats amb fibres d'aramida. |
| CFRP | Polímers reforçats amb fibres de carboni. |
| EBR | Reforç adherit externament (Externally Bonded Reinforcement). |
| ELS | Estat límit de servei |
| ELU | Estat límit últim |
| FRP | Polímers reforçats amb fibres |
| GFRP | Polímers reforçats amb fibres de vidres |
| NSM | Reforç adjuntat en el recobriment (Near Surface Mounted) |
| PAN | PoliAcrilNítil |

1. INTRODUCCIÓ

1.1 MOTIVACIÓ

1.1.1 REFORÇ D'ESTRUCTURES

Un canvi en les necessitats socials, una actualització de les normatives de càlcul, un canvi d'ús de l'estructura o el deteriorament d'aquesta són causes que desemboquen en la realització d'un reforç de l'estructura. Aquest reforç, bé sigui per augmentar la resistència o per mantenir les seves condicions d'aptitud a l'ús, es pot realitzar de diverses maneres. Els mètodes tradicionals de recrescut de seccions han estat i són una de les solucions més emprades, no obstant, desavantatges com el pes del reforç o l'augment de les dimensions de la peça han fet que, a partir dels anys 90, es desenvolupin noves tècniques de reforç. Aquest és el cas del reforç extern mitjançant l'adhesió de laminats de polímers reforçats amb fibres (FRP), un laminat conformat per resines a mode de matriu per repartir càrregues i fibres que li donen la resistència a tracció. Les seves propietats mecàniques així com la resistència a la corrosió i la seva facilitat de posta en obra han creat un gran interès en grups d'investigadors d'arreu del món per tal de trobar models de predicció i formulacions per a calcular la contribució d'aquest tipus de reforç.

1.1.2 TÈCNiques DE REFORÇ D'ESTRUCTURES

Les tècniques de reforç d'estructures que existeixen en l'actualitat es poden resumir segons l'esforç al que està sotmesa l'element i segons si és actiu (des de la col·locació contribueix a la resistència) o passiu (contribueix en aquells increments de càrregues a partir de la col·locació del reforç) i es basen en el recrescut de seccions i en el pretesat exterior.

L'augment de secció resistent, en reforços amb formigó armat, s'acostuma a fer amb un recrescut de la zona traccionada afegint nova armadura amb el què s'augmenta el cantell i l'àrea d'armadura o bé amb un recrescut de la zona comprimida aconseguint un augment del cantell únicament. L'addició de perfils metàl·lics consisteix en l'ús d'estructura metàl·lica afegida per a resistir esforços, com poden ser bigues o una estructura metàl·lica completa i l'enganxat de xapes es realitza amb resines epoxi i xapes de poc espessor per tal d'augmentar la resistència de la part traccionada de l'element. Els encamisats (metàl·lics o de formigó) consisteixen en evitar la deformació lateral dels elements, amb el què s'aconsegueix tenir un augment de resistència al estar multicomprimit.

Encamisats, augment de la secció resistent en formigó armat són tècniques complexes i s'han d'executar de manera acurada. Problemàtiques com l'important increment de pes de l'estructura, l'augment de secció, reducció de gàlils (aspecte que pot ser limitant per a l'ús de l'estructura) i la difícil posada en obra (requereix mà d'obra qualificada i especialitzada) són factors que influeixen molt a l'hora de realitzar-los. També trobem que l'addició de perfils, xapes de poc espessor enganxades amb resines epoxídiques, encamisats i baguetes són mètodes habitualment emprats en

acer laminat però la corrosió de les plaques (al estar a l'exterior l'oxidació danya a la interfase entre xapa i resina perjudicant l'adherència del reforç), la dificultat de manipulació en casos de xapes gruixudes (de pes considerable), les juntes degudes a les limitacions de longitud (no sempre es pot col·locar la xapa amb la mida total del reforç) són causes que donen lloc a la no durabilitat del reforç i a la poca vida útil d'aquest. Alguns dels principals mètodes de reforç d'estructures es poden veure en la Figura 1.1.



Figura 1.1 Mètodes de reforç estructural convencionals: Addició de perfils metàl·lics (imatges superiors) i encamisat de formigó (imatge inferior) (Francisco Hostalet, 2012)

Els desavantatges associats a aquests mètodes tradicionals són aspectes per les quals el reforç de l'estructura mitjançant l'adhesió de laminats de polímers reforçats amb fibres (FRP) es va plantejar com a alternativa per a fer reforços i reparacions estructurals. A més de l'experiència prèvia en aplicacions a d'altres àrees com la indústria aeronàutica, naval o automobilística durant més de 50 anys, els avantatges de la fàcil manipulació, l'estalvi d'elements auxiliars a l'hora de col·locar-los i les característiques mecàniques de rigidesa i resistència pel poc pes de l'element o el fet que no l'afecta la corrosió són aspectes que l'han fet competitiu amb els reforços tradicionals. L'ús d'aquest tipus de reforç s'ha estès ràpidament per la seva versatilitat en diferents elements ja que significa una solució més que acceptable als problemes enumerats anteriorment i són aplicables al reforç d'axial, de flexió, de tallant i/o de torsió en les estructures.

1.1.3 REFORÇ D'ESTRUCTURES AMB FRP

El reforç d'estructures mitjançant FRP consisteix en l'adhesió mitjançant resines epoxídiques dels laminats de FRP per donar aquest augment de capacitat resistent. Els laminats són un material compost format per fibres d'elevades prestacions embegudes en una matriu polimèrica i que es presenten en forma de laminat flexible (prefabricat o conformat in situ), el que permet adaptar-les a la forma de l'element. Aquest tipus de reforç soluciona les principals problemàtiques del reforç tradicional ja que tenen poc pes, altes resistències, són fàcils de col·locar en obra (adaptable a la forma de l'element), resistents a la corrosió i pràcticament no augmenten les dimensions de la secció de l'element a reforçar en ser làmines d'espessor reduït (com a molt uns tres mil·límetres).

Les dues tècniques més utilitzades en FRP són el reforç adherit externament (EBR: *Externally Bonded Reinforcement*) que consisteix en enganxar làmines o fulles de fibres sobre l'element mitjançant resina epoxi, i el de làmines o barres inserides en el recobriment (NSM: *Near Surface Mounted*) que consisteix en inserir barres o làmines de FRP en talls o solcs realitzats en el recobriment de l'element de formigó armat i reblerts amb resina o pasta de ciment. Les fibres utilitzades són les fibres de carboni, de vidre i d'aramida (Kevlar), a partir de les qual els laminats adopten l'abreviatura de CFRP, GFRP i AFRP respectivament.

L'aplicació de laminats de FRP com a reforç extern (EBR) en elements de formigó armat es troba molt extesa pels casos de reforços a flexió i a confinament. No passa el mateix en el cas del tallant degut a l'existència d'una menor experimentació i a que no es coneixen prou bé els mecanismes resistents, pel que no hi ha consens en l'avaluació de la contribució de l'FRP a tallant.

Aquesta tesina està enfocada a estudiar el reforç a tallant amb laminats FRP aplicats mitjançant la tècnica de reforç adherit externament (EBR).

1.2 OBJECTIUS

General

Donat que no existeix consens en les formulacions que avaluen la contribució del reforç amb FRP a la resistència a tallant, l'objectiu d'aquesta tesina és fer un anàlisi comparatiu de les formulacions existents que per avaluar la contribució del laminat FRP. Aquest anàlisi es fa mitjançant l'elaboració d'una base de dades d'assajos experimentals realitzats a bigues de formigó armat reforçades amb aquest sistema. Un cop analitzades les formulacions, si s'escau es proposarà una millora de la formulació.

Específics

- Recopilar els models existents de càlcul de la contribució a tallant del laminat de FRP.
- Realitzar una base de dades el més extensa possible d'assajos a tallant de bigues de formigó armat reforçades a tallant amb laminat de FRP.
- Aplicar les formulacions als assajos i comparar els resultats.
- Proposar una millora en la formulació

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESINA

La tesina es divideix en sis capítols i un annex.

En el capítol primer es realitza una introducció al reforç estructural i als objectius que es volen aconseguir a la tesina. En el capítol segon es presenten les característiques del reforç amb FRP: materials, principals problemàtiques, models existents i configuracions de reforç a tallant. En el capítol tercer s'exposen i analitzen les característiques de la base de dades realitzada. En el capítol quart es realitza l'anàlisi estadístic comparatiu entre els diferents models existents en general i agrupant segons assajos de característiques similars (tipus de secció, resistència del formigó, etc.) En el capítol cinquè es proposa una formulació per als reforços d'embolcall complet. En el capítol sisè s'expressen les conclusions extretes després de la realització d'aquesta tesina.

L'annex 1 resumeix les propietats dels assajos de la base de dades utilitzada.

2. REFORÇ EXTERN A TALLANT AMB LAMINATS DE FRP

2.1 CARACTERÍSTIQUES DELS LAMINATS DE FRP

2.1.1 GENERALITATS

Els polímers reforçats amb fibres són un material compost format per fibres (de carboni, vidre o aramida) embegudes dins una matriu polimèrica d'un plàstic termostable com un epoxi, un vinilèster o un polièster.

Es consideren material compost per estar format per dos materials amb propietats diferents que al combinar-los assoleixen les característiques buscades. En el cas dels FRP, s'aconsegueix un increment de les capacitats mecàniques de resistència i elasticitat de la matriu al combinar-la amb les fibres. Aquest augment depèn de les propietats mecàniques de cadascun dels materials (fibra i matriu), del volum relatiu entre ells i de la disposició de les fibres en la matriu.

2.1.2 MATERIALS

Com ja s'ha comentat, els laminats de FRP es componen de fibres i matriu i, òbviament, les propietats resultants del compost dependrà de les propietats de cadascun dels materials emprats però també del procés de fabricació. La idea principal és que la relació entre els components del FRP treballin alhora, per tant, per cada tipus s'han d'escollir els materials adequats per a què es compleixi aquest objectiu.

Els sistemes de FRP més destacats són:

- Laminats de FRP realitzats in situ amb la tècnica del "*wet lay-up*" (làmines polimèriques armades amb fibres conformades in situ al fraguar les resines aplicades).
- Laminats de FRP prefabricats mitjançant la tècnica de pultrusió (processos de arrossegat de la matèria prima i parat per operacions d'impregnat, conformat, curat i tall aconseguit un bon acabat superficial).
- Sistemes especials (ex: embolcallat automàtic, pretesat, etc.).

Per altra banda és important saber els diferents sistemes de FRP més usats en aquests moments. Són sistemes que s'han testat a escala real en estructures existents i que seran més o menys adequats depenent de la forma geomètrica de l'element a reforçar. Per exemple si l'element a reforçar és recte i té superfícies planes (una biga) una bona solució podria ser l'aplicació d'un laminat prefabricat de FRP mentre que si l'element té superfícies corbes (un pilar circular) és millor disposar fulles o teles en ser més flexible.

A part dels materials, és molt important també l'estat de la superfície en la que s'ha d'aplicar. Aquests sistemes funcionen mitjançant una tensió tangencial garantida per l'adherència entre superfícies, per tant, és important que la superfície estigui neta,

seca, tingui la rugositat necessària per a desenvolupar la tensió tangencial de l'adhesiu i, en el moment de la posta en obra, la temperatura ambient ha de ser la que garanteixi un bon fragat de la resina usada com a adhesiu.

A continuació s'exposen les principals característiques dels materials conformadors del material compost: fibres, matrius i adhesius.

2.1.2.1 FIBRES

La funció de les fibres és la d'aportar la resistència al compost. L'alt valor d'aquesta relació és un factor molt important en l'aprofitament de les propietats al utilitzar-les com a reforç. El seu diàmetre oscil·la entre els 5 i els 20 μm i es fabriquen unidireccionals o bidireccionals, contínues (enrotllades) o discontinües.

Les principals fibres emprades en la conformació dels FRP són les de carboni, vidre i aramida i són les que en aquesta tesina s'estudiaran dels diferents assajos. En la Figura 2.1 es comparen les propietats dels tres tipus de fibra més comunes i les de l'acer per armadura passiva i activa.

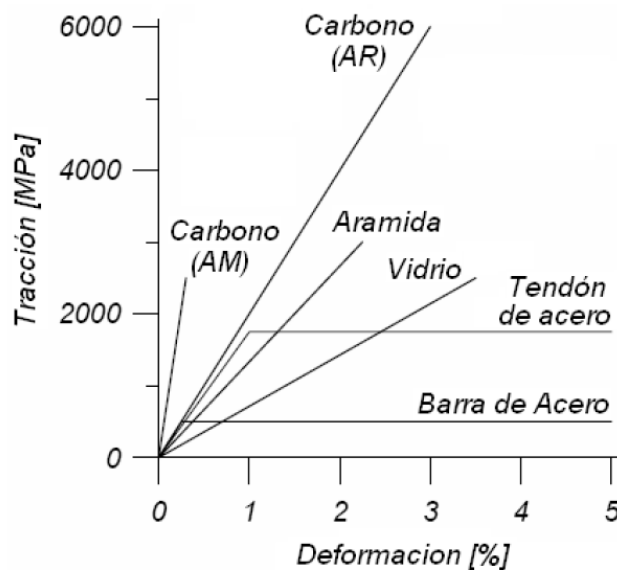


Figura 2.1 Propietats de diferents tipus de fibra i de l'acer convencional (Carolin, 2003)

Es pot observar el comportament elàstic lineal fins a ruptura de les fibres com a diferència del comportament elastoplàstic dels acers així com que la resistència és més elevada que els acers convencionals, tant per a pretesat com per a armat. Els mòduls elàstics de les fibres de vidre i d'aramida són inferiors als dels acers més usats mentre que el de fibres de carboni d'alta resistència és semblant al dels acers i el de les d'alt mòdul és molt superior. La resistència de les fibres de vidre, aramida i carboni d'alt mòdul són similars mentre que les fibres de carboni d'alta resistència són clarament superiors.

Dels tres tipus de fibres existents, vidre, aramida i carboni cal destacar el següent:

Fibres de vidre

El seu cost és baix però tenen problemes d'erosió per l'atac químic en ambients alcalins, fet que la seva aplicació sigui limitada en el formigó armat (altament alcalí) amb el què s'han de fer tractaments químics per a solucionar-ho. El diàmetre és d'uns 5 μm i la temperatura límit a la que perden les seves capacitats resistents és de 1000° C. El seu ús més habitual és en el reforç intern. En la Figura 2.2 es pot veure com és una fibra de vidre.



Figura 2.2 Exemple de fibra de vidre (Casas, 2012)

Fibres d'aramida

Tenen estructura anisòtropa tenint millors característiques mecàniques en la direcció de la fibra, són d'alta tenacitat i tenen bones prestacions a fatiga. No tenen problemes a atacs químics però amb la radiació ultraviolada perden coloració i resistència. El seu diàmetre és d'uns 12 μm i la temperatura límit a la que perden les seves capacitats resistents és de 200° C. El seu ús més habitual és en el reforç d'obres de fàbrica. En la Figura 2.3 es veu una fibra d'aramida.



Figura 2.3 Exemple de fibra d'aramida (Casas, 2012)

Fibres de carboni

Les fibres de carboni són fibres amb un contingut de carboni comprès entre el 80% i el 95% i s'obtenen a partir de l'oxidació, carbonització i grafitització a altes temperatures (més de 2000° C) de fibres de PoliAcrilNitril (PAN) o de la brea. Segons la matèria prima a partir de la qual s'obtenen les fibres els diàmetres seran majors o menors, variant entre 9 µm i 18 µm en el cas de les provinents de la brea i entre 5 µm i 8 µm per les provinents del PAN, que són les més usades en el reforç d'elements de formigó armat.

Les fibres de carboni basades en PAN les podem dividir en dos tipus, les d'alta resistència i les d'alt mòdul. Les d'alta resistència tenen una elevada resistència a tracció (uns 2.7 GPa) en contraposició del seu mòdul que és relativament baix mentre que les fibres de carboni d'alt mòdul són el contrari pel que fa a les característiques mecàniques amb un mòdul d'uns 390 GPa i una resistència relativament baixa.

No tenen problemes amb atacs químics ni amb la radiació ultraviolada, es comporten bé a fatiga, no s'oxiden i no presenten deformació a càrrega constant (fluència). No obstant, són conductores per l'alt contingut de carboni i en conseqüència poden oxidar l'acer si estan en contacte directe. La seva temperatura crítica de pèrdua de capacitats resistents és de 650° C. En la Figura 2.4 es veu una fibra de carboni.

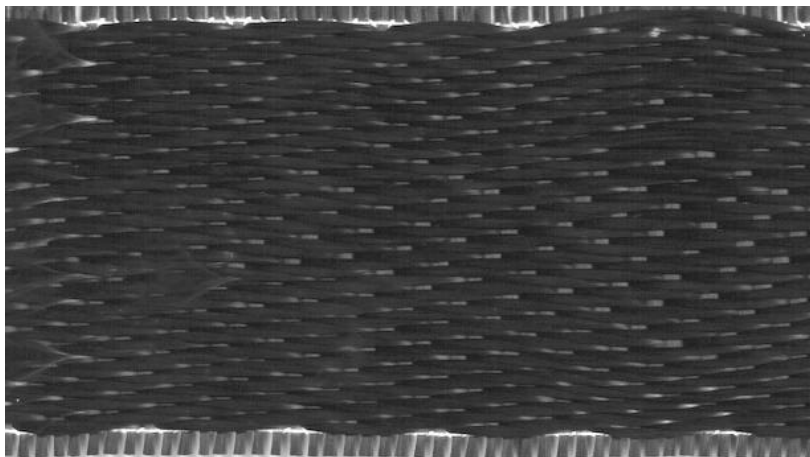


Figura 2.4 Exemple de fibra de carboni (Casas, 2012)

Les característiques mecàniques de cada fibra es poden resumir en els valors de la Taula 2.1 on es poden veure el mòdul elàstic, la resistència a la tracció i la deformació última per separat, és a dir, aquests valors no serveixen directament per a dissenyar el reforç sinó que s'han de combinar amb els valors de les resines de les matrius per a estimar el valor real.

Taula 2.1 Característiques mecàniques dels diferents tipus de fibres (Feldman 1989, Kim 1995)

| Material | Mòdul Elàstic (GPa) | Resistència a tracció (MPa) | Deformació última (%) |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Fibra de carboni | | | |
| Alta resistència | 215 – 235 | 3500 – 4800 | 1.4 - 2.0 |
| Ultra alta resistència | 215 - 235 | 3500 – 6000 | 1.5 – 2.3 |
| Alt Mòdul | 350 - 500 | 2500 – 3100 | 0.5 – 0.9 |
| Ultra alt Mòdul | 500 - 700 | 2100 – 2400 | 0.2 – 0.4 |
| Fibra de vidre | | | |
| E | 70 | 1900 – 3000 | 3.0 – 4.5 |
| S | 85 - 90 | 3500 – 4800 | 4.5 – 5.5 |
| Fibra d'aramida | | | |
| Baix Mòdul | 70 - 80 | 3500 – 4100 | 4.3 – 5.0 |
| Alt Mòdul | 115 - 130 | 3500 - 4000 | 2.5 – 3.5 |

Observant l'anterior Taula 2.1 s'aprecia que el mòdul elàstic de les fibres de carboni d'alta resistència és pràcticament el doble que el de l'aramida i tres vegades més que el de les de vidre i en el cas de les d'alt mòdul i de ultra alt mòdul tenen més de tres vegades per les fibres d'aramida i més de cinc per les de vidre. La resistència a tracció de tots els tipus de fibres és superior a 1900 MPa i els màxims són de 4000 MPa (fibres d'aramida), 4800 MPa (fibres de carboni d'alta resistència i de vidre tipus S) excepte les fibres d'ultra alta resistència d'entre 3500 i 6000 MPa, les de carboni d'alt mòdul (2500 a 3100 MPa), les de carboni d'ultra alt mòdul (2100 a 2400 MPa) i les de vidre (1900 a 3000 MPa). i finalment, les deformacions últimes estan entre el 0,2% i 0,9% per les fibres de carboni d'alt mòdul i ultra alt mòdul, entre 1,4% i 2,3% per les d'alta i ultra alta resistència. En el cas de les fibres de vidre varia entre el 3,0% i el 4,5% (tipus E) i entre 4,5% i 5,5% (tipus S) i les fibres d'aramida entre 2,5% i 3.5% per les d'alt mòdul i entre 4,3% i 5,0% les de baix mòdul. L'aspecte més important és que l'augment del mòdul elàstic comporta un decrement de la resistència a tracció.

2.1.2.2 MATRIUS

La funció de la matriu en el compost és la de mantenir la cohesió del FRP, transmetre els esforços uniformement entre les fibres, donar la configuració geomètrica del material i protegir les fibres contra els agents externs que les puguin danyar mecànicament o químicament. Com que formen part del nou material, influeixen en propietats mecàniques com és el cas del mòdul transversal, la resistència, propietats a tallant i compressió. Per aquesta raó és essencial escollir la matriu adequada per a la fabricació del compost.

Els tipus de matriu existents són de tipus polimèric i formades per termoplàstics o bé per termostables com les resines epoxi, els polièsters i els vinilèsters. Les més utilitzades en enginyeria civil son les termostables perquè al aplicar calor no es fonen perdent la forma, no obstant, perden rigidesa a partir d'una temperatura aproximada

de 80° C, anomenada de transició vítria, i que introdueix una variable a tenir en compte a l'hora de dissenyar el reforç. Dels tres tipus de matrius, les resines epoxi són les més habituals a la vegada que també s'utilitzen com a adhesiu entre el laminat i l'element a reforçar per les seves propietats mecàniques i durabilitat, encara que són més cares que els polièsters i els vinilèsters.

En la Taula 2.2 es poden veure ampliades les característiques de les resines epoxi com a adhesiu i per ser les més usades en reforç estructural.

Taula 2.2 Propietats mecàniques dels diferents tipus de matrius (Alzate, 2012)

| Matriu | Mòdul elàstic (GPa) | Resistència a tracció (MPa) | Deformació última (%) | Densitat (kg/m³) |
|-------------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Polièster | 2,1 a 4,1 | 20 a 100 | 1,0 a 6,5 | 1000 a 1450 |
| Vinilèster | 3,2 | 80 a 90 | 4,0 a 5,0 | - |
| Epoxi | 2,5 a 4,1 | 55 a 130 | 1,5 a 9,0 | 1100 a 1300 |

2.1.2.3 ADHESIUS

Els adhesius són els responsables d'aconseguir la tensió tangencial entre l'element i la làmina de FRP per tal d'assegurar la compatibilitat de deformacions entre ells i que el reforç actuï com a tal. Química (de l'adhesiu i de la superfície), reologia, anàlisi de tensions, mecanismes de ruptura i tensions màximes seran aspectes clau a l'hora de decidir quin tipus d'adhesiu s'ha de col·locar.

En el sector estructural el producte més utilitzat en aquests moments són les resines de formulació epoxi. Aquestes s'obtenen com a barreja de dos elements, per una banda la resina epoxi (polímer) i per l'altra un component enduridor que, una vegada feta la mescla i després d'un temps de fraguat (*pot time*), actua proporcionant unes característiques mecàniques elevades. Segons l'ús a que es destinen es poden incorporar additius a la mescla per a obtenir millors resultats o bé per a retardar el temps d'enduriment per a una millor aplicació.

Les propietats de l'adhesiu són pròpies d'ell (dependran únicament de la mescla, quantitats dels components...) però per tal de que es puguin complir s'han de donar unes condicions determinades de temperatura, composició química dels elements a unir, temps d'aplicació, de fraguat, de curat i, sobretot, que les superfícies tinguin les condicions de netedat, humitat i rugositat per a garantir que el producte pugui desenvolupar plenament les seves propietats. Per exemple, si l'adherència no es bona, l'adhesiu podria lliscar i no permetre el treball solidari entre reforç i element.

Els productes epoxi presenten les següents diferències amb d'altres polímers que han fet el seu ús més extensiu en l'enginyeria civil dels quals podem destacar (Holloway and Leeming 1999):

- Alta activitat superficial i bones propietats d'humectació per a una varietat de substrats.
- Es poden formular per a tenir un llarg "temps d'obertura".
- Alta resistència de cohesió del compost curat.

- Possibilitat d'enduriment per inclusió d'una fase de goma dispersa.
- La manca de subproductes de la reacció de curat minimitza la contracció i permet l'adherència d'àrees llargues simplement per pressió de contacte.
- Baixa contracció comparada amb d'altres productes.
- Baixa fluència i major resistència en l'aplicació de càrregues de llarga durada.
- Possibilitat de composició tixòtropa per a l'aplicació en superfícies verticals.
- Adaptació a línies de contorn irregulars.

Les característiques principals d'aquests adhesius epoxi usats es presenten en la Taula 2.3 comparades amb els valors de l'acer i del formigó, materials molt comuns en l'enginyeria civil.

Taula 2.3 Propietats mecàniques dels adhesius epoxídics curats, del formigó i de l'acer (Täljsten, 1994)

| Propietat de l'adhesiu (a 20° C) | Adhesiu epoxi curat | Formigó | Acer |
|---|---------------------|----------|-----------------------------------|
| Densitat (Kg/m ³) | 1100 – 1700 | 2350 | 7800 |
| Mòdul d'Elasticitat (GPa) | 0.5 – 20 | 20 – 50 | 205 |
| Mòdul Tangencial (GPa) | 0.2 – 8 | 8 – 21 | 80 |
| Coefficient de Poisson | 0.3 – 0.4 | 0.2 | 0.3 |
| Resistència a Tracció (MPa) | 9 – 30 | 1 – 4 | 200 – 600 |
| Resistència a Tallant (MPa) | 10 – 30 | 2 - 5 | 200 – 600 |
| Resistència a Compressió (MPa) | 55 – 110 | 25 – 150 | 200 – 600 |
| Deformació de Tracció a la ruptura (%) | 0.5 – 5 | 0.015 | 25 |
| Energia de Fractura (aprox.) (Jm ⁻²) | 200 – 1000 | 100 | 10 ⁵ - 10 ⁶ |
| Coefficient d'Expansió Tèrmica (10 ⁻⁶ /°C) | 25 – 100 | 11 – 13 | 10 – 15 |
| Absorció d'aigua: 7 dies – 25°C (% w/w) | 0.1 – 3 | 5 | 0 |
| Temperatura de transició Vítria (°C) | 45 - 80 | --- | --- |

2.1.2.4 MATERIAL COMPOST - FRP

Les seves característiques estan fortament influenciades per el tipus de fibra i la seva orientació i a la vegada per la matriu i el contingut de fibres sobre el volum total de compost. La quantitat més habitual de fibres en el compost sol ser d'un 50-70% en les làmines i d'un 25-35% en fulles de fibra (FIB Bulletin 14, 2001). Pel que fa a l'orientació de les fibres, si es col·loquen totes les fibres en la mateixa direcció, s'obté un compost unidireccional i, si es col·loquen en dues o més direccions el compost és bidireccional o multidireccional respectivament.

Els més habituals en reforç i reparació d'estructures són els compostos amb fibres de carboni (CFRP) amb resina epoxi. Com s'ha comentat, l'ús d'aquest material compost ve donat per la seva capacitat d'adaptar-se a les formes dels elements a reforçar a més del seu excel·lent comportament mecànic.

Els punts forts d'aquests materials compostos en l'aplicació als reforços estructurals són els següents:

- Immunitat a la corrosió.
- Densitat molt menor que la de l'acer.
- Alta resistència a la tracció.
- Rigidesa segons necessitat (dins els límits del material).
- Capacitat de deformació
- Mides i geometria disponibles segons necessitat.

Tot i així, cal considerar, en detriment dels laminats de FRP, els següents inconvenients que s'han de tenir en compte en el disseny i que s'han de mitigar per tal d'evitar comportaments no desitjats. Aquests són:

- Ruptura fràgil per la no existència de branca plàstica i que, en conseqüència, no tenim la ductilitat. La solució adequada és limitar les deformacions per no arribar a ruptura.
- Mal comportament de les resines a altes temperatures (aproximadament a partir dels 80° C). En cas de preveure que es puguin donar aquestes temperatures, la solució és protegir el reforç.
- Problemes químics. Les fibres de vidre no són compatibles químicament en ambients alcalins (com és el cas del formigó) si no es realitza cap tractament, les fibres d'aramida perden coloració i resistència degut a les radiacions ultraviolades i les de fibres de carboni poden produir corrosió galvànica en contacte amb l'acer.
- Preu.

2.1.3 PROPIETATS MECÀNIQUES DELS FRP

Les propietats mecàniques dels FRP venen determinades a partir de les propietats de cada material que els conforma (mòduls d'elasticitat, resistències a tracció) així com la quantitat relativa de cadascun d'ells. Coneixent aquests valors, les propietats es poden estimar de manera general com:

$$E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m \cdot V_m$$

$$f_f = f_{fib} \cdot V_{fib} + f_m \cdot V_m$$

$$V_{fib} + V_m = 1$$

On:

E_f : Mòdul Elàstic de l'FRP en la direcció de les fibres.

E_{fib} : Mòdul Elàstic de les fibres.

E_m : Mòdul Elàstic de la matriu (resines).

V_{fib} : Volum de fibres.

V_m : Volum de la matriu.

f_f : Resistència a tracció de l'FRP en la direcció de les fibres.

f_{fib} : Resistència a tracció de les fibres.

f_m : Resistència a tracció de la matriu (resines).

No obstant, en els casos de la col·locació de laminats prefabricats realitzats in situ amb la tècnica del "wet lay-up" els valors de espessor de fibra, de matriu i, en conseqüència, el volum de cadascun dels components estan sotmesos a una gran incertesa que fan que amb l'anterior formulació es pugui cometre un error important en les propietats i també en la contribució del reforç a l'estructura existent. Per això, la solució proposada és la de considerar el gruix col·locat com el de les fibres utilitzades donat pel fabricant i no considerant el proporcionat per la matriu, amb el que V_{fib} valdrà la unitat. A més, s'utilitza un coeficient de seguretat que també ve donat pel fabricant. També es poden obtenir valors d'assajos experimentals amb laminat prefabricat realitzat in situ.

Per corregir els possibles errors al realitzar aquest sistema es proposa la següent equació:

$$t_{fib} \cdot E_{fib} \cdot r = t_f \cdot E_f$$

On:

- t_{fib} : gruix de les fibres.
- E_{fib} : Mòdul elàstic de les fibres.
- t_f : Espessor del compost (fibres més resina)
- E_f : Mòdul elàstic del compost (fibres més resina).
- r : Factor de reducció proporcionat pel fabricant.

Es pot tenir un ordre de magnitud de les que serien les propietats mecàniques dels laminats unidireccionals de FRP prefabricat en la Taula 2.4 segons el volum de fibres que contenen i es poden comparar amb les característiques d'un acer convencional de la mateixa taula.

Taula 2.4 Propietats mecàniques de laminats de FRP i d'acer convencional

| Material | Contingut de fibres (% en pes) | Densitat (kg/m ³) | Mòdul elàstic (GPa) | Resistència a tracció (MPa) |
|---|--------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Làmina de fibra de vidre i matriu de polièster (GFRP) | 50 a 80 | 1600 a 2000 | 20 a 55 | 400 a 1800 |
| Làmina de fibra de carboni i matriu d'epoxi (CFRP) | 65 a 75 | 1600 a 1900 | 120 a 250 | 1200 a 2250 |
| Làmina de fibra d'aramida i matriu d'epoxi (AFRP) | 60 a 70 | 1000 a 1250 | 40 a 125 | 1000 a 1800 |
| Acer convencional | - | 7850 | 200 | 400 |

En les taules es pot veure com el mòdul elàstic de les làmines de FRP són, en general, inferiors als d'un acer convencional i la diferència és molt variable depenent de quina sigui la fibra que la conforma, essent la formada per fibres de vidre la de menor mòdul elàstic i la de fibra de carboni la major. Pel que fa a la densitat del material del material compost, els laminats amb fibra de vidre i de carboni oscil·len entre els 1600 i els 2000 kg/m³ mentre que amb fibres d'aramida estan al voltant dels 1100 kg/m³. En comparació amb l'acer, es un material molt lleuger ja que estem parlant d'una reducció d'un 80% del pes propi. Si observem la resistència a tracció dels laminats, es veu clarament com és molt més elevada que la de l'acer (fins a 5 vegades superior). Les diferències (a la baixa) de les resistències i mòduls elàstics entre la fibra i el material compost són deguts a que la matriu té unes prestacions mecàniques inferiors a les de la fibra amb el què redueixen les característiques del laminat com es pot veure en la Figura 2.5.

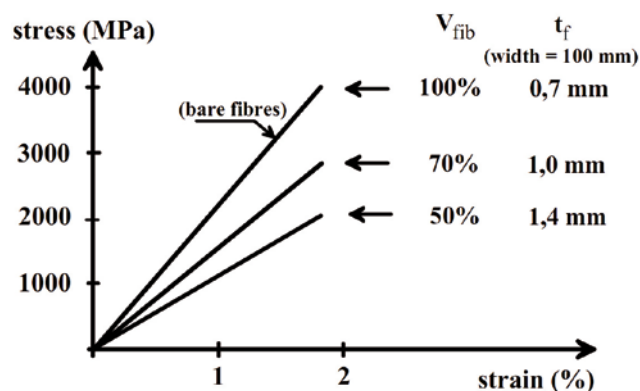


Figura 2.5 Variació de la resistència i del mòdul elàstic segons el volum de fibres

Pel que fa al comportament, les làmines de FRP tenen un comportament perfectament elàstic fet que facilita els càlculs de tensions no obstant, l'inconvenient principal és que, al no tenir una branca plàstica en el seu comportament, la ruptura és fràgil. Per a aquesta raó, a l'hora de dissenyar un reforç amb laminat de FRP es limita la deformació per evitar aquest tipus de ruptura i donar ductilitat a l'element a reforçar. Per contra, l'acer té les dues branques, elàstica i plàstica que fa que la ductilitat ens permeti preveure la fallada de l'estructura. Aquestes diferències es poden observar en la Figura 2.6.

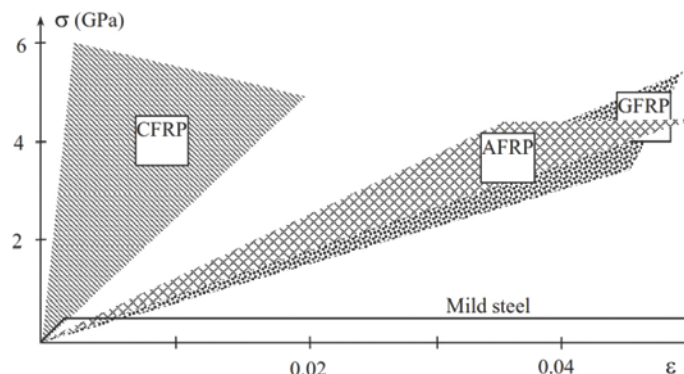


Figura 2.6 Diagrames tensió-deformació de les fibres de carboni (CFRP), aramida (AFRP), vidre (GFRP) i de l'acer convencional (FIB Bulletin 14, 2001)

2.2 CONFIGURACIÓ DEL REFORÇ A TALLANT AMB LAMINATS DE FRP

Els reforços a tallant amb laminats de FRP es col·loquen adherits externament mitjançant una resina (de tipus epoxi habitualment) i cal tenir en compte quina disposició tenen. En el nostre cas de bigues de formigó armat amb làmines de FRP adherides externament, existeixen tres maneres de posar les làmines que donaran lloc a diferents comportaments i també a diferents formulacions per tal de calcular la contribució del reforç. La disposició de les làmines és en el pla perpendicular a l'eix de la biga i les configuracions són les de la Figura 2.7.

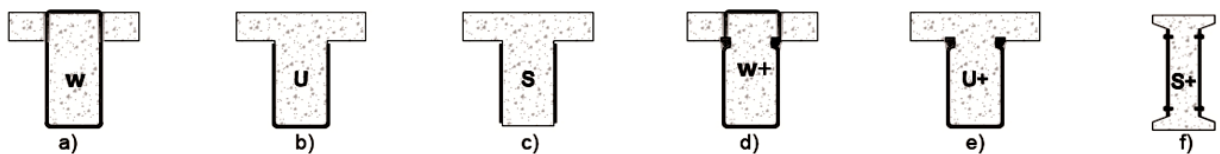


Figura 2.7 Secció dels tipus de reforços de bigues amb FRP

On el significat de cada esquema amb la seva lletra corresponent és:

W (*wrapped*): Secció totalment embolcallada.

U: Secció reforçada en forma d'U.

S (*sides*): Secció reforçada només als laterals.

W+ (*wrapped*): Secció totalment embolcallada i ancorada per evitar que es desenganxi.

U+: Secció reforçada en U i ancorada per evitar que es desenganxi.

S+ (*sides*): Secció reforçada només als laterals i ancorada per evitar que es desenganxi.

A part de la disposició en secció, també s'ha de considerar la col·locació en l'alçat de la peça. Els laminats s'han orientat per tal de veure com varia la contribució en funció de la inclinació i trobar la inclinació adequada. La idea principal és que el reforç estigui perpendicular al pla de fractura de la biga. A més a més, també es poden posar separades entre elles que s'anomena un reforç discontinu o be a tocar o una mica superposades que seria un reforç continu. Les maneres de col·locar els laminats en alçat es poden veure en la Figura 2.8.

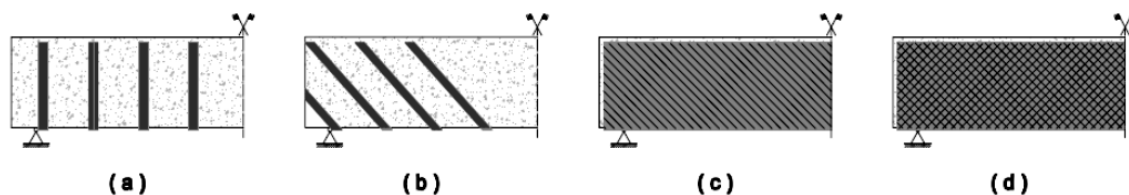


Figura 2.8 Alçat dels tipus de reforços en bigues amb FRP

Reforços amb laminats de FRP de forma discontinua:

- Laminat de FRP perpendicular a l'eix.
- Laminat inclinat un angle determinat per ser perpendicular a la fissura.

Reforços amb laminats de FRP de forma contínua:

- Reforç amb laminats de FRP col·locats de forma contínua i orientat per ser perpendicular a la fissura.
- Reforç amb laminats de FRP col·locats de forma contínua i en diverses orientacions.

2.3 PROBLEMÀTIQUES ACTUALS

Les principals problemàtiques de l'ús de laminats de FRP és que les recomanacions de disseny no contemplen la possible interacció entre el reforç i els mecanismes resistents de la biga sense reforçar. A més, un altre problema és que no pot desenvolupar tota la seva resistència a tracció degut a que el laminat, abans d'arribar a la tensió màxima es desenganxa de la biga i, per tant, s'obtenen valors inferiors als predits excepte en la configuració d'embolcall complet (W) on aquest fenomen no passa ja que abans es trenca el laminat a tracció. Per aquesta raó els investigadors han desenvolupat sistemes d'ancoratges per tal d'evitar aquest fenomen de despreniment del laminat (*debonding* o *peeling* en anglès) i permetre que el laminat faci la seva funció de reforç amb la contribució predita.

Per altra banda, la problemàtica principal la trobem en els mecanismes resistents. Fins a l'actualitat la resistència a tallant en bigues de formigó armat s'ha calculat com la suma de les contribucions del formigó i la de l'armadura si es dóna el cas. Seguint aquesta metodologia, els models per al càlcul de la contribució del reforç a tallant així com del càlcul del tallant últim en bigues reforçades es calculen actualment com la suma de totes les contribucions, és a dir:

$$V_{Rd} = V_{cu} + V_{su} + V_{FRP}$$

on:

V_{Rd} : Valor de la resistència de càlcul a esforç tallant.

V_{cu} : Contribució del formigó a la resistència a tallant.

V_{su} : Contribució de l'armadura transversal (estreps) a la resistència a tallant.

V_{FRP} : Contribució del reforç amb laminat de FRP a la resistència a tallant.

En el cas de bigues sense reforçar el tallant últim calculat (contribució del formigó i de l'armadura transversal) està comprovat empíricament a partir d'un gran nombre d'experiments. Tanmateix, això no passa en les bigues reforçades amb laminats de FRP. El nombre d'experiments amb els que es basen és reduït, moltes vegades les dades s'obtenen de mesures indirectes i la dispersió dels resultats es considerable.

A partir de la investigació en l'aplicació de làmines de polímers reforçades amb fibres que s'ha dut a terme durant els últims vint anys, diversos autors han proposat formulacions per al càlcul de l'augment de resistència que introdueixen les fibres (V_{FRP}). D'aquests models de càlcul alguns s'han posat en recomanacions i guies de càlcul com són el FIB Bulletin 14 (2001), ACI-440.2R-08 (2008), TR55 (2001), CNR-DT200 (2004), CAN/CSA-S6-06 (2006) i CIDAR (2006). Aquests quatre models juntament amb els proposats pels autors Mofidi et Chaallal (2011) i Alzate (2012) són els que s'estudiaran en aquest treball amb l'objectiu de veure quins d'ells són els més fiables.

