

## SULLA ROTTURA PER RIFOLLAMENTO DI LAMINATI COMPOSITI PLURISTRATO

F. Ascione<sup>(a)</sup>, L. Feo<sup>(b)</sup>, F. Maceri<sup>(c)</sup>

<sup>(a)</sup> Università di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Ingegneria Civile; e-mail: [ascione@ing.uniroma2.it](mailto:ascione@ing.uniroma2.it)

<sup>(b)</sup> Università di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Civile; e-mail: [l.feo@unisa.it](mailto:l.feo@unisa.it)

<sup>(c)</sup> Università di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Ingegneria Civile; e-mail: [maceri@ing.uniroma2.it](mailto:maceri@ing.uniroma2.it)

*Parole chiave:* Laminati compositi, Fibre di vetro, Crisi per rifollamento, Collegamenti bullonati.

### Sommario

Il lavoro riguarda un'indagine sperimentale sul comportamento di unioni bullonate tra laminati compositi fibrorinforzati (FRP) monostrato e pluristrato del tipo *cross-ply*. In particolare, sono presentati i risultati relativi allo studio dell'influenza dell'angolo di fibratura e dello schema di laminazione del composito nei confronti del carico di rottura per rifollamento delle connessioni.

### 1. INTRODUZIONE

Gli FRP sono stati impiegati nelle strutture civili a partire dalla fine degli anni '80 [1-3] non solo come elementi di rinforzo di strutture esistenti ma come veri e propri materiali da costruzione, dotati di autonomia progettuale. In questo ambito, il problema del calcolo e della verifica dei collegamenti rappresenta uno degli aspetti più delicati della progettazione di strutture civili interamente realizzate con FRP, assieme al controllo e all'analisi dei fenomeni di instabilità globale e locale. Inoltre, i metodi di calcolo dei collegamenti messi a punto nel corso degli anni per le strutture realizzate con materiali tradizionali non sempre possono essere utilizzati anche per le strutture di materiale composito, caratterizzate da un diverso comportamento costitutivo con proprietà di simmetria, valori di rigidità, duttilità e resistenza a comportamento limite notevolmente diversi rispetto ai materiali tradizionali.

Le ricerche recentemente condotte hanno evidenziato le modalità di crisi delle connessioni bullonate tra laminati compositi individuando i principali fattori che ne sono responsabili [4-18]:

- geometria del giunto (diametro dei bulloni, larghezza e spessore dei piatti, distanza dei fori dai bordi);
- tipologia delle fibre e della matrice;
- schema di laminazione.

Al fine di pervenire ad una completa definizione dei criteri di progettazione e verifica delle unioni bullonate tra laminati FRP, si rende necessaria una validazione sperimentale delle formulazioni teoriche attualmente disponibili in letteratura [4-19]. In tale contesto si inserisce il presente lavoro, il cui principale obiettivo è quello di analizzare dal punto di vista sperimentale l'influenza dell'angolo di fibratura e dello schema di laminazione di compositi in fibra di vetro (GFRP) nei confronti del carico di rottura per rifollamento di connessioni bullonate [20].

## 2. I PROVINI DI GFRP

I provini di GFRP utilizzati nella presente ricerca hanno forma quadrata di lato 500mm (Fig. 1) e sono stati ottenuti per laminazione sottovuoto di otto o ventiquattro strati di tessuto unidirezionale in fibra di vetro impregnati con resina epossidica.

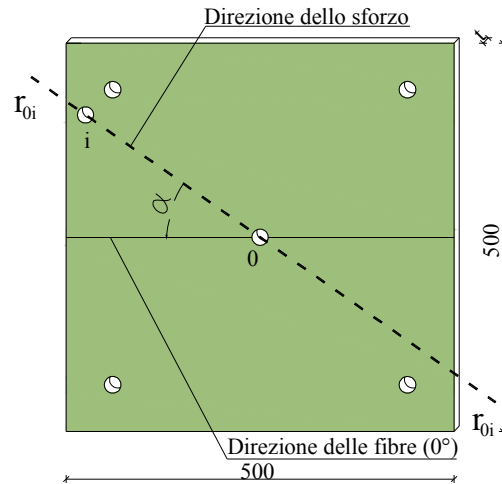


Figura 1: Geometria dei provini di GFRP

In particolare, sono stati utilizzati i seguenti tre tipi di laminato composito:

*Laminato 1*, costituito da otto strati di tessuto equiorientati e due strati esterni di *chopped strand mat (CSM)* con lo schema di laminazione  $[CSM/0_4]_s$ . Le frazioni volumetriche delle fibre e della matrice sono pari, rispettivamente, al 60% e 40%. Lo spessore del laminato è pari a 10mm.