2.4 RESISTÈNCIA A TALLANT DE LA BIGA SENSE REFORÇAR

2.4.1 MÈTODE DE CàLCUL DE LA RESISTÈNCIA ÚLTIMA A TALLANT DE LA BIGA SENSE REFORÇAR SEGONS EHE (2008)

Com s'ha comentat anteriorment, el càlcul dels valors de resistències degudes al formigó i a l'armadura transversal (estreps) es calculen segons la "Instrucció de Hormigón Estructural EHE-08" (2008) considerant el mètode general de càlcul. Això significa que s'han calculat els angles reals de les bieles de compressió (θ) considerant-lo com l'angle de referència de les fissures (θ_e) producte de la relació amb altres esforços de Estat Límit Últim.

$$\theta_e = 29 + 7\varepsilon_x$$

on:

ε_x : Deformació longitudinal de l'ànima (Figura 2.9), expressada en tant per mil que s'obté de:

$$\varepsilon_x \approx \frac{\frac{M_d}{z} + V_{rd} - 0,5N_d - A_p\sigma_{p0}}{2(E_sA_s + E_pA_p)} \cdot 1000 \neq 0$$

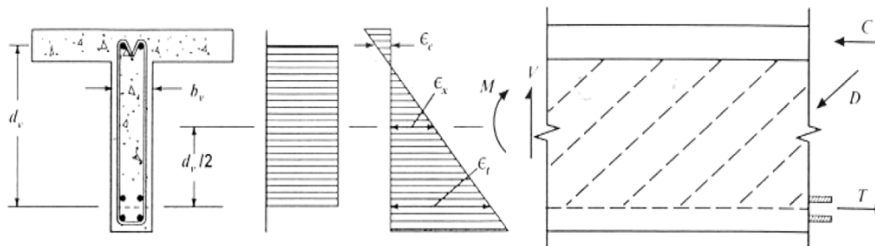


Figura 2.9 Deformació longitudinal de l'ànima.

On:

σ_{p0} : Tensió dels tendons de pretensat essent nul·la la deformació del formigó.

Per a avaluar el valor de la deformació longitudinal de l'ànima, ϵ_x , s'han de tenir en compte les següents consideracions:

- V_{rd} i M_d es consideren positius i M_d no serà menor que $z \cdot V_{rd}$.
- N_d es considera positiu de compressió.
- Els valors d' A_s i A_p són els de l'armadura ancorada a la secció d'estudi. En cas contrari, es reduirà en proporció a la falta de longitud d'ancoratge.
- Si la tensió de tracció pot produir fissures en el cap comprimit, es doblarà el valor de ϵ_x obtingut a l'equació.

La contribució de l'armadura transversal a la resistència a tallant segons la EHE-08 (2008) és:

$$V_{su} = 0,9 \cdot d \cdot A_{\alpha} \cdot f_{y\alpha,d} \cdot \cotg\theta$$

On:

d: distància des de la fibra més comprimida de formigó fins al centre de gravetat de l'armadura traccionada.

$f_{y\alpha,d}$: Resistència de càlcul de l'armadura A_{α} .

θ : Angle entre les bieles de compressió de formigó i l'eix de la peça complint:

$$0,5 \leq \cotg\theta \leq 2,0$$

A_{α} : Àrea per unitat de longitud de cada grup d'armadures que formen un angle α amb la directriu de la peça (en mm^2/mm).

La contribució del formigó a la resistència d'esforç tallant segons la EHE-08 (2008) és:

$$V_{cu} = (0,15 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cv})^{1/3} + 0,15 \sigma'_{cd}) \cdot \beta \cdot b_0 \cdot d$$

On:

f_{cv} : Resistència efectiva del formigó a tallant en N/mm^2 de valor $f_{cv} = f_{ck}$ amb f_{cv} no major que $15 \text{ N}/\text{mm}^2$ en el cas de control indirecte del formigó.

f_{ck} : Resistència a compressió del formigó en N/mm^2 . S'adoptaran valors de f_{ck} de fins a $100 \text{ N}/\text{mm}^2$.

σ'_{cd} : Tensió axial mitjana a l'ànima de la secció.

El coeficient β es calcula com:

$$\beta = \frac{2 \cotg\theta - 1}{2 \cotg\theta_e - 1} \quad \text{si } 0,5 \leq \cotg\theta < \cotg\theta_e$$

$$\beta = \frac{\cotg\theta - 2}{\cotg\theta_e - 2} \quad \text{si } \cotg\theta_e \leq \cotg\theta \leq 2,0$$

On:

θ_e : Angle de referència d'inclinació de les fissures, pel qual pot adoptar-se l'expressió anteriorment citada:

$$\theta_e = 29 + 7\sigma_x$$

ξ : Coeficient obtingut segons: $\xi = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \leq 2,0$ amb d en mm.

ρ_l : Quantia geomètrica de l'armadura longitudinal principal de tracció, passiva i activa adherent, ancorada a una distància igual o major que d a partir de la secció d'estudi calculada com:

$$\rho_l = \frac{A_s + A_p}{b_0 \cdot d} \leq 0,02$$

b_0 : Amplada de l'ànima segons el punt 44.2.1 de la EHE-08 (2008).

2.4.2 MÈTODE DE CàLCUL DE LA RESISTÈNCIA ÚLTIMA A TALLANT DE LA BIGA SENSE REFORÇAR SEGONS EUROCODI 2 (2004)

Es presenta a continuació la formulació de càlcul de la resistència a tallant de la biga sense reforçar segons l'Eurocodi 2 (2004). La formulació plantejada és similar a la de la EHE-08 no obstant s'ha considerat convenient exposar-la.

La contribució de l'armadura transversal a la resistència a tallant es calcula com:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \sin \beta$$

On:

A_{sw} : Armadura transversal

S : Separació entre armadures

z : Braç mecànic. $0,9 \cdot d$ en cas de falta de càlculs més precisos.

f_{ywd} : Resistència a tracció de disseny de les barres de l'armadura.

θ : Angle de les bieles de compressió

β : Angle de col·locació de l'armadura respecte l'eix de la biga.

La contribució del formigó al tallant s'obté de:

$$V_{Rd,c} = \left[\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d$$

On:

γ_c : Coeficient de seguretat del formigó

k : Coeficient idèntic al ϵ de la EHE-08 (2008):

$$k = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \leq 2,0$$

ρ_l : Quantia geomètrica de l'armadura longitudinal principal de tracció, passiva i activa adherent, ancorada a una distància igual o major que d a partir de la secció d'estudi calculada com:

$$\rho_l = \frac{A_s}{b_0 \cdot d} \leq 0,02$$

f_{ck} : Resistència a compressió del formigó en N/mm^2 . S'adoptaran valors de f_{ck} de fins a 100 N/mm^2 .

σ_{cp} : Tensió axial efectiva en la secció.

b_w : Amplada de l'ànima més estreta de la secció en la zona traccionada

d : Cantell útil de la secció

A més, l'Eurocodi 2 limita la resistència màxima a tallant al següent valor:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta + \cot \beta}{1 + \cot^2 \theta}$$

On:

α_{cw} : Coeficient que té en compte l'estat tensional del cordó comprimit i que pren el següent valor:

$$\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}/\gamma_c} \quad \text{si } 0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\alpha_{cw} = 1,25 \quad \text{si } 0,25 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \leq \sigma_{cp} \leq 0,50 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\alpha_{cw} = 2,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}/\gamma_c} \right) \quad \text{si } 0,50 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \leq \sigma_{cp} \leq 1,0 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

ν_1 : Factor de reducció per la fisuració a tallant

$$\nu_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

Si la tensió de càlcul en la armadura és inferior al 80% de la tensió característica de plastificació de l'acer, f_{yk} , ν_1 es pot prendre com:

$$\nu_1 = 0,6 \quad \text{per a } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa}$$

2.4.3 MÈTODE DE CÀLCUL DE LA RESISTÈNCIA ÚLTIMA A TALLANT DE LA BIGA SENSE REFORÇAR SEGONS ACI 318-08 (2008)

El càlcul de la resistència a tallant de la biga sense reforçar segons l'ACI 318-08 (2008) es calcula com:

$$V_n = V_c + V_s$$

On:

V_c : Resistència nominal a tallant proporcionada pel formigó.

V_s : Resistència nominal a tallant proporcionada per l'armadura transversal.

La resistència a tallant es basa en un esforç tallant promig sobre tota la secció transversal efectiva $b_w \cdot d$. En un element sense armadura transversal, es suposa que el tallant el resisteix l'ànima de la secció de formigó. En un element amb armadura transversal es suposa que una part del tallant la proporciona el formigó i la resta l'armadura a tallant.

La resistència a tallant proporcionada pel formigó V_c es suposa que es la mateixa per a bigues amb i sense armadura a tallant i es pren com el tallant que produeix una fissuració inclinada significativa.

Determinació de V_c

El codi proporciona una sèrie de punts a tenir en compte:

- Elements sotmesos únicament a tallant i a flexió:

$$V_c = 0,17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$$

- Element sotmesos a compressió:

$$V_c = 0,17 \cdot \left(1 + \frac{N_u}{14 \cdot A_g}\right) \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad \frac{N_u}{A_g} \text{ en MPa}$$

- Es permet usar valors de $\sqrt{f'_c}$ majors que 8,3 MPa al calcular V_c , V_{ci} i V_{cw} per a bigues de formigó armat o pretesat i lloses nervades de formigó amb un armat mínim en l'ànima.
- Per elements sotmesos a tracció elevada, V_c s'ha d'agafar com a zero a no ser que es realitzi un anàlisi més detallat.

Determinació de V_s

La normativa ens indica el següent:

- Si V_u és major que $\Phi \cdot V_c$, el reforç a tallant V_s , si és perpendicular a l'eix de l'element es calcularà segons:

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d}{s}$$

On:

A_v : Àrea d'armadura a tallant

s : Separació

- V_s no major que:

$$V_{s,max} = 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$$

A més també proporciona el següent:

- f_y i f_{yt} no poden ser majors que 420 MPa excepte que el valor no pot ser major que 550 MPa per armat amb filferro corrugat electrosoldat.
- Els estreps i altres barres o filferros usats com a armadura a tallant s'han de col·locar fins a una distancia d mesurada des de la fibra extrema en compressió i desenvolupats en les dues cares.
- La separació entre barres, estreps, filferros col·locats perpendiculars a l'eix de l'element no pot ser superior a $0,5 \cdot d$ en elements de formigó armat, a $0,75 \cdot h$ en formigó pretesat i a 600mm.
- Els estreps inclinats y el reforç longitudinal aixecat han d'estar separats de manera tal que cada línia de 45° , s'ha d'extendre fins a la reacció des de la meitat de l'element, $0,5 \cdot d$, fins al reforç longitudinal de tracció, creuat com a mínim per una línia d'armadura de tallant.
- Quan V_s sobrepassi $0,33 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$, les separacions màximes es reduiran a la meitat.

Armadura mínima a tallant

- S'ha de col·locar una àrea mínima de reforç a tallant, $A_{v,min}$, en tot l'element de formigó (armat o pretesat) sotmès a flexió on $V_u > 0,5 \cdot \Phi \cdot V_c$, excepte en:
 - Sabates i lloses massisses.
 - Elements alveolars amb una altura total, sense incloure l'afinat, no major a 315 mm i unitats alveolars on V_u no es major que $0,5 \cdot \Phi \cdot V_{cw}$.
 - Lloses nervades de formigó amb biguetes definides en 8.13.
 - Bigues de cantell menor o igual a 250 mm.
 - Bigues integrals amb lloses de cantell menor o igual a 600 mm i menor o igual que el major de: 2,5 vegades l'espessor de l'ala i 0,5 vegades l'ample de l'ànima.
 - Bigues construïdes amb formigó de pes normal armat amb fibres d'acer, amb un f'_c que no excedeixi de 40 MPa, de cantell menor o igual a 600 mm i V_u no major a $0,17 \cdot \Phi \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$.

- Quan requereixi armadura a tallant o per a resistència i quan es pugui no considerar la torsió, $A_{v,min}$ per a elements pretesats i armats s'ha de calcular segons:

$$A_{v,min} = 0,062 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_{yt}} \quad \text{No menor que } \frac{0,035 \cdot b_w \cdot s}{f_{yt}}$$

2.5 MODELS TEÒRICS PER AL CALCUL DE LA CONTRIBUCIÓ DEL LAMINAT DE FRP A LA RESISTÈNCIA A TALLANT V_{FRP}

Els models estudiats en aquesta tesina són guies i/o recomanacions a partir de les quals es calcula la contribució a tallant dels laminats de FRP. Un dels objectius d'aquesta tesina es el d'observar la bondat en els resultats que proporcionen aquestes recomanacions, veient les dades que requereixen cadascun i comparant-los entre ells. L'estudi de formulacions els podem classificar en dos tipus segons siguin recomanacions (o guies de disseny) o altres autors. Aquestes són:

- Recomanacions o guies de disseny:
 - FIB Bulletin 14 (2001)
 - ACI 440.2R-08 (2008)
 - TR55 (2001)
 - CNR-DT200 (2004)
 - CAN/CAS-S6-06 (2006)
 - CIDAR (2006)
- Altres autors:
 - Mofidi et Chaallal (2011)
 - Alzate (2012)

Existeixen un major nombre de formulacions però s'han escollit aquestes per ser més recents i per comportar-se bé segons Alzate (2012)

En totes elles, la resistència total a tallant s'obté com la suma de les contribucions del formigó, de l'armadura i del FRP, encara que aquestes només donen el valor de la contribució del laminat. Així doncs, per poder considerar la resistència total s'han calculat els valors de les components del formigó i armadura com si fos una biga sense reforç i aplicant la normativa espanyola vigent, la "*Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08*" (2008).

Pel que fa a les propietats geomètriques rellevants en els càlculs de contribucions de resistències, la Figura 2.10 mostra la nomenclatura per a denominar a cadascun dels paràmetres considerats en tots els models.

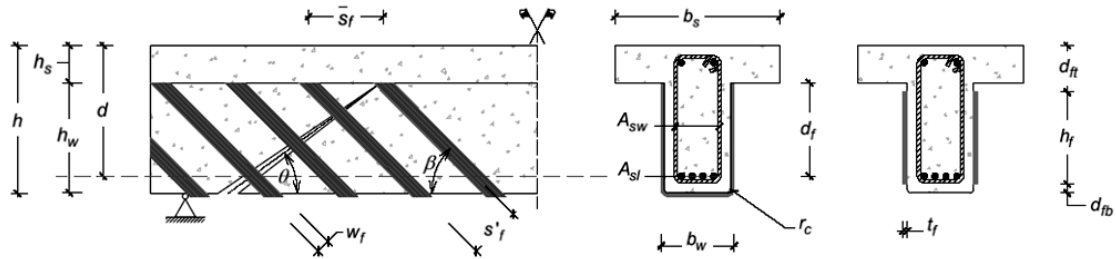


Figura 2.10 Nomenclatura de les propietats geomètriques en el reforç de bigues amb laminats de FRP

Les metodologies i formulacions de càlcul dels models utilitzats així com de la normativa espanyola s'exposen a continuació.

$$v_1 = 0,9 - \frac{f_{ck}}{200} > 0,50 \quad \text{per a } f_{ck} \geq 60 \text{MPa}$$

2.5.1 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL FIB BULLETIN 14 (2001)

La contribució es calcula segons:

$$V_{fd} = 0,9 \cdot \varepsilon_{fed} \cdot E_f \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cotg\theta + \cotg\beta) \cdot \sin\beta$$

Segons el tipus de reforç, discontinu o continu:

- Reforç discontinu: $\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f}{b_w \cdot s_f}$
- Reforç continu: $\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot \sin\beta}{b_w}$

i ε_{fed} com:

$$\varepsilon_{fed} = \frac{0,8 \cdot \varepsilon_{fe}}{\gamma_f}; \quad \gamma_f = 1,2 \quad \text{o} \quad 1,3 \quad \text{o} \quad 1,35$$

on ε_{fe} es calcula segons la disposició en secció del reforç de FRP:

- Reforç en embolcall complet (W):

$$\varepsilon_{fe} = 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \frac{\rho_f}{1000}} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu}$$

- Reforç en U (U) o reforç en els laterals (S):

$$\varepsilon_{fe} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \frac{\rho_f}{1000}} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \\ 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \frac{\rho_f}{1000}} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \end{array} \right.$$

2.5.2 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL ACI 440.2R-08 (2008)

La contribució es calcula segons:

$$V_{fd} = \emptyset \cdot \Psi_f \cdot (2 \cdot t_f \cdot \frac{W_f}{s_f} \cdot f_{fe} \cdot (\sin\beta + \cos\beta)) \cdot d_f$$

On:

$$\emptyset = 0,85$$

Ψ_f (segons tipus de disposició en secció transversal del reforç):

- Secció en "W": $\Psi_f = 0,95$
- Secció en "U" o en "S": $\Psi_f = 0,85$

El valor de f_{fe} com:

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

i ε_{fe} segons la disposició del reforç en secció transversal valdrà:

- En embolcall complet (W):

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{fu}$$

- En U (U) o als laterals (S):

$$\varepsilon_{fe} = k_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004$$

On:

$$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$$

I el coeficient k_1 i la longitud equivalent L_e són:

$$k_1 = \left(\frac{f_{ck}}{27}\right)^{2/3} \quad L_e = \frac{23300}{(t_f \cdot E_f)^{0,58}}$$

El valor de k_2 dependrà de la disposició en secció transversal del reforç, de manera que:

- En U (U):

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f}$$

- Als laterals (S):

$$k_2 = \frac{d_f - 2 \cdot L_e}{d_f}$$

2.5.3 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL TR55 (2001)

La contribució es calcula segons:

$$V_{fd} = E_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot A_{FRP} \cdot \frac{(d_f - \frac{n}{3} \cdot l_{t,m\grave{a}x})}{s_f} \cdot (\sin\alpha_f + \cos\alpha_f)$$

On:

$$l_{t,m\grave{a}x} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{f_{ctm}}}$$

$$w_f = \sin\alpha_f \cdot s_f \quad (=1 \text{ en cas de reforç continu})$$

ε_{fd} i n_1 segons la disposició del reforç en secció transversal serà:

- En embolcall complet (W):

$$n_1 = 0$$

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_{fd,u}}{2} \\ 0,64 \cdot \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f \cdot t_f}} \\ 0,004 \end{array} \right.$$

- En U (U) o als laterals (S):

$$n_1 = 1$$

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_{fd,u}}{2} \\ 0,64 \cdot \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f \cdot t_f}} \\ 0,004 \end{array} \right.$$

2.5.4 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL CNR-DT200 (2004)

La contribució es calcula a partir de la disposició en secció transversal del reforç segons:

- Lateral (S):

$$V_{fd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \min\{0,9 \cdot d, h_w\} \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin\beta}{\sin\theta} \cdot \frac{w_f}{s_f}$$

On:

$$\gamma_{Rd} = 1.20$$

f_{fed} :

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \frac{z_{rid,eq}}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \cdot \left(1 - 0.6 \cdot \sqrt{\frac{l_{eq}}{z_{rid,eq}}}\right)^2$$

essent:

f_{fdd} :

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{FK}}{t_f}}$$

amb Γ_{FK} (energia de fractura, unitats en N i mm):

$$\Gamma_{FK} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}$$

i k_b :

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

$z_{rid,eq}$:

$$z_{rid,eq} = z_{rid} + l_{eq}$$

On:

$$z_{rid} = \min\{0.9 \cdot d, h_w\} - l_e \cdot \sin \beta$$

$$l_{eq} = \frac{s_f}{f_{fdd} / E_f} \cdot \sin \beta$$

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}}$$

- En U (U) o en embolcall complet (W):

$$V_{fd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \beta + \cot \theta) \cdot \frac{w_f}{s_f}$$

On:

$$\gamma_{Rd} = 1.20$$

f_{fed} segons el tipus de reforç

- Si el reforç és als laterals (U):

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}}\right]$$

essent:

f_{fda} :

$$f_{fda} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{FK}}{t_f}}$$

amb Γ_{FK} (energia de fractura, unitats en N i mm):

$$\Gamma_{FK} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}$$

i k_b :

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

l_e :

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}}$$

- Si el reforç es d'embotall complet (W):

$$f_{fed} = f_{fda} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fda}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right]$$

essent:

f_{fda} :

$$f_{fda} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{FK}}{t_f}}$$

amb Γ_{FK} (energia de fractura, unitats en N i mm):

$$\Gamma_{FK} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}$$

i k_b :

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

Φ_R :

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b_w}$$

on r_c és el radi d'arrodoniment de les cantonades de la secció i el quocient r_c/b_w comprès entre 0 i 0.5.

f_{fd} :

$$f_{fd} = \eta \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_m}$$

Amb:

γ_m :

| Mode de fallada | A ⁽¹⁾ | B ⁽²⁾ |
|-----------------|------------------|------------------|
| Ruptura FRP | 1.10 | 1.25 |
| Desenganxat FRP | 1.20 | 1.50 |

(1) Quan es certifiquen components un a un i el compost.

(2) Quan només es certifiquen els components un a un.

η : factor que té en compte aspectes de durabilitat i comportament dels materials de FRP.

2.5.5 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL CAN/CSA-S6-06 (2006)

La contribució es calcula segons:

$$V_{fd} = \frac{A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fe} \cdot d_f \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha}{s_f}$$

On:

ε_{fe} segons la disposició del reforç en secció transversal valdrà:

- En embolcall complet (W):

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{fu}$$

- En U (U) o als laterals (S):

$$\varepsilon_{fe} = k_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004$$

On:

$$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$$

I el coeficient k_1 , k_2 i la longitud equivalent L_e són:

$$k_1 = \left(\frac{f_{ck}}{27}\right)^{2/3} \quad k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad L_e = \frac{23300}{(t_f \cdot E_f)^{0,58}}$$

2.5.6 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS EL CIDAR (2006)

La contribució es calcula segons:

$$V_{fd} = 2 \cdot f_{fed} \cdot t_f \cdot \frac{w_f}{s_f} \cdot h_{fe} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

On:

$$h_{fe} = z_b - z_t$$

$$z_b = 0,9 \cdot d - d_{fb}$$

$$z_t = d_{ft}$$

$$f_{fed} = D_f \cdot f_{fd,max}$$

$f_{fd,max}$ i D_f segons la disposició del reforç en secció transversal valdrà:

- En embolcall complet (W):

$$f_{fd,max} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_f} \cdot \Phi_R \cdot f_{fu} & \varepsilon_f \leq 1,5\% \\ \frac{1}{\gamma_f} \cdot \Phi_R \cdot f_{fu} & \varepsilon_f > 1,5\% \end{cases}$$

$$D_f = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{z_t}{z_b}\right) \frac{1}{\gamma_f} \cdot \Phi_R \cdot f_{fu}$$

- En U (U) o als laterals (S):

$$f_{fd,max} = \min \begin{cases} \frac{1}{\gamma_f} \cdot \Phi_R \cdot f_{fu} \\ \frac{1}{\gamma_f} \cdot 0,35 \cdot \beta_L \cdot \beta_w \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot \sqrt{f_{ck}}}{t_f}} \end{cases}$$

$$D_f = \begin{cases} \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)} & \lambda \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \cdot \lambda} & \lambda > 1 \end{cases}$$

On:

$$\beta_L = \begin{cases} \lambda & \lambda \leq 1 \\ 1 & \lambda > 1 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e}$$

$$L_{max} = \begin{cases} \frac{h_{fe}}{\sin \alpha} & \text{Reforç en U} \\ \frac{h_{fe}}{2 \cdot \sin \alpha} & \text{Reforç en S} \end{cases}$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{\sqrt{f_{ck}}}}$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_f / (s_f \cdot \sin \alpha)}{1 + w_f / (s_f \cdot \sin \alpha)}}$$

$$\Phi_R = 0,80$$

γ_f : Coeficient de seguretat

E_f : Mòdul elàstic del laminat

f_{ck} : Resistència característica del formigó

f_{fu} : Resistència última del FRP

ε_f : Deformació última del FRP

2.5.7 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS MOFIDI ET CHAALLAL (2011)

Aquesta formulació només considera els reforços als laterals (S) i en U (U). La contribució es calcula segons:

$$V_{fd} = 2 \cdot \beta_c \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe} \cdot E_f \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f \cdot \frac{w_f}{s_f}$$

On:

ε_{fe} :

$$\varepsilon_{fe} = 0.31 \cdot \beta_c \cdot \beta_L \cdot \beta_w \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{t_f \cdot E_f}}$$

Sent:

β_c :

- Reforç en U (U):

$$\beta_c = \frac{0.6}{\sqrt{\rho_f \cdot E_f + \rho_s \cdot E_s}}$$

sent ρ_f la quantia de reforç.

- Reforç en els laterals (S):

$$\beta_c = \frac{0.43}{\sqrt{\rho_f \cdot E_f + \rho_s \cdot E_s}}$$

sent ρ_f la quantia de reforç.

β_L :

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{si } \lambda \geq 1 \\ (2 - \lambda) \cdot \lambda & \text{si } \lambda < 1 \end{cases}$$

On:

λ :

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e}$$

Amb:

L_{max} :

- En cas de reforç en U (U):

$$L_{max} = \frac{d_f}{\sin \beta}$$

- En cas de reforç als laterals (S):

$$L_{max} = \frac{d_f}{2 \cdot \sin \beta}$$

L_e :

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ct}}}$$

Sent:

$$f_{ct} = 0.53 \cdot \sqrt{f'_c}$$

β_w :

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_f/s_f}{1 + w_f/s_f}}$$

2.5.8 CONTRIBUCIÓ A TALLANT DEL REFORÇ DE FRP SEGONS ALZATE (2012)

La contribució es calcula a partir de la fórmula següent:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fed} \cdot h_f \cdot \frac{(\cot \theta + \cot \alpha_f) \cdot \sin \alpha_f}{s_f}$$

On:

γ_{Rd} : Coeficient de seguretat

t_f : Espessor del reforç

w_f : Amplada del laminat

E_f : Mòdul elàstic del laminat

h_f : Alçada del reforç

θ : Angle de les fissures de tallant

α_f : Angle de col·locació del laminat respecte de l'eix de la biga

s_f : Separació entre les làmines segons:

$$s_f = \frac{2 \cdot w_f + h_f}{2 \cdot \sin \alpha_f}$$

ε_{fed} : Deformació del laminat de FRP segons la disposició en secció transversal del reforç:

- Reforç en U (U):

$$\varepsilon_{fe} = \frac{0,022}{\gamma_m} \cdot \left(\frac{1}{(\rho_f \cdot E_f + \rho_{sv} E_{sv}) \cdot l_b} \right)^{0,56}$$

On:

γ_m : Coeficient de seguretat

ρ_f : Quantia de laminat de FRP

E_f : Mòdul elàstic del laminat

ρ_{sv} : Quantia de reforç d'acer a tallant

E_{sv} : Mòdul elàstic de l'acer de reforç a tallant

l_b : Longitud d'adherència

- Reforç lateral (S):

$$\varepsilon_{fe} = \frac{9,60}{\gamma_m} \cdot \left(\frac{1}{(\rho_f \cdot E_f + \rho_{sv} E_{sv}) \cdot l_b} \right)^{0,48} \cdot 10^{-3}$$

On:

γ_m : Coeficient de seguretat

ρ_f : Quantia de laminat de FRP

E_f : Mòdul elàstic del laminat

ρ_{sv} : Quantia de reforç d'acer a tallant

E_{sv} : Mòdul elàstic de l'acer de reforç a tallant

l_b : Longitud d'adherència

- Reforç d'embolcall complet (W)

$$\varepsilon_{fe} = \frac{3,04}{\gamma_m} \cdot \left(\frac{1}{(\rho_f \cdot E_f + \rho_{sv} E_{sv}) \cdot f_{cm}} \right)^{0,48} \cdot \varepsilon_{fu}$$

On:

γ_m : Coeficient de seguretat

ρ_f : Quantia de laminat de FRP

E_f : Mòdul elàstic del laminat

ρ_{sv} : Quantia de reforç d'acer a tallant

E_{sv} : Mòdul elàstic de l'acer de reforç a tallant

f_{cm} : Resistència mitjana del formigó

ε_{fu} : Deformació última del FRP

2.5.9 ANÀLISI COMPARATIU DE LES DIFERENTS FORMULACIONS

Per tal de realitzar una primera comparació entre els mètodes de càlcul de la contribució del laminat de FRP a la resistència a tallant es realitza una comparació dels paràmetres que considera cadascuna d'aquestes formulacions.

En primer lloc, els paràmetres que consideren tots són la deformació del laminat (ε_f), el mòdul elàstic del laminat (E_f), les característiques geomètriques del reforç: espessor (t_f), amplada (w_f), separació (s_f) i angle del laminat (α_f, β) i alguna de les següents resistències del formigó ($f_{cm}, f_{ck}, f_{ctm}, f'_c, f_{ct}$). La diferència bàsica entre les diferents formulacions radica en el càlcul de la deformació del laminat i en alguns paràmetres que unes consideren i altres no, com per exemple, excepte la recomanació FIB Bulletin 14 (2001), la resta consideren una longitud ($L_e, l_{t,max}, l_{eq}, l_b$) com a referència a la longitud necessària d'adherència del laminat.

A part de les característiques geomètriques anteriors, el ACI 440.2R-08 (2008), el TR55 (2001), Mofidi et Chaallal (2011), Alzate (2012), CAN/CSA-S6-06 (2006) i CIDAR (2006) consideren la longitud de l'ànima de la biga que està reforçada (d_f, h_f). Pel que fa a característiques geomètriques es consideren l'amplada de l'ànima (b_w) i el cantell

útil (d) en el FIB Bulletin 14 (2001), el cantell útil i l'alçada de l'ànima (h_w) en el CNR-DT200 (2004) i el cantell útil (d) en el CIDAR (2006). També en el FIB Bulletin 14 (2001), el CNR-DT200 (2004), l'Alzate (2012), el CAN/CSA-S6-06 (2006) i el CIDAR (2006) consideren l'angle de les bieles de compressió (θ) i en el FIB Bulletin 14 (2001), Mofidi et Chaallal (2011) i Alzate (2012) la quantia de reforç amb laminat de FRP (ρ_f).

Finalment es vol destacar que els models d'altres autors, Mofidi et Chaallal (2011) i Alzate (2012), consideren la quantia d'acer que pot contribuir en el tallant (ρ_s) i el mòdul d'elasticitat d'aquest acer (E_s).

Per tal de resumir l'anterior, es presenta la Taula 2.5 on es poden veure els paràmetres que considera cada model.

Taula 2.5 Resum dels paràmetres considerats en cada formulació

| Paràmetre | FIB Bulletin 14 (2001) | ACI 440.2R-08 (2008) | TR55 (2001) | CNR-DT200 (2004) | Mofidi et Chaallal (2011) | Alzate (2012) | CAN/CSA-S6-06 (2006) | CIDAR (2006) |
|--|------------------------|----------------------|-------------|-------------------|---------------------------|---------------|----------------------|--------------|
| ε_f | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| E_f | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| t_f | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| w_f | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| s_f | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| d_f | | √ | √ | | √ | | √ | √ |
| h_f | | | | | | √ | | √ |
| α_f | α_f | α_f | α_f | α_f | α_f | α_f | α_f | α_f |
| ρ_f | √ | | | | √ | √ | | |
| $L_e, l_{t,max}$ l_{eq}, l_b | | L_e | $l_{t,max}$ | l_{eq} | L_e | l_b | L_e | L_e v |
| f_{cm}, f_{ck}, f_{ctm} f'_{cm}, f_{ct} | f_{cm} | f_{ck} | f_{ctm} | f_{ck}, f_{ctm} | f'_c, f_{ct} | f_{ctm} | f_{ck} | f_{ck} |
| b_w | √ | | | | | | | |
| h_w | | | | √ | | | | |
| d | √ | | | √ | | | | √ |
| θ | √ | | | √ | | √ | √ | √ |
| ρ_s | | | | | √ | √ | | |
| E_s | | | | | √ | √ | | |

3. BASE DE DADES

3.1 GENERALITATS

Tot i que el nombre d'experiments realitzats per obtenir informació dels reforços de bigues de formigó amb laminats de FRP a tallant no és elevat si el comparem amb els de tallant sense reforç, no es pot obviar la quantitat d'assajos realitzats fins ara. Investigadors d'arreu del món estan centrats en aquesta temàtica i durant els últims deu anys s'han anat recollint la informació i els resultats obtinguts per aquests.

L'objecte d'aquesta base de dades és la de recollir una gran quantitat d'assajos experimentals dels reforços a tallant amb FRP per fer un tractament estadístic dels resultats obtinguts en cadascun d'ells i de les prediccions dels models exposats anteriorment. Aquests assajos s'obtidran d'altres bases de dades existents, d'articles d'investigació i també de la campanya que s'està duent a terme en la Universitat Politècnica de Catalunya.

De tots els assajos recopilats, es descartaran tots aquells que:

1. No permetin el càlcul amb les guies o recomanacions per falta de dades.
2. La ruptura de l'element no hagi estat per tallant.
3. El resultat d'aplicar les normatives doni uns resultats excessivament desviats i puguin perjudicar a l'anàlisi estadístic.

Ja que sinó, o bé no podem comparar l'experiment amb la predicció, o bé la dada de resistència obtinguda no és la pròpia del reforç.

A continuació es detallen més les característiques de la base de dades i aquesta es pot veure en l'Annex 1.

3.2 DESCRIPCIÓ DE LA BASE DE DADES

3.2.1 CARACTERÍSTIQUES GENERALS

En total, la base de dades recopilada té 644 assajos reunits en 86 campanyes experimentals diferents que oscil·len entre 1 i 28 assajos per campanya i s'han realitzat entre els anys 1992 i 2011. L'origen dels assajos prové, principalment, de la base de dades de la Universidade do Minho (Barros et. al, 2011) on han recopilat més de 500 de diversos autors entre els anys 1992 i 2011. A partir d'articles publicats s'han obtingut altres experiments realitzats que serien uns 120 i de la campanya duta a terme per la Universitat Politècnica de Catalunya uns 20. D'aquests 644, se'n descarten 178 per no aportar informació a l'anàlisi realitzat. En l'Annex 1 es pot veure la base de dades amb els assajos utilitzats en aquest treball a on s'han exclòs els assajos descartats de l'Apartat 3.3 Experiments descartats.

3.2.2 CARACTERÍSTIQUES DE LES BIGUES DE FORMIGÓ ARMAT

Per tal de ser més concisos en aquest estudi es consideraran tots els assajos vàlids en conjunt i també es dividiran en dos subgrups segons el tipus de secció. Les de secció rectangular (R) són 354 i les de secció en T (T) són 112. En cada subgrup es destacaran les principals característiques geomètriques, dels materials, de l'armat, del reforç i dels valors experimentals obtinguts.

L'amplada de les bigues està compresa entre els 75 i els 660,4 mil·límetres i el cantell entre 150 i 720 mil·límetres. La llum varia entre els 680 i 6400 mil·límetres i el recobriment de formigó entre 6 i 81 mil·límetres. La relació entre el punt d'aplicació de la càrrega i el suport i el cantell útil (a/d) està entre 0,9 i 6,65. Els formigons utilitzats tenen una resistència a compressió d'entre 16,63 i 71,4 MPa amb 68 bigues fetes amb formigó d'alta resistència (>50 MPa). L'armat longitudinal a tracció (inferior) varia entre els 101 i els 11259 mil·límetres quadrats. Els reforços amb FRP són majoritàriament de carboni (87%) essent els de vidre i aramida minoritaris (7% i 6% respectivament). La col·locació d'aquests es realitza en forma de reforç lateral (S) en un 23% , en forma de reforç en U (U) en un 53% i en forma d'embolcall complet (W) en un 24%. Els espessors totals del reforç varien entre 0,033 i 4,5 mil·límetres amb un mòdul elàstic de 5,3 a 392 GPa i una resistència a tracció de 106 a 4900 MPa.

En la Taula 3.1 es pot veure un resum de les principals característiques geomètriques, les propietats dels materials i la configuració de les càrregues.

Taula 3.1 Resum de paràmetres de geometria, propietats dels materials i configuració de càrregues

| Paràmetre | Mínim | Mitjana | Màxim | Desviació std. |
|--------------------------|-------|---------|-------|----------------|
| Amplada (mm) | 75 | 114,22 | 660,4 | 207,46 |
| Cantell (mm) | 150 | 355,97 | 720 | 108,37 |
| Llum (mm) | 680 | 2307,79 | 6400 | 944,81 |
| a/d | 0,90 | 2,74 | 6,65 | 0,69 |
| f_{cm} (MPa) | 16,63 | 36,80 | 71,4 | 11,33 |
| A_s (mm ²) | 101 | 1617,57 | 11259 | 1431,98 |
| Espessor (mm) | 0,033 | 0,51 | 4,5 | 0,63 |
| E_{FRP} (GPa) | 5,3 | 200,20 | 392 | 82,38 |
| f_{tu} (MPa) | 106 | 3064,21 | 4900 | 1124,69 |

3.2.2.1 BIGUES DE SECCIÓ RECTANGULAR

Característiques geomètriques

L'amplada de les bigues assajades està compresa entre els 75 i els 600 mil·límetres i el cantell entre 150 i 720 mil·límetres. La distància entre suports varia entre 680 i 6400 mil·límetres. La relació entre la distància entre el punt d'aplicació de la càrrega i el recolzament i el cantell útil (a/d) està entre 0,90 i 6,65. L'espessor de formigó damunt de les armadures varia entre 10 i 81 mil·límetres.

Característiques dels materials

Les resistències a compressió experimentals del formigó dels 354 assajos oscil·len entre els 16,63 i els 71,4 MPa, de les quals 62 són superiors a 50 MPa (formigó d'alta resistència). Les resistències a tracció estan entre 1,26 i 4,77 MPa. Els mòduls elàstics són 20700 MPa el menor i de 46500 MPa el major.

Característiques de les armadures de les bigues

L'armat longitudinal superior (A'_s) de les bigues, en la majoria de casos, no es considera bé perquè és inexistent o perquè només s'utilitza com a armadura de pell. Aquells casos en els que és necessària l'armadura de compressió o bé es considera, el nombre de barres varia entre 2 (una per cantonada) i 6 i els diàmetres d'aquestes entre 16 i 32 mil·límetres disposant una armadura d'entre 402 i 4825 mil·límetres quadrats. La resistència de les barres va de 420 a 1721 MPa mentre que el mòdul elàstic és aproximadament de 200 GPa en tots els assajos.

L'armat longitudinal inferior (A_s) es considera sempre i, en alguns casos, fins i tot es disposa en dues capes. El nombre de barres utilitzades està entre 2 (una per cantonada) i 8 i els diàmetres d'aquestes varien dels 8 als 38 mil·límetres amb el que l'àrea d'armat resultant va dels 101 als 11259 mil·límetres quadrats. La resistència de l'acer està compresa entre 330 i 1720 MPa amb un mòdul elàstic que en aquest cas sí és més variable: entre 180 i 211,3 GPa.

En la disposició de l'armadura transversal (A_{st}) tenim bigues armades i bigues sense armar. En els casos armats, el nombre de barres disposades es de 1 a 4 i de 4 a 12 mil·límetres de diàmetre amb un espaiament de 120 a 1000 mil·límetres. Les característiques mecàniques van de 240 a 665 MPa de resistència i de 188 a 251,5 GPa de mòdul elàstic.

Característiques del reforç de FRP

Els tipus de fibres empleats per als reforços són de carboni (87%), de vidre (6%) i d'aramida (7%) i que estan col·locades un 30,14% en forma de reforç lateral (S), un 39,45% en forma de U (U) i un 30,41% en reforç d'embolcall complet (W). En quant a la continuïtat del laminat, el nombre de reforços continus (49%) i discontinus (51%) és molt semblant. Els espessors de les làmines de FRP varien entre 0,033 i 4,5 mil·límetres i en els diversos assajos estudiats se n'han col·locat entre 1 i 6. El mòdul elàstic del compost varia entre 5,3 i 392 GPa amb una resistència a tracció de 112 a 4900 MPa.

A l'hora de col·locar el reforç, la longitud de la làmina pot ser igual al cantell de la biga o no, i, en el cas dels assajos d'aquesta base de dades, el rang de longituds està entre 90,9 i 720 mil·límetres. En els casos de reforç discontinu, l'amplada de les làmines està compresa entre 10 i 300 mil·límetres i les separacions són de 40 a 707,1 mil·límetres.

Mode de ruptura

Els tipus de mode de ruptura de la base de dades són a tallant per ruptura del laminat del FRP, per desenganxat del laminat ("*peeling*" o "*debonding*") i també hi ha assajos que no s'ha decidit el tipus de ruptura per falta de coneixement del mecanisme resistent. Són 340 assajos que han trencat a tallant, dels quals 216 són per desenganxat ("*peeling*" o "*debonding*"), 96 per ruptura del laminat i 28 a tallant sense saber el mecanisme, i 14 sense decidir el mode de ruptura.

En la Taula 3.2 es pot veure un resum de les principals característiques geomètriques, les propietats dels materials i la configuració de les càrregues de les bigues de secció rectangular assajades.

Taula 3.2 Resum de paràmetres de geometria, propietats dels materials i configuració de càrregues per a bigues de secció rectangular

| Paràmetre | Mínim | Mitjana | Màxim | Desviació std. |
|--------------------------|-------|---------|-------|----------------|
| Amplada (mm) | 75 | 189,01 | 600 | 80,44 |
| Cantell (mm) | 150 | 333,96 | 720 | 113,89 |
| Llum (mm) | 680 | 2210,45 | 6400 | 972,91 |
| a/d | 0,90 | 2,81 | 6,65 | 0,74 |
| f_{cm} (MPa) | 16,63 | 37,44 | 71,4 | 11,01 |
| A_s (mm ²) | 101 | 1438 | 11259 | 1530,95 |
| Espessor (mm) | 0,033 | 0,52 | 4,5 | 0,74 |
| E_{FRP} (GPa) | 0,2 | 191,64 | 392 | 34,01 |
| f_{tu} (MPa) | 105 | 3023 | 4900 | 1231 |

3.2.2.2 BIGUES DE SECCIÓ EN T

Característiques geomètriques

L'amplada total de les bigues de secció en T (i també de la llosa) assajades està compresa entre els 270 i els 660,4 mil·límetres i el cantell total entre 220 i 600 mil·límetres. Les ànimes tenen de 95 a 200 mil·límetres d'ample i de 165 a 450 mil·límetres de cantell. Els cantells de la llosa són d'entre 50 i 150 mil·límetres. La distància entre suports varia entre 1400 i 4267 mil·límetres. La relació entre la distància entre el punt d'aplicació de la càrrega i el recolzament i el cantell útil (a/d) varia entre 1,44 i 3,51. L'espessor de formigó damunt de les armadures varia entre 6 i 55 mil·límetres.

Característiques dels materials

Les resistències a compressió experimentals del formigó dels 112 assajos oscil·len entre els 18,60 i els 68,50 MPa, de les quals 6 són superiors a 50 MPa (formigó d'alta resistència). Les resistències a tracció estan entre 1,45 i 6,21 MPa. Els mòduls elàstics són 26502 MPa el menor i de 34380 MPa el major.

Característiques de les armadures de les bigues

L'armat longitudinal superior (A'_s) de les bigues no es considera en cap dels assajos menys en la campanya duta a terme per la Universitat Politècnica de Catalunya on l'armadura consta de 4 barres de 12 mil·límetres de diàmetre que equival a una àrea de 452 mil·límetres quadrats. La resistència de les barres va de 396 a 650 MPa mentre que el mòdul elàstic varia entre 192 i 210 GPa.

L'armat longitudinal inferior (A_s) es considera sempre en tots els assajos i, fins i tot, es disposa en dues capes. El nombre de barres utilitzades està entre 2 (una per cantonada) i 4 i els diàmetres d'aquestes varien dels 13 als 32 mil·límetres amb el que l'àrea d'armat resultant va dels 253 als 2124 mil·límetres quadrats. La resistència de l'acer està compresa entre 344 i 650 MPa amb un mòdul elàstic comprès entre 175 i 203 GPa.

En la disposició de l'armadura transversal (A_{st}) tenim bigues armades i bigues sense armar. En els casos armats, el nombre de barres disposades és de 2 i de 5 a 10 mil·límetres de diàmetre amb un espaiament de 75 a 610 mil·límetres. Les característiques mecàniques van de 325 a 725 MPa de resistència i de 165 a 210 GPa de mòdul elàstic.

Característiques del reforç de FRP

Els tipus de fibres emprats per als reforços són de carboni (93%), de vidre (5%) i d'aramida (2%) i que estan col·locades un 1,7% en forma de reforç lateral (S), un 94,8% en forma de U (U) i un 3,5% en reforç d'embolcall complet (W). En quant a la continuïtat del laminat, el nombre de reforços discontinus és més elevat (un 57%) que el de continus (43%). Els espessors de les làmines de FRP varien entre 0,033 i 2,4 mil·límetres i en els diversos assajos estudiats se n'han col·locat entre 1 i 3. El mòdul elàstic del compost varia entre 8,1 i 310 GPa amb una resistència a tracció de 106 a 3790 MPa.

A l'hora de col·locar el reforç, la longitud de la làmina pot ser igual al cantell de la biga o no, i, en aquest cas el rang de longituds està entre 165 i 450 mil·límetres. En els casos de reforç discontinu, l'amplada de les làmines està compresa entre 9,5 i 100 mil·límetres i les separacions són de 75 a 367 mil·límetres.

Mode de ruptura

Els tipus de mode de ruptura de la base de dades són els mateixos que els de les bigues de secció rectangular: per ruptura del laminat del FRP, per desenganxat del laminat ("*peeling*" o "*debonding*") i també hi ha assajos que no s'ha decidit el tipus de ruptura per falta de coneixement del mecanisme resistent. Són 69 assajos que han trencat a tallant, dels quals 30 són per desenganxat ("*peeling*" o "*debonding*"), 17 per ruptura del laminat i 22 a tallant sense saber el mecanisme, i 43 sense decidir si han trencat a tallant o no.

En la Taula 3.3 es pot veure un resum de les principals característiques geomètriques, les propietats dels materials i la configuració de les càrregues de les bigues de secció en T assajades.

Taula 3.3 Resum de paràmetres de geometria, propietats dels materials i configuració de càrregues per a bigues de secció en T

| Paràmetre | Mínim | Mitjana | Màxim | Desviació std. |
|--------------------------|-------|---------|-------|----------------|
| Amplada (mm) | 270 | 464,29 | 660,4 | 102,76 |
| Amplada ànima (mm) | 95 | 156,00 | 200 | 27,92 |
| Cantell (mm) | 220 | 398,89 | 600 | 79,45 |
| Llum (mm) | 1400 | 2496,14 | 4267 | 932,13 |
| a/d | 1,44 | 2,53 | 3,51 | 0,48 |
| f_{cm} (MPa) | 18,60 | 34,71 | 68,50 | 10,94 |
| A_s (mm ²) | 253 | 1426,63 | 2124 | 582,91 |
| Espessor (mm) | 0,033 | 0,70 | 2,4 | 0,67 |
| E_{FRP} (GPa) | 8,1 | 188,13 | 310 | 54,88 |
| f_{tu} (MPa) | 106 | 2862,61 | 3790 | 921,45 |

3.3 EXPERIMENTS DESCARTATS

3.3.1 EXPERIMENTS DESCARTATS PER MANCA D'INFORMACIÓ

El fet de què es considerin un gran nombre de variables en la base de dades i aquestes s'utilitzin en els models de predicció de la contribució de la resistència pot donar lloc a que algun dels assajos experimentals estigui mancat d'alguna d'elles. La falta d'alguns valors importants com poden ser l'angle en el què està col·locat el laminat, el nombre de capes, la separació, etc. no permet el càlcul mitjançant els models. Per aquesta raó, s'han descartat aquells assajos que en algun dels models no es podia calcular la contribució teòrica de l'FRP. Són un total de 94 assajos dels quals 60 són de secció rectangular i 34 de secció en T.

3.3.2 EXPERIMENTS EN QUÈ SEGONS LA FORMULACIÓ TEÒRICA NO HAURIA CONTRIBUÏT EL REFORÇ

Donat que la contribució de l'FRP per l'assaig experimental s'obté com a la diferència entre el tallant últim de la biga reforçada i el tallant últim de la biga sense reforçar. Això no vol dir que el reforç no contribueixi, donat que si es modifiquen els mecanismes resistents, pot ser que la contribució del formigó i l'acer disminueixi i per això el tallant últim de la biga reforçada sigui menor que sense reforç. En la base de dades, valors nuls del valor experimental de la resistència a tallant del reforç són casos d'aquests on el reforç aparentment no ha contribuït i fins i tot la resistència última ha estat inferior a la de la biga sense reforçar. El nombre d'assajos en aquest grup és de 10, essent 5 de bigues de secció rectangular i 5 de bigues de secció en T.

3.3.3 EXPERIMENTS DESCARTATS PER RUPTURA A FLEXIÓ

Els següents experiments s'han descartat per no haver fallat en el mode desitjat. Els valors de resistència a tallant obtinguts no són els reals deguts al reforç, amb el què no són vàlids per a aquest estudi. El nombre d'assajos en aquest grup és de 59, essent 44 de bigues de secció rectangular i 15 de bigues de secció en T.

3.3.4 EXPERIMENTS DESCARTATS PER RESULTATS EXTREMS

Els següents experiments s'han descartat per donar resultats extrems, tant grans com petits que poden alterar l'anàlisi. El nombre d'assajos és de 15, essent 11 de bigues rectangulars i 4 de bigues en T.

4. ANÀLISI COMPARATIU DELS MODELS EXISTENTS

4.1 MÈTODE D'ANÀLISI

L'estudi es realitzarà a partir del quocient entre el valor de la contribució de l'FRP experimental a la resistència a tallant del reforç de FRP i el valor teòric calculat a partir de cada model de predicció per tal de contrastar la fiabilitat de les recomanacions existents. Donat que es tracta d'assajos experimentals, les formulacions s'apliquen amb els valors mitjos de resistències i amb els coeficients de seguretat iguals a 1.

El valor d'aquest indicador $V_{FRP,Exp.}/V_{FRP,Anal.}$ pot variar entre zero i infinit sent 1 el valor ideal, ja que significaria que la predicció dona un valor igual al real. No obstant, degut a les incerteses de les propietats dels materials, a la col·locació, etc. al considerar un gran nombre d'assajos es troben relacions inferiors i superiors a l'ideal. Tots aquells valors menors a 1 són casos en què la formulació està pel costat de la inseguretat perquè la resistència analítica seria major que la real, en canvi, aquells valors superior a 1 són casos on la formulació és conservadora encara que valors molt més grans que la unitat impliquen una infravaloració del reforç.

En primer lloc, es consideraran els valors mínim, màxim, promig i mediana així com la desviació estàndard i el coeficient de variació de tots els valors de cada mètode de càlcul per tenir una idea estadística bàsica i resumir les gràfiques de dispersió en aquests valors.

En segon lloc, es realitzaran gràfiques de dispersió dels resultats de cada model per a observar visualment una primera idea del mètode de predicció.

En tercer i últim lloc, s'aplicarà el mètode "Demerit Points Classification" de Collins (2001). Aquest mètode consisteix en classificar els experiments en funció del valor del quocient de resistències en diferents intervals i veure quants assajos estan en cadascun d'ells. Segons el interval estigui més a prop o més lluny del valor desitjat (en aquest cas la unitat), a aquest se li assigna una puntuació coherent amb la bondat del resultat. Finalment, la valoració de la recomanació o guia de disseny és la suma del producte del nombre d'assajos de cada interval per la puntuació associada a aquests. Per interpretar els resultats s'ha de considerar que, com més baixa sigui la puntuació total, millor és comporta la formulació.

Per aplicar el "*Demerit Points Classification*" de Collins (2001), els intervals en els que s'ha classificat els resultats del quocient resistència del reforç de FRP experimental entre resistència a tallant analítica de la recomanació i la puntuació associada a cadascun d'aquests són els següents (Taula 4.1).

Taula 4.1 Interval de classificació dels resultats i puntuació associada pel Mètode de Collins (2001)

| Interval | Puntuació associada |
|--|---------------------|
| $V_{FRP,Exp} \cdot \sqrt{V_{FRP,Anal.}} < 0,5$ | 10 |
| $0,5 < V_{FRP,Exp} \cdot \sqrt{V_{FRP,Anal.}} < 0,65$ | 5 |
| $0,65 < V_{FRP,Exp} \cdot \sqrt{V_{FRP,Anal.}} < 0,85$ | 2 |
| $0,85 < V_{FRP,Exp} \cdot \sqrt{V_{FRP,Anal.}} < 1,3$ | 0 |
| $1,3 < V_{FRP,Exp} \cdot \sqrt{V_{FRP,Anal.}} < 2$ | 1 |
| $V_{FRP,Exp} \cdot \sqrt{V_{FRP,Anal.}} > 2$ | 2 |

Es pot veure clarament com la penalització per a valors analítics que estan pel costat de la inseguretat és important (10) mentre que penalitzen molt menys els valors molt conservadors (2).

4.2 ANÀLISI GLOBAL

Els indicadors de mínim, màxim, mitjana, mediana, desviació típica i coeficient de variació són un bon resum de la gràfica de dispersió de cada formulació estudiada (Taula 4.2).

Taula 4.2 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada

| Model de càlcul | Mínim | Màxim | Mitjana | Mediana | Desviació típica | Coefficient de variació | Núm. Assajos |
|---------------------------|-------|-------|---------|---------|------------------|-------------------------|--------------|
| FIB Bulletin 14 | 0,01 | 3,24 | 0,76 | 0,66 | 0,45 | 0,60 | 466 |
| ACI 440.2R-08 | 0,02 | 14,04 | 1,40 | 0,94 | 1,74 | 1,24 | 466 |
| TR55 | 0,03 | 14,04 | 1,61 | 1,02 | 1,86 | 1,15 | 466 |
| CNR-DT200 | 0,06 | 14,17 | 2,22 | 1,54 | 2,11 | 0,95 | 466 |
| CAN/CSA-S6-06 | 0,03 | 14,04 | 1,67 | 1,08 | 1,92 | 1,15 | 466 |
| CIDAR | 0,01 | 6,36 | 0,66 | 0,43 | 0,77 | 1,17 | 466 |
| Mofidi et Chaallal | 0,03 | 4,14 | 1,26 | 1,18 | 0,68 | 0,54 | 360 |
| Alzate | 0,02 | 8,88 | 1,25 | 1,08 | 0,93 | 0,74 | 466 |

El nombre d'assajos considerats és de 466 per a totes les recomanacions excepte per a la de Mofidi et Chaallal (2011), degut a que no té formulació per al reforç d'embolcall complet (W). Les mitjanes de les formulacions estan al voltant del 1,6 amb un màxim de 2,22 (CNR-DT200, 2004) i un mínim de 0,66 (CIDAR, 2006). La mediana varia entre 0,43 (CIDAR, 2006) i 1,54 (CNR-DT200, 2004). La diferència entre la mitjana i la mediana dona la idea de la heterogeneïtat dels resultats de l'aplicació de cada

formulació i l'ajust a la recta $V_{FRP,Exp.}=V_{FRP,Anal.}$. La desviació típica entre 0,45 (FIB Bulletin 14, 2001) i 2,11 (CNR-DT200, 2004). El coeficient de variació està comprès entre 0,54 (Mofidi et Chaallal, 2011) i 1,24 (ACI 440.2R-08, 2008), amb el que s'observa que la mostra menys dispersa és la que té el mínim coeficient de variació.

Per a cada model de predicció de la contribució del reforç amb FRP s'ha obtingut la gràfica de dispersió a partir de la qual es pot fer un primer raonament sobre els resultats i la fiabilitat. Les gràfiques representen amb un punt blau cada biga assajada i la recta vermella significa el resultat ideal, la igualtat entre valor analític i l'experimental. En l'eix de les abscisses es representa la contribució a tallant obtinguda experimentalment i en l'eix d'ordenades la contribució calculada segons la formulació corresponent de cada cas. En conseqüència, la zona inferior a la línia vermella és la zona on el valor obtingut analíticament és inferior al experimental i, per tant, seria conservador i, per contra, la part superior serà la part del costat de la inseguretats per ser major al real.

FIB BULLETIN 14 (2001)

La gràfica de dispersió d'aquesta guia de disseny (Figura 4.1) presenta una dispersió reduïda de la mostra i està centrada en la recta. En la zona no conservadora del gràfic és més dispersa i presenta alguns casos de resultats molt allunyats del desitjat en la part no conservadora de la gràfica. La major part dels resultats estan continguts entre un $\pm 25\%$ de contribució respecte a la recta d'igualtat entre valor predit i experimental.

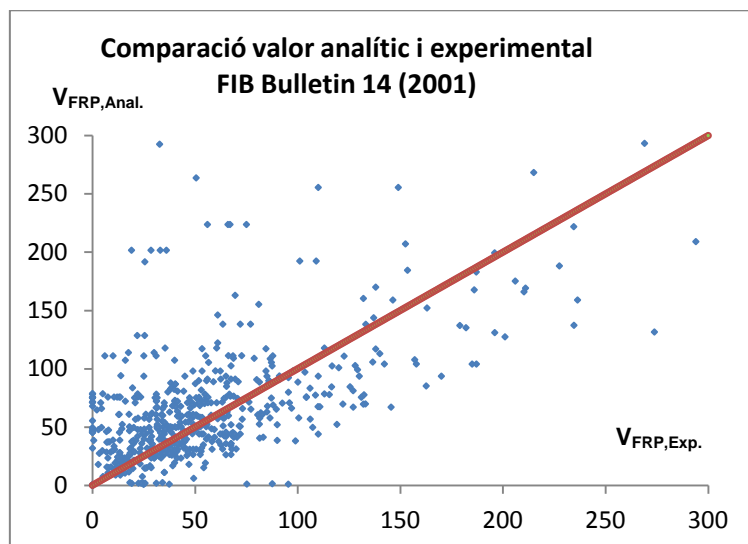


Figura 4.1 Gràfica de dispersió per al FIB Bulletin 14 (2001)

ACI 440.2R-08 (2008)

La gràfica de dispersió de l'ACI 440.2R-08 (2008) (Figura 4.2) mostra una concentració important a prop de la recta tot i que una bona part dels assajos estan en la zona no conservadora. En aquest cas la dispersió dels resultats és major en la zona del costat de la inseguretat i augmenten el nombre d'assajos amb resultats llunyans a la recta igualitària per la zona conservadora i sobretot per la zona que està del costat de la inseguretat.

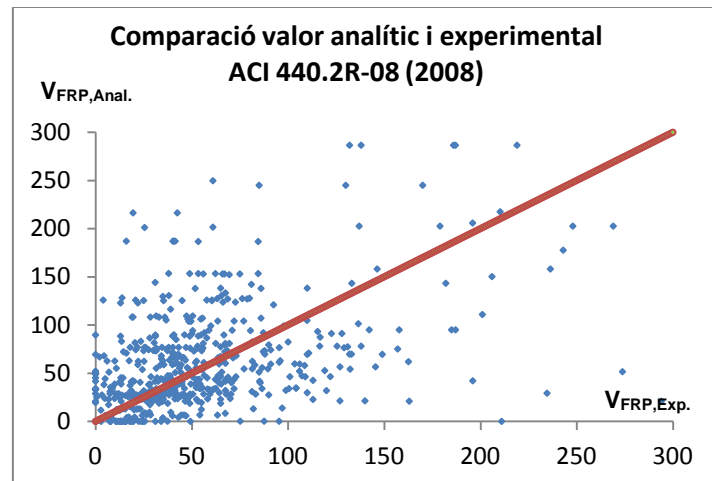


Figura 4.2 Gràfica de dispersió per al ACI 440.2R-08 (2008)

TR55 (2001)

El cas de la recomanació TR55 (2001) (Figura 4.3) té més dispersió i la separació d'aquests valors de la recta és similar però augmenten els assajos que estan en la zona segura. És molt similar a la de l'ACI 440.2R-08 (2008).

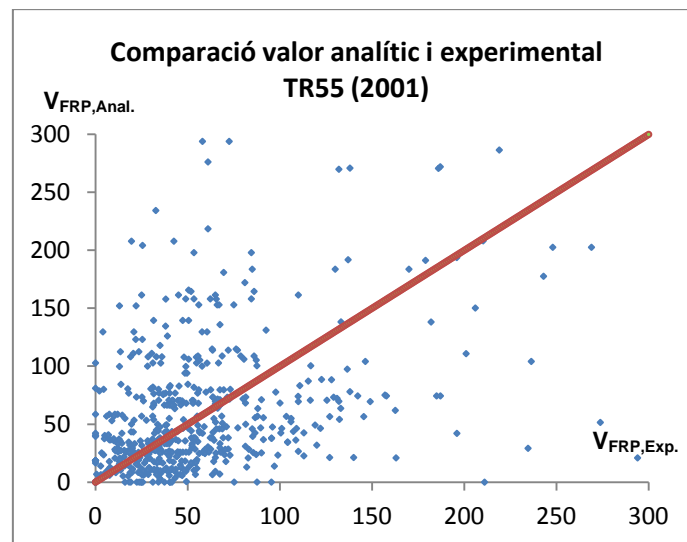


Figura 4.3 Gràfica de dispersió per al TR55 (2001)

CNR-DT200 (2004)

En aquest cas (Figura 4.4), es concentren la majoria de resultats en la zona segura i més propers a la recta. Té menys dispersió, tant en la zona conservadora com en la no conservadora. No presenta assajos amb resultats extremadament grans.

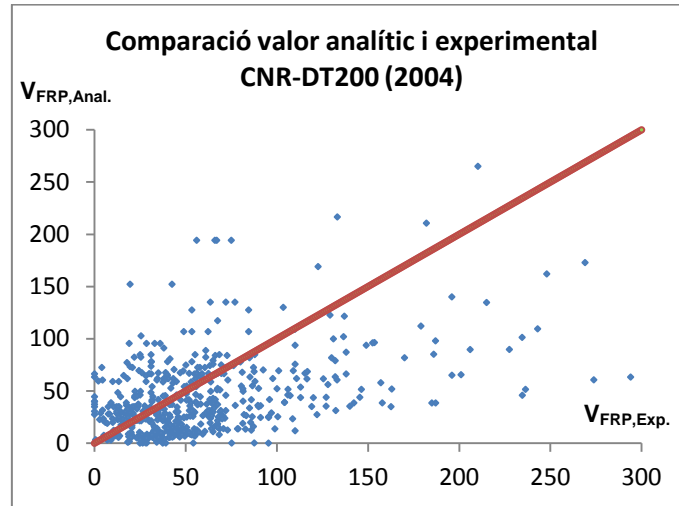


Figura 4.4 Gràfica de dispersió per al CNR-DT200 (2004)

CAN/CSA-S6-06 (2006)

Aquesta formulació està basada en la formulació de l'ACI 440.2R-08 (2008), per aquesta raó, la gràfica és molt semblant (Figura 4.5). La diferència entre ambdues formulacions és en els reforços laterals (S) on s'empra un coeficient k_2 diferent al de l'ACI 440.2R-08 (2008). Aquesta diferència s'observa millor en les gràfiques de dispersió de reforç en S.

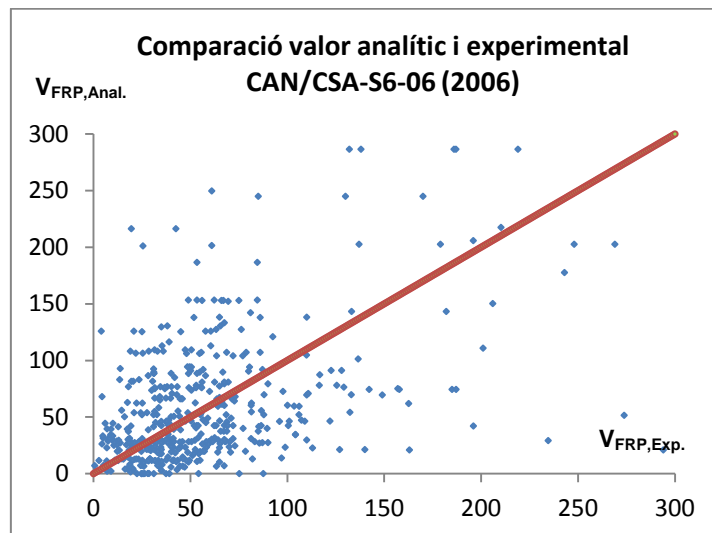


Figura 4.5 Gràfica de dispersió per al CAN/CSA-S6-06 (2006)

CIDAR (2006)

El CIDAR (2006) presenta una gràfica de dispersió amb pocs resultats en la zona conservadora propers a la recta ideal (Figura 4.6). La concentració d'assajos es en la zona no conservadora propera a la recta però es manifesta un important nombre d'assajos allunyats de la recta. Els assajos de la zona segura es troben principalment en la zona conservadora amb una dispersió similar a les formulacions d'Alzate (2012) i Mofidi et Chaallal (2011).

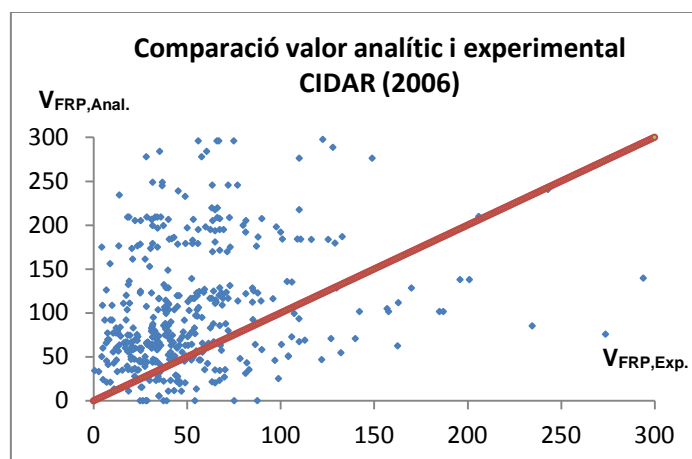


Figura 4.6 Gràfica de dispersió per al CIDAR (2006)

MOFIDI ET CHAALLAL (2011)

Com es pot veure en la gràfica (Figura 4.7), es veu un gran nombre de resultats amb valor analític igual a zero, que corresponen als reforços d'embolcall complet (W) el qual no té formulació per a aquest tipus de reforç i per tant, s'ha de tenir en compte que el nombre d'assajos és de 360 en comptes dels 466 de les altres formulacions. Per als tipus de reforç lateral (S) i en U (U), la distància dels assajos a la recta igualitària és més reduïda que en les anteriors formulacions concentrant-se la majoria d'ells propers a la recta per la zona segura. Els assajos compresos en la zona insegura, que són pocs, estan molt propers a la recta.

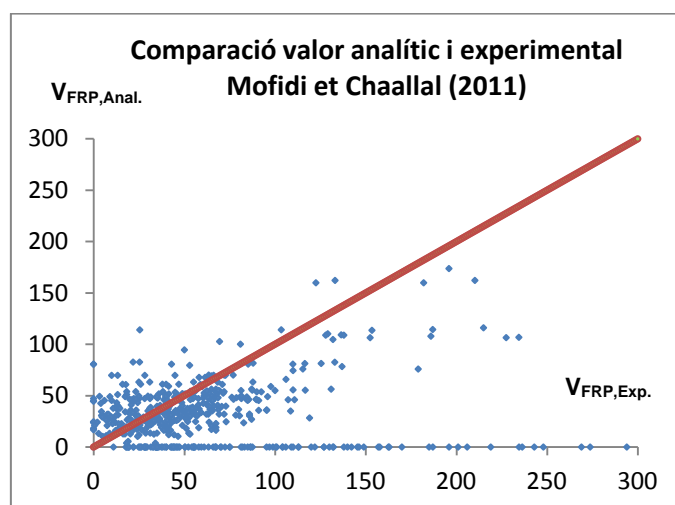


Figura 4.7 Gràfica de dispersió per a Mofidi et Chaallal (2011)

ALZATE (2012)

La formulació d'Alzate té els assajos repartits entre la zona conservadora i no conservadora (Figura 4.8). Els assajos de la zona conservadora es presenten seguint la inclinació de la recta i propers a aquesta. En la zona no conservadora els assajos són més dispersos i no segueixen la inclinació de la recta. Estan repartits a la par entre la banda conservadora i la no conservadora.

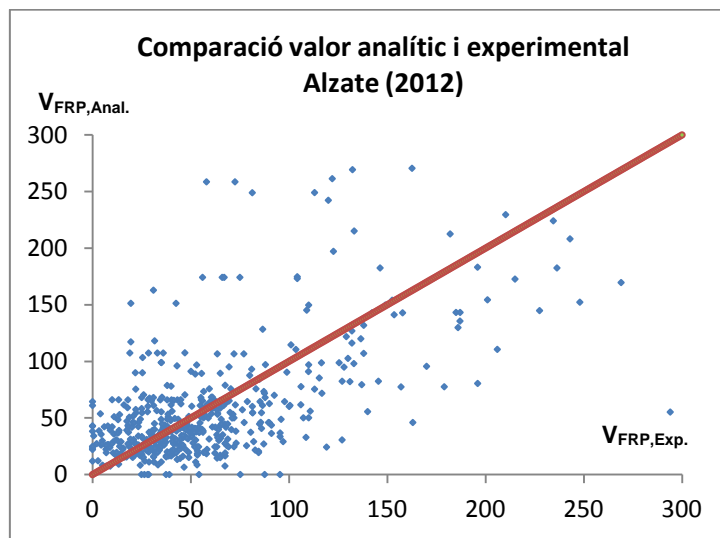


Figura 4.8 Gràfica de dispersió per a Alzate (2012)

4.2.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)

Mitjançant el mètode Collins (2001), que permet donar més penalització a aquella formulació que tingui més resultats pel costat de la inseguretat, la classificació dels mètodes de més a menys fiable està molt més adaptada al context considerat de la seguretat estructural.

Com es pot veure en la Taula 4.3, les valoracions segons el Mètode del "Demerit Points Classification" de Collins (2001) estan compreses entre 765 (Mofidi et Chaallal, 2011) i 3141 (CIDAR, 2006). Considerant que com menor és la puntuació, més fiable és la recomanació, es pot afirmar que les formulacions que més s'ajusten als valors experimentals són el CNR-DT200 (2004) i Alzate (2012). Cal destacar que la puntuació de la teoria de Mofidi et Chaallal (2011) és baixa però el nombre d'assajos que hi intervenen és 360 en comptes de 466 dels altres per no tenir formulació per reforç d'embolcall complet (W). La recomanació que menys s'ajusta als resultats experimentals és el CIDAR (2006) amb una puntuació de 3141. La resta de formulacions es troben al voltant de 1700 de puntuació.

Taula 4.3 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi global dels assajos

| Interval | FIB Bulletin 14 | ACI 440.2R-08 | TR55 | CNR-DT200 | CAN/CSA-S6-06 | CIDAR | Mofidi et Chaallal | Alzate |
|-------------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|--------------------|-------------|
| $x < 0,5$ | 148 | 115 | 109 | 60 | 102 | 270 | 42 | 81 |
| $0,5 < x < 0,65$ | 82 | 44 | 39 | 35 | 42 | 52 | 17 | 28 |
| $0,65 < x < 0,85$ | 65 | 53 | 49 | 42 | 48 | 47 | 36 | 44 |
| $0,85 < x < 1,30$ | 117 | 98 | 79 | 65 | 77 | 36 | 113 | 144 |
| $1,30 < x < 2$ | 46 | 86 | 74 | 79 | 74 | 35 | 116 | 104 |
| $x > 2$ | 8 | 70 | 116 | 185 | 123 | 26 | 36 | 65 |
| Núm. assajos | 466 | 466 | 466 | 466 | 466 | 466 | 360 | 466 |
| PUNTUACIÓ | 2082 | 1702 | 1689 | 1308 | 1646 | 3141 | 765 | 1272 |

En la següent figura (Figura 4.9), es poden veure el nombre d'assajos en cada interval de cada formulació.

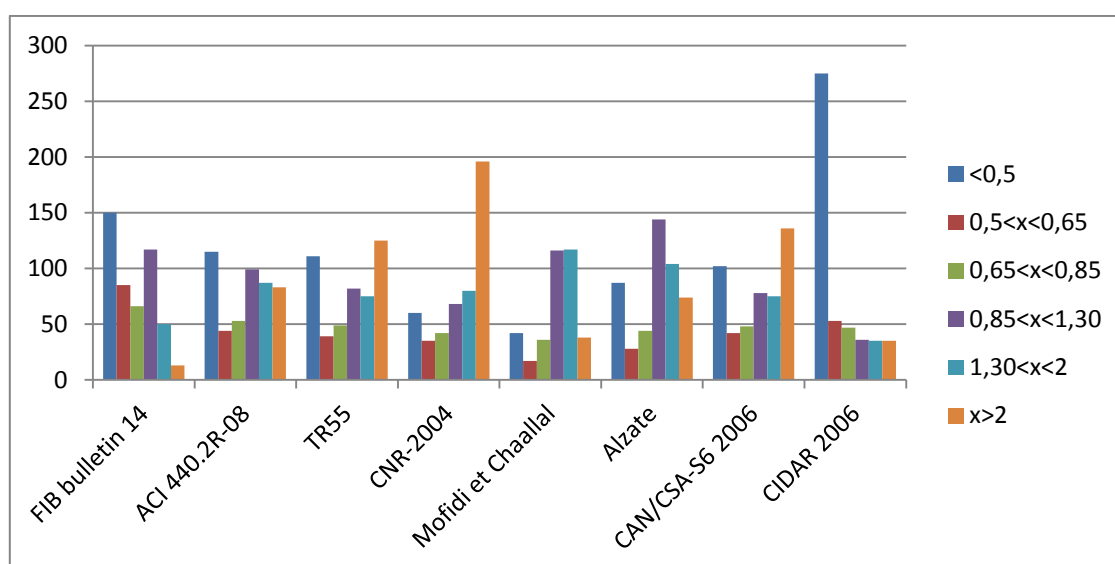


Figura 4.9 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi global

4.3 ANÀLISI SEGONS TIPUS DE SECCIÓ

Realitzant l'anàlisi amb el mateix mètode però considerant per separat les bigues de secció rectangular i les bigues de secció en T permet veure quin tipus de secció és la que té més fiabilitat al aplicar les normatives anteriors.

4.3.1 ANÀLISI DE LES BIGUES DE SECCIÓ RECTANGULAR

Considerant els mateixos indicadors que abans i calculant-los de nou per a aquesta submostra d'assajos s'obtenen els indicadors per a bigues de secció rectangular (Taula 4.4).

Taula 4.4 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada

| Model de càlcul | Mínim | Màxim | Mitjana | Mediana | Desviació típica | Coefficient de variació | Núm. Assajos |
|---------------------------|-------|-------|---------|---------|------------------|-------------------------|--------------|
| FIB Bulletin 14 | 0,04 | 3,24 | 0,79 | 0,72 | 0,47 | 0,60 | 354 |
| ACI 440.2R-08 | 0,03 | 14,04 | 1,50 | 0,93 | 1,94 | 1,29 | 354 |
| TR55 | 0,03 | 14,04 | 1,54 | 0,97 | 1,93 | 1,26 | 354 |
| CNR-DT200 | 0,06 | 14,17 | 2,15 | 1,59 | 2,01 | 0,93 | 354 |
| CAN/CSA-S6-06 | 0,03 | 14,04 | 1,64 | 1,05 | 2,04 | 1,24 | 354 |
| CIDAR | 0,01 | 6,36 | 0,69 | 0,42 | 0,84 | 1,21 | 354 |
| Mofidi et Chaallal | 0,09 | 4,14 | 1,26 | 1,20 | 0,68 | 0,54 | 248 |
| Alzate | 0,02 | 8,88 | 1,22 | 1,07 | 0,93 | 0,76 | 354 |

El nombre d'assajos considerats és de 354 per a totes les recomanacions excepte per a la de Mofidi et Chaallal (2011), degut a que no té formulació per al reforç d'embolcall complet (W). Les mitjanes de les formulacions estan al voltant del 1,5 amb un màxim de 2,15 (CNR-DT200, 2004) i un mínim de 0,69 (CIDAR, 2006). La mediana varia entre 0,42 (CIDAR, 2006) i 1,59 (CNR-DT200, 2004). La diferència entre la mitjana i la mediana dóna la idea de la heterogeneïtat dels resultats de l'aplicació de cada formulació i l'ajust a la recta $V_{FRP,Exp.}=V_{FRP,Anal.}$. La desviació típica varia entre 0,47 (FIB Bulletin 14, 2001) i 2,01 (CNR-DT200, 2004). El coeficient de variació està comprès entre 0,54 (Mofidi et Chaallal, 2011) i 1,29 (ACI 440.2R-08, 2008), amb el que s'observa que la mostra menys dispersa és la que té el mínim coeficient de variació.

Anàlogament a l'anàlisi anterior, a partir de les gràfiques de dispersió es pot interpretar qualitativament l'ajust dels models però considerant només un tipus de biga de secció concreta, en aquest cas, secció rectangular. El mode de representació és idèntic a l'anterior anàlisi i trobem 354 assajos.

FIB BULLETIN 14 (2001)

La gràfica de dispersió d'aquesta guia de disseny en el cas de considerar només les bigues de secció rectangular (Figura 4.10) veiem que és molt semblant a si es consideren totes les bigues. Es segueix mantenint l'ample de banda del $\pm 25\%$ al voltant de la recta i la distribució dels assajos. Els valors allunyats es conserven iguals a l'anterior gràfica de dispersió.

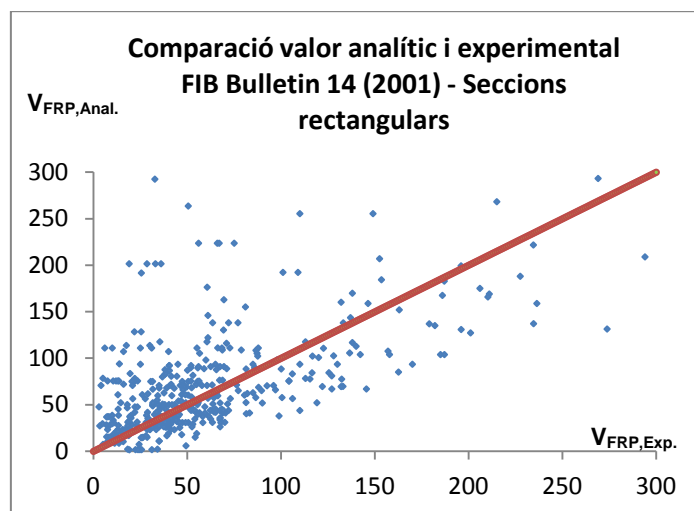


Figura 4.10 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al FIB Bulletin 14 (2001)

ACI 440.2R-08 (2008)

La gràfica de dispersió de l'ACI 440.2R-08 (2008) per a seccions rectangulars (Figura 4.11) manté una dispersió molt semblant a l'altre gràfica. Els assajos el resultat dels quals estava allunyat de la recta són els mateixos i es presenten repartits en més quantitat a la banda conservadora de la recta, fet que coincideix amb els resultats dels valors estadístics.

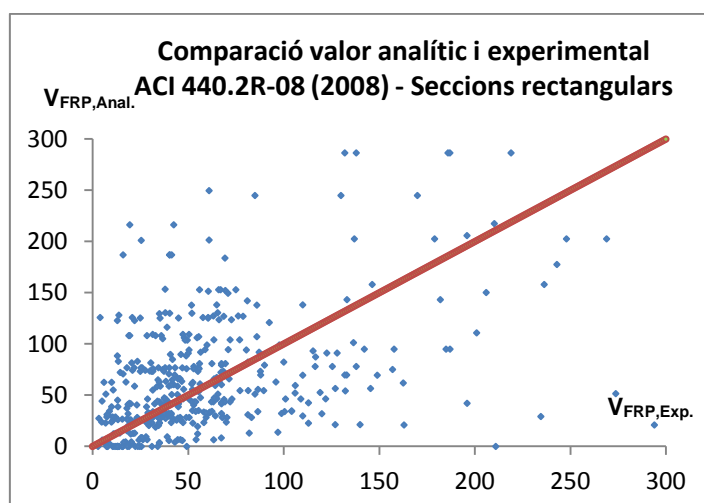


Figura 4.11 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al ACI 440.2R-08 (2008)

TR55 (2001)

El resultat d'observar la dispersió dels assajos en el cas de les bigues de secció rectangular de la recomanació TR55 (2001) (Figura 4.12) es pot observar que el nombre de casos en la zona desfavorable disminueix arribant a estar pràcticament equilibrat el nombre d'assajos per sobre i per sota de la recta sent més els que estan en la zona conservadora.

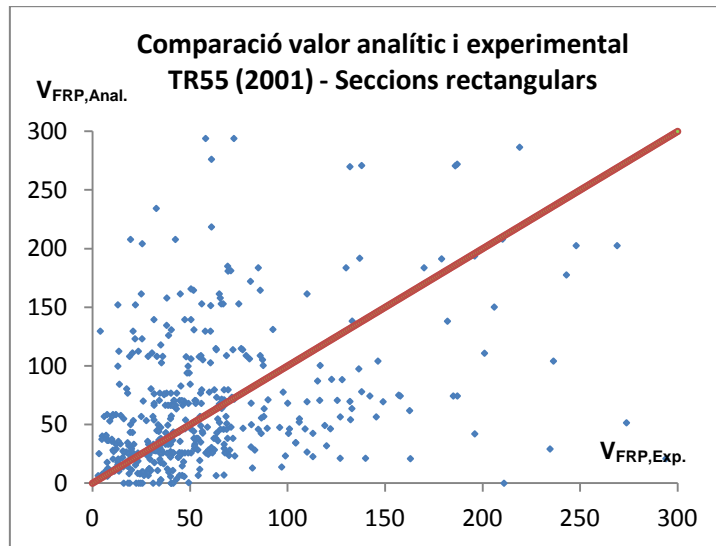


Figura 4.12 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al TR55 (2001)

CNR-DT200 (2004)

La gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular del CNR-DT200 (2004) (Figura 4.13) té menys nombre d'assajos en la zona insegura. Es pot dir que és més conservador per a bigues de secció rectangular que en el cas general. La dispersió és la mateixa que en la gràfica de dispersió de l'anàlisi global.