*Laminato 2*, costruito in accordo con lo schema di laminazione  $[CSM/0_6/90_6]_s$ . In particolare, esso è formato da quattro gruppi di strati di tessuto: due gruppi composti ciascuno da 6 strati nella direzione  $0^\circ$  e altri due composti da sei strati disposti lungo la direzione ortogonale. Le frazioni volumetriche delle fibre e della matrice sono pari, rispettivamente, al 65% e 35%. Lo spessore del laminato è pari a 12mm.

*Laminato 3*, caratterizzato dallo schema di laminazione  $[(CSM/0_3/90_3)_2]_s$ . Esso risulta formato da otto gruppi di strati di tessuto. Di essi, quattro sono costituiti ciascuno da tre strati con fibre disposte lungo la direzione  $0^\circ$  ed altri quattro con le fibre disposte nella direzione ortogonale. I valori delle frazioni volumetriche delle fibre e della matrice, nonché dello spessore, sono i medesimi di quelli del laminato 2.

I valori nominali delle principali proprietà dei costituenti i laminati sono stati forniti dal produttore e sono riportati, rispettivamente, nelle tabelle 1 e 2.

Tabella 1a: Proprietà delle fibre del laminato 1

Proprietà <i>(Valori nominali forniti dal produttore)</i>	Unità di misura	Valore
Densità volumetrica	g/cm <sup>3</sup>	2.14
Diametro filamento	μm	14
Carico di rottura a trazione	MPa	2500
Modulo di elasticità normale a trazione	GPa	50
Allungamento a rottura	%	3.5 – 4.0

Tabella 1b: Proprietà della resina del laminato 1

<b>Proprietà</b> <i>(Valori nominali forniti dal produttore)</i>	<b>Unità di misura</b>	<b>Valore</b>
Carico di rottura a trazione	MPa	26
Modulo di elasticità normale a trazione	MPa	1400

Tabella 2a: Proprietà delle fibre dei laminati 2 e 3

<b>Proprietà</b> <i>(Valori nominali forniti dal produttore)</i>	<b>Unità di misura</b>	<b>Valore</b>
Densità volumetrica	g/cm <sup>3</sup>	2.59-2.62
Diametro filamento	μm	14
Carico di rottura a trazione	MPa	2600
Modulo di elasticità normale a trazione	GPa	73
Allungamento a rottura	%	3.5 – 4.0

Tabella 2b: Proprietà della resina dei laminati 2 e 3

<b>Proprietà</b> <i>(Valori nominali forniti dal produttore)</i>	<b>Unità di misura</b>	<b>Valore</b>
Carico di rottura a trazione	MPa	42
Modulo di elasticità normale a trazione	MPa	2500

Le proprietà meccaniche dei laminati sono state determinate dagli autori del presente lavoro attraverso l'esecuzione di prove di compressione e di trazione su campioni di materiale ricavati dai laminati (Tab. 3). Si rimanda il lettore ai lavori [20-21] per una dettagliata descrizione delle modalità di esecuzione delle suddette prove di caratterizzazione meccanica.

Tabella 3a: Proprietà meccaniche del laminato 1

<b>Proprietà</b> <i>(Valori sperimentali)</i>	<b>Unità di misura</b>	<b>Valore medio</b>
Resistenza a trazione, 0°	MPa	222
Resistenza a trazione, 90°	MPa	71
Resistenza a compressione, 0°	MPa	201
Resistenza a compressione, 90°	MPa	81
Modulo di elasticità normale, 0°	MPa	28431
Modulo di elasticità normale, 90°	MPa	11210

Tabella 3b: Proprietà meccaniche dei laminati 2 e 3

<b>Proprietà</b> <i>(Valori sperimentali)</i>	<b>Unità di misura</b>	<b>Valore medio</b>
Resistenza a trazione, 0°	MPa	310
Resistenza a trazione, 90°	MPa	310
Resistenza a compressione, 0°	MPa	381
Resistenza a compressione, 90°	MPa	381
Modulo di elasticità normale, 0°	MPa	25000
Modulo di elasticità normale, 90°	MPa	23000

Su ciascun provino (Fig.1) sono stati praticati quattro fori d'angolo ed altri due fori, di diametro pari a 21mm. Dei due ultimi, il primo è posizionato al centro (foro 0), ed il secondo (foro i), strumentale per la prova, è ubicato in corrispondenza del bordo del provino in modo che la retta passante per i centri dei due fori,  $r_{0i}$  (coincidente con la direzione dello sforzo sollecitante), formi con la direzione delle fibre un angolo  $\alpha$  di prefissato valore. I seguenti sedici valori dell'angolo  $\alpha$  sono stati presi in considerazione per le prove di rifollamento del laminato 1: 0°, 1°, 3°, 5°, 7°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 60°, 75° e 90°. Per i laminati 2 e 3, sono stati considerati i seguenti sette valori di  $\alpha$ : 0°, 1°, 5°, 20°, 25°, 45° e 90° [20, 21].