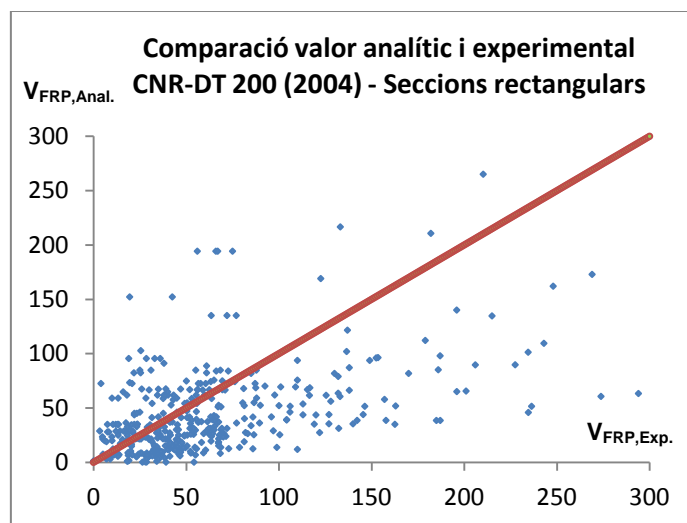


Figura 4.13 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al CNR-DT200 (2004)

CAN/CSA-S6-06 (2006)

Descartant les bigues de secció en T, la gràfica de dispersió de la formulació CAN/CSA-S6-06 (2006) (Figura 4.14) redueix el nombre d'assajos en la zona no conservadora més que en la zona conservadora mantenint la mateixa dispersió dels resultats. La dispersió dels resultats és idèntica a la de la gràfica de dispersió de l'anàlisi global. És més conservadora per a bigues de secció rectangular.

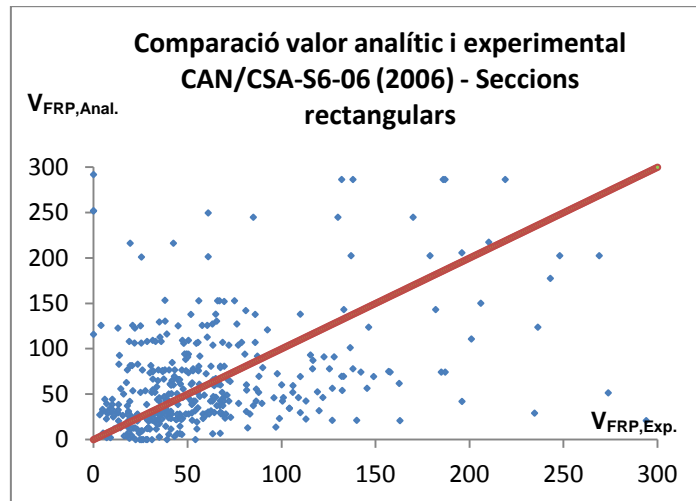


Figura 4.14 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al CAN/CSA-S6-06 (2006)

CIDAR (2006)

En la gràfica de dispersió d'aquesta recomanació es pot veure com han disminuït el nombre d'assajos de la zona insegura amb el que per a bigues de secció rectangular és una formulació no conservadora. La dispersió dels resultats segueix sent la mateixa que en l'anterior anàlisi, no obstant, segueix mantenint molts assajos en la zona insegura i allunyats de la recta (Figura 4.15).

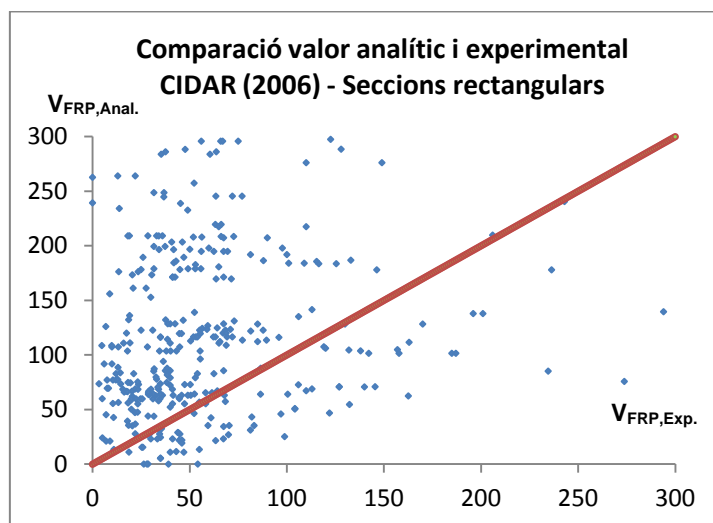


Figura 4.15 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per al CIDAR (2006)

MOFIDI ET CHAALLAL (2011)

En aquest cas (Figura 4.16), es segueixen observant en l'eix d'abscisses totes les bigues de secció rectangular reforçades en embolcall complet (W). Es redueix el nombre d'assajos en la zona insegura i la dispersió fora d'aquest interval és idèntica a la del gràfic d'anàlisi global.

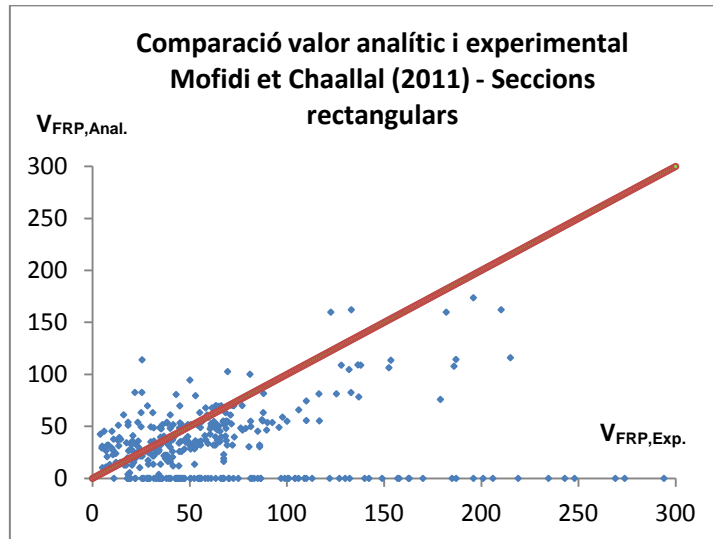


Figura 4.16 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per a Mofidi et Chaallal (2011)

ALZATE (2012)

La formulació d'Alzate (2012) per a bigues de secció rectangular dóna lloc a la gràfica de dispersió següent (Figura 4.17) on es diferencia respecte a la global amb menys resultats en la zona no conservadora. La dispersió és la mateixa que en l'anàlisi global anterior.

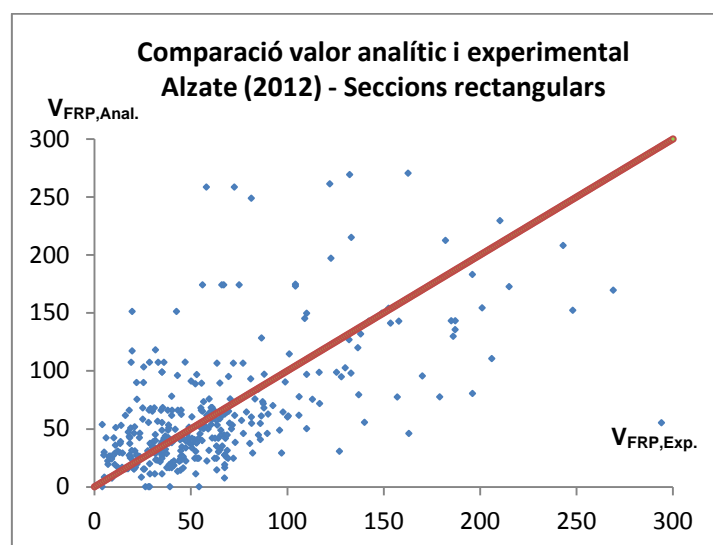


Figura 4.17 Gràfica de dispersió per a bigues de secció rectangular per a Alzate (2012)

4.3.1.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)

La Taula 4.5 mostra el nombre d'assajos de bigues de secció rectangular de cada interval en el què s'han dividit els resultats, la puntuació associada a cada interval i el resultat parcial i global de cada recomanació per a seccions rectangulars. Es pot veure, també, les valoracions segons el Mètode del "Demerit Points Classification" de Collins (2001) estan compreses entre 534 (Mofidi et Chaallal, 2011) i 2418 (CIDAR, 2006). Considerant que com menor és la puntuació, més fiable és la recomanació, es pot afirmar que les formulacions que més s'ajusten als valors experimentals de bigues de secció rectangular són el CNR-DT200 (2004) i Alzate (2012). Cal destacar que la puntuació de la teoria de Mofidi et Chaallal (2011) és baixa però el nombre d'assajos que hi intervenen és 248 en comptes de 354 dels altres per no tenir formulació per reforç d'embolcall complet (W). La recomanació que menys s'ajusta als resultats experimentals és el CIDAR (2006) amb una puntuació de 2418. La resta de formulacions es troben al voltant de 1300 de puntuació.

Taula 4.5 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues de secció rectangular

| Interval | FIB Bulletin 14 | ACI 440.2R-08 | TR55 | CNR-DT200 | CAN/CSA-S6-06 | CIDAR | Mofidi et Chaallal | Alzate |
|------------------|-----------------|---------------|-------------|------------|---------------|-------------|--------------------|-------------|
| <0,5 | 106 | 90 | 85 | 40 | 80 | 210 | 29 | 65 |
| 0,5<x<0,65 | 52 | 34 | 33 | 21 | 31 | 35 | 13 | 24 |
| 0,65<x<0,85 | 49 | 38 | 37 | 30 | 37 | 32 | 26 | 35 |
| 0,85<x<1,30 | 101 | 71 | 64 | 52 | 50 | 22 | 76 | 108 |
| 1,30<x<2 | 38 | 61 | 62 | 70 | 66 | 31 | 81 | 76 |
| x>2 | 8 | 60 | 73 | 141 | 80 | 24 | 23 | 46 |
| Núm. assajos | 354 | 354 | 354 | 354 | 354 | 354 | 248 | 354 |
| PUNTUACIÓ | 1472 | 1327 | 1297 | 917 | 1255 | 2418 | 534 | 1008 |

En la següent figura (Figura 4.18), es poden veure el nombre d'assajos en cada interval de cada formulació.

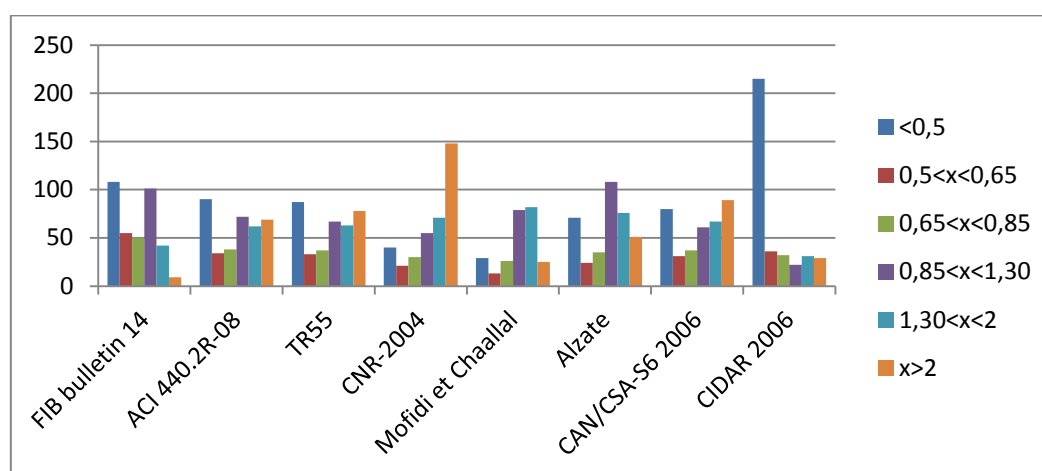


Figura 4.18 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues de secció rectangular

4.3.2 ANÀLISI DE LES BIGUES DE SECCIÓ EN T

El nombre d'assajos considerats és de 112 per a totes les recomanacions ja que on hi ha assajos amb reforç d'embolcall compert. Les mitjanes de les formulacions estan al voltant del 1,7 amb un màxim de 2,51 (CNR-DT200, 2004) i un mínim de 0,55 (CIDAR, 2006). La mediana varia entre 0,45 (CIDAR, 2006) i 1,19 (TR 55, 2001). La diferència entre la mitjana i la mediana dóna la idea de la heterogeneïtat dels resultats de l'aplicació de cada formulació i l'ajust a la recta $V_{FRP,Exp.}=V_{FRP,Anal.}$. La desviació típica està entre 0,36 (FIB Bulletin 14, 2001) i 2,39 (CNR-DT200, 2004). El coeficient de variació està comprès entre 0,55 (Mofidi et Chaallal, 2011) i 0,95 (CNR-DT200, 2004), amb el que s'observa que la mostra menys dispersa és la que té el mínim coeficient de variació (veure Taula 4.6).

Taula 4.6 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada

| Model de càlcul | Mínim | Màxim | Mitjana | Mediana | Desviació típica | Coefficient de variació | Núm. Assajos |
|--------------------|-------|-------|---------|---------|------------------|-------------------------|--------------|
| FIB Bulletin 14 | 0,01 | 1,98 | 0,63 | 0,57 | 0,36 | 0,57 | 112 |
| ACI 440.2R-08 | 0,02 | 3,48 | 1,07 | 1,03 | 0,68 | 0,64 | 112 |
| TR55 | 0,06 | 6,98 | 1,88 | 1,19 | 1,55 | 0,83 | 112 |
| CNR-DT200 | 0,07 | 8,51 | 2,51 | 1,11 | 2,39 | 0,95 | 112 |
| CAN/CSA-S6-06 | 0,07 | 6,33 | 1,77 | 1,17 | 1,43 | 0,81 | 112 |
| CIDAR | 0,02 | 3,18 | 0,55 | 0,45 | 0,48 | 0,86 | 112 |
| Mofidi et Chaallal | 0,03 | 3,79 | 1,26 | 1,16 | 0,69 | 0,55 | 112 |
| Alzate | 0,02 | 4,34 | 1,39 | 1,17 | 0,93 | 0,67 | 112 |

Com en els anteriors casos però considerant únicament els assajos de bigues de formigó de secció en forma de T s'obtenen els següents gràfics de dispersió que representen els resultats de cada assaig i per a cada recomanació o guia de disseny de reforços amb laminats de FRP considerades. Novament, el sistema de representació emprat és el mateix que els dos anteriors.

FIB BULLETIN 14 (2001)

La gràfica de dispersió d'aquest model amb les bigues de formigó de secció en T té, a comparació amb la de seccions rectangulars, una dispersió molt menor. La separació d'aquests respecte la recta bisectriu és molt reduïda i la major part dels resultats estan situats a la part no conservadora del gràfic. Sembla com si les bigues de secció en T es comportessin millor segons aquesta formulació (Figura 4.19).

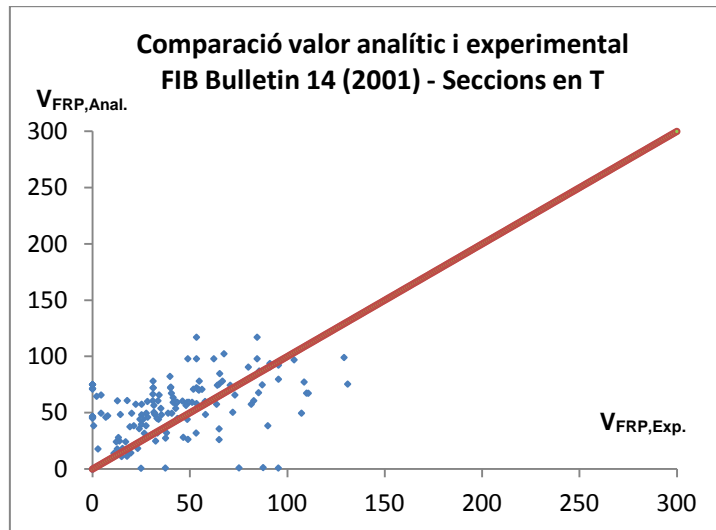


Figura 4.19 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al FIB Bulletin 14 (2001)

ACI 440.2R-08 (2008)

Els resultats de bigues de secció en T per al cas de l'ACI 440.2R-08 (2008) (Figura 4.20) tenen una menor dispersió respecte la gràfica amb totes les bigues. No obstant, a comparació amb el del FIB Bulletin 14 (2001) els resultats estan més separats de la recta i són més dispersos com es pot veure en el grup de nou punts situats a la zona no conservadora del gràfic. El nombre d'assajos a banda i banda de la recta és molt semblant.

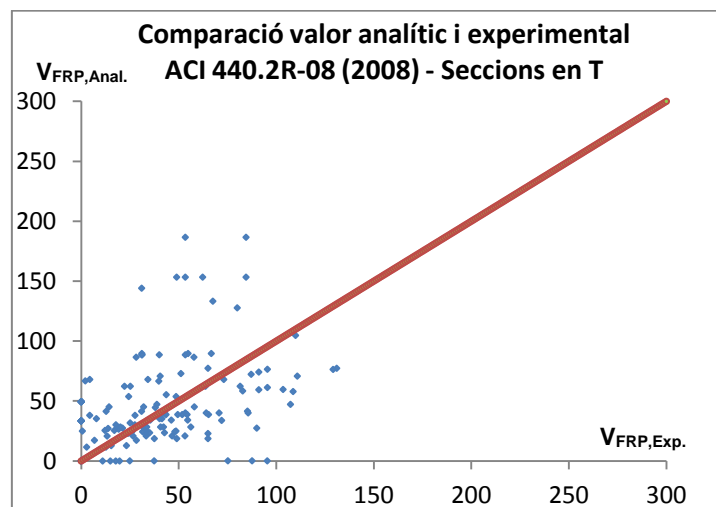


Figura 4.20 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al ACI 440.2R-08 (2008)

TR55 (2001)

La formulació de la guia de disseny de TR55 (2001) per a bigues de formigó en secció en T genera una gràfica de dispersió (Figura 4.21) similar a la del ACI 440.2R-08 (2008) tot i que passa a ser major el nombre d'assajos en la zona inferior de la recta, la conservadora. La separació des de la recta als punts augmenta tant en la zona conservadora com en la no conservadora.

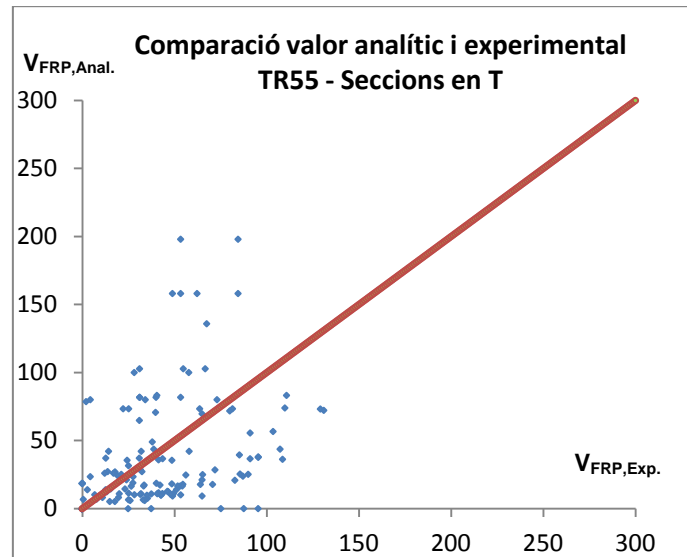


Figura 4.21 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al TR55 (2001)

CNR-DT200 (2004)

En la gràfica de dispersió de bigues de secció en T del CNR-DT200 (2004) (Figura 4.22) disminueixen els assajos en la zona del costat de la inseguretad del gràfic i els resultats conservadors es separen més de la recta a diferència dels casos de bigues rectangulars. La dispersió és baixa i la recta els punts estan centrats en la recta.

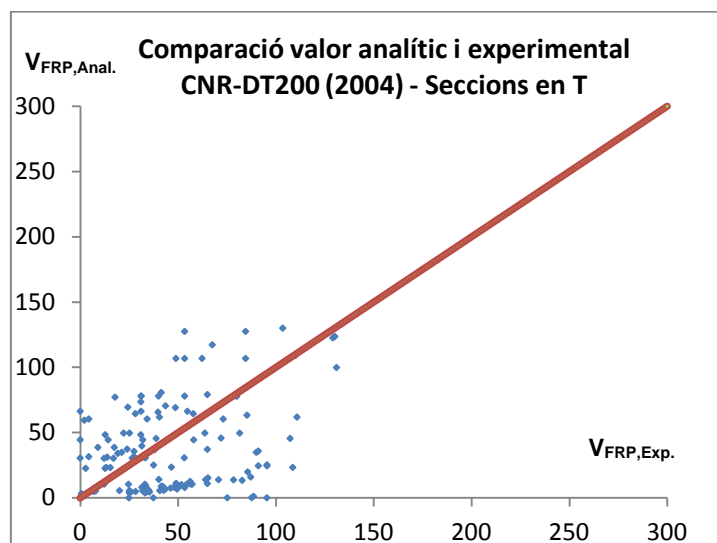


Figura 4.22 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al CNR-DT200 (2004)

CAN/CSA-S6-06 (2006)

La dispersió de resultats en la gràfica del CAN/CSA-S6-06 (2006) (Figura 4.23) és major que en les formulacions de FIB Bulletin 14 (2001), CNR-DT200 (2004), Mofidi et Chaallal (2011) i Alzate (2012) i molt similar a l'ACI 440.2R-08 (2008) per estar basada en ella. Els assajos es troben repartits a la par entre la part conservadora i la no conservadora del gràfic. Els assajos de la zona segura són més conservadors que en l'ACI 440.2R-08 (2008).

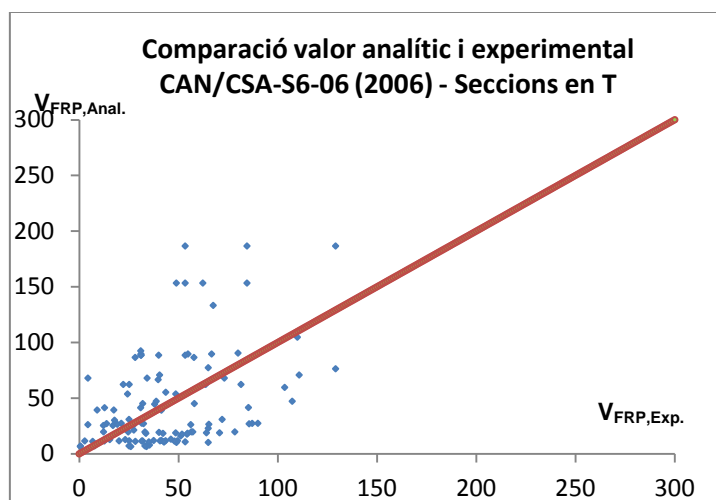


Figura 4.23 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al CAN/CSA-S6-06 (2006)

CIDAR (2006)

En la gràfica de dispersió del CIDAR (2006) (Figura 4.24) pràcticament no hi ha assajos en la zona conservadora del gràfic. En la zona no conservadora la dispersió és elevada i hi ha la presència d'un grup d'assajos relativament propera a la recta bisectriu. La separació respecte de la recta igualitària és considerable.

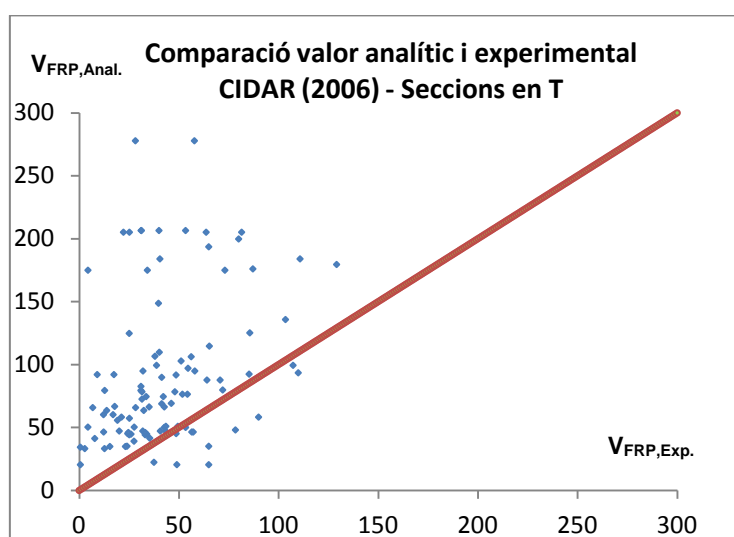


Figura 4.24 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per al CIDAR (2006)

MOFIDI ET CHAALLAL (2011)

En aquesta gràfica de dispersió (Figura 4.25) els assajos estan a poca distància respecte a la recta bisectriu, pocs assajos a la zona no conservadora i aquests propers a la recta bisectriu. Els assajos de la zona conservadora es troben més llunyans respecte la recta. La dispersió es baixa, sent la de la zona conservadora major a la de la zona no conservadora.

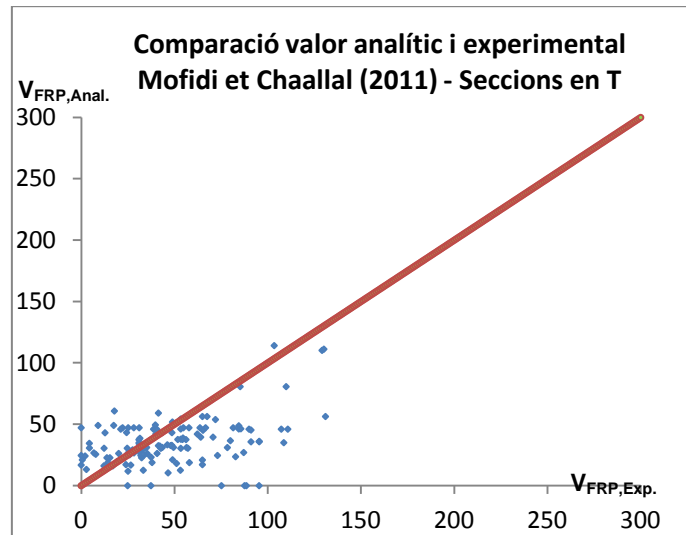


Figura 4.25 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per a Mofidi et Chaallal (2011)

ALZATE (2012)

La formulació d'Alzate (2012) aplicada a bigues de secció en T dóna una gràfica de dispersió (Figura 4.26) amb poca dispersió dels resultats. La separació respecte a la recta bisectriu és reduïda per a tots els assajos i la major part dels resultats estan a la zona conservadora. Té una gràfica semblant a la formulació de Mofidi et Chaallal (2011).

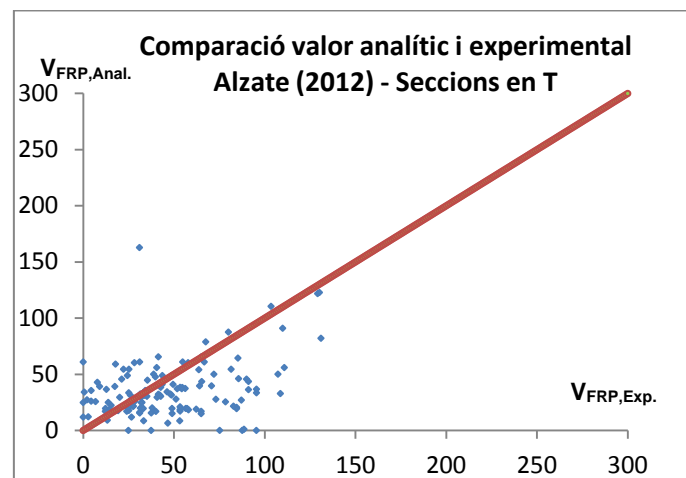


Figura 4.26 Gràfica de dispersió per a bigues de secció en T per a Alzate (2012)

4.3.2.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)

En el cas de bigues de secció en T (Taula 4.7) els valors associats a l'aplicació del Mètode de Collins (2001) estan compresos entre 231 (Mofidi et Chaallal, 2011) i 723 (CIDAR, 2006). Cal destacar que en aquest cas la puntuació de la teoria de Mofidi et Chaallal (2011) és comparable amb la resta de formulacions ja que el nombre d'assajos que hi intervenen és de 112 per totes les formulacions. Per tant, les recomanacions més fiables són les de Mofidi et Chaallal (2011) i d'Alzate (2012). La recomanació que menys s'ajusta als resultats experimentals és el CIDAR (2006) amb una puntuació de 723. La resta de formulacions es troben al voltant de 400 de puntuació.

Taula 4.7 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues de secció en T

| Interval | FIB Bulletin 14 | ACI 440.2R-08 | TR55 | CNR-DT200 | CAN/CSA-S6-06 | CIDAR | Mofidi et Chaallal | Alzate |
|------------------|-----------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|--------------------|------------|
| <0,5 | 42 | 25 | 24 | 20 | 22 | 60 | 13 | 16 |
| 0,5<x<0,65 | 30 | 10 | 6 | 14 | 11 | 17 | 4 | 4 |
| 0,65<x<0,85 | 16 | 15 | 12 | 12 | 11 | 15 | 10 | 9 |
| 0,85<x<1,30 | 16 | 27 | 15 | 13 | 17 | 14 | 37 | 36 |
| 1,30<x<2 | 8 | 25 | 12 | 9 | 8 | 4 | 35 | 28 |
| x>2 | 0 | 10 | 43 | 44 | 43 | 2 | 13 | 19 |
| Núm. assajos | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 |
| PUNTUACIÓ | 610 | 375 | 392 | 391 | 391 | 723 | 231 | 264 |

En la següent figura (Figura 4.27), es poden veure el nombre d'assajos en cada interval de cada formulació.

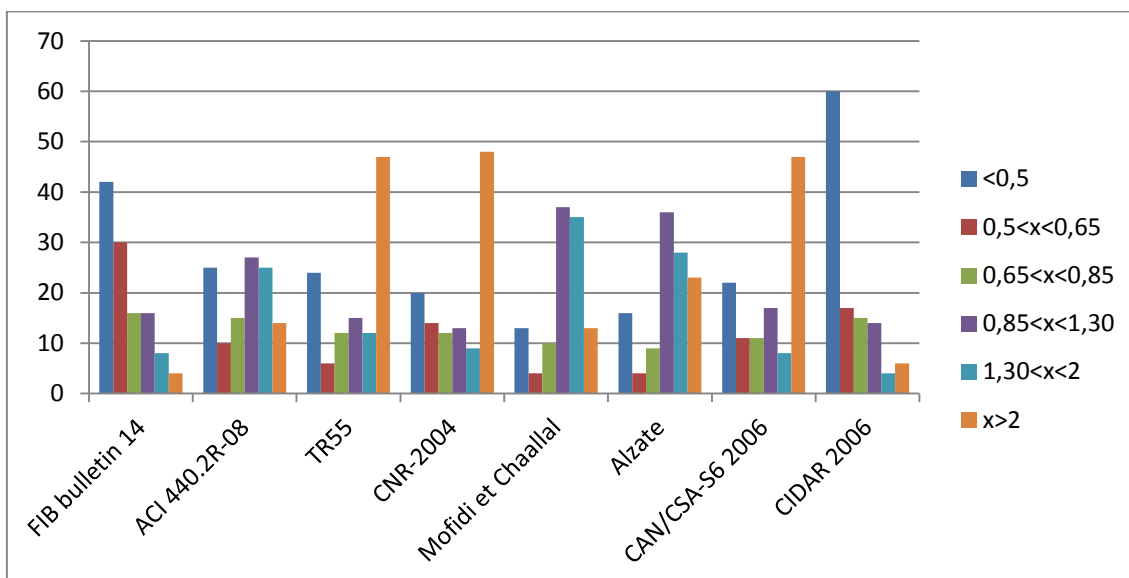


Figura 4.27 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues de secció en T

4.4 ANÀLISI SEGONS EL TIPUS DE REFORÇ

Realitzant l'anàlisi amb el mateix mètode però considerant per separat els tipus de reforç en u, en s i en w permet veure quina configuració del reforç és la que té més fiabilitat al aplicar les normatives anteriors.

4.4.1 ANÀLISI DE LES BIGUES REFORÇADES EN U

El nombre d'assajos considerats és de 254 per a totes les recomanacions. Les mitjanes de les formulacions estan al voltant del 1,3 amb un màxim de 2,07 (CNR-DT200, 2004) i un mínim de 0,50 (CIDAR, 2006). La mediana varia entre 0,44 (CIDAR, 2006) i 1,24 (CNR-DT200, 2004). La diferència entre la mitjana i la mediana dóna la idea de la heterogeneïtat dels resultats de l'aplicació de cada formulació i l'ajust a la recta $V_{FRP,Exp.}=V_{FRP,Anal.}$. La desviació típica varia entre 0,38 (CIDAR, 2006) i 2,09 (CNR-DT200, 2004). El coeficient de variació està comprès entre 0,51 (Mofidi et Chaallal, 2011) i 1,01 (CNR-DT200, 2004), amb el que s'observa que la mostra menys dispersa és la que té el mínim coeficient de variació (veure Taula 4.8).

Taula 4.8 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada

| Model de càlcul | Mínim | Màxim | Mitjana | Mediana | Desviació típica | Coeficient de variació | Núm. Assajos |
|--------------------|-------|-------|---------|---------|------------------|------------------------|--------------|
| FIB Bulletin 14 | 0,01 | 3,24 | 0,74 | 0,66 | 0,41 | 0,56 | 254 |
| ACI 440.2R-08 | 0,02 | 3,92 | 1,03 | 0,94 | 0,62 | 0,60 | 254 |
| TR55 | 0,03 | 6,98 | 1,52 | 1,14 | 1,22 | 0,80 | 254 |
| CNR-DT200 | 0,06 | 3,59 | 2,07 | 1,24 | 2,09 | 1,01 | 254 |
| CAN/CSA-S6-06 | 0,03 | 6,33 | 1,46 | 1,10 | 1,12 | 0,77 | 254 |
| CIDAR | 0,01 | 3,18 | 0,50 | 0,44 | 0,38 | 0,76 | 254 |
| Mofidi et Chaallal | 0,03 | 3,79 | 1,22 | 1,15 | 0,62 | 0,51 | 254 |
| Alzate | 0,02 | 4,34 | 1,27 | 1,09 | 0,79 | 0,62 | 254 |

Com en els anteriors casos però considerant únicament els assajos de bigues de formigó reforçades en forma de U (U) s'obtenen els següents gràfics de dispersió que representen els resultats de cada assaig i per a cada recomanació o guia de disseny de reforços amb laminats de FRP considerades. El sistema de representació emprat és el mateix que els anteriors.

FIB BULLETIN 14 (2001)

Segons la gràfica de dispersió (Figura 4.28), els resultats dels assajos de bigues reforçades en U (U) tenen poca dispersió però al voltant del 75 % dels resultats estan situats en la zona no conservadora. En la zona conservadora hi ha pràcticament assajos.

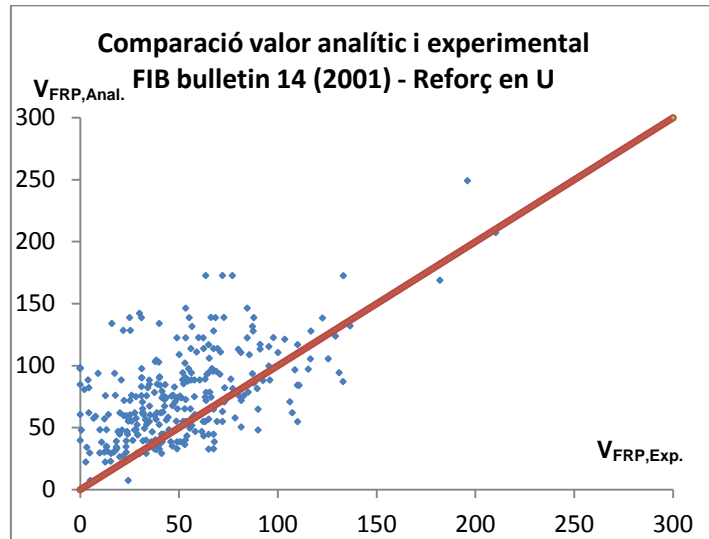


Figura 4.28 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al FIB Bulletin 14 (2001)

ACI 440.2R-08 (2008)

Comparat amb el FIB Bulletin 14 (2001), la dispersió dels resultats és molt similar (veure Figura 4.29), no obstant, la quantitat d'assajos en la zona conservadora és més elevat i el núvol de punts que representen els assajos queda més centrat en la recta encara que segueixen sent més els resultats en la zona no conservadora.

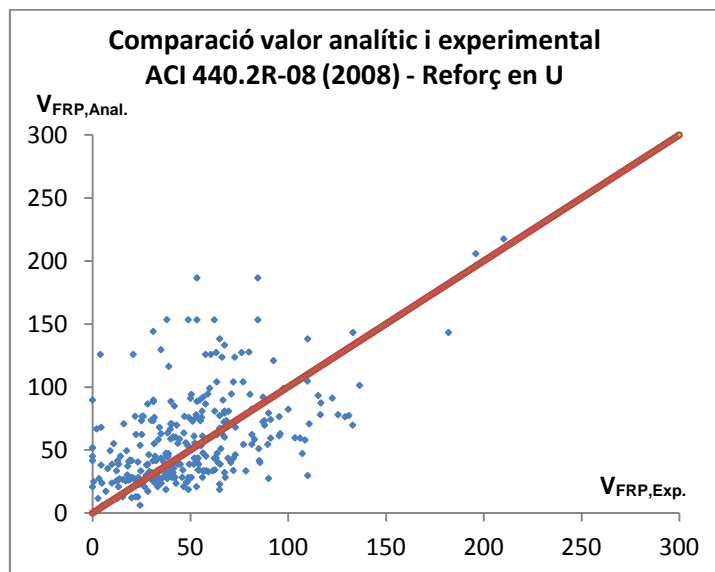


Figura 4.29 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al ACI 440.2R-08 (2008)

TR55 (2001)

La dispersió dels resultats és més elevada que en totes les altres formulacions excepte la del CIDAR (2006). La major part dels resultats estan en la part segura del gràfic. La dispersió en la zona insegura és major que en la zona segura (Figura 4.30).

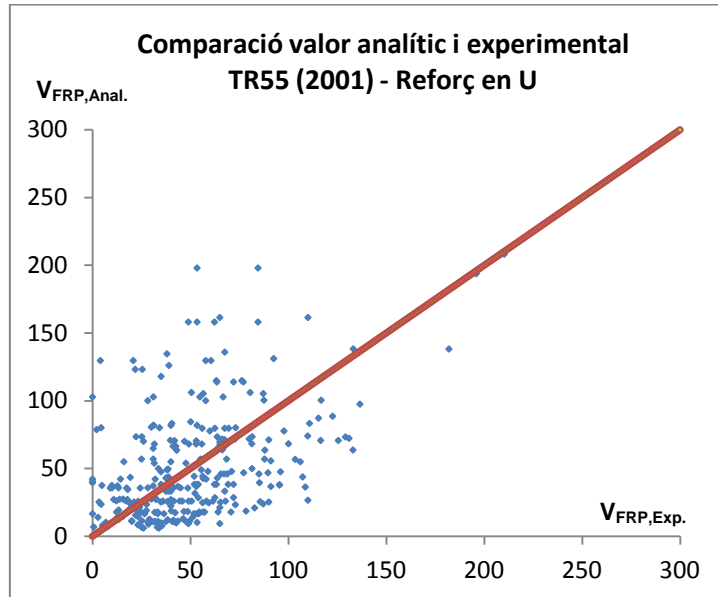


Figura 4.30 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al TR55 (2001)

CNR-DT200 (2004)

La formulació del CNR-DT200 (2004) dóna com a resultat una gràfica de dispersió reduïda, propers a la recta i amb els valors repartits a la par entre la zona conservadora i la no conservadora (Figura 4.31). Els assajos s'ajusten a la recta i la dispersió és similar en la zona conservadora i en la no conservadora.

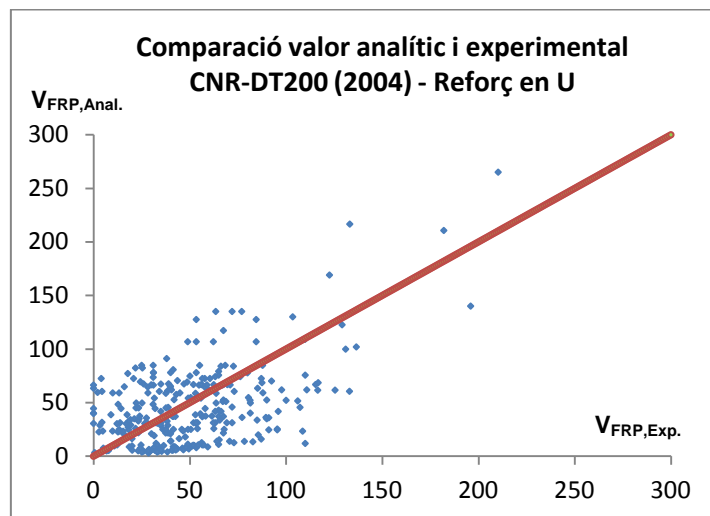


Figura 4.31 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al CNR-DT200 (2004)

CAN/CSA-S6-06 (2006)

Aquesta formulació presenta una dispersió elevada comparada amb les altres formulacions (Figura 4.32). Els assajos estan repartits entre la part conservadora i la no conservadora. Els de la part no conservadora són més dispersos i estan més allunyats de la recta mentre que els de la part conservadora estan a la mateixa distància que en les millors formulacions. S'ajusten bé a la recta.

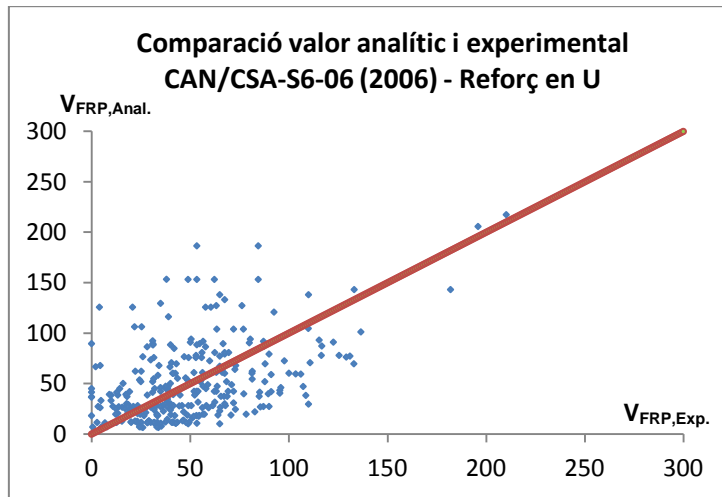


Figura 4.32 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al CAN/CSA-S6-06 (2006)

CIDAR (2006)

La dispersió dels resultats del CIDAR (2006) en reforços en U (Figura 4.33) és molt elevada i pràcticament tots els resultats estan a la part no conservadora del gràfic. Els pocs assajos que estan a la part conservadora estan propers a la recta però els que estan a la zona no conservadora presenten una gran dispersió i estan molt allunyats de la recta.

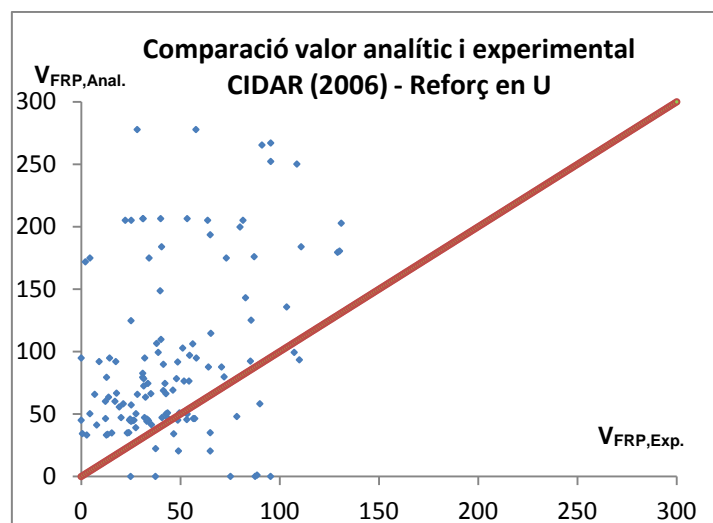


Figura 4.33 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per al CIDAR (2006)

MOFIDI ET CHAALLAL (2011)

En el cas de Mofidi et Chaallal (2011) (Figura 4.34) la dispersió és la més reduïda de totes les formulacions estudiades en reforços en U. La major part dels assajos estan a la zona conservadora i aquests són propers a la recta bisectriu. Els assajos de la part no conservadora també estan propers a la recta. La dispersió és baixa.

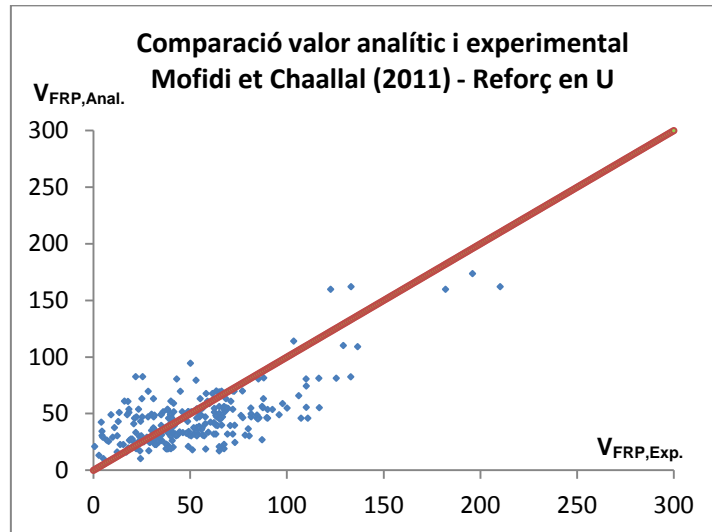


Figura 4.34 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per a Mofidi et Chaallal (2011)

ALZATE (2012)

La gràfica de dispersió d'aquesta formulació (Figura 4.35) presenta els assajos repartits aproximadament a parts iguals entre la zona segura i la insegura però propers a la recta. La dispersió dels resultats es reduïda i similar a la de Mofidi et Chaallal (2011).

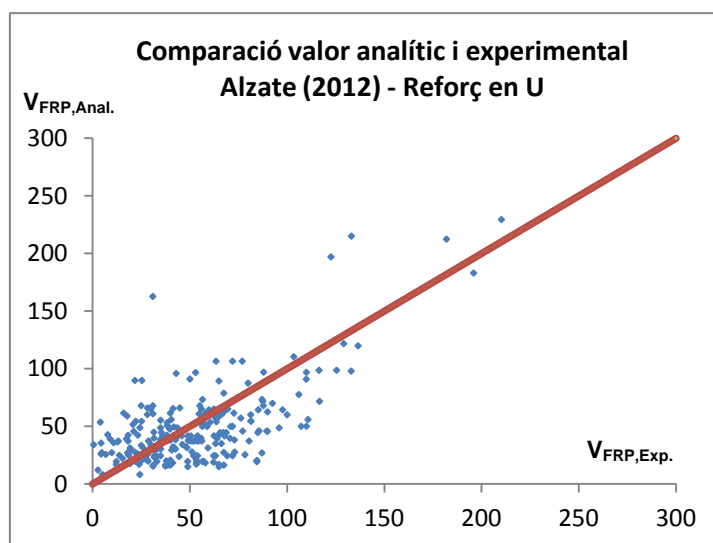


Figura 4.35 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en U per a Alzate (2012)

4.4.1.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)

En el cas de bigues reforçades en forma de U (U) (Taula 4.9) els valors associats a l'aplicació del Mètode de Collins (2001) estan compresos entre 504 (Mofidi et Chaallal, 2011) i 1809 (CIDAR, 2006). Considerant que com menor és la puntuació, més fiable és la recomanació, es pot afirmar que les formulacions que més s'ajusten als valors experimentals de bigues reforçades en U són Mofidi et Chaallal (2011) i Alzate (2012). Cal destacar que en aquest cas la puntuació de la teoria de Mofidi et Chaallal (2011) és comparable amb la resta de formulacions ja que el nombre d'assajos que hi intervenen és el mateix en analitzar els reforços en U (U). La recomanació que menys s'ajusta als resultats experimentals és el CIDAR (2006) amb una puntuació de 1809. La resta de formulacions es troben al voltant de 800 de puntuació.

Taula 4.9 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues reforçades en forma de U (U)

| Interval | FIB Bulletin 14 | ACI 440.2R-08 | TR55 | CNR-DT200 | CAN/CSA-S6-06 | CIDAR | Mofidi et Chaallal | Alzate |
|-------------------|-----------------|---------------|------------|------------|---------------|-------------|--------------------|------------|
| $x < 0,5$ | 74 | 48 | 42 | 33 | 42 | 154 | 28 | 33 |
| $0,5 < x < 0,65$ | 50 | 28 | 16 | 25 | 23 | 38 | 10 | 14 |
| $0,65 < x < 0,85$ | 42 | 38 | 34 | 33 | 31 | 34 | 25 | 25 |
| $0,85 < x < 1,30$ | 65 | 71 | 49 | 39 | 52 | 19 | 89 | 86 |
| $1,30 < x < 2$ | 20 | 55 | 51 | 47 | 44 | 7 | 80 | 61 |
| $x > 2$ | 3 | 14 | 62 | 77 | 62 | 2 | 22 | 35 |
| Núm. assajos | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| PUNTUACIÓ | 1100 | 779 | 743 | 722 | 765 | 1809 | 504 | 581 |

En la següent figura (Figura 4.36), es poden veure el nombre d'assajos en cada interval de cada formulació.

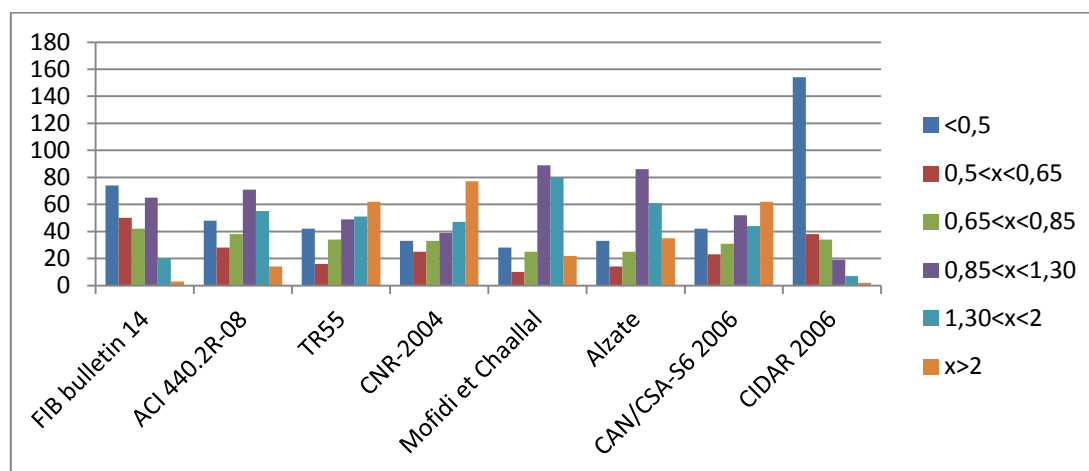


Figura 4.36 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues reforçades en forma d'U (U)

4.4.2 ANÀLISI DE LES BIGUES REFORÇADES EN S

El nombre d'assajos considerats és de 107 per a totes les recomanacions. Les mitjanes de les formulacions estan al voltant del 1,3 amb un màxim de 2,33 (CNR-DT200, 2004) i un mínim de 0,27 (CIDAR, 2006). La mediana varia entre 0,19 (CIDAR, 2006) i 1,69 (CNR-DT200, 2004). La diferència entre la mitjana i la mediana dona la idea de la heterogeneïtat dels resultats de l'aplicació de cada formulació i l'ajust a la recta $V_{FRP,Exp.}=V_{FRP,Anal.}$. La desviació típica varia entre 0,22 (CIDAR, 2006) i 2,15 (CNR-DT200, 2004). El coeficient de variació està comprès entre 0,59 (FIB Bulletin 14, 2001) i 1,48 (ACI 440.2R-08, 2008), amb el que s'observa que la mostra menys dispersa és la que té el mínim coeficient de variació (veure Taula 4.10)

Taula 4.10 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada

| Model de càlcul | Mínim | Màxim | Mitjana | Mediana | Desviació típica | Coefficient de variació | Núm. Assajos |
|---------------------------|-------|-------|---------|---------|------------------|-------------------------|--------------|
| FIB Bulletin 14 | 0,04 | 1,59 | 0,59 | 0,54 | 0,35 | 0,59 | 107 |
| ACI 440.2R-08 | 0,10 | 12,89 | 1,04 | 0,55 | 1,54 | 1,48 | 107 |
| TR55 | 0,11 | 3,07 | 0,66 | 0,52 | 0,52 | 0,79 | 107 |
| CNR-DT200 | 0,21 | 14,17 | 2,33 | 1,69 | 2,15 | 0,92 | 107 |
| CAN/CSA-S6-06 | 0,13 | 12,89 | 1,07 | 0,56 | 1,54 | 1,44 | 107 |
| CIDAR | 0,05 | 1,19 | 0,27 | 0,19 | 0,22 | 0,82 | 107 |
| Mofidi et Chaallal | 0,13 | 4,14 | 1,34 | 1,27 | 0,80 | 0,60 | 107 |
| Alzate | 0,05 | 4,70 | 1,20 | 1,09 | 0,76 | 0,63 | 107 |

Com en els anteriors casos però considerant únicament els assajos de bigues de formigó reforçades lateralment (S) s'obtenen els següents gràfics de dispersió que representen els resultats de cada assaig i per a cada recomanació o guia de disseny de reforços amb laminats de FRP considerades. El sistema de representació emprat és el mateix que els anteriors.

FIB BULLETIN 14 (2001)

La gràfica de dispersió del FIB Bulletin 14 (2001) per a bigues reforçades lateralment (S) (Figura 4.37) presenta la majoria d'assajos en la zona no conservadora, sent uns 15 els que estan en la zona conservadora. El comportament és anàleg a la majoria de formulacions excepte CNR-DT200 (2004), Mofidi et Chaallal (2011) i Alzate (2012). La dispersió és important en la zona no conservadora amb una distància a la recta bisectriu considerable.

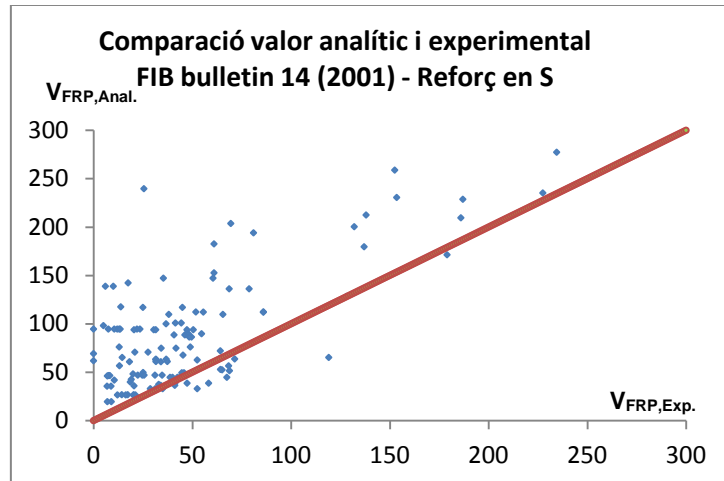


Figura 4.37 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al FIB Bulletin 14 (2001)

ACI 440.2R-08 (2008)

La gràfica de dispersió per a l'ACI 440.2R-08 (2008) (Figura 4.38) presenta un comportament similar als altres on la majoria d'assajos estan situats a la part del gràfic on el valor analític és major que l'experimental. Els que estan a la part conservadora estan propers a la recta amb poca dispersió mentre que els que estan a la part no conservadora s'allunyen de la recta.

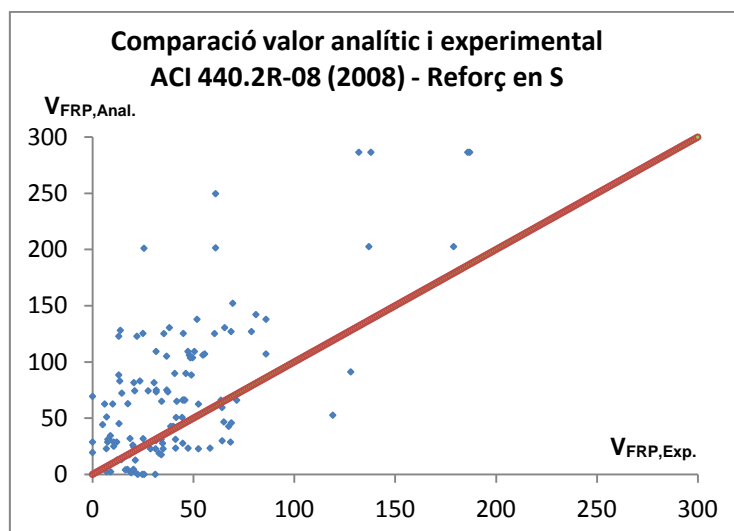


Figura 4.38 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al ACI 440.2R-08 (2008)

TR55 (2001)

El comportament de la formulació TR55 (2001) és anàleg a les anteriors recomanacions (Figura 4.39). Presenta la major part dels resultats en la zona pel costat de la inseguretat i a una distància considerable de la recta. La formulació no s'ajusta a la recta.

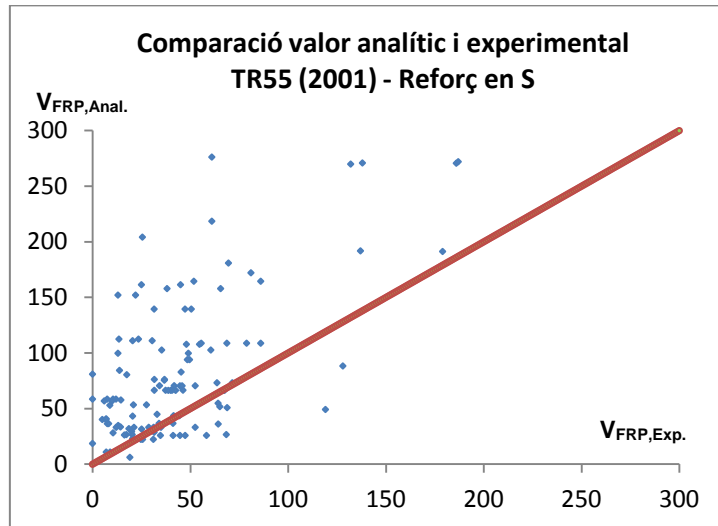


Figura 4.39 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al TR55 (2001)

CNR-DT200 (2004)

A diferència dels altres models de predicció i igual que els models de Mofidi et Chaallal (2011) i Alzate (2012), el CNR-DT200 (2004) (Figura 4.40) presenta la majoria dels assajos en la part conservadora. La dispersió d'aquests és baixa i els pocs assajos situats en la zona no conservadora estan molt propers a la recta. És un model conservador.

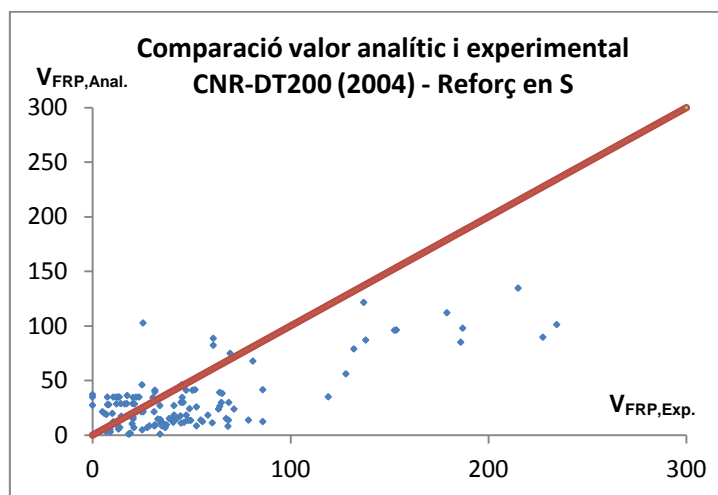


Figura 4.40 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al CNR-DT200 (2004)

CAN/CSA-S6-06 (2006)

El cas de la recomanació CAN/CSA-S6-06 (2006) (Figura 4.41) la major part dels assajos estan en la zona insegura de la gràfica, separats de la recta i amb una gran dispersió. Els pocs assajos que estan en la zona conservadora, estan propers a la recta i amb una dispersió important.

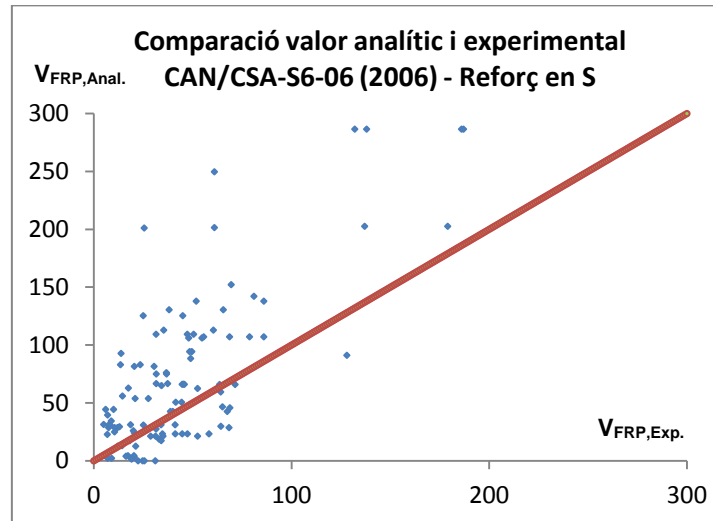


Figura 4.41 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al CAN/CSA-S6-06 (2006)

CIDAR (2006)

En el cas de la recomanació CIDAR (2006) hi ha menys de 5 assajos en la part conservadora del gràfic (Figura 4.42). La resta estan en la part no conservadora. La dispersió és considerable i estan allunyats de la recta. És un model que està pel costat de la inseguretats.

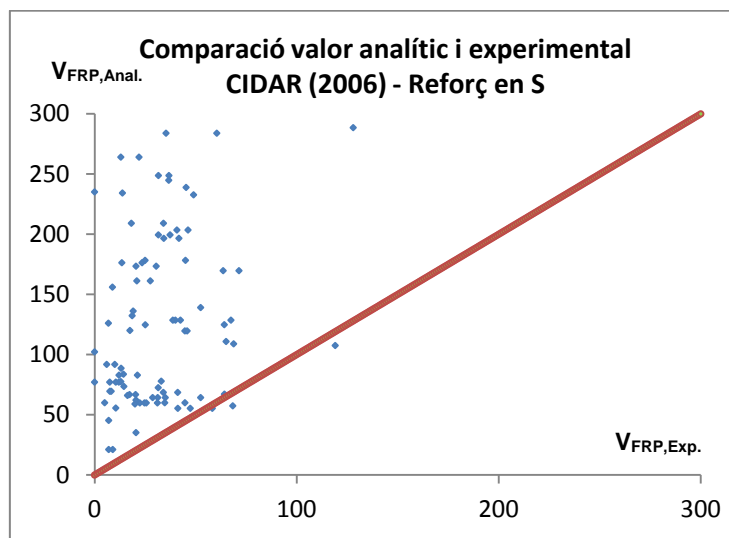


Figura 4.42 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per al CIDAR (2006)

MOFIDI ET CHAALLAL (2011)

El model de predicció de Mofidi et Chaallal (2011) per a bigues reforçades lateralment (S) també presenta la majoria dels assajos en la zona conservadora i els que estan en la zona no conservadora estan propers a la recta i tenen poca dispersió. Els assajos que estan a la zona segura i propers a la recta amb poca dispersió (Figura 4.43).

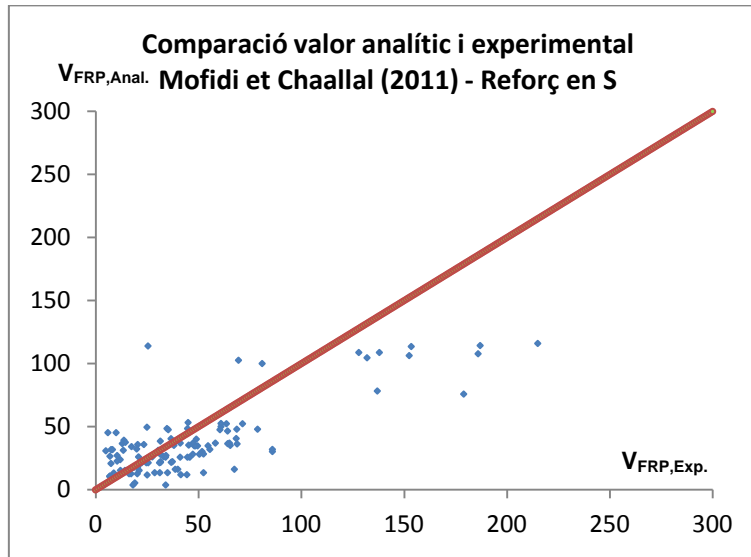


Figura 4.43 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per a Mofidi et Chaallal (2011)

ALZATE (2012)

Com en els dos casos anteriors, aquesta formulació (Figura 4.44) també té la major part dels assajos en la zona conservadora de la gràfica. Té més dispersió que les formulacions del CNR-DT200 (2004) i de Mofidi et Chaallal (2011) i la distància a la recta és major que en el cas de Mofidi et Chaallal (2011) i similar a la del CNR-DT200 (2004).

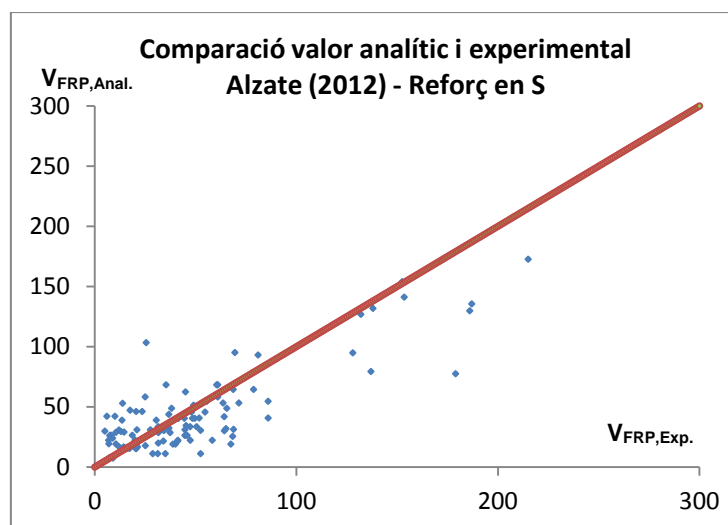


Figura 4.44 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en S per a Alzate (2012)

4.4.2.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)

En el cas de bigues reforçades lateralment (S) (Taula 4.11) els valors associats a l'aplicació del Mètode de Collins (2001) estan compresos entre 261 (Mofidi et Chaallal, 2011) i 956 (CIDAR, 2006). Considerant que com menor és la puntuació, més fiable és la recomanació, es pot afirmar que les formulacions que més s'ajusten als valors experimentals de bigues de secció rectangular són el CNR-DT200 (2004), Mofidi et Chaallal (2011) i Alzate (2012). Cal destacar que en aquest cas la puntuació de la teoria de Mofidi et Chaallal (2011) és comparable amb la resta de formulacions ja que el nombre d'assajos que hi intervenen és el mateix en analitzar els reforços laterals (S). La recomanació que menys s'ajusta als resultats experimentals és el CIDAR (2006) amb una puntuació de 956. La resta de formulacions es troben al voltant de 600 de puntuació.

Taula 4.11 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues reforçades lateralment (S)

| Interval | FIB Bulletin 14 | ACI 440.2R-08 | TR55 | CNR-DT200 | CAN/CSA-S6-06 | CIDAR | Mofidi et Chaallal | Alzate |
|------------------|-----------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|--------------------|------------|
| <0,5 | 47 | 47 | 48 | 13 | 43 | 91 | 14 | 20 |
| 0,5<x<0,65 | 21 | 12 | 21 | 5 | 15 | 8 | 7 | 3 |
| 0,65<x<0,85 | 12 | 11 | 11 | 8 | 12 | 3 | 11 | 8 |
| 0,85<x<1,30 | 22 | 13 | 15 | 13 | 11 | 4 | 24 | 37 |
| 1,30<x<2 | 4 | 11 | 8 | 18 | 13 | 0 | 36 | 23 |
| x>2 | 0 | 12 | 3 | 49 | 12 | 0 | 14 | 15 |
| Núm. assajos | 107 | 107 | 107 | 107 | 107 | 107 | 107 | 107 |
| PUNTUACIÓ | 603 | 587 | 621 | 287 | 566 | 956 | 261 | 284 |

En la següent figura (Figura 4.45), es poden veure el nombre d'assajos en cada interval de cada formulació.

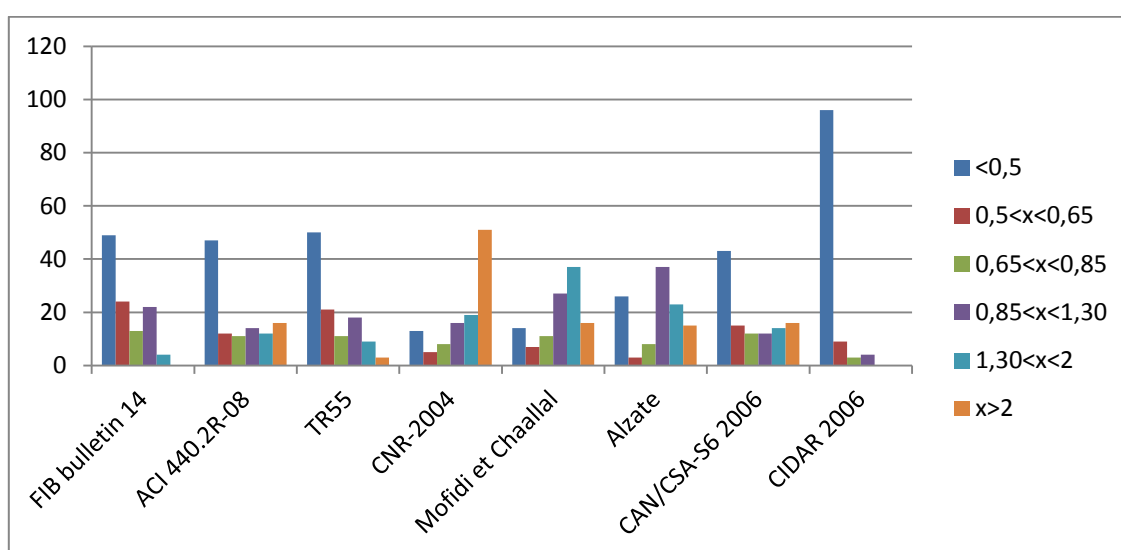


Figura 4.45 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues reforçades lateralment (S)

4.4.3 ANÀLISI DE LES BIGUES REFORÇADES EN W

El nombre d'assajos considerats és de 114 per a totes les recomanacions excepte per a Mofidi et Chaallal (2011) que no presenta formulació per a aquesta configuració de reforç. Les mitjanes de les formulacions estan al voltant del 2 amb un màxim de 2,77 (TR55, 2001) i un mínim de 0,95 (FIB Bulletin 14, 2001). La mediana varia entre 0,94 (FIB Bulletin 14, 2001) i 2,24 (CNR-DT200, 2004). La diferència entre la mitjana i la mediana dóna la idea de la heterogeneïtat dels resultats de l'aplicació de cada formulació i l'ajust a la recta $V_{FRP,Exp.}=V_{FRP,Anal.}$. La desviació típica està entre 0,56 (FIB Bulletin 14, 2001) i 2,90 (TR55, 2001 i CAN/CAS-S6-06, 2006). El coeficient de variació està comprès entre 0,59 (FIB Bulletin 14, 2001) i 1,06 (CAN/CSA-S6-06, 2006), amb el que s'observa que la mostra menys dispersa és la que té el mínim coeficient de variació (veure Taula 4.12).

Taula 4.12 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada

| Model de càlcul | Mínim | Màxim | Mitjana | Mediana | Desviació típica | Coefficient de variació | Núm. Assajos |
|---------------------------|-------|-------|---------|---------|------------------|-------------------------|--------------|
| FIB Bulletin 14 | 0,05 | 2,53 | 0,95 | 0,94 | 0,56 | 0,59 | 114 |
| ACI 440.2R-08 | 0,07 | 14,04 | 2,60 | 1,70 | 2,74 | 1,05 | 114 |
| TR55 | 0,09 | 14,04 | 2,77 | 1,99 | 2,90 | 1,05 | 114 |
| CNR-DT200 | 0,13 | 12,19 | 2,57 | 2,24 | 2,03 | 0,79 | 114 |
| CAN/CSA-S6-06 | 0,09 | 14,04 | 2,75 | 1,91 | 2,90 | 1,06 | 114 |
| CIDAR | 0,05 | 6,36 | 1,41 | 1,25 | 1,15 | 0,82 | 114 |
| Mofidi et Chaallal | - | - | - | - | - | - | - |
| Alzate | 0,13 | 8,88 | 1,28 | 0,98 | 1,29 | 1,01 | 114 |

Com en els anteriors casos però considerant únicament els assajos de bigues de formigó reforçades amb embolcall complet (W) s'obtenen els següents gràfics de dispersió que representen els resultats de cada assaig i per a cada recomanació o guia de disseny de reforços amb laminats de FRP considerades. El sistema de representació emprat és el mateix que els anteriors.

FIB BULLETIN 14 (2001)

El model de predicció del FIB Bulletin 14 presenta una gràfica de dispersió on es veu que els resultats es distribueixen a banda i banda de la recta amb poca dispersió i poc separats de la recta (Figura 4.46). És un model conservador i amb un bon ajust de la recta.

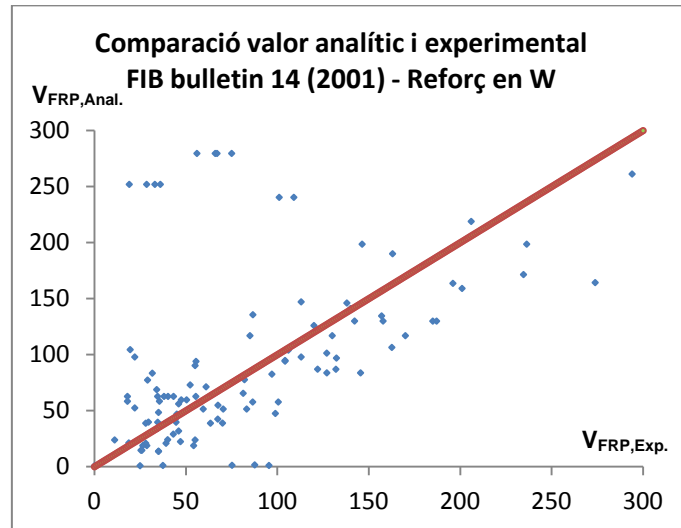


Figura 4.46 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al FIB Bulletin 14 (2001)

ACI 440.2R-08 (2008)

En aquesta formulació la gràfica de dispersió presenta la major part dels assajos a la part conservadora de la gràfica separats de la recta i amb força dispersió (Figura 4.47). Hi ha pocs assajos en la zona no conservadora i es troben separats de la recta i dispersos. És un model conservador.

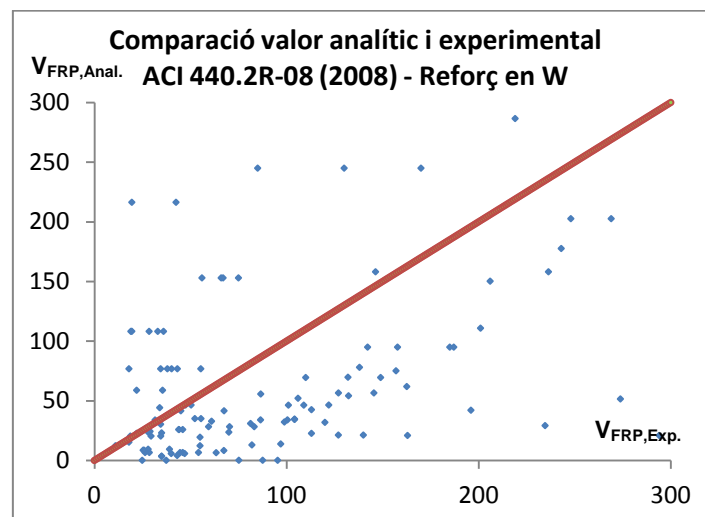


Figura 4.47 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al ACI 440.2R-08 (2008)

TR55 (2001)

La gràfica de dispersió del TR55 (2001) (Figura 4.48) també presenta la major part dels assajos en la zona conservadora separats de la recta i amb força dispersió. A mesura que augmenta la contribució del reforç es separen més de la recta. En la zona no conservadora els assajos estan relativament a prop de la recta però al augmentar la contribució també es separen i augmenta la dispersió. És un model conservador.

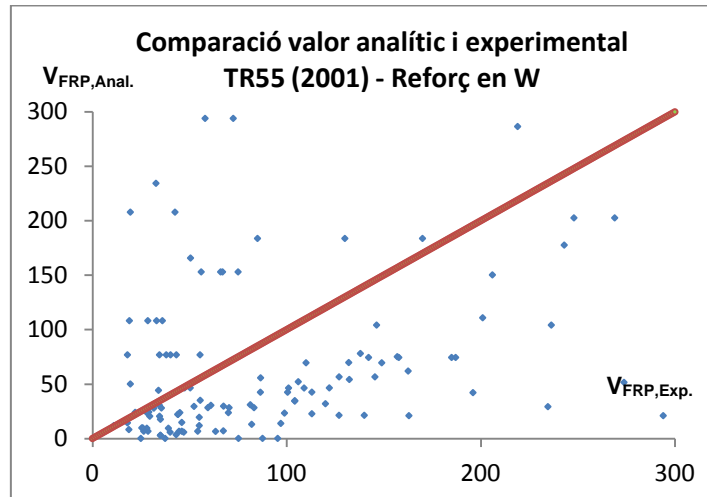


Figura 4.48 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al TR55 (2001)

CNR-DT200 (2004)

En aquesta formulació, la gràfica de dispersió presenta pràcticament tots els seus assajos en la zona conservadora, distanciant-se més i augmentant la dispersió a mesura que augmenta la contribució del reforç (Figura 4.49). La dispersió en la zona no conservadora és elevada. Es tracta també d'una formulació conservadora.

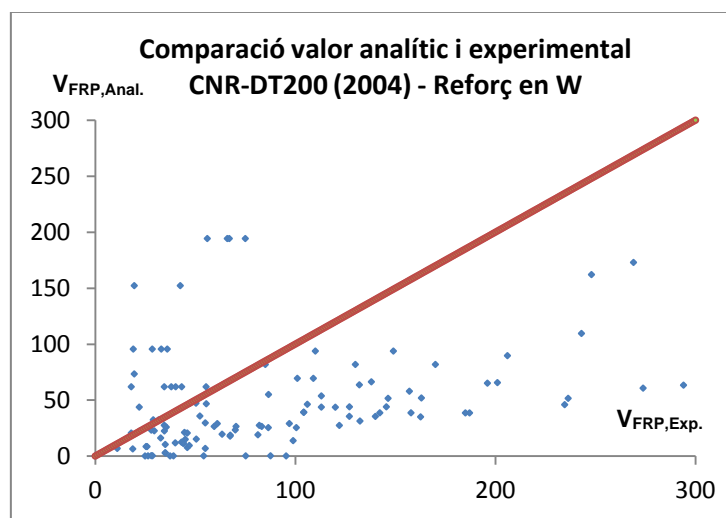


Figura 4.49 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al CNR-DT200 (2004)

CAN/CSA-S6-06 (2006)

La gràfica de dispersió d'aquesta recomanació (Figura 4.50), al estar basada en la formulació de l'ACI 440.2R-08 (2008). La major part dels assajos estan a la zona conservadora de la gràfica augmentant la separació respecte la recta i la dispersió a mesura que augmenta la contribució. Els assajos de la zona no conservadora són pocs i estan allunyats de la recta bisectriu. La dispersió en la zona insegura és elevada. Es tracta d'un model conservador.

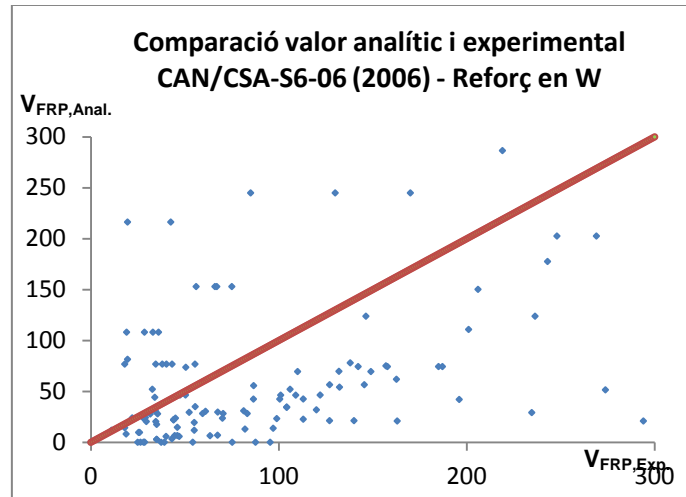


Figura 4.50 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per a CAN/CSA-S6-06 (2006)

CIDAR (2006)

En la gràfica de dispersió del model de predicció del CIDAR (2006) (Figura 4.51) la major part dels assajos es troba en la zona conservadora amb poca dispersió i a prop de la recta augmentant la separació de la recta a mesura que augmenta la contribució del reforç. En la zona no conservadora els valors s'ajusten a la recta amb gran dispersió. És un model conservador.

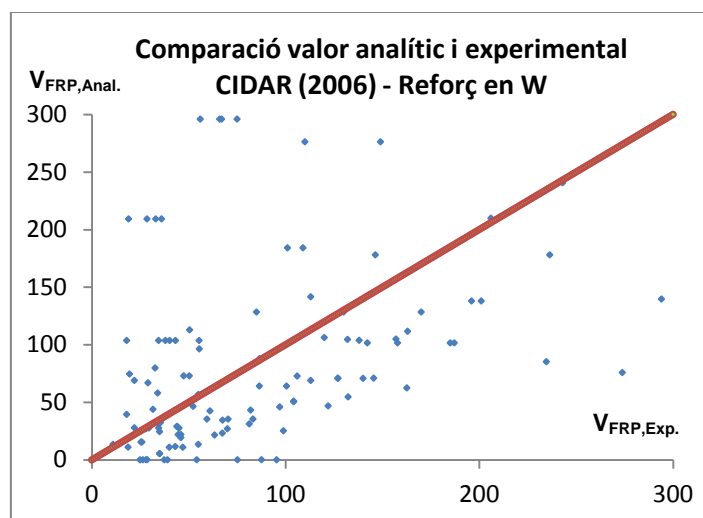


Figura 4.51 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per al CIDAR (2006)

MOFIDI ET CHAALLAL (2011)

Mofidi et Chaallal (2011) no té un model de predicció de la contribució del reforç de làmines de FRP en el cas d'embolcall complert (W).