### 3. L'IMPIANTO SPERIMENTALE

Il dispositivo sperimentale per le prove di rifollamento consiste in due coppie di piatti d'acciaio di forma quadrata, con lato pari a 500 mm e spessore di 50 mm. Al centro dei piatti è presente un foro di 300 mm di diametro [20, 21]. Per eseguire la prova il generico provino di GFRP viene inserito tra i due piatti d'acciaio e ad essi collegato per il tramite dei quattro bulloni inseriti nei corrispondenti fori d'angolo. La notevole rigidezza dei piatti di acciaio, rispetto a quella del laminato di GFRP, consente di considerare la parte circolare del provino (di diametro 300 mm) come una piastra incastrata al bordo. Il dispositivo di prova viene ammorsato alle ganasce di una macchina universale di prova, caratterizzata da un valore del carico massimo pari a 630kN (Fig. 2).



Figura 2: Dispositivo di ancoraggio

In particolare, alla ganascia inferiore della macchina di prova è agganciato il bullone, avente diametro di 20 mm, inserito al centro del provino di GFRP e a quella superiore è fissato il bullone inserito nel foro presente sul bordo del dispositivo, in modo da applicare lo sforzo secondo la direzione voluta. La prova viene quindi effettuata in controllo di spostamento assumendo quale velocità di carico il valore  $9.9 \cdot 10^{-3}$  mm/sec.

Si precisa che tutti i provini di GFRP sono stati strumentati nell'intorno del foro centrale (foro 0), mediante l'applicazione di dieci rosette estensimetriche del tipo "C2A-06-062LR-120 Vishay MM", disposte su entrambe le facce del provino ad una distanza relativa compresa tra i 5 mm ed i 10mm, così come illustrato in Figura 3 [20, 21]. In particolare, i trasduttori di deformazione sono autocompensati in temperatura e presentano tre griglie estensimetriche inclinate tra loro di un angolo pari a  $45^\circ$  e resistenza elettrica di  $120 \pm 0.6$  Ohm a  $24^\circ\text{C}$ .

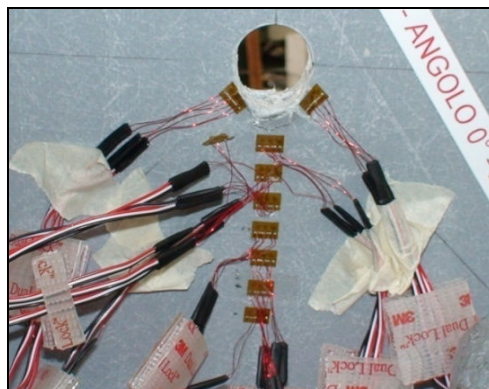


Figura 3: Strumentazione intorno al foro centrale del generico provino di GFRP (immagine ripresa dopo la rottura del provino cui è seguito il distacco della rosetta R1)

Durante l'esecuzione delle prove, i valori del carico, degli spostamenti e delle deformazioni sono stati registrati in automatico da un sistema di acquisizione dati composto da tre centraline "System 5100 Vishay MM" disposte in parallelo e caratterizzate complessivamente dalla presenza di 60 canali estensimetrici.

#### 4. RISULTATI DELL'INDAGINE SPERIMENTALE

In questo paragrafo si presentano i risultati dell'indagine sperimentale in termini di valori del carico di rottura per rifollamento,  $F_u^{(\alpha)}$ , di tutti i provini esaminati. Il valore del suddetto carico di rottura è stato ricavato dal diagramma carico-spostamento e corrisponde al picco della suddetta curva (Fig.4).

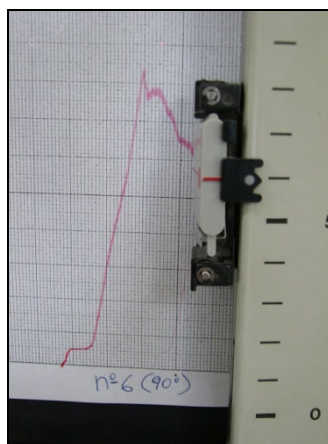


Figura 4: Tipico diagramma carico-spostamento

#### 4.1 Laminato 1

In figura 5 è mostrato l'andamento del rapporto  $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$  al variare dell'angolo  $\alpha$ , essendo  $F_u^{(0)}$  il carico di rottura del provino le cui fibre sono parallele allo sforzo applicato ( $\alpha = 0$ ).

In tali curve, i valori di  $F_u^{(\alpha)}$  sono da intendersi come valori medi