ALZATE (2012)

La gràfica de dispersió de la formulació d'Alzate (2012) (Figura 4.52) presenta els resultats repartits a la par entre la zona segura i insegura. En la zona no conservadora estan relativament a prop de la recta. Per contra, en la zona conservadora es troben distribuïts bastant dispersos i separats de la recta. L'ajust a la recta és bo.

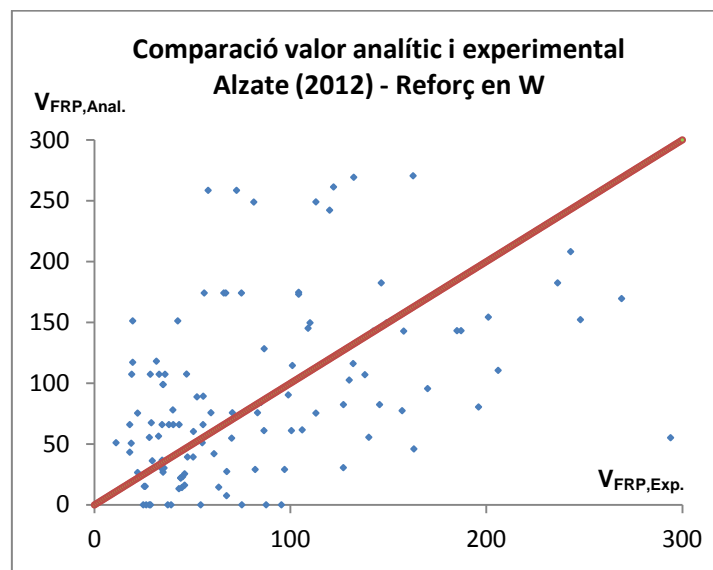


Figura 4.52 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per a Alzate (2012)

4.4.3.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS (2001)

En el cas de bigues reforçades en embolcall complert (W) (Taula 4.13) els valors associats a l'aplicació del Mètode de Collins (2001) estan compreses entre 315 (CNR-DT200, 2004) i 431 (Alzate, 2012). Considerant que com menor és la puntuació, més fiable és la recomanació, es pot afirmar que les formulacions que més s'ajusten als valors experimentals de bigues de secció rectangular són CNR-DT200 (2004) i CAN/CSA-S6-06 (2006) tot i que el TR55 (2001) i l'ACI 440.2R-08 (2008) també tenen una fiabilitat similar. La teoria de Mofidi et Chaallal (2011) no s'ha estudiat perquè no té un model de predicció per a aquest tipus de reforç en embolcall complert (W). La recomanació que menys s'ajusta als resultats experimentals és l'Alzate (2012) amb una puntuació de 431. Totes les formulacions es troben al voltant de 360 de puntuació.

Taula 4.13 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues reforçades en embolcall complet (W)

| Interval | FIB Bulletin 14 | ACI 440.2R-08 | TR55 | CNR-DT200 | CAN/CSA-S6-06 | CIDAR | Mofidi et Chaallal | Alzate |
|------------------|-----------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|--------------------|------------|
| <0,5 | 27 | 20 | 19 | 14 | 17 | 25 | - | 30 |
| 0,5<x<0,65 | 11 | 4 | 2 | 5 | 4 | 6 | - | 11 |
| 0,65<x<0,85 | 13 | 4 | 4 | 1 | 5 | 12 | - | 12 |
| 0,85<x<1,30 | 33 | 15 | 15 | 13 | 15 | 15 | - | 24 |
| 1,30<x<2 | 25 | 23 | 18 | 14 | 20 | 31 | - | 22 |
| x>2 | 5 | 48 | 56 | 67 | 53 | 25 | - | 15 |
| Núm. assajos | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | - | 114 |
| PUNTUACIÓ | 386 | 347 | 338 | 315 | 326 | 385 | - | 431 |

En la següent figura (Figura 4.53), es poden veure el nombre d'assajos en cada interval de cada formulació.

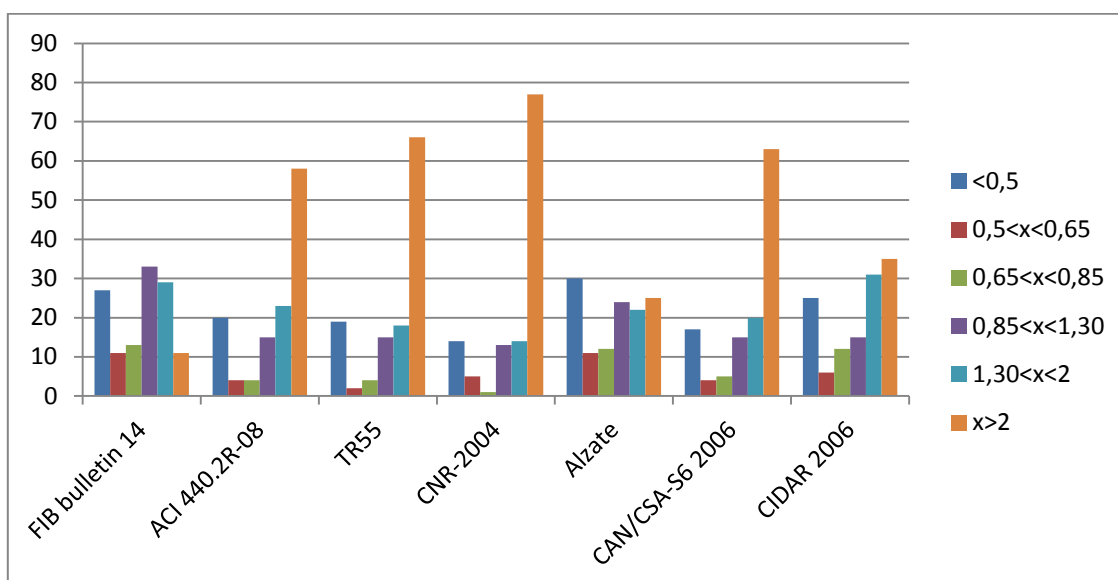


Figura 4.53 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues reforçades en embolcall complet (W)

5. PROPOSTA DE FORMULACIÓ

Després de realitzar l'anàlisi comparatiu entre les diverses formulacions existents, es pot observar com la formulació de Mofidi et Chaallal (2011) és la que millor ajusta els valors analítics de la contribució a tallant del reforç als valors obtinguts dels assajos de les campanyes experimentals de la base de dades recopilada. No obstant, aquesta formulació no disposa de model de càlcul teòric per als reforços amb laminats de FRP amb la configuració d'embolcall complet (W). Per aquesta raó, es proposa la següent formulació i s'analitza el seu comportament per tal de completar el model de predicció de Mofidi et Chaallal (2011).

5.1 PROPOSTA DE FORMULACIÓ BASADA EN MOFIDI ET CHAALLAL (2011)

El càlcul de la contribució a tallant dels reforços d'embolcall complet (W) és:

$$V_{fd} = 2 \cdot \beta_c \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe} \cdot E_f \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f \cdot \frac{w_f}{s_f}$$

On:

ε_{fe} :

$$\varepsilon_{fe} = 0.31 \cdot \beta_c \cdot \beta_L \cdot \beta_w \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{t_f \cdot E_f}}$$

Sent:

β_c :

- En cas de reforç en U (U):

$$\beta_c = \frac{0.6}{\sqrt{\rho_f \cdot E_f + \rho_s \cdot E_s}}$$

sent ρ_f la quantia de reforç.

- En cas de reforç en els laterals (S):

$$\beta_c = \frac{0.43}{\sqrt{\rho_f \cdot E_f + \rho_s \cdot E_s}}$$

sent ρ_f la quantia de reforç.

- En cas de reforç en embolcallat complet (W):

$$\beta_c = \frac{0.75}{\sqrt{\rho_f \cdot E_f + \rho_s \cdot E_s}}$$

β_L :

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{si } \lambda \geq 1 \\ (2 - \lambda) \cdot \lambda & \text{si } \lambda < 1 \end{cases}$$

On:

λ :

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e}$$

Amb:

L_{max} :

- En cas de reforç en U (U):

$$L_{max} = \frac{d_f}{\sin \beta}$$

- En cas de reforç als laterals (S):

$$L_{max} = \frac{d_f}{2 \cdot \sin \beta}$$

- En cas de reforç d'embolcall complet (W):

$$L_{max} = \frac{h_f}{\sin \beta}$$

L_e :

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ct}}}$$

Sent:

$$f_{ct} = 0.53 \cdot \sqrt{f'_c}$$

β_w :

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_f/s_f}{1 + w_f/s_f}}$$

5.2 ANÀLISI DE LA FORMULACIÓ PROPOSADA

Per tal de veure el comportament de la nova formulació, aquesta s'analitza a continuació de la mateixa manera que s'han analitzat les formulacions anteriors d'aquest treball per tal de comparar-les. La formulació proposta modifica el model de predicció de Mofidi et Chaallal (2011) incorporant una formulació per als reforços d'embolcall complet, per tant, només es compara aquesta part de la formulació.

Comparant els anterior resultats amb la nova formulació (Taula 5.1), es veu com els resultats del model de predicció proposat s'ajusten més als resultats experimentals que el CNR-DT200 (2004). La mediana s'apropa més a la unitat, és a dir, la mostra està més centrada. Per altra banda també millora la mitjana que es tradueix en que la mostra no és molt dispersa. També ho confirmen el coeficient de variació i la desviació típica baixos respecte a les altres formulacions.

Taula 5.1 Indicadors estadístics de cada formulació estudiada

| Model de càlcul | Mínim | Màxim | Mitjana | Mediana | Desviació típica | Coeficient de variació | Núm. Assajos |
|-------------------------------------|-------|-------|---------|---------|------------------|------------------------|--------------|
| FIB Bulletin 14 | 0,05 | 2,53 | 0,95 | 0,94 | 0,56 | 0,59 | 114 |
| ACI 440.2R-08 | 0,07 | 14,04 | 2,60 | 1,70 | 2,74 | 1,05 | 114 |
| TR55 | 0,09 | 14,04 | 2,77 | 1,99 | 2,90 | 1,05 | 114 |
| CNR-DT200 | 0,13 | 12,19 | 2,57 | 2,24 | 2,03 | 0,79 | 114 |
| CAN/CSA-S6-06 | 0,09 | 14,04 | 2,75 | 1,91 | 2,90 | 1,06 | 114 |
| CIDAR | 0,05 | 6,36 | 1,41 | 1,25 | 1,15 | 0,82 | 114 |
| Mofidi et Chaallal | - | - | - | - | - | - | - |
| Alzate | 0,13 | 8,88 | 1,28 | 0,98 | 1,29 | 1,01 | 114 |
| Talens - Mofidi et. Chaallal | 0,23 | 4,27 | 1,33 | 1,11 | 0,79 | 0,60 | 114 |

S'ha representat també la gràfica de dispersió del model de càlcul proposat (Figura 5.1). El model de predicció proposat, presenta una gràfica de dispersió on es veu que els resultats es distribueixen a banda i banda de la recta entre els 0 i els 150 kN de contribució del reforç amb poca dispersió i poc separats de la recta. Fora d'aquest interval els resultats s'allunyen més de la recta i estan més dispersats però en la zona conservadora la major part d'ells. En comparació amb els altres models, aquest presenta menor dispersió i els assajos de la zona no conservadora es troben més a prop de la recta. L'ajust de la recta és més bondadós en aquest mètode i no és excessivament conservador.

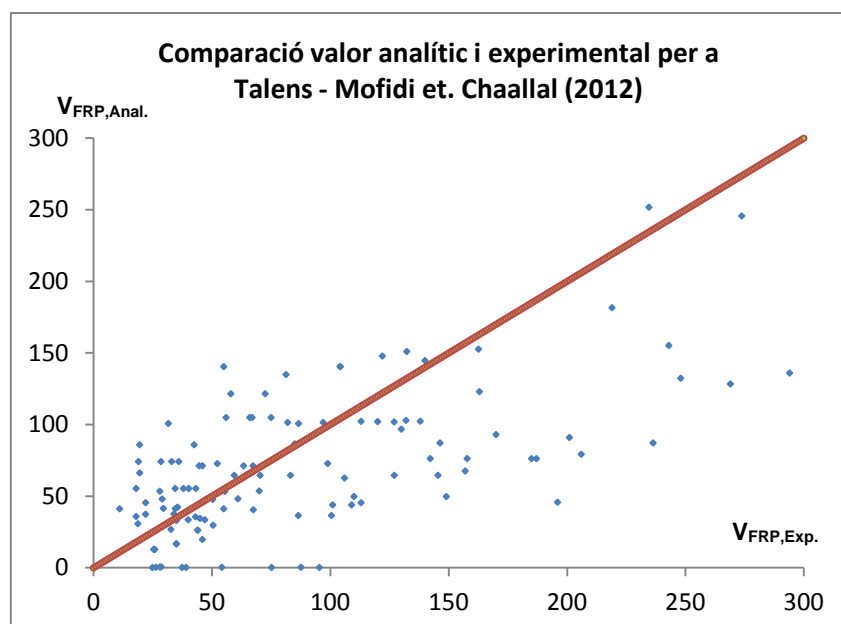


Figura 5.1 Gràfica de dispersió per a bigues reforçades en W per a Mofidi et Chaallal - Talens (2012)

5.2.1 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE COLLINS

Aplicant el mètode de "*Demerit Point Classification*" de Collins (2001) a la proposta formulada i comparant el resultat amb els de les anteriors formulacions (Taula 5.2), es pot veure que la valoració és de 292, inferior a la menor de les anteriors, CNR-DT200 (2004), de 315. Tenint en compte que en el mètode de Collins (2001), el resultat menor significa un millor ajust de la formulació, es pot afirmar que aquesta proposta és raonable i adequada per al càlcul de la contribució a tallant del laminat de FRP en reforços d'embolcall complet (W).

Taula 5.2 Resultats del Mètode de Collins (2001) aplicat a l'anàlisi dels assajos de bigues reforçades en embolcall complet (W)

| Interval | FIB Bulletin 14 | ACI 440.2R-08 | TR55 | CNR-DT200 | CAN/CSA-S6-06 | CIDAR | Mofidi et Chaallal | Alzate | Mofidi et Chaallal - Talens |
|------------------|-----------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|--------------------|------------|-----------------------------|
| <0,5 | 27 | 20 | 19 | 14 | 17 | 25 | - | 30 | 13 |
| 0,5<x<0,65 | 11 | 4 | 2 | 5 | 4 | 6 | - | 11 | 13 |
| 0,65<x<0,85 | 13 | 4 | 4 | 1 | 5 | 12 | - | 12 | 12 |
| 0,85<x<1,30 | 33 | 15 | 15 | 13 | 15 | 15 | - | 24 | 29 |
| 1,30<x<2 | 25 | 23 | 18 | 14 | 20 | 31 | - | 22 | 21 |
| x>2 | 5 | 48 | 56 | 67 | 53 | 25 | - | 15 | 26 |
| Núm. assajos | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | - | 114 | 114 |
| PUNTUACIÓ | 386 | 347 | 338 | 315 | 326 | 385 | - | 451 | 292 |

En la següent figura (Figura 5.2), es poden veure el nombre d'assajos en cada interval de cada formulació incloent-hi la nova formulació Mofidi et Chaallal - Talens (2012).

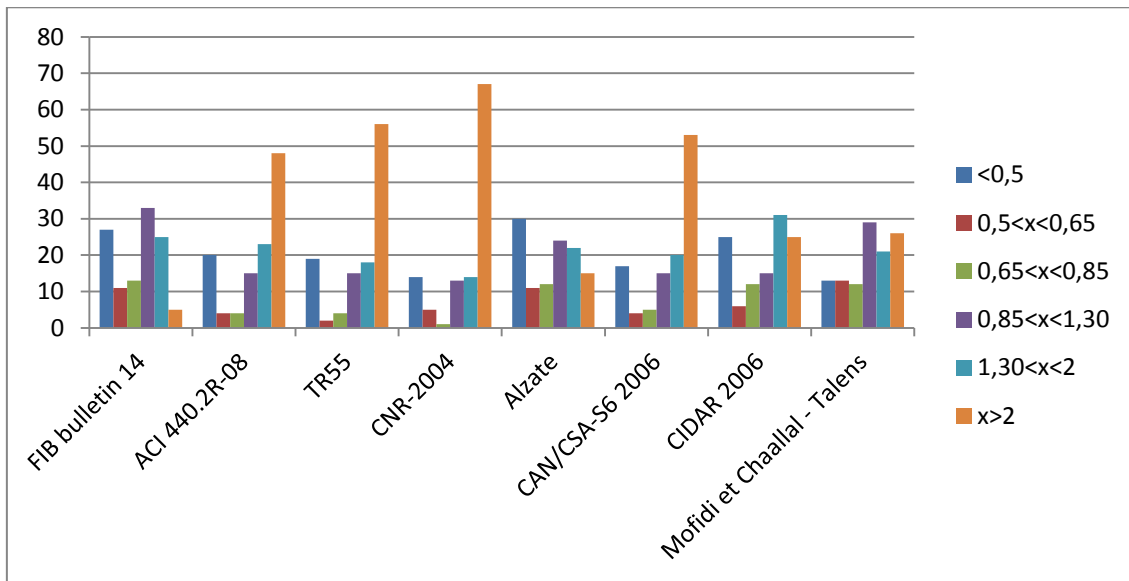


Figura 5.2 Resultats del mètode de Collins (2001) en l'anàlisi de bigues reforçades en embolcall complet (W) amb Mofidi et Chaallal - Talens (2012)

6. CONCLUSIONS

El principal objectiu de la present tesina, que és comparar les formulacions existents que avaluen la contribució del laminat de FRP a tallant, i els objectius específics exposats en el Capítol 1 s'han aconseguit satisfactòriament. A continuació es presenten les conclusions adquirides mitjançant la realització d'aquest estudi.

En primer lloc, la utilització dels laminats de polímers reforçats amb fibres (FRP) ha donat solució a la problemàtica associada als reforços estructurals tradicionals com el recrescut de secció en millorar la relació resistència/pes, rigidesa/pes, resistència a la corrosió. A més, la seva adaptabilitat permet una aplicació senzilla, ràpida i amb pocs mitjans auxiliars a qualsevol superfície. Aquestes característiques han fet que, a principis dels 90, s'iniciés la investigació en el reforç amb laminats de FRP tant a flexió com a tallant i com a confinament.

Tot i les seves excel·lents propietats, no està ben definit el model de càlcul de la contribució del reforç a tallant amb FRP. Existeixen diverses formulacions per a calcular l'augment de resistència a tallant que consideren la contribució a tallant del laminat com un sumand més en la resistència a tallant, no obstant, no consideren la possible interacció entre el reforç i els mecanismes resistents de la biga sense reforçar.

La principal diferència entre les formulacions és, bàsicament, el càlcul de la deformació última del laminat de FRP ja que, en el reforç a tallant amb aquest sistema, es produeix un desenganxat del laminat de FRP ("*peeling*" o "*debonding*") que no permet que aquest desenvolupi totes les seves capacitats provocant divergències entre els resultats analítics i els experimentals. De totes les formulacions existents s'han escollit les del FIB Bulletin 14 (2001), de l'ACI 440.2R-08 (2008), del TR55 (2001), del CNR-DT200 (2004), del CAN/CSA-S6 (2006), del CIDAR (2006) i les de Mofidi et Chaallal (2011) i Alzate (2012) per, mitjançant la base de dades recopilada (Annex 1), analitzar el seu comportament. Aquestes basen les seves prediccions en les característiques del reforç (mòdul de deformació, deformació/resistència última, espessor, amplada, separació i inclinació) i en les característiques del formigó (resistència característica, mitjana a compressió o a tracció).

En segon lloc, amb la base de dades es pot veure que els assajos realitzats fins ara s'han fet amb bigues de formigó armat de secció rectangular (354) i de secció en T (112), a escala real amb formigons de resistència normal i alta, armades a flexió i algunes a tallant i reforçades amb laminat de FRP. De tots els assajos recopilats, se n'ha descartat 178 per no ser útils per l'estudi al no disposar de totes les dades.

A partir de la base de dades, es pot veure que les fibres més utilitzades en el reforç d'estructures són les fibres de carboni tant en seccions rectangulars (96%) com en seccions en T (93%). El tipus de reforç, en forma de U (U), lateral (S) i d'embolcall complet (W) s'utilitzen en la mateixa mesura en les bigues de secció rectangular (41%, 30% i 29% respectivament) mentre que en les bigues de secció en T no s'utilitza pràcticament el reforç en embolcall complet (W) i el més utilitzat és el reforç en forma d'U (U) amb un 94%. El nombre de reforços continus i discontinus és aproximadament el mateix.

En tercer lloc, després de realitzar l'anàlisi estadístic es pot afirmar que els indicadors més representatius de l'ajust i la dispersió de les prediccions de cada recomanació o formulació als valors experimentals són la mediana i la desviació típica. La diferència entre la mitjana i la mediana es pot prendre com la heterogeneïtat dels resultats que s'obtenen en l'aplicació d'una o altra formulació. Veient el mínim i màxim de cada formulació es pot observar com formulacions com l'ACI 440.2R-08 (2008), el TR55 (2001), CNR-DT200 (2004) o CAN/CSA-S6-06 (2006) tenen un ajust pitjor al tenir més distància entre aquests paràmetres.

Després d'aplicar el mètode del "Demerit Points Classification" a les formulacions estudiades, la que té el millor model de predicció són el CNR-DT200 (2004), Mofidi et Chaallal (2011) i l'Alzate (2012). Si observem els resultats segons el tipus de secció, per a seccions rectangulars les formulacions més adequades són el CNR-DT200 (2004), Mofidi et Chaallal (2011) i l'Alzate (2012) mentre que per a bigues de secció en T la més adequada és la de Mofidi et Chaallal (2011) juntament amb l'Alzate (2012). No obstant, l'anàlisi segons la configuració del reforç dóna uns resultats més ajustats per a cada formulació.

Les més adequades són: per als reforços en forma de U (U) la de Mofidi et Chaallal (2011), per als reforços laterals (S) la de Mofidi et Chaallal (2011) i per als reforços d'embolcall complet (W), la formulació proposta en l'anterior capítol i el CNR-DT200 (2004). La resta de formulacions també tenen un bon comportament en els reforços d'embolcall complet (W) degut a què en aquest tipus de reforç no es produeix el despeniment prematur del laminat de FRP.

De tots els models de càlcul estudiats, la formulació més insegura és el CIDAR (2006).

En base a la formulació de Mofidi et Chaallal (2011) es fa una proposta per incloure la configuració de reforç en embolcallat complet.

Línies d'investigació futures

Vistos els resultats i les conclusions, i després de la realització d'aquest treball es proposen a continuació les línies de futures investigacions per a seguir desenvolupant el coneixement dels reforços amb laminats de FRP.

- Es necessiten més campanyes experimentals per tal de definir bé els mecanismes resistents i veure si es produeixen interaccions entre els reforços d'armadura passiva i FRP així com si es modifiquen aspectes relacionats amb la resistència última del formigó a tallant.
- S'ha d'estudiar les formulacions en el cas de bigues de formigó armat de secció en T ja que els models de predicció actuals estan desenvolupats per a bigues rectangulars i les contribucions del reforç reals són molt superiors a les que s'obtenen analíticament.

- Donat que el desenganxat del laminat de FRP ("*peeling*" o "*debonding*") és un aspecte fonamental, s'ha d'investigar en formulacions més detallades relacionades amb aquest fenomen per tal d'obtenir un bon model de predicció.

REFERÈNCIES

ACI Committee 440. *ACI 440.2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Country Club Drive: American Concrete Institute, 2008.

Alzate A. *Análisis de los modelos de comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con polímeros armados con fibras (FRP). Validación y calibración experimental*. Tesi doctoral, UPM, Departamento de mecánica de los medios continuos y teoría de estructuras, Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción - CSIC, Departamento de construcción, 2012 [UPM].

Alzate, A.; Arteaga, A.; de Diego, A.; Cisneros, D.; Perera, R. Experimental study on reinforced concrete beams externally shear strengthened with CFRP sheets. *Construction and Building Materials*. June 9, 2011.

Barros, J.; Lima, J.; Meneguetti, V.; Dias, S.; dos Santos, L. DABASUM: Database for FRP-based shear strengthening of reinforced concrete beams, University of Minho. A: *DABASUM*. [en línia]. Azurém Guimarães: University of Minho, 2011. [Consulta: 1 setembre 2011 a 16 maig 2012]. Disponible a: <<http://dabasum.civil.uminho.pt>>.

Bousselham, A.; Chaallal, O. Maximum Shear Strength of RC Beams Retrofitted in Shear with FRP Composites. *Journal of Composites for construction*. Juliol-Agost 2009, pàgs. 302-314.

Canadian Standards Association. *CAN/CSA-s6-06: Canadian Highway Bridge Code*. Toronto: Canadian Standards Association, 2008.

Carolin, A. *Carbon Fiber Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements*. Phd thesis. Luleå University of Technology, 2003 [Luleå University of Technology].

Casas, J. R. *Reforç d'estructures amb pretensat i materials compostos*. 1a ed. Barcelona. [Consulta: 16 maig 2012]. Disponible a: <http://atenea.upc.edu/moodle/file.php?file=%2F45636%2FReparacio_pretensat_exterior_i_FRP.pdf>

CEN, AENOR. *Eurocódigo 2: Cálculo de estructuras de Hormigón, Parte 1: Reglas generales y reglas para edificios*. Código de diseño. Madrid: AENOR, 2010.

Chen, J.; Teng, J. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction Building Materials*. 2003, 17(1): pàgs. 27-41.

CIDAR. *Design guideline for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: Beams and slabs. Draft 3 - Submitted to standards*. Australia: CIDAR/CBIR, 2006.

CNR - Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. *CNR-DT200: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*. Rome: CNR, 2004.

Collins, M.P. *Evaluation of shear design procedures for concrete structures*. Canada: CSA Technical Committee on Reinforced Concrete Design, 2001.

Colotti, V.; Swamy, R.N. Unified analytical approach for determining shear capacity of RC beams strengthened with FRP. *Engineering Structures*. 2011, número 33, pàgs. 827-842.

Comisión Permanente del Hormigón, Ministerio de Fomento. *Instrucción de Hormigón Estructural*. Madrid: Centro de publicaciones, 2008.

Concrete Society. *TR55: Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials: a review*. London: Elsevier Science Ltd., 2001.

Fédération Internationale du Béton (FIB). *FIB Bulletin 14 Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. Lausanne: Sprint-Digital-Druck Stuttgart, 2001.

Feldman, D. *Polymeric building materials*. UK: Elsevier Science Publishers Ltd., 1989.

Holloway, L.C., and Leeming, M.B. *Strengthening of Reinforced Concrete Structures using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering*. England: Ed. Cambridge, 1999.

Hostalet, F. *Sistemas de refuerzo de estructuras* [en línia]. 1a ed. Barcelona. [Consulta: 16 maig 2012]. Disponible a:
<http://atenea.upc.edu/moodle/file.php?file=%2F45636%2FSistemas_de_refuerzo_de_estructuras.pdf>.

Kim, D. H. *Composite structures for civil and architectural engineering*. London: E & FN Spon, 1995.

Leung, C. K. Y.; Asce, M.; Chen, Z.; Lee, S.; Ng, M.; Xu, M.; Tang, J. Effect of Size on the Failure of Geometrically Similar Concrete Beams Strengthened in Shear with FRP Strips. *Journal of Composites for construction*. September-October 2007, pàgs. 487-496.

Mofidi, A. et Chaallal O. *Shear strengthening of RC beams with EB FRP: Influencing Factors an Conceptual Model*. Montreal: ASCE, 2011.

Perera, R.; Vique, J.; Arteaga, A.; de Diego, A. Diseño a cortante de vigas de hormigón armado con armadura de acero y armadura externa de FRP mediante el mecanismo de bielas y tirantes y algoritmos genéticos. *Hormigón y acero*. 2009, volum 60, nº 254, pàgs. 65-83.

Sas, G. *FRP shear strengthening of RC beams and walls*. Licentiate Thesis, Luleå University of Technology, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering. Division of Structural Engineering. 2008.

Täljsten, B. *Plate bonding, Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics*. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering. 1994.

ANNEX 1: BASE DE DADES

ANNEX 1: BASE DE DADES

A.1 INTRODUCCIÓ

En aquest annex es presenta la base de dades recopilada per tal de verificar la fiabilitat dels models teòrics escollits. Com s'ha dit en l'apartat 1.2 Objectius i a l'apartat 3 Base de dades, en aquesta tesina s'ha recopilat una base de dades d'assajos de bigues reforçades amb laminats de FRP de diversos grups d'investigadors per a comparar els models teòrics escollits i remarcar els seus aspectes favorables i desfavorables.

La base de dades recopilada es resumeix en els següents apartats de l'Annex 1.

A.2 BASE DE DADES

A.2.1 CRITERI DE SELECCIÓ

Per tal d'incloure un assaig en la base de dades, els requeriments són:

- Bigues de formigó armat.
- Secció rectangular o en T.
- Reforçada mitjançant l'adhesió de laminats de FRP.
- Simplement recolzada.
- Assajada amb una o dues càrregues.

Una vegada recopilats els assajos que complien les condicions anteriors, s'han descartat tots aquells dels quals la informació era insuficient per a obtenir la predicció d'alguna formulació o bé el resultat era excessivament gran o petit comparat amb la resta d'assajos.

A.2.2 DADES RECOPILADES

La taula A.1 exposa detalls de la recopilació de dades de geometria, propietats del material i la configuració de càrrega. Les unitats es troben especificades en cada columna. Els assajos es troben ordenats cronològicament de més antic a més recent.

En les columnes 1 i 2 es mostra l'autor de l'assaig i el nom de l'assaig respectivament

La geometria de cada assaig es resumeix en les columnes 3 a 9 on, respectivament, es mostren l'ample de l'ànima (b), el cantell total (h), l'àrea d'armadura de tracció (A_s), l'àrea d'armadura de compressió (A'_s), l'àrea d'armadura de tallant (A_{st}) i la separació dels estreps (s_t).

Les propietats dels materials venen donades en les columnes 10 a 14 on s'exposen la resistència mitjana a compressió del formigó (f_{cm}), la resistència mitjana a tracció del formigó (f_{ctm}), el mòdul d'elasticitat del formigó (E_c), la resistència mitjana de l'acer (f_{ym}) i el modul d'elasticitat de l'acer (E_s).

Les propietats del reforç extern amb laminats de FRP es donen en les columnes 15 a 20 on es pot veure el tipus de fibres (FRP on: fibres de carboni: CFRP; fibres de vidre: GFRP i fibres d'aramida: AFRP). També es mostra la configuració del reforç (Conf.), l'espessor del reforç (t_f), l'amplada del laminat (w_f , on C significa reforç continu), el mòdul d'elasticitat del laminat (E_f) i la deformació última del laminat (ϵ_{fu}) respectivament.

Les propietats de la configuració de càrrega i els resultats dels assajos es presenten en les columnes 21 a 23 on s'exposen la llum de la biga (L), la longitud a tallant de la biga (L_v) i la contribució a tallant del laminat de FRP ($V_{f,exp}$)

Finalment es mostra també els modes de ruptura de cada assaig, els quals poden ser:

- SR: Ruptura a tallant amb ruptura del laminat de FRP
- SD: Ruptura a tallant amb desprendiment prematur del laminat de FRP.
- S: Ruptura a tallant sense definir si és SR o SD.
- N/D: Dades del mode de ruptura no disponibles.

Les dades que surten indicades amb un guió ("-") són dades no trobades en les referències.

A.2.3 REFERÈNCIES

Tots els assajos d'aquesta base de dades han estat referenciats per altres autors la referència dels quals es troba en l'apartat Referències d'aquesta tesina excepte els assajos de Pujol et al. (2011) que encara s'estan realitzant més i es publicaran amb posterioritat a aquesta tesina. Aquests són:

Assajos referenciats per Cas, G. (2008):

- Uji (1992)
- AlSulaimani et al. (1994)
- Satto et al. (1996)
- Araki et al. (1997)
- Funakawa et al. (1997)
- Miyauchi et al. (1997)
- Kamiharako et al. (1997) assajos 2, 4, 7 i 8.
- Ono et al. (1997)
- Satto et al. (1997)
- Taerwe et al. (1997)
- Täljsten et al. (1997)
- Umezu (1997) assajos CS1, CS2 i CS3.
- Chaallal et al. (1998)
- Mitsui et al. (1998)
- Khalifa et al. (1999)
- Khalifa and Nanni (2000)
- Deniaud and Cheng (2001)

- Annaiah et al. (2001)
- Park et al. (2001)
- Li et al. (2002)
- Chaallal et al. (2002)
- Khalifa and Nanni (2002)
- Pellegrino and Modena (2002)
- Moren (2002)
- Beber (2003)
- Deniaud and Cheng (2003)
- Diagana et al. (2003)
- Täljsten (2003)
- Wong & Vecchio (2003)
- Alagusundaramoorthy et al. (2003)
- Abdel-Jaber et al (2003)
- Zhang (2003)
- Allam & Ebeido (2003)
- Adhikary et al. (2004)
- Feng Xue Song et al. (2004)
- Ianni Ruberto & Im Bimbo(2004)
- Carolin and Täljsten (2005)
- Miyajima et al. (2005)
- Monti and Liota (2005)
- Zhang & Hsu (2005)
- Qu et al. (2005)
- Cao et al. (2005)
- Safaan (2006)
- Bouselham and Chaallal (2006)
- De Lorenzis and Rizzo (2006)
- Dias and Barros (2006)
- Pellegrino and Modena (2006)
- Kotynia (2007)
- Grande et al. (2007)
- Zhang et al. (2007)
- Mosallam (2007)
- Dias and Barros (2008)
- Jayaprakash et al. (2008)
- El Hacha and Wagner (2009)
- Siddiqui (2009)
- Gamino et al. (2010)
- Dias and Barros (2011)

Assajos referenciats per Perera, R.; Vique, J.; Arteaga, A.; de Diego, A. (2009)

- Kamiharako (1997) assaig 3
- Umezu (1997) assajos AS1 a AS3, AB1 a AB5 i AB8 a AB11.
- Norris (2006)

Assajos referenciats per Chen, J. i Teng, J. (2003)

- Kachalev DI & Barnes SH (2003)
- Kage, T.; Abe, M.; Lee, HS. & Tomosawa (2003)

Assajos referenciats per Alzate, A. (2011)

- Alzate et al. (2011)

Assajos referenciats per Leung et al.(2007)

- Leung et al. (2011) assajos SB-U1, SB-U2,SB-F1 i SB-F2.

Assajos referenciats per Colotti et al. (2011)

- Leung et al. (2011) assajos LB-U1, LB-U2, MB-U1, MB-U2, LB-F1 i LB-F2.

Taula A.1 Base de dades

| Nom de l'autor de la campanya experimental (1) | Nom de l'assaig (2) | Geometria de la biga de formigó armat | | | | | | | Propietats dels materials | | | | | Propietats del reforç amb FRP | | | | | Configuració de la càrrega | | | | | |
|--|---------------------|---------------------------------------|----------|----------|------------------------------------|-------------------------------------|---|-----------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|----------|-----------------------|----------------------------|---------|----|
| | | Tipus Secció (3) | b mm (4) | h mm (5) | A _s mm ² (6) | A' _s mm ² (7) | A _{st} mm ² /mm (8) | st mm (9) | f _{cm} MPa (10) | f _{cm} MPa (11) | E _c MPa (12) | f _{tm} MPa (13) | E _s GPa (14) | FRP (15) | Conf. (16) | t _r mm (17) | w _r mm (18) | E _r GPa (19) | ε _{ru} mε (20) | L m (21) | L _y m (22) | V _{teop.} kW (23) | MR (24) | |
| Uji | 3 | R | 100 | 200 | 402.12 | - | - | - | 24.60 | 2.54 | 31450 | - | 200 | CFRP | W | 0.097 | C | 230 | 11.50 | - | - | - | 34.5 | SR |
| | 5 | R | 100 | 200 | 402.12 | - | - | - | 24.60 | 2.54 | 31450 | - | 200 | CFRP | S | 0.097 | C | 230 | 11.50 | - | - | - | 20.5 | SD |
| | 6 | R | 100 | 200 | 402.12 | - | - | - | 27.40 | 2.75 | 32230 | - | 200 | CFRP | S | 0.137 | C | 230 | 11.50 | - | - | - | 33.0 | SD |
| | 7 | R | 100 | 200 | 402.12 | - | - | - | 27.40 | 2.75 | 32230 | - | 200 | CFRP | S | 0.194 | C | 230 | 11.50 | - | - | - | 20.5 | SD |
| | SO | R | 150 | 150 | 339.29 | - | 0.283 | 200 | 29.88 | 2.91 | 32880 | 450 | 200 | GFRP | S | 3.000 | 3.000 | 13 | 15.00 | 1.20 | 0.40 | 4.0 | 7.0 | SD |
| | SP | R | 150 | 150 | 339.29 | - | 0.283 | 200 | 29.88 | 2.91 | 32880 | 450 | 200 | GFRP | S | 3.000 | 3.000 | 13 | 15.00 | 1.20 | 0.40 | 9.0 | 7.0 | SD |
| | S2 | R | 200 | 300 | 1701.17 | - | - | - | 45.20 | 3.89 | 36630 | - | 180 | CFRP | S | 0.240 | 0.240 | 230 | 15.10 | 1.60 | 0.70 | 34.2 | SD | |
| S3 | R | 200 | 300 | 1701.17 | - | - | - | 41.30 | 3.65 | 35750 | - | 180 | CFRP | U | 0.240 | 0.240 | 230 | 15.10 | 1.60 | 0.70 | 55.0 | SD | | |
| S4 | R | 200 | 300 | 1701.17 | - | - | - | 37.50 | 3.41 | 34830 | - | 180 | CFRP | S | 0.120 | C | 230 | 15.10 | 1.60 | 0.70 | 32.1 | SD | | |
| S5 | R | 200 | 300 | 1701.17 | - | - | - | 39.70 | 3.55 | 35370 | - | 180 | CFRP | U | 0.120 | C | 230 | 15.10 | 1.60 | 0.70 | 53.1 | SD | | |
| Araki et al. | CF045 | R | 200 | 400 | 1900.66 | - | 0.329 | 172 | 24.50 | 2.55 | 31420 | 344 | 196 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 235 | 16.30 | 1.20 | 0.52 | 17.5 | SR | |
| | CF064 | R | 200 | 400 | 1900.66 | - | 0.329 | 172 | 24.60 | 2.56 | 31450 | 344 | 196 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 235 | 16.32 | 1.20 | 0.52 | 30.5 | SR | |
| | CF097 | R | 200 | 400 | 1900.66 | - | 0.329 | 172 | 24.90 | 2.58 | 31530 | 344 | 196 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 235 | 16.32 | 1.20 | 0.52 | 53.0 | SR | |
| | CF131 | R | 200 | 400 | 1900.66 | - | 0.329 | 172 | 25.10 | 2.59 | 31590 | 344 | 196 | CFRP | W | 0.111 | C | 235 | 16.32 | 1.20 | 0.52 | 78.5 | SR | |
| | CF243 | R | 200 | 400 | 1900.66 | - | 0.329 | 172 | 25.30 | 2.61 | 31650 | 344 | 196 | CFRP | W | 0.222 | C | 235 | 16.32 | 1.20 | 0.52 | 103.0 | N/D | |
| | AF060 | R | 200 | 400 | 1900.66 | - | 0.329 | 172 | 25.50 | 2.62 | 31700 | 344 | 196 | AFRP | W | 0.144 | 0.144 | 85 | 32.13 | 1.20 | 0.52 | 18.0 | SR | |
| | AF090 | R | 200 | 400 | 1900.66 | - | 0.329 | 172 | 25.60 | 2.63 | 31730 | 344 | 196 | AFRP | W | 0.144 | 0.144 | 85 | 32.13 | 1.20 | 0.52 | 29.0 | SR | |
| | AF120 | R | 200 | 400 | 1900.66 | - | 0.329 | 172 | 25.80 | 2.64 | 31790 | 344 | 196 | AFRP | W | 0.144 | 0.144 | 85 | 32.13 | 1.20 | 0.52 | 55.5 | N/D | |
| | S2 | R | 600 | 600 | 11259.47 | - | 0.827 | 190 | 30.64 | 2.70 | 33020 | 337 | 201 | CFRP | W | 0.167 | C | 240 | 15.98 | 3.55 | 1.28 | 243.0 | SR | |
| | S3 | R | 600 | 600 | 11259.47 | - | 0.827 | 190 | 30.64 | 2.70 | 33020 | 337 | 201 | CFRP | W | 0.334 | C | 240 | 15.98 | 3.55 | 1.28 | 346.5 | SR | |
| | S4 | R | 600 | 600 | 11259.47 | - | 0.827 | 190 | 30.64 | 2.70 | 33020 | 337 | 201 | CFRP | W | 0.501 | C | 240 | 15.98 | 3.55 | 1.28 | 493.5 | SR | |
| | Miyauchi et al. | 1/5Z-3 | R | 125 | 200 | - | - | - | 35.10 | 3.23 | 34170 | - | - | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 230 | 15.10 | - | - | 0.50 | 18.8 | SR |
| 1/2Z-3 | | R | 125 | 200 | - | - | - | 32.40 | 3.07 | 33520 | - | - | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 230 | 15.10 | - | - | 0.50 | 29.5 | SR | |
| 1/LZ-2 | | R | 125 | 200 | - | - | - | 39.10 | 3.03 | 33370 | - | - | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 230 | 15.10 | - | - | 0.33 | 34.6 | SR | |
| Kamiharako et al. | 2 | R | 250 | 500 | 2268.23 | - | - | 32.60 | 3.08 | 33570 | - | 210 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 244 | 16.35 | 2.00 | 1.00 | 104.2 | SD | | |
| | 3 | R | 250 | 500 | 2268.23 | - | - | 32.60 | 3.08 | 33570 | - | 210 | AFRP | W | 0.169 | 0.169 | 90 | 32.44 | 2.00 | 1.00 | 55.0 | SD | | |
| | 4 | R | 250 | 500 | 2268.23 | - | - | 32.60 | 3.08 | 33570 | - | 210 | CFRP | W | 0.110 | 0.110 | 244 | 16.35 | 2.00 | 1.00 | 104.2 | SD | | |
| | 7 | R | 400 | 700 | 3402.34 | - | - | 34.60 | 3.20 | 34050 | 500 | 210 | CFRP | W | 0.110 | 0.110 | 244 | 16.35 | 2.00 | 1.00 | 273.8 | SD | | |
| | 8 | R | 400 | 700 | 3402.34 | - | - | 34.60 | 3.20 | 34050 | - | 210 | AFRP | W | 0.169 | 0.169 | 90 | 32.44 | 2.00 | 1.00 | 234.6 | SD | | |
| | S82 | R | 300 | 300 | 1134.11 | - | 0.226 | 250 | 24.00 | 2.52 | 31270 | 292 | 206 | CFRP | W | 0.110 | C | 248 | 13.83 | 1.55 | 0.40 | 22.0 | N/D | |
| | S83 | R | 300 | 300 | 1134.11 | - | 0.226 | 250 | 24.00 | 2.52 | 31270 | 292 | 206 | CFRP | W | 0.110 | C | 248 | 13.83 | 1.55 | 0.40 | 113.0 | N/D | |
| | S84 | R | 300 | 300 | 1134.11 | - | 0.226 | 250 | 24.00 | 2.52 | 31270 | 292 | 206 | CFRP | W | 0.220 | C | 248 | 13.83 | 1.55 | 0.40 | 201.0 | N/D | |
| Satto et al. | S85 | R | 300 | 300 | 1134.11 | - | 0.226 | 250 | 24.90 | 2.58 | 31530 | 292 | 206 | CFRP | W | 0.220 | C | 230 | 14.91 | 1.55 | 0.40 | 196.0 | N/D | |
| | Nº 2 | T | 150 | 300 | 1963.50 | - | 1.005 | 100 | 35.70 | 3.29 | 34380 | 386 | 192 | CFRP | U | 0.111 | C | 230 | 15.13 | 1.40 | 0.60 | 24.0 | SD | |
| | Nº 3 | T | 150 | 300 | 1963.50 | - | 1.005 | 100 | 35.30 | 3.26 | 34270 | 386 | 192 | CFRP | U | 0.111 | C | 230 | 15.13 | 1.40 | 0.60 | 65.0 | SD | |
| | B52 | R | 200 | 450 | 1884.96 | - | 0.283 | 200 | 28.36 | 2.78 | 32360 | 559 | 200 | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 280 | 12.50 | 3.80 | 1.25 | 20.6 | SD | |
| | B55 | R | 200 | 450 | 1884.96 | - | 0.094 | 600 | 28.36 | 2.78 | 32360 | 559 | 200 | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 280 | 12.50 | 3.80 | 1.25 | 16.9 | SD | |
| | B56 | R | 200 | 450 | 1884.96 | - | 0.071 | 800 | 28.36 | 2.78 | 32360 | 559 | 200 | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 280 | 12.50 | 3.80 | 1.25 | 15.3 | SD | |
| | B57 | R | 200 | 450 | 1884.96 | - | 0.057 | 1000 | 28.36 | 2.78 | 32360 | 559 | 200 | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 280 | 12.50 | 3.80 | 1.25 | 49.7 | N/D | |
| | S2 | R | 180 | 500 | 1608.50 | - | - | - | 54.73 | 4.45 | 38610 | - | 200 | CFRP | S | 0.600 | C | 101 | 14.41 | 4.00 | 1.20 | 153.5 | SD | |
| S3 | R | 180 | 500 | 1608.50 | - | - | - | 41.09 | 3.64 | 36540 | - | 200 | CFRP | S | 2.000 | C | 49 | 11.78 | 4.00 | 1.20 | 152.5 | SD | | |
| Urmez | AS1 | R | 150 | 300 | 544.38 | - | - | 41.82 | 3.68 | 29000 | 420 | 191 | AFRP | W | 0.044 | C | 73 | 36.99 | 1.90 | 0.80 | 44.6 | SR | | |
| | AS2 | R | 150 | 300 | 544.38 | - | - | 41.82 | 3.68 | 28000 | 420 | 191 | AFRP | W | 0.044 | C | 73 | 36.99 | 1.90 | 0.80 | 43.1 | SR | | |
| | AS3 | R | 150 | 300 | 544.38 | - | - | 43.45 | 3.78 | 28400 | 420 | 191 | AFRP | W | 0.088 | 0.088 | 73 | 36.99 | 1.90 | 0.80 | 67.4 | SR | | |
| | CS1 | R | 300 | 300 | 1088.75 | - | - | 39.55 | 3.54 | 29000 | 420 | 191 | CFRP | W | 0.111 | C | 244 | 17.54 | 1.82 | 0.76 | 87.0 | SR | | |
| | CS2 | R | 300 | 300 | 1088.75 | - | - | 39.55 | 3.54 | 29000 | 421 | 191 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 244 | 17.54 | 1.82 | 0.76 | 32.0 | SR | | |
| | CS3 | R | 150 | 300 | 544.38 | - | - | 43.45 | 3.78 | 28400 | 420 | 191 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 244 | 17.54 | 1.90 | 0.80 | 69.4 | SR | | |
| | AB1 | R | 150 | 300 | 830.95 | - | - | 40.82 | 3.62 | 27000 | 420 | 203 | AFRP | W | 0.044 | C | 73 | 36.99 | 1.82 | 0.76 | 63.4 | SR | | |
| | AB2 | R | 300 | 300 | 1661.90 | - | - | 44.18 | 3.83 | 27100 | 420 | 203 | AFRP | W | 0.044 | C | 73 | 36.99 | 1.82 | 0.76 | 46.0 | SR | | |
| | AB3 | R | 300 | 300 | 1661.90 | - | - | 40.82 | 3.62 | 27000 | 420 | 203 | AFRP | W | 0.088 | C | 73 | 36.99 | 1.82 | 0.76 | 82.0 | SR | | |
| | AB4 | R | 300 | 300 | 1661.90 | - | - | 40.82 | 3.62 | 27000 | 420 | 203 | AFRP | W | 0.088 | C | 73 | 36.99 | 1.82 | 0.76 | 97.0 | SR | | |
| | AB5 | R | 300 | 300 | 1661.90 | - | - | 41.55 | 3.66 | 20700 | 420 | 203 | AFRP | W | 0.144 | C | 73 | 36.99 | 1.82 | 0.76 | 127.0 | SR | | |
| AB8 | R | 600 | 300 | 3323.81 | - | - | 42.27 | 3.71 | 26800 | 420 | 203 | AFRP | W | 0.144 | C | 73 | 36.99 | 1.82 | 0.76 | 140.0 | SR | | | |
| AB9 | R | 450 | 450 | 4021.24 | - | - | 39.00 | 3.50 | 26400 | 420 | 203 | AFRP | W | 0.144 | C | 73 | 36.99 | 2.70 | 1.20 | 163.0 | SR | | | |
| AB10 | R | 550 | 550 | 5629.73 | - | - | 39.00 | 3.50 | 26400 | 420 | 203 | AFRP | W | 0.144 | C | 73 | 36.99 | 3.30 | 1.50 | 294.0 | SR | | | |
| AB11 | R | 550 | 550 | 5629.73 | - | - | 39.64 | 3.54 | 26400 | 420 | 203 | AFRP | W | 0.288 | C | 73 | | | | | | | | |

| Author | Model | R | 150 | 250 | 530.14 | 0.283 | 200 | 34.55 | 3.21 | 26000 | 400 | 200 | CFRP | S | 1.000 | 1.000 | 150 | 16.00 | 1.20 | 0.60 | 34.3 | SD | |
|----------------------------------|----------|-----------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| Chaallal et al. Mitsui et al. | RS90a | R | 150 | 250 | 530.14 | - | 0.283 | 200 | 34.55 | 3.21 | 26000 | 400 | 200 | CFRP | S | 1.000 | 1.000 | 150 | 16.00 | 1.20 | 0.60 | 34.3 | SD |
| | | R | 150 | 250 | - | - | - | - | 28.50 | 2.82 | 32520 | - | 200 | CFRP | W+ | 0.167 | C | 230 | 15.00 | - | 0.25 | 40.2 | SR |
| | | R | 150 | 250 | - | - | - | - | 28.50 | 2.82 | 32520 | - | 200 | CFRP | W+ | 0.167 | C | 230 | 15.00 | - | 0.25 | 43.2 | SR |
| | | R | 150 | 250 | - | - | - | - | 28.50 | 2.82 | 32520 | - | 200 | CFRP | W+ | 0.167 | C | 230 | 15.00 | - | 0.25 | 34.5 | SR |
| | | R | 150 | 250 | - | - | - | - | 28.50 | 2.82 | 32520 | - | 200 | CFRP | W+ | 0.167 | C | 230 | 15.00 | - | 0.35 | 55.4 | SR |
| | | R | 150 | 250 | - | - | - | - | 28.50 | 2.82 | 32520 | - | 200 | CFRP | W+ | 0.167 | C | 230 | 15.00 | - | 0.35 | 38.0 | SR |
| Khalifa et al. | CW2 | R | 150 | 305 | 1608.50 | - | 1.257 | 125 | 27.50 | 2.75 | 25000 | 350 | 200 | CFRP | U+ | 0.330 | C | 228 | 15.35 | 1.83 | 0.92 | 39.0 | N/D |
| | | R | 150 | 305 | 1608.50 | - | - | - | 20.50 | 2.17 | 22000 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 15.35 | 1.83 | 0.92 | 40.0 | SD |
| | | R | 150 | 305 | 1608.50 | - | - | - | 20.50 | 2.17 | 22000 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 15.35 | 1.83 | 0.92 | 65.0 | SD |
| | | T | 150 | 405 | 1231.50 | - | - | - | 35.00 | 3.21 | 28000 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 16.62 | 2.34 | 1.07 | 65.0 | SD |
| | | T | 150 | 405 | 1231.50 | - | - | - | 35.00 | 3.21 | 28000 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 16.62 | 2.34 | 1.07 | 67.5 | SD |
| | | T | 150 | 405 | 1231.50 | - | - | - | 35.00 | 5.21 | 28000 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 16.62 | 2.34 | 1.07 | 72.0 | SD |
| Deniaud and Cheng | T6NS-C45 | T | 150 | 405 | 1231.50 | - | - | - | 35.00 | 6.21 | 28000 | - | 200 | CFRP | S | 0.165 | 0.165 | 228 | 16.62 | 2.34 | 1.07 | 31.5 | SD |
| | | T | 140 | 600 | 2123.72 | - | - | - | 35.50 | 3.28 | 34340 | - | 200 | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 230 | 14.78 | 3.70 | 1.48 | 103.5 | SD |
| | | T | 140 | 600 | 2123.72 | - | 0.141 | 400 | 35.50 | 3.28 | 34340 | 520 | 200 | GFRP | U | 0.110 | 0.110 | 230 | 14.78 | 3.70 | 1.48 | 83.5 | SD |
| | | T | 140 | 600 | 2123.72 | - | 0.141 | 400 | 35.50 | 3.28 | 34340 | 520 | 200 | GFRP | U | 1.800 | C | 18 | 5.99 | 3.70 | 1.48 | 109.9 | SD |
| | | T | 140 | 600 | 2123.72 | - | 0.141 | 400 | 35.50 | 3.28 | 34340 | 520 | 200 | GFRP | U | 2.100 | C | 8 | 15.31 | 3.70 | 1.48 | 129.2 | SD |
| | | T | 152.4 | 381 | 253.35 | - | - | - | 13.68 | 1.63 | 27358 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 16.62 | 2.74 | 0.91 | 25.2 | SD |
| Annaiah et al. | JS2A | T | 152.4 | 381 | 253.35 | - | - | - | 13.68 | 1.63 | 27358 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 16.62 | 2.74 | 0.91 | 22.2 | SD |
| | | T | 152.4 | 381 | 253.35 | - | - | - | 13.68 | 1.63 | 27358 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 16.62 | 2.74 | 0.91 | 81.5 | SD |
| | | T | 152.4 | 381 | 253.35 | - | - | - | 13.68 | 1.63 | 27358 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 16.62 | 2.74 | 0.91 | 63.7 | SD |
| | | T | 152.4 | 381 | 253.35 | - | - | - | 13.68 | 1.63 | 27358 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 228 | 16.62 | 2.74 | 0.91 | 31.1 | SD |
| | | T | 152.4 | 381 | 253.35 | - | - | - | 13.68 | 1.63 | 27358 | - | 200 | CFRP | U | 0.330 | C | 228 | 16.62 | 2.74 | 0.91 | 66.7 | SD |
| | | T | 152.4 | 381 | 253.35 | - | - | - | 13.68 | 1.63 | 27361 | - | 200 | CFRP | U | 0.330 | C | 228 | 16.62 | 2.74 | 0.91 | 54.8 | SD |
| Park et al. | 2 | T | 152.4 | 381 | 253.35 | - | - | - | 13.68 | 1.63 | 27362 | - | 200 | AFRP | U | 0.600 | C | 117 | 12.97 | 2.74 | 0.91 | 57.8 | SD |
| | | T | 152.4 | 381 | 253.35 | - | - | - | 13.68 | 1.63 | 27363 | - | 200 | AFRP | U | 0.600 | C | 117 | 12.97 | 2.74 | 0.91 | 28.2 | SD |
| | | R | 100 | 250 | 422.54 | - | - | - | 17.10 | 2.01 | 29099 | - | 200 | CFRP | U | 0.160 | C | 240 | 14.17 | 1.02 | 0.510 | 38.6 | SD |
| | | R | 100 | 250 | 422.54 | - | - | - | 17.10 | 2.01 | 29099 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 155 | 15.48 | 1.02 | 0.510 | 18.6 | SD |
| | | R | 100 | 300 | 667.59 | - | 0.754 | 75 | 17.10 | 2.01 | 29099 | 325 | 200 | CFRP | S | 0.160 | C | 240 | 14.17 | 1.62 | 0.810 | 38.0 | SD |
| | | T | 100 | 300 | 667.59 | - | 0.754 | 75 | 17.10 | 2.01 | 29099 | 325 | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 155 | 15.48 | 1.62 | 0.810 | 25.1 | SD |
| Li et al. | B80_1 | R | 130 | 300 | 402.12 | - | 0.071 | 800 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 270 | 210 | CFRP | S+ | 1.500 | C | 42 | 11.08 | 2.40 | 0.800 | 12.0 | N/D |
| | | R | 130 | 300 | 402.12 | - | 0.071 | 800 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 270 | 210 | CFRP | S+ | 1.500 | C | 42 | 11.08 | 2.40 | 0.800 | 23.5 | N/D |
| | | R | 130 | 300 | 402.12 | - | 0.141 | 400 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 270 | 210 | CFRP | S+ | 1.500 | C | 42 | 11.08 | 2.40 | 0.800 | 10.5 | N/D |
| | | R | 130 | 300 | 402.12 | - | 0.283 | 200 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 270 | 210 | CFRP | S+ | 1.500 | C | 42 | 11.08 | 2.40 | 0.800 | 7.5 | N/D |
| | | R | 130 | 300 | 402.12 | - | 0.283 | 200 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 270 | 210 | CFRP | S+ | 1.500 | C | 42 | 11.08 | 2.40 | 0.800 | 13.5 | N/D |
| | | R | 130 | 300 | 628.32 | - | 0.071 | 800 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 270 | 210 | CFRP | S+ | 1.500 | C | 42 | 11.08 | 2.40 | 0.800 | 20.5 | N/D |
| | | R | 130 | 300 | 628.32 | - | 0.283 | 200 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 270 | 210 | CFRP | S+ | 1.500 | C | 42 | 11.08 | 2.40 | 0.800 | 30.5 | N/D |
| | | T | 135.13 | 444.5 | 1134.11 | - | 1.015 | 140 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.145 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 | 31.1 | SR |
| | | T | 135.13 | 444.5 | 1134.11 | - | 1.015 | 140 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.290 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 | 53.4 | SR |
| | | T | 135.13 | 444.5 | 1134.11 | - | 0.698 | 203 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.145 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 | 31.1 | SR |
| | | T | 135.13 | 444.5 | 1134.11 | - | 0.698 | 203 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.290 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 | 62.3 | SR |
| | | Chaallal et al. | G5.5_1L | T | 135.13 | 444.5 | 1134.11 | - | 0.698 | 203 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.435 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 |
| T | 135.13 | | | 444.5 | 1134.11 | - | 0.349 | 406 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.145 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 | 40.0 | SR |
| T | 135.13 | | | 444.5 | 1134.11 | - | 0.349 | 406 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.290 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 | 84.5 | SR |
| T | 135.13 | | | 444.5 | 1134.11 | - | 0.233 | 610 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.145 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 | 53.4 | SR |
| T | 135.13 | | | 444.5 | 1134.11 | - | 0.233 | 610 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.290 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 | 48.9 | SR |
| T | 135.13 | | | 444.5 | 1134.11 | - | 0.233 | 610 | 29.91 | 2.89 | 32810 | 441 | 203 | CFRP | U+ | 0.435 | C | 231 | 15.80 | 4.27 | 0.686 | 53.4 | SR |
| R | 150 | | | 305 | 1608.50 | - | 1.257 | 125 | 19.30 | 2.08 | 29400 | 350 | 200 | CFRP | U+ | 0.330 | C | 228 | 16.62 | 1.83 | 0.760 | 50.5 | N/D |
| R | 150 | | | 305 | 1608.50 | - | 1.257 | 125 | 19.30 | 2.08 | 29400 | 350 | 200 | CFRP | U+ | 0.330 | C | 228 | 16.62 | 2.24 | 1.020 | 80.0 | N/D |
| R | 150 | | | 305 | 1608.50 | - | - | - | 27.50 | 2.75 | 32250 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | 0.165 | 228 | 16.62 | 1.83 | 0.760 | 54.0 | SD |
| R | 150 | | | 305 | 1608.50 | - | - | - | 27.50 | 2.75 | 32250 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | 0.165 | 228 | 16.62 | 1.83 | 0.760 | 56.5 | SD |
| R | 150 | | | 305 | 1608.50 | - | - | - | 27.50 | 2.75 | 32250 | - | 200 | CFRP | U+ | 0.330 | C | 228 | 16.62 | 1.83 | 0.760 | 67.5 | SD |
| R | 150 | | | 305 | 1608.50 | - | - | - | 27.50 | 2.75 | 32250 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | 0.165 | 228 | 16.62 | 1.83 | 0.760 | 92.5 | N/D |
| Khalifa and Nanni | SW3-2 | R | 150 | 305 | 1608.50 | - | - | - | 27.50 | 2.75 | 32250 | - | 200 | CFRP | U | 0.165 | 0.165 | 228 | 16.62 | 2.24 | 1.020 | 90.0 | N/D |
| | | R | 150 | 300 | - | - | - | - | 19.20 | 2.17 | 29800 | - | 210 | CFRP | S | 0.165 | C | 234 | 19.22 | 2.00 | 0.750 | 45.3 | SD |
| | | R | 150 | 300 | - | - | - | - | 19.20 | 2.17 | 29800 | - | 210 | CFRP | S | 0.495 | C | 234 | 19.22 | 2.00 | 0.750 | 38.1 | SD |
| | | R | 150 | 300 | - | - | - | - | 19.20 | 2.17 | 29800 | - | 210 | CFRP | S | 0.495 | C | 234 | 19.22 | 2.00 | 0.750 | 65.5 | SD |
| | | R | 150 | 300 | - | - | 0.503 | 200 | 23.10 | 2.45 | 31010 | 548 | 210 | CFRP | S | 0.330 | C | 234 | 19.22 | 2.00 | 0.750 | 31.5 | SD |
| | | R | 150 | 300 | - | - | 0.503 | 200 | 23.10 | 2.45 | 31010 | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-----|-----|---------|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|----|
| Moren | 1_3 | R | 102 | 229 | 530.93 | - | - | - | 34.16 | 3.18 | 28100 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 41.2 | SD | |
| | 1_4 | R | 102 | 229 | 530.93 | - | - | - | 34.16 | 3.18 | 28101 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 47.4 | SD | |
| | 2_3 | R | 102 | 229 | 530.93 | - | - | - | 34.16 | 3.18 | 28102 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 58.3 | SD | |
| | 2_4 | R | 102 | 229 | 530.93 | - | - | - | 34.16 | 3.18 | 28103 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 48.0 | SD | |
| Beber | V9_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 47.2 | SD | |
| | V9_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 47.4 | SD | |
| | V21_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 58.3 | SD | |
| | V10_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 50.6 | SD | |
| | V10_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 49.1 | SD | |
| | V17_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 45.9 | SD | |
| | V11_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 41.5 | SD | |
| | V11_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 67.9 | SD | |
| | V17_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 36.0 | SD | |
| | V12_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 59.4 | SR | |
| | V18_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 70.4 | SR | |
| | V20_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.78 | 2.53 | 0.740 | 83.2 | SR | |
| | V12_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 44.7 | SD | |
| | V14_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 34.7 | SD | |
| | V19_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 61.5 | SD | |
| | V19_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 58.2 | SD | |
| | V13_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 0.111 | C | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 65.1 | SD | | |
| | V13_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 0.111 | C | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 68.8 | SD | | |
| | V15_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | C | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 81.5 | SD | | |
| | V16_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | C | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 55.5 | SD | | |
| | V14_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 0.111 | C | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 71.5 | SD | | |
| | V15_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 0.111 | C | 230 | 14.80 | 2.53 | 0.740 | 63.6 | SD | | |
| V20_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 1.400 | 1.400 | 205 | 12.20 | 2.53 | 0.740 | 86.0 | SD | | | |
| V22_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 1.400 | 1.400 | 205 | 12.20 | 2.53 | 0.740 | 55.6 | SD | | | |
| V21_B | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 1.400 | 1.400 | 205 | 12.20 | 2.53 | 0.740 | 78.8 | SD | | | |
| V22_A | R | 150 | 300 | 1206.37 | - | - | - | 24.50 | 2.55 | 31420 | - | 200 | CFRP | S | 1.400 | 1.400 | 205 | 12.20 | 2.53 | 0.740 | 68.7 | SD | | | |
| Deniaud and Cheng | T452-C45 | T | 140 | 400 | 1061.86 | - | 0.283 | 200 | 29.45 | 2.86 | 32680 | 520 | 200 | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 0.110 | 230 | 14.78 | - | 1.030 | 17.8 | SR | |
| | T454-G90 | T | 140 | 400 | 1061.86 | - | 0.141 | 400 | 30.00 | 2.90 | 32840 | 520 | 200 | GFRP | U | 1.800 | C | 18 | 5.99 | - | 1.030 | 48.7 | SR | SR | |
| | T4N5-G90 | T | 140 | 400 | 1061.86 | - | - | - | 30.18 | 2.91 | 32890 | - | 200 | GFRP | U | 1.800 | C | 18 | 5.99 | - | 1.030 | 43.6 | SR | SR | |
| | T452-G90 | T | 140 | 400 | 1061.86 | - | 0.283 | 200 | 30.27 | 2.92 | 32910 | 520 | 200 | GFRP | U | 1.800 | C | 18 | 5.99 | - | 1.030 | 24.4 | SR | SR | |
| Diagana et al. | T452-Tri | T | 140 | 400 | 1061.86 | - | 0.283 | 200 | 30.36 | 2.92 | 32940 | 520 | 200 | GFRP | U | 2.100 | C | 8 | 15.31 | - | 1.030 | 41.4 | SR | SR | |
| | Pu1 | R | 130 | 450 | 710.00 | - | 0.188 | 300 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 240 | 210 | CFRP | U | 0.430 | 0.430 | 105 | 13.33 | 1.80 | 0.900 | 32.5 | SD | SD | |
| | Pu2 | R | 130 | 450 | 710.00 | - | 0.188 | 300 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 240 | 210 | CFRP | U | 0.430 | 0.430 | 105 | 13.33 | 1.80 | 0.900 | 20.0 | SD | SD | |
| | Pu3 | R | 130 | 450 | 710.00 | - | 0.188 | 300 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 240 | 210 | CFRP | U | 0.430 | 0.430 | 105 | 13.33 | 1.80 | 0.900 | 44.5 | SD | SD | |
| | Pu4 | R | 130 | 450 | 710.00 | - | 0.188 | 300 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 240 | 210 | CFRP | U | 0.430 | 0.430 | 105 | 13.33 | 1.80 | 0.900 | 40.0 | SD | SD | |
| | Pc1 | R | 130 | 450 | 710.00 | - | 0.188 | 300 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 240 | 210 | CFRP | W | 0.430 | 0.430 | 105 | 13.33 | 1.80 | 0.900 | 67.5 | SR | SR | |
| | Pc2 | R | 130 | 450 | 710.00 | - | 0.188 | 300 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 240 | 210 | CFRP | W | 0.430 | 0.430 | 105 | 13.33 | 1.80 | 0.900 | 45.0 | SR | SR | |
| | Pc3 | R | 130 | 450 | 710.00 | - | 0.188 | 300 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 240 | 210 | CFRP | W | 0.430 | 0.430 | 105 | 13.33 | 1.80 | 0.900 | 35.5 | SR | SR | |
| | Pc4 | R | 130 | 450 | 710.00 | - | 0.188 | 300 | 30.00 | 2.90 | 35000 | 240 | 210 | CFRP | W | 0.430 | 0.430 | 105 | 13.33 | 1.80 | 0.900 | 22.0 | SR | SR | |
| | Rc1 | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45100 | 56.73 | 4.57 | 45100 | - | 200 | CFRP | U | 0.110 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 182.0 | N/D | |
| | C1 | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45100 | 56.73 | 4.57 | 45100 | - | 200 | CFRP | U | 0.070 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 122.6 | SR | SR |
| | C2 | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 46500 | 60.36 | 4.77 | 46500 | - | 200 | CFRP | U | 0.110 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 133.2 | SR | SR |
| | C3 | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 48.82 | 48.82 | 4.11 | 42100 | - | 200 | CFRP | U | 0.110 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 136.6 | SR | SR |
| C5 | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 60.36 | 60.36 | 4.77 | 42100 | - | 200 | CFRP | U | 0.167 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 210.3 | SR | SR | |
| Wong & Vecchio | RWOA-1 | R | 305 | 560 | 2399.51 | - | - | - | 22.30 | 2.40 | 26000 | - | 210 | CFRP | S | 0.840 | 0.840 | 99 | 11.00 | 3.66 | 1.830 | 81.0 | SD | SD | |
| | RWOA-2 | R | 305 | 560 | 3099.32 | - | - | - | 25.60 | 2.63 | 28000 | - | 205 | CFRP | S | 0.840 | 0.840 | 99 | 11.00 | 4.57 | 2.285 | 69.5 | SD | SD | |
| | RWOA-3 | R | 305 | 560 | 3804.68 | - | - | - | 43.20 | 3.71 | 36000 | - | 210 | CFRP | S | 0.840 | 0.840 | 99 | 11.00 | 6.40 | 3.200 | 25.5 | SD | SD | |
| Alagusundaramoorthy et al | S83-90 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.180 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 33.0 | SR | SR | |
| | S84-90 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.180 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 19.0 | SR | SR | |
| | S85-90 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.180 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 36.0 | SR | SR | |
| | S86-90 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.180 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 19.5 | SR | SR | |
| | S87-90-0 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.360 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 42.5 | SR | SR | |
| | S88-90-0 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.180 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 28.5 | SR | SR | |
| | S89-45 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.180 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 66.0 | SR | SR | |
| | S810-45 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.180 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 75.0 | SR | SR | |
| | S811-45 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.180 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 56.0 | SR | SR | |
| | S812-45 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.180 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 67.0 | SR | SR | |
| Abdel-Jaber et al | S813-45-0 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | 30.91 | 2.96 | 33090 | 414 | 200 | CFRP | W | 0.360 | C | 228 | 21.49 | 1.83 | 0.915 | 58.0 | SR | SR | |
| | S814-45-0 | R | 230 | 380 | 981.75 | - | 0.424 | 300 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| Abdel-Laber et al | B9 | R | 150 | 200 | 603.19 | - | - | - | 47.67 | 4.04 | 371.71 | - | 200 | CFRP | S | 0.270 | C | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.400 | 13.0 | SD | | | |
| | B10 | R | 150 | 200 | 603.19 | - | - | - | 47.67 | 4.04 | 371.72 | - | 200 | CFRP | S | 0.270 | C | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.400 | 20.0 | SD | | | |
| | B12 | R | 150 | 200 | 603.19 | - | - | - | 47.67 | 4.04 | 371.73 | - | 200 | CFRP | S | 0.270 | C | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.400 | 52.5 | SR | | | |
| | B13 | R | 150 | 200 | 603.19 | - | - | - | 47.67 | 4.04 | 371.74 | - | 200 | CFRP | S | 0.270 | C | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.400 | 49.0 | SR | | | |
| | B15 | R | 150 | 200 | 603.19 | - | - | - | 47.67 | 4.04 | 371.75 | - | 200 | CFRP | U | 0.270 | C | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.400 | 41.9 | SR | | | |
| | B16 | R | 150 | 200 | 603.19 | - | - | - | 47.67 | 4.04 | 371.76 | - | 200 | CFRP | U | 0.540 | C | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.400 | 35.0 | SR | | | |
| Zhang | Z11-S90 | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 165 | 16.97 | 0.76 | 0.381 | 37.4 | SD | | | |
| | Z11-S45 | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 165 | 16.97 | 0.76 | 0.381 | 49.6 | SD | | | |
| | Z22-S90 | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 165 | 16.97 | 0.76 | 0.254 | 31.6 | SD | | | |
| | Z22-S45 | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 165 | 16.97 | 0.76 | 0.254 | 48.5 | SD | | | |
| | Z31-F90 | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 0.330 | C | 73 | 13.13 | 0.76 | 0.381 | 34.0 | SD | | | |
| | Z31-FD | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 0.660 | C | 73 | 13.13 | 0.76 | 0.381 | 44.7 | SD | | | |
| | Z31-FU | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 0.330 | C | 73 | 13.13 | 0.76 | 0.381 | 52.9 | SD | | | |
| | Z42-F90 | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 0.330 | C | 73 | 13.13 | 0.76 | 0.254 | 41.1 | SD | | | |
| | Z42-FD | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 0.660 | C | 73 | 13.13 | 0.76 | 0.254 | 45.8 | SD | | | |
| | Z42-FU | R | 101.6 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 0.330 | C | 73 | 13.13 | 0.76 | 0.254 | 40.0 | SD | | | |
| | ZC4-R45 | R | 132.4 | 228.6 | 427.53 | - | - | - | 42.60 | 3.73 | 360.50 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 238 | 11.76 | 1.07 | 0.533 | 13.8 | SD | | | |
| | Z11-SCR45 | R | 203.2 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 238 | 11.76 | 0.76 | 0.381 | 35.4 | SD | | | |
| | Z22-SCR45 | R | 203.2 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 238 | 11.76 | 0.76 | 0.254 | 60.5 | SD | | | |
| | Z31-FCRU | R | 203.2 | 228.6 | 506.71 | - | - | - | 41.34 | 3.65 | 357.60 | - | 200 | CFRP | S | 0.330 | C | 73 | 13.13 | 0.76 | 0.381 | 64.3 | SD | | | |
| | Allam & Ebeido | S2 | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | S | 0.260 | 0.260 | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.450 | 35.0 | SD | | |
| | | S3 | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | S | 0.260 | 0.260 | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.450 | 31.3 | SD | | |
| | | S4 | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | S | 0.260 | 0.260 | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.450 | 28.8 | SD | | |
| | | US-2 | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | U | 0.260 | 0.260 | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.450 | 40.0 | SD | | |
| US-3 | | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | U | 0.260 | 0.260 | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.450 | 38.8 | SD | | | |
| US-4 | | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | U | 0.260 | 0.260 | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.450 | 37.5 | SD | | | |
| W3 | | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | S | 0.260 | C | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.450 | 40.0 | SD | | | |
| W4 | | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | S | 0.260 | C | 230 | 15.22 | 1.50 | 0.450 | 38.8 | SD | | | |
| S1 | | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | S | 0.260 | 0.260 | 230 | 15.22 | 1.20 | 0.300 | 52.5 | SD | | | |
| US-1 | | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | U | 0.260 | 0.260 | 230 | 15.22 | 1.20 | 0.300 | 67.5 | N/D | | | |
| W-1 | | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | S | 0.260 | C | 230 | 15.22 | 1.20 | 0.300 | 67.5 | N/D | | | |
| UW-1 | | R | 120 | 200 | 603.19 | - | 0.471 | 120 | 23.70 | 2.50 | 311.90 | 250 | 200 | CFRP | U | 0.260 | C | 230 | 15.22 | 1.20 | 0.300 | 67.5 | N/D | | | |
| Kachalev DI & Barnes SH | | C1 | R | 152 | 152 | - | - | - | - | 0.00 | 2.17 | 256.56 | - | - | CFRP | S | 0.444 | C | 230 | 14.78 | - | - | 19.1 | N/D | | |
| | | Kage T, Abe M, Lee HS & Tomosawa | SCD3-23 | R | 200 | 200 | - | - | - | - | 0.00 | 2.97 | 288.74 | - | - | CFRP | U | 0.097 | 0.097 | 284 | 12.08 | - | - | 23.7 | N/D | |
| | | | Adhikary et al. | C1 | R | 300 | 300 | 3216.99 | - | - | - | 37.20 | 3.39 | 347.60 | - | 207 | CFRP | U | 0.167 | C | 230 | 14.78 | 2.80 | 1.000 | 53.0 | SD |
| | | | | C2 | R | 300 | 300 | 3216.99 | - | - | - | 41.00 | 3.63 | 356.80 | - | 207 | CFRP | U+ | 0.167 | C | 230 | 14.78 | 2.80 | 1.000 | 116.5 | SR |
| | | | | C3 | R | 300 | 300 | 3216.99 | - | - | - | 41.10 | 3.64 | 357.00 | - | 207 | CFRP | U+ | 0.167 | C | 230 | 14.78 | 2.80 | 1.000 | 125.5 | SR |
| | | | | A-1 | R | 300 | 300 | 3216.99 | - | - | - | 39.60 | 3.54 | 353.40 | - | 207 | AFRP | U | 0.286 | C | 120 | 16.67 | 2.80 | 1.000 | 43.0 | SD |
| | A-2 | | | R | 300 | 300 | 3216.99 | - | - | - | 41.80 | 3.68 | 358.60 | - | 207 | AFRP | U | 0.286 | C | 120 | 16.67 | 2.80 | 1.000 | 88.0 | SR | |
| | A-3 | | | R | 300 | 300 | 3216.99 | - | - | - | 43.90 | 3.81 | 363.40 | - | 207 | AFRP | U+ | 0.286 | C | 120 | 16.67 | 2.80 | 1.000 | 133.0 | SR | |
| | Feng Xue Song et al. | | | SB1_3 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U | 0.220 | C | 235 | 17.87 | 1.60 | 0.864 | 63.3 | SD |
| | | | | SB1_4 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U | 0.220 | C | 235 | 17.87 | 1.60 | 0.864 | 76.3 | SD |
| | | | | SB1_5 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.60 | 0.864 | 69.3 | SD |
| | | | | SB1_6 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.60 | 0.864 | 53.3 | SD |
| | | | | SB1_7 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U+ | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.60 | 0.864 | 63.3 | SD |
| | | | | SB1_8 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U+ | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.60 | 0.864 | 62.3 | SD |
| | | | | SB1_9 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 1.60 | 0.864 | 63.3 | SD |
| | | | | SB1_10 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 1.60 | 0.864 | 66.3 | SD |
| | | | | SB2_2 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U+ | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.54 | 0.864 | 72.0 | SD |
| | | | | SB2_3 | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.54 | 0.864 | 52.0 | SD |
| SB3_2 | | R | | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.18 | 0.864 | 35.0 | SD | | |
| SB3_3 | | R | 150 | 360 | 2010.62 | - | 0.419 | 135 | 32.55 | 3.07 | 330.00 | 395 | 205 | CFRP | U+ | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.18 | 0.864 | 54.0 | SD | | | |
| Ianni Ruberto & Im Binbo | | ST2-a | R | 150 | 350 | 2280.80 | - | 0.353 | 160 | 24.50 | 2.55 | 314.20 | 495 | 200 | GFRP | W | 0.240 | C | 76 | 47.43 | 2.70 | 0.900 | 109.0 | SR | | |
| | | ST2-b | R | 150 | 350 | 2280.80 | - | 0.353 | 160 | 24.50 | 2.55 | 314.20 | 495 | 200 | GFRP | W | 0.240 | C | 76 | 47.43 | 2.70 | 0.900 | 101.0 | SR | | |
| | | ST3-a | R | 150 | 350 | 2280.80 | - | 0.353 | 160 | 24.50 | 2.55 | 314.20 | 495 | 200 | GFRP | W | 0.360 | C | 76 | 47.43 | 2.70 | 0.900 | 149.0 | SR | | |
| | | ST3-b | R | 150 | 350 | 2280.80 | - | 0.353 | 160 | 24.50 | 2.55 | 314.20 | 495 | 200 | GFRP | W | 0.360 | C | 76 | 47.43 | 2.70 | 0.900 | 110.0 | SR | | |
| Carolin and Täljsten | | A145 | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 3.91 | 420.00 | - | 210 | CFRP | S | 0.070 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 63.8 | SR | | |
| | A245a | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 3.91 | 420.00 | - | 210 | CFRP | S | 0.220 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 68.8 | SD | | | |
| | A245b | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 3.80 | 420.00 | - | 210 | CFRP | S | 0.220 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 92.8 | SD | | | |
| | A245W | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 3.39 | 420.00 | - | 210 | CFRP | W | 0.220 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 109.3 | SR | | | |
| | A245Ra | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 4.55 | 420.00 | - | 210 | CFRP | S | 0.220 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 93.3 | SD | | | |
| | A245Rb | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 3.45 | 420.00 | - | 210 | CFRP | S | 0.220 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 65.8 | SD | | | |
| | A290a | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 4.13 | 420.00 | - | 210 | CFRP | S | 0.220 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 68.3 | SD | | | |
| | A290b | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 3.74 | 420.00 | - | 210 | CFRP | S | 0.220 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 89.3 | SD | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------|-------|---------|---------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| Carolijn and Tajlsten | A290W | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 3.74 | 42000 | - | 210 | CFRP | W | 0.220 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 123.8 | N/D | |
| | A290WR | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 3.39 | 42000 | - | 210 | CFRP | W | 0.220 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 134.3 | SR | |
| | A345 | R | 180 | 500 | 2412.74 | - | - | - | 45.45 | 4.75 | 42000 | - | 210 | CFRP | S | 0.500 | C | 234 | 19.23 | 4.00 | 1.250 | 107.3 | SD | |
| | B290 | R | 180 | 400 | 2412.74 | - | - | 0.283 | 200 | 45.45 | 3.39 | 42000 | 515 | 210 | CFRP | S | 0.333 | C | 234 | 19.23 | 3.00 | 1.000 | 30.5 | SD |
| | B390 | R | 180 | 400 | 2412.74 | - | - | 0.283 | 200 | 45.45 | 3.39 | 42000 | 515 | 210 | CFRP | S | 0.500 | C | 234 | 19.23 | 3.00 | 1.000 | 27.0 | SD |
| | case2 | R | 340 | 440 | 2945.24 | - | 0.168 | 150 | 29.82 | 2.88 | 32780 | 382 | 200 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 253 | 19.13 | 2.60 | 1.100 | 81.3 | SR | |
| | case3 | R | 340 | 440 | 2945.24 | - | 0.168 | 150 | 29.82 | 2.88 | 32780 | 382 | 200 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 253 | 19.13 | 2.60 | 1.100 | 122.0 | SR | |
| | case4 | R | 340 | 440 | 2945.24 | - | 0.168 | 150 | 29.82 | 2.88 | 32780 | 382 | 200 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 253 | 19.13 | 2.60 | 1.100 | 132.3 | SR | |
| | case5 | R | 340 | 440 | 2945.24 | - | 0.168 | 150 | 29.82 | 2.88 | 32780 | 382 | 200 | CFRP | W | 0.111 | 0.111 | 253 | 19.13 | 2.60 | 1.100 | 162.6 | SR | |
| | Monti and Liota | SS90* | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | 200 | CFRP | S | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 2.0 | SD |
| SS45 | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | 200 | CFRP | S | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 3.0 | SD | |
| SSVA | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | 200 | CFRP | S | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 7.0 | SD | |
| SF90 | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | 200 | CFRP | S | 0.220 | C | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 14.5 | SD | |
| US60 | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 13.0 | SD | |
| USVA | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 22.0 | SD | |
| USVA+ | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | 200 | CFRP | U+ | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 37.0 | SD | |
| US45+ | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | 200 | CFRP | U+ | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 28.0 | SD | |
| UF90 | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | - | - | CFRP | U | 0.220 | C | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 27.0 | SD |
| US45++ | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | - | - | CFRP | U+ | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 35.5 | SD |
| UF45+A | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | - | - | CFRP | U+ | 0.220 | C | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 69.0 | SD |
| UF45++B | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | - | - | CFRP | U+ | 0.220 | C | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 74.0 | SD |
| UF45+++C | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | - | - | CFRP | U+ | 0.220 | C | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 85.0 | SD |
| US45+++F | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | - | - | CFRP | U+ | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 65.5 | SD |
| US45+++E | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | - | - | CFRP | U+ | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 52.0 | SD |
| US45+D | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | - | - | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 66.5 | SD |
| WS45+++ | | R | 250 | 450 | 1256.64 | 628.32 | 0.251 | 400 | 9.63 | 1.26 | 25620 | 500 | - | - | CFRP | W+ | 0.220 | 0.220 | 390 | 7.69 | 2.80 | 1.400 | 60.5 | SR |
| Zhang & Hsu | | Z4_45 | R | 152.4 | 228.6 | 427.53 | - | - | - | 42.60 | 3.73 | 36050 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 165 | 16.97 | 1.07 | 0.533 | 36.7 | SD |
| | | Z4_90 | R | 152.4 | 228.6 | 427.53 | - | - | - | 42.60 | 3.73 | 36050 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 165 | 16.97 | 1.07 | 0.533 | 27.6 | SD |
| | | Z4_FAB | R | 152.4 | 228.6 | 427.53 | - | - | - | 42.60 | 3.73 | 36050 | - | 200 | CFRP | S | 0.330 | C | 73 | 13.13 | 1.07 | 0.533 | 7.6 | SR |
| | Z6_90 | R | 152.4 | 228.6 | 427.53 | - | - | - | 42.60 | 3.73 | 36050 | - | 200 | CFRP | S | 1.200 | 1.200 | 165 | 16.97 | 1.37 | 0.533 | 20.9 | SD | |
| | Z6_FAB | R | 152.4 | 228.6 | 427.53 | - | - | - | 42.60 | 3.73 | 36050 | - | 200 | CFRP | S | 0.330 | C | 73 | 13.13 | 1.37 | 0.533 | 8.2 | SR | |
| | U4 | R | 100 | 200 | 678.58 | - | - | - | - | 49.27 | 4.14 | 34270 | - | 200 | CFRP | U | 0.111 | 0.111 | 235 | 14.26 | 0.68 | 0.340 | 21.9 | SD |
| | U5 | R | 200 | 400 | 2945.24 | - | - | - | - | 49.27 | 4.14 | 34270 | - | 200 | CFRP | U | 0.222 | 0.222 | 235 | 14.26 | 1.36 | 0.680 | 50.1 | SD |
| Cao et al | U6 | R | 300 | 600 | 9650.97 | - | - | - | 49.27 | 4.14 | 34270 | - | 200 | CFRP | U | 0.333 | 0.333 | 235 | 14.26 | 2.04 | 1.020 | 196.0 | SD | |
| | A2 | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | 0.283 | 200 | 24.10 | 2.52 | 31300 | 303 | 200 | CFRP | W | 0.167 | 0.167 | 249 | 14.60 | 1.60 | 0.600 | 44.0 | SD | |
| | A3 | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | 0.283 | 200 | 24.10 | 2.52 | 31300 | 303 | 200 | CFRP | W | 0.167 | 0.167 | 249 | 14.60 | 1.60 | 0.400 | 46.0 | SD | |
| | A5 | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | 0.283 | 200 | 24.10 | 2.52 | 31300 | 303 | 200 | CFRP | W | 0.167 | 0.167 | 249 | 14.60 | 1.60 | 0.400 | 44.0 | SD | |
| | A6 | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | 0.283 | 200 | 24.10 | 2.52 | 31300 | 303 | 200 | CFRP | W | 0.167 | 0.167 | 249 | 14.60 | 1.60 | 0.200 | 34.0 | SD | |
| | Bb | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | - | - | - | 24.10 | 2.52 | 31300 | - | 200 | GFRP | W | 1.270 | 1.270 | 21 | 12.68 | 1.70 | 0.550 | 70.0 | SD |
| | Bc | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | - | - | - | 23.70 | 2.50 | 31190 | - | 200 | GFRP | W | 1.270 | 1.270 | 21 | 12.68 | 1.70 | 0.550 | 55.0 | SD |
| | Be | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | - | - | - | 23.70 | 2.50 | 31190 | - | 200 | GFRP | W | 1.270 | 1.270 | 21 | 12.68 | 1.70 | 0.300 | 28.0 | SD |
| | Bf | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | - | - | - | 23.70 | 2.50 | 31190 | - | 200 | GFRP | W | 1.270 | 1.270 | 21 | 12.68 | 1.70 | 0.300 | 11.0 | SD |
| | L2 | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | - | - | - | 23.70 | 2.50 | 31190 | - | 200 | GFRP | W | 1.200 | 1.200 | 5 | 21.13 | 1.70 | 0.650 | 40.0 | SD |
| | L3 | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | - | - | - | 15.24 | 1.76 | 27960 | - | 200 | GFRP | W | 1.200 | 1.200 | 5 | 21.13 | 1.70 | 0.650 | 35.0 | SD |
| | L6 | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | - | - | - | 15.24 | 1.76 | 27960 | - | 200 | GFRP | W | 1.200 | 1.200 | 5 | 21.13 | 1.70 | 0.400 | 47.0 | SD |
| | L7 | R | 150 | 250 | 1472.62 | - | - | - | - | 15.24 | 1.76 | 27960 | - | 200 | GFRP | W | 1.200 | 1.200 | 5 | 21.13 | 1.70 | 0.400 | 35.0 | SD |
| | Safaan | S8FP | R | 100 | 150 | 100.53 | - | - | - | 29.82 | 2.88 | 29500 | - | 210 | GFRP | S+INF | 2.000 | C | 22 | 19.53 | 0.90 | 0.300 | 17.3 | SD |
| | | S8FU | R | 100 | 150 | 100.53 | - | - | - | 29.82 | 2.88 | 29500 | - | 210 | GFRP | S+INF | 2.000 | C | 22 | 19.53 | 0.90 | 0.300 | 14.3 | N/D |
| | | S8FR | R | 100 | 150 | 100.53 | - | - | - | 29.82 | 2.88 | 29500 | - | 210 | GFRP | S+INF | 2.000 | C | 22 | 19.53 | 0.90 | 0.300 | 20.3 | SR |
| | | S10FP | R | 100 | 150 | 157.08 | - | - | - | 29.82 | 2.88 | 29500 | - | 210 | GFRP | S+INF | 2.000 | C | 22 | 19.53 | 0.90 | 0.300 | 12.1 | SD |
| S10FU | | R | 100 | 150 | 157.08 | - | - | - | 29.82 | 2.88 | 29500 | - | 210 | GFRP | S+INF | 2.000 | C | 22 | 19.53 | 0.90 | 0.300 | 16.3 | N/D | |
| S10FR | | R | 100 | 150 | 157.08 | - | - | - | 29.82 | 2.88 | 29500 | - | 210 | GFRP | S+INF | 2.000 | C | 22 | 19.53 | 0.90 | 0.300 | 21.2 | SR | |
| S13P | | R | 100 | 150 | 265.46 | - | - | - | 29.82 | 2.88 | 29500 | - | 210 | GFRP | S | 4.000 | C | 22 | 19.53 | 0.90 | 0.300 | 6.9 | SD | |
| S13R | | R | 100 | 150 | 265.46 | - | - | - | 29.82 | 2.88 | 29500 | - | 210 | GFRP | S | 4.000 | C | 22 | 19.53 | 0.90 | 0.300 | 8.9 | SD | |
| DBS01L | | T | 95 | 220 | 603.77 | - | - | - | - | 25.20 | 2.60 | 31620 | - | 175 | CFRP | U+ | 0.066 | C | 231 | 15.80 | 1.58 | 0.265 | 15.4 | N/D |
| DBS02L | | T | 95 | 220 | 603.77 | - | - | - | - | 25.20 | 2.60 | 31620 | - | 175 | CFRP | U+ | 0.132 | C | 231 | 15.80 | 1.58 | 0.265 | 13.8 | N/D |
| DBS11L | T | 95 | 220 | 603.77 | - | 0.362 | 100 | - | 25.20 | 2.60 | 31620 | 420 | 175 | CFRP | U+ | 0.066 | C | 231 | 15.80 | 1.58 | 0.265 | 12.7 | N/D | |
| DBS12L | T | 95 | 220 | 603.77 | - | 0.362 | 100 | - | 25.20 | 2.60 | 31620 | 420 | 175 | CFRP | U+ | 0.132 | C | 231 | 15.80 | 1.58 | 0.265 | 17.0 | N/D | |
| SBS01L | T | 95 | 220 | 603.77 | - | - | - | - | 25.20 | 2.60 | 31620 | - | 175 | CFRP | U+ | 0.066 | C | 231 | 15.80 | 1.58 | 0.530 | 23.2 | N/D | |
| SBS02L | T | 95 | 220 | 603.77 | - | - | - | - | 25.20 | 2.60 | 31620 | - | 175 | CFRP | U+ | 0.132 | C | 231 | 15.80 | 1.58 | 0.530 | 32.4 | N/D | |
| SBS11L | T | 95 | 220 | 603.77 | - | 0.362 | 100 | - | 25.20 | 2.60 | 31620 | 420 | 175 | CFRP | U+ | 0.066 | C | 231 | 15.80 | 1.58 | 0.530 | 2.8 | N/D | |
| SBS12L | T | 95 | 220 | 603.77 | - | 0.362 | 100 | - | 25.20 | 2.60 | 31620 | 420 | 175 | CFRP | U+ | 0.132 | C | 231 | 15.80 | 1.58 | 0.530 | 12.2 | N/D | |
| DB_50_05L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | - | - | - | 16.70 | 1.98 | 28960 | - | 200 | CFRP | U | 0.060 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 0.525 | 90.0 | N/D | |
| DB_50_1L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | - | - | - | 16.70 | 1.98 | 2 | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------------|------|-----|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bousseham and Chaalal | DB_S0_2L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | - | 16.70 | 1.98 | 28960 | - | 200 | CFRP | U | 0.214 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 0.525 | 110.8 | N/D | |
| | DB_S1_1L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | 0.574 | 175 | 1.98 | 28960 | 650 | 200 | CFRP | U | 0.107 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 0.525 | 32.0 | N/D | |
| | DB_S1_2L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | 0.574 | 175 | 1.98 | 28960 | 650 | 200 | CFRP | U | 0.214 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 0.525 | 34.2 | N/D | |
| | DB_S2_1L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | 1.149 | 88 | 1.98 | 28960 | 650 | 200 | CFRP | U | 0.107 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 0.525 | 58.0 | N/D | |
| | DB_S2_2L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | 1.149 | 88 | 1.98 | 28960 | 650 | 200 | CFRP | U | 0.214 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 0.525 | 73.1 | N/D | |
| | SB_S0_05L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | - | - | 16.70 | 1.98 | 28960 | - | 200 | CFRP | U | 0.060 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 1.050 | 21.2 | N/D |
| | SB_S0_1L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | - | - | 16.70 | 1.98 | 28960 | - | 200 | CFRP | U | 0.107 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 1.050 | 38.8 | N/D |
| | SB_S0_2L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | - | - | 16.70 | 1.98 | 28960 | - | 200 | CFRP | U | 0.214 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 1.050 | 40.5 | N/D |
| | SB_S1_05L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | 0.574 | 175 | 16.70 | 1.98 | 28960 | 650 | 200 | CFRP | U | 0.060 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 1.050 | 19.2 | N/D |
| | SB_S1_2L | T | 152 | 406 | 1995.04 | - | 0.574 | 175 | 16.70 | 1.98 | 28960 | 650 | 200 | CFRP | U | 0.214 | C | 231 | 15.80 | 3.11 | 1.050 | 4.4 | N/D |
| | De Lorenzis and Rizzo | UW90 | R | 200 | 210 | 1520.53 | - | 0.353 | 160 | 2.31 | 30373 | 665 | 211 | CFRP | W | 2.000 | C | 122 | 17.02 | 1.60 | 0.519 | 19.4 | SD |
| | | NS90-73-a | R | 200 | 210 | 1520.53 | - | 0.353 | 160 | 2.31 | 30373 | 665 | 211 | CFRP | W | 2.000 | C | 122 | 17.02 | 1.60 | 0.519 | 50.5 | N/D |
| | Dias and Barros | N545-146-a | R | 200 | 210 | 1520.53 | - | 0.353 | 160 | 2.31 | 30373 | 665 | 211 | CFRP | W | 2.000 | C | 122 | 17.02 | 1.60 | 0.519 | 32.7 | N/D |
| | | A10_M | R | 150 | 300 | 314.16 | - | - | 40.18 | 3.58 | 35480 | - | 210 | CFRP | U | 0.334 | 0.334 | 390 | 7.69 | 1.50 | 0.600 | 10.8 | SD |
| | | A10_VL | R | 150 | 300 | 314.16 | - | - | 40.18 | 3.58 | 35480 | - | 210 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 150 | 20.00 | 1.50 | 0.600 | 29.1 | SD |
| | | A10_VL1 | R | 150 | 300 | 314.16 | - | - | 40.18 | 3.58 | 35480 | - | 210 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 150 | 20.00 | 1.50 | 0.600 | 29.1 | SD |
| | | A10_IL | R | 150 | 300 | 314.16 | - | - | 40.18 | 3.58 | 35480 | - | 210 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 150 | 20.00 | 1.50 | 0.600 | 28.8 | SD |
| | | A12_M | R | 150 | 300 | 452.39 | - | - | 40.18 | 3.58 | 35480 | - | 210 | CFRP | U | 0.334 | 0.334 | 390 | 7.69 | 1.50 | 0.600 | 31.5 | SD |
| A12_VL | | R | 150 | 300 | 452.39 | - | - | 40.18 | 3.58 | 35480 | - | 210 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 150 | 20.00 | 1.50 | 0.600 | 59.4 | SD | |
| A12_IL | | R | 150 | 300 | 452.39 | - | - | 40.18 | 3.58 | 35480 | - | 210 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 150 | 20.00 | 1.50 | 0.600 | 73.0 | SD | |
| B10_M | | R | 150 | 150 | 314.16 | - | - | 46.55 | 3.97 | 36930 | - | 210 | CFRP | U | 0.334 | 0.334 | 390 | 7.69 | 0.90 | 0.300 | 18.6 | SD | |
| B10_VL | | R | 150 | 150 | 314.16 | - | - | 46.55 | 3.97 | 36930 | - | 210 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 150 | 20.00 | 0.90 | 0.300 | 28.6 | SD | |
| B12_M | | R | 150 | 150 | 452.39 | - | - | 46.55 | 3.97 | 36930 | - | 210 | CFRP | U | 0.334 | 0.334 | 390 | 7.69 | 0.90 | 0.300 | 33.7 | SD | |
| B12_VL | | R | 150 | 150 | 452.39 | - | - | 46.55 | 3.97 | 36930 | - | 210 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 150 | 20.00 | 0.90 | 0.300 | 31.8 | SD | |
| Pellegrino and Modena | | A-U1-C-17 | R | 150 | 300 | 2827.43 | - | 0.591 | 170 | 3.09 | 33690 | 534 | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 230 | 15.00 | 2.00 | 0.750 | 52.9 | SD |
| | | A-U1-C-20 | R | 150 | 300 | 2827.43 | - | 0.503 | 200 | 3.09 | 33690 | 534 | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 230 | 15.00 | 2.00 | 0.750 | 55.8 | SD |
| | | A-U1-S-17 | R | 150 | 300 | 2827.43 | - | 0.591 | 170 | 3.09 | 33690 | 534 | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 230 | 15.00 | 2.00 | 0.750 | 49.2 | SD |
| | | A-U1-S-20 | R | 150 | 300 | 2827.43 | - | 0.503 | 200 | 3.09 | 33690 | 534 | 200 | CFRP | U | 0.165 | C | 230 | 15.00 | 2.00 | 0.750 | 31.6 | SD |
| | | A-U2-C-17 | R | 150 | 300 | 2827.43 | - | 0.591 | 170 | 3.09 | 33690 | 534 | 200 | CFRP | U | 0.330 | C | 230 | 15.00 | 2.00 | 0.750 | 57.8 | SD |
| | | A-U2-C-20 | R | 150 | 300 | 2827.43 | - | 0.503 | 200 | 3.09 | 33690 | 534 | 200 | CFRP | U | 0.330 | C | 230 | 15.00 | 2.00 | 0.750 | 60.5 | SD |
| | A-U2-S-17 | R | 150 | 300 | 2827.43 | - | 0.591 | 170 | 3.09 | 33690 | 534 | 200 | CFRP | U | 0.330 | C | 230 | 15.00 | 2.00 | 0.750 | 20.8 | SD | |
| | A-U2-S-20 | R | 150 | 300 | 2827.43 | - | 0.503 | 200 | 3.09 | 33690 | 534 | 200 | CFRP | U | 0.330 | C | 230 | 15.00 | 2.00 | 0.750 | 20.8 | SD | |
| | Norris | E | R | 125 | 200 | 402.12 | - | 0.265 | 200 | 0.00 | 28066 | 420 | 210 | - | U | 1.000 | C | 34 | 11.47 | 2.60 | 0.410 | 18.0 | SD |
| | | BI-2/3B | T | 150 | 360 | 1256.64 | - | 0.883 | 200 | 30.91 | 28200 | 340 | 202 | CFRP | U | 2.400 | 2.400 | 163 | 13.80 | 2.60 | 0.800 | 51.1 | SD |
| | | BI-3/5A | T | 150 | 360 | 1256.64 | - | 0.283 | 200 | 30.45 | 28200 | 340 | 202 | CFRP | U | 2.400 | 2.400 | 163 | 13.80 | 2.60 | 0.800 | 87.1 | SD |
| | | Grande et al | RS4W | R | 250 | 450 | 2148.85 | - | 0.251 | 400 | 14.00 | 27485 | 500 | 200 | CFRP | W | 0.191 | C | 392 | 6.00 | 2.80 | 1.400 | 130.0 |
| RS3W | | | R | 250 | 450 | 2148.85 | - | 0.335 | 300 | 14.00 | 27485 | 500 | 200 | CFRP | W | 0.191 | C | 392 | 6.00 | 2.80 | 1.400 | 170.0 | SR |
| RS2W | | | R | 250 | 450 | 2148.85 | - | 0.503 | 200 | 14.00 | 27485 | 500 | 200 | CFRP | W | 0.191 | C | 392 | 6.00 | 2.80 | 1.400 | 85.0 | SR |
| RS3U | | | R | 250 | 450 | 2148.85 | - | 0.335 | 300 | 14.00 | 27485 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.191 | C | 392 | 6.00 | 2.80 | 1.400 | 110.0 | SD |
| RS2U | | | R | 250 | 450 | 2148.85 | - | 0.503 | 200 | 14.00 | 27485 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.191 | C | 392 | 6.00 | 2.80 | 1.400 | 65.0 | SD |
| RS3S | | | R | 250 | 450 | 2148.85 | - | 0.335 | 300 | 14.00 | 27485 | 500 | 200 | CFRP | S | 0.191 | C | 392 | 6.00 | 2.80 | 1.400 | 45.0 | SD |
| Zhang et al | | RS2S | R | 250 | 450 | 2148.85 | - | 0.503 | 200 | 14.00 | 27485 | 500 | 200 | CFRP | S | 0.191 | C | 392 | 6.00 | 2.80 | 1.400 | 25.0 | SD |
| | | U2 | R | 220 | 300 | 2412.74 | - | 0.471 | 120 | 34.64 | 34101 | 380 | 200 | AFRP | U | 0.193 | C | 118 | 17.46 | 2.00 | 1.000 | 22.1 | SD |
| | | U3 | R | 220 | 300 | 2412.74 | - | 0.471 | 120 | 34.64 | 34101 | 380 | 200 | AFRP | U | 0.193 | C | 118 | 17.46 | 2.00 | 1.000 | 23.4 | SD |
| | U4 | R | 220 | 300 | 2412.74 | - | 0.471 | 120 | 34.64 | 34101 | 380 | 200 | AFRP | U | 0.193 | C | 118 | 17.46 | 2.00 | 1.000 | 37.7 | SD | |
| | W1 | R | 220 | 300 | 2412.74 | - | 0.471 | 120 | 34.64 | 34101 | 380 | 200 | AFRP | W | 0.193 | C | 118 | 17.46 | 2.00 | 1.000 | 47.5 | SD | |
| | W2 | R | 220 | 300 | 2412.74 | - | 0.471 | 120 | 34.64 | 34101 | 380 | 200 | AFRP | W | 0.193 | C | 118 | 17.46 | 2.00 | 1.000 | 50.4 | N/D | |
| Mosallam | B22R | R | 150 | 250 | 253.35 | - | 0.234 | 610 | 27.86 | 32211 | - | 200 | CFRP | S | 1.190 | 1.190 | 152 | 19.09 | 2.41 | 0.610 | 44.4 | SR | |
| | B19 | R | 150 | 250 | 253.35 | - | 0.234 | 610 | 27.86 | 32211 | - | 200 | CFRP | S | 1.190 | 1.190 | 152 | 19.09 | 2.41 | 0.610 | 41.5 | SR | |
| Dias and Barros | 25-3LV-A | T | 180 | 400 | 1874.75 | - | 0.188 | 300 | 22.80 | 30921 | 533 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 167 | 17.72 | 2.25 | 0.900 | 0.6 | N/D | |
| | 25-5LV-A | T | 180 | 400 | 1874.75 | - | 0.188 | 300 | 22.80 | 30921 | 533 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 167 | 17.72 | 2.25 | 0.900 | 25.2 | N/D | |
| | 25-8LV-A | T | 180 | 400 | 1874.75 | - | 0.188 | 300 | 22.80 | 30923 | 533 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 167 | 17.72 | 2.25 | 0.900 | 48.6 | N/D | |
| | 25-3LV45-A | T | 180 | 400 | 1874.75 | - | 0.188 | 300 | 22.80 | 30924 | 533 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 167 | 17.72 | 2.25 | 0.900 | 7.8 | N/D | |
| | 25-5LV45-A | T | 180 | 400 | 1874.75 | - | 0.188 | 300 | 22.80 | 30925 | 533 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 167 | 17.72 | 2.25 | 0.900 | 41.4 | N/D | |
| | 25-8LV45-A | T | 180 | 400 | 1874.75 | - | 0.188 | 300 | 22.80 | 30926 | 533 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 167 | 17.72 | 2.25 | 0.900 | 40.2 | N/D | |
| | 25-3LV60-A | T | 180 | 400 | 1874.75 | - | 0.188 | 300 | 22.80 | 30927 | 533 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 167 | 17.72 | 2.25 | 0.900 | 35.4 | N/D | |
| | 25-5LV60-A | T | 180 | 400 | 1874.75 | - | 0.188 | 300 | 22.80 | 30928 | 533 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 167 | 17.72 | 2.25 | 0.900 | 46.2 | N/D | |
| | 25-7LV60-A | T | 180 | 400 | 1874.75 | - | 0.188 | 300 | 22.80 | 30929 | 533 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 167 | 17.72 | 2.25 | 0.900 | 54.6 | N/D | |
| | Jayaprakash et al | BT1-1 | R | 120 | 340 | 628.32 | - | - | 27.62 | 2.73 | 32140 | - | 200 | CFRP | U+INF | 0.090 | 0.090 | 230 | 16.52 | 2.48 | 0.775 | 18.3 | SR |
| | | BT1-1I | R | 120 | 340 | 628.32 | - | - | 27.62 | 2.73 | 32140 | - | 200 | CFRP | U+INF | 0.090 | 0.090 | 230 | 16.52 | 2.48 | 0.775 | 38.3 | SR |
| | | BT1-2I | R | 120 | 340 | 628.32 | - | - | 27.62 | 2.73 | 32140 | - | 200 | CFRP | U+INF | 0.090 | 0.090 | 230 | 16.52 | 2.48 | 0.775 | 18.3 | SR |
| BS1-1 | | R | 120 | 340 | 402.12 | - | - | 27.62 | 2.73 | 32140 | - | 200 | CFRP | U+INF | 0.090 | 0.090 | 230 | 16.52 | 2.48 | 0.775 | 23.3 | SR | |
| BS1-2 | | R | 120 | 340 | 402.12 | - | - | 27.62 | 2.73 | 32140 | - | 200 | CFRP | U+INF | 0.090 | 0.090 | 230 | 16.52 | 2.48 | 0.775 | 13.3 | SR | |
| BT2-1 | | R | 120 | 340 | 628.32 | - | - | 17.73 | 1.96 | 28866 | - | 200 | CFRP | U+INF | 0.090 | 0.090 | 230 | 16.52 | 2.48 | 1.240 | 34.9 | SR | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|------------|-----|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| Jayaprakash et al | BT2-2 | R | 120 | 340 | 628.32 | - | - | 17.73 | 1.96 | 28866 | - | 200 | CFRP | U+INF | 0.090 | 0.090 | 230 | 16.52 | 2.48 | 1.240 | 28.3 | SR | |
| | BT2-2i | R | 120 | 340 | 628.32 | - | - | 17.73 | 1.96 | 28866 | - | 200 | CFRP | U+INF | 0.090 | 0.090 | 230 | 16.52 | 2.48 | 1.240 | 44.9 | SR | |
| El Hacha and Wagner | BF-360 | R | 150 | 305 | 597.30 | - | - | 30.18 | 2.91 | 32888 | - | - | CFRP | U | 4.500 | 4.500 | 124 | 15.85 | 1.80 | 0.750 | 38.4 | N/D | |
| | B5S-1 | R | 200 | 300 | 942.48 | - | 0.377 | 34.55 | 3.21 | 34077 | - | - | CFRP | S | 1.000 | 1.000 | 77 | 6.93 | 2.00 | 0.750 | 7.0 | N/D | |
| Siddiqui | B5S-2 | R | 200 | 300 | 942.48 | - | 0.377 | 34.55 | 3.21 | 34077 | - | - | CFRP | S | 1.000 | 1.000 | 77 | 6.93 | 2.00 | 0.750 | 14.5 | N/D | |
| | VTC1 | T | 120 | 300 | 628.32 | - | 0.135 | 57.27 | 4.60 | 32250 | 517 | 198 | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 221 | 12.35 | 1.40 | 0.700 | 37.5 | N/D | |
| Gamino et al | VTC3 | T | 120 | 300 | 628.32 | - | 0.135 | 57.73 | 4.62 | 32320 | 517 | 198 | CFRP | U | 0.165 | 0.165 | 219 | 12.47 | 1.40 | 0.700 | 27.5 | SD | |
| | VTC4 | T | 120 | 300 | 628.32 | - | 0.135 | 56.91 | 4.58 | 32190 | 517 | 198 | CFRP | U | 1.165 | 1.165 | 219 | 12.47 | 1.40 | 0.700 | 80.0 | SR | |
| | VTC5 | T | 120 | 300 | 628.32 | - | 0.135 | 57.27 | 4.60 | 32250 | 517 | 198 | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 221 | 13.20 | 1.40 | 0.700 | 49.0 | SD | |
| | VTC6 | T | 120 | 300 | 628.32 | - | 0.135 | 55.09 | 4.47 | 31910 | 517 | 198 | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 221 | 13.20 | 1.40 | 0.700 | 65.0 | SR | |
| | VTC7 | T | 120 | 300 | 628.32 | - | 0.135 | 52.82 | 4.34 | 31540 | 517 | 198 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 310 | 4.03 | 1.40 | 0.700 | 31.0 | N/D | |
| | Dias and Barros | 2S_4M(1) | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.55 | 3.00 | 33270 | 542 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 218 | 13.10 | 2.25 | 0.900 | 4.4 | SD |
| | | 2S_7M(1) | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.55 | 3.00 | 33270 | 542 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 218 | 13.10 | 2.25 | 0.900 | 12.8 | SD |
| | | 2S_7M(2) | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.55 | 3.00 | 33270 | 542 | 200 | CFRP | U | 0.352 | 0.352 | 218 | 13.10 | 2.25 | 0.900 | 39.8 | SD |
| | | 4S_4M(1) | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 31.55 | 3.00 | 33270 | 542 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 218 | 13.10 | 2.25 | 0.900 | 27.6 | SD |
| | | 4S_7M(1) | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 31.55 | 3.00 | 33270 | 542 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 218 | 13.10 | 2.25 | 0.900 | 31.0 | SD |
| | | 2S-4LV-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 20.1 | N/D |
| | | 2S-7LV-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 42.2 | N/D |
| | | 2S-10LV-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 56.2 | N/D |
| | | 2S-4U45-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 53.4 | N/D |
| | | 2S-7U45-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 70.7 | N/D |
| | | 2S-10U45-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 85.6 | N/D |
| | | 2S-10U45-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 90.0 | N/D |
| 2S-4U160-B | | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 49.5 | N/D | |
| 2S-6U160-B | | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 54.3 | N/D | |
| 2S-9U160-B | | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 65.3 | N/D | |
| 4S-4LV-B | | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 31.9 | N/D | |
| 4S-4LVa-B | | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 40.7 | N/D | |
| 4S-7LV-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 33.6 | N/D | | |
| 4S-4U45-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 42.7 | N/D | | |
| 4S-7U45-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 64.1 | N/D | | |
| 4S-4U160-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 43.5 | N/D | | |
| 4S-6U160-B | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 31.64 | 3.00 | 33271 | 542 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 171 | 16.04 | 2.25 | 0.900 | 51.8 | N/D | | |
| 2S-7LV-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 28.3 | N/D | | |
| 2S-4U45-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 33.9 | N/D | | |
| 2S-7U45-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 48.0 | N/D | | |
| 2S-4U160-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 33.1 | N/D | | |
| 2S-6U160-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.188 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 42.7 | N/D | | |
| 4S-7LV-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 6.8 | N/D | | |
| 4S-4U45-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 26.0 | N/D | | |
| 4S-7U45-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 31.5 | N/D | | |
| 4S-4U160-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 25.1 | N/D | | |
| 4S-6U160-C | T | 180 | 400 | 1809.56 | - | 0.314 | 11.60 | 3.00 | 26502 | 539 | 200 | CFRP | U | 1.400 | 1.400 | 174 | 16.34 | 2.25 | 0.900 | 35.1 | N/D | | |
| Pujol et al | SEM3a | T | 200 | 550 | 1608.50 | 452.39 | 0.236 | 32.93 | 1.45 | 29116 | 725 | 200 | CFRP | U | 0.200 | 0.200 | 162 | 12.00 | 3.30 | 1.480 | 56.5 | N/D | |
| | SEM3b | T | 200 | 550 | 1608.50 | 452.39 | 0.236 | 32.93 | 3.70 | 29116 | 725 | 200 | CFRP | U | 0.200 | 0.200 | 162 | 12.00 | 3.30 | 1.480 | 78.4 | N/D | |
| | SEM5a | T | 200 | 550 | 1608.50 | 452.39 | 0.236 | 37.41 | 1.45 | 28428 | 725 | 200 | CFRP | U | 0.200 | 0.200 | 162 | 12.00 | 3.30 | 1.480 | 57.2 | N/D | |
| | SEM5b | T | 200 | 550 | 1608.50 | 452.39 | 0.236 | 37.41 | 1.45 | 28428 | 725 | 200 | CFRP | U | 0.200 | 0.200 | 162 | 12.00 | 3.30 | 1.480 | 12.3 | N/D | |
| SEA3a | SEA3a | T | 200 | 550 | 2060.88 | 452.39 | 0.236 | 37.41 | 1.45 | 28428 | 725 | 200 | CFRP | U | 0.200 | 0.200 | 162 | 12.00 | 3.30 | 1.480 | 33.1 | N/D | |
| | SEA3b | T | 200 | 550 | 2060.88 | 452.39 | 0.236 | 37.41 | 1.45 | 28428 | 725 | 200 | CFRP | U | 0.200 | 0.200 | 162 | 12.00 | 3.30 | 1.480 | 24.7 | N/D | |
| | SEA4a | T | 200 | 550 | 2060.88 | 452.39 | 0.236 | 41.24 | 1.45 | 29367 | 725 | 200 | CFRP | U | 0.200 | 0.200 | 162 | 12.00 | 3.30 | 1.480 | 9.0 | N/D | |
| | SEA4b | T | 200 | 550 | 2060.88 | 452.39 | 0.236 | 41.24 | 1.45 | 29367 | 725 | 200 | CFRP | U | 0.200 | 0.200 | 162 | 12.00 | 3.30 | 1.480 | 17.4 | N/D | |
| Alzate et al. | U90S5-a(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 28.95 | 2.83 | 32562 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.293 | 0.293 | 240 | 16.67 | 4.30 | 1.260 | 97.7 | SD | |
| | U90S5-b(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 20.01 | 2.21 | 29965 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.293 | 0.293 | 240 | 16.67 | 4.30 | 1.260 | 100.1 | SD | |
| | U90C5-a(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 16.47 | 1.94 | 28775 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.293 | C | 240 | 16.67 | 4.30 | 1.260 | 87.2 | SD | |
| | U90C5-b(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 14.64 | 1.80 | 28112 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.293 | C | 240 | 16.67 | 4.30 | 1.260 | 116.7 | SD | |
| | U4555(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 22.67 | 2.00 | 30792 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.293 | 240 | 16.67 | 4.30 | 1.260 | 66.2 | SD | | |
| | U90S3-a(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 12.50 | 1.62 | 27287 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 4.30 | 1.260 | 85.0 | SD | |
| | U90S3-b(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 14.58 | 1.79 | 28089 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 4.30 | 1.260 | 77.2 | SD | |
| | U90S3-c(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 20.01 | 2.21 | 29965 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | C | 240 | 15.83 | 4.30 | 1.260 | 96.0 | SD | |
| | U90C3-a(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 22.20 | 2.37 | 30650 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | C | 240 | 15.83 | 4.30 | 1.260 | 69.5 | SD | |
| | U90C3-b(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 22.20 | 2.37 | 30650 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | C | 240 | 15.83 | 4.30 | 1.260 | 62.5 | SD | |
| | U4553-a(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 12.50 | 1.62 | 27287 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 4.30 | 1.260 | 67.2 | SD | |
| | U4553-b(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 22.67 | 2.40 | 30792 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 4.30 | 1.260 | 71.0 | SD | |
| | U90S5-a(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----|-----|---------|---------|---------|-------|------|-------|-------|-------|-----|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Alzate et al. | U90C5-a(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 16.47 | 1.94 | 28775 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.293 | C | 240 | 16.67 | 3.04 | 1.260 | 56.6 | SD | |
| | U90C5-b(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 14.64 | 1.80 | 28112 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.293 | C | 240 | 16.67 | 3.04 | 1.260 | 87.5 | SD | |
| | U4555(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 22.67 | 2.40 | 30792 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.293 | 0.293 | 240 | 16.67 | 3.04 | 1.260 | 72.7 | SD | |
| | U90S3-a(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 12.50 | 1.62 | 27287 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 3.04 | 1.260 | 65.6 | SD | |
| | U90S3-b(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 14.58 | 1.79 | 28089 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 3.04 | 1.260 | 89.6 | SD | |
| | U90S3-c(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 20.01 | 2.21 | 29965 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 3.04 | 1.260 | 35.0 | SD | |
| | U90C3-a(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 22.20 | 2.37 | 30650 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | C | 240 | 15.83 | 3.04 | 1.260 | 67.5 | SD | |
| | U90C3-b(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 22.20 | 2.37 | 30650 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | C | 240 | 15.83 | 3.04 | 1.260 | 56.0 | SD | |
| | U4553-a(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 12.50 | 1.62 | 27287 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 3.04 | 1.260 | 68.8 | SD | |
| | U4553-b(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 22.67 | 2.40 | 30792 | 500 | 200 | CFRP | U | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 3.04 | 1.260 | 58.9 | SD | |
| | W90S3-a(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 0.00 | 0.00 | 28089 | 500 | 200 | CFRP | W | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 4.30 | 1.260 | 185.0 | N/D | |
| | W90S3-b(L) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 0.00 | 0.00 | 28112 | 500 | 200 | CFRP | W | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 4.30 | 1.260 | 157.8 | N/D | |
| | W90S3-a(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 0.00 | 0.00 | 28089 | 500 | 200 | CFRP | W | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 3.04 | 1.260 | 187.1 | N/D | |
| | W90S3-b(C) | R | 250 | 420 | 1884.96 | - | 0.265 | 380 | 0.00 | 0.00 | 28112 | 500 | 200 | CFRP | W | 0.176 | 0.176 | 240 | 15.83 | 3.04 | 1.260 | 142.2 | N/D | |
| | SB-U1 | R | 75 | 180 | 7391.86 | 402.12 | 0.209 | 120 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 235 | 17.87 | 0.90 | 0.601 | 24.3 | N/D |
| | SB-U2 | R | 75 | 180 | 7392.86 | 402.12 | 0.209 | 120 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 235 | 17.87 | 0.90 | 0.602 | 5.1 | N/D |
| | SB-F1 | R | 75 | 180 | 7393.86 | 402.12 | 0.209 | 120 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.110 | 0.110 | 235 | 17.87 | 0.90 | 0.603 | 25.4 | N/D |
| | SB-F2 | R | 75 | 180 | 7394.86 | 402.12 | 0.209 | 120 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.110 | 0.110 | 235 | 17.87 | 0.90 | 0.604 | 25.9 | N/D |
| | LB-U1 | R | 300 | 720 | 7395.86 | 4825.49 | 0.838 | 240 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 3.75 | 1.800 | 25.4 | SD |
| | LB-U2 | R | 300 | 720 | 7395.86 | 4825.49 | 0.838 | 240 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 3.75 | 1.800 | 21.8 | SD |
| MB-U1 | R | 150 | 360 | 2068.97 | 1608.50 | 0.419 | 135 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.85 | 0.900 | 4.8 | SD | |
| MB-U2 | R | 150 | 360 | 2068.97 | 1608.50 | 0.419 | 135 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.85 | 0.900 | 9.9 | SD | |
| LB-F1 | R | 300 | 720 | 7395.86 | 4825.49 | 0.838 | 240 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 3.75 | 1.800 | 333.6 | SD | |
| LB-F2 | R | 300 | 720 | 7395.86 | 4825.49 | 0.838 | 240 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 3.75 | 1.800 | 343.2 | SD | |
| MB-F1 | R | 150 | 360 | 2068.97 | 1608.50 | 0.419 | 135 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.85 | 0.900 | 86.5 | SR | |
| MB-F2 | R | 150 | 360 | 2068.97 | 1608.50 | 0.419 | 135 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.85 | 0.900 | 100.5 | SR | |
| Leung et al. | SB-U1 | R | 75 | 180 | 7391.86 | 402.12 | 0.209 | 120 | 0.00 | 2.17 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 235 | 17.87 | 0.90 | 0.601 | 24.3 | N/D |
| | SB-U2 | R | 75 | 180 | 7392.86 | 402.12 | 0.209 | 120 | 0.00 | 2.17 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.110 | 0.110 | 235 | 17.87 | 0.90 | 0.602 | 5.1 | N/D |
| | SB-F1 | R | 75 | 180 | 7393.86 | 402.12 | 0.209 | 120 | 0.00 | 2.17 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.110 | 0.110 | 235 | 17.87 | 0.90 | 0.603 | 25.4 | N/D |
| | SB-F2 | R | 75 | 180 | 7394.86 | 402.12 | 0.209 | 120 | 0.00 | 2.17 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.110 | 0.110 | 235 | 17.87 | 0.90 | 0.604 | 25.9 | N/D |
| | LB-U1 | R | 300 | 720 | 7395.86 | 4825.49 | 0.838 | 240 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 3.75 | 1.800 | 25.4 | SD |
| | LB-U2 | R | 300 | 720 | 7395.86 | 4825.49 | 0.838 | 240 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 3.75 | 1.800 | 21.8 | SD |
| | MB-U1 | R | 150 | 360 | 2068.97 | 1608.50 | 0.419 | 135 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.85 | 0.900 | 4.8 | SD |
| | MB-U2 | R | 150 | 360 | 2068.97 | 1608.50 | 0.419 | 135 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | U | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.85 | 0.900 | 9.9 | SD |
| | LB-F1 | R | 300 | 720 | 7395.86 | 4825.49 | 0.838 | 240 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 3.75 | 1.800 | 333.6 | SD |
| | LB-F2 | R | 300 | 720 | 7395.86 | 4825.49 | 0.838 | 240 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.440 | 0.440 | 235 | 17.87 | 3.75 | 1.800 | 343.2 | SD |
| | MB-F1 | R | 150 | 360 | 2068.97 | 1608.50 | 0.419 | 135 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.85 | 0.900 | 86.5 | SR |
| | MB-F2 | R | 150 | 360 | 2068.97 | 1608.50 | 0.419 | 135 | 0.00 | 0.00 | 25625 | 400 | - | - | CFRP | W | 0.220 | 0.220 | 235 | 17.87 | 1.85 | 0.900 | 100.5 | SR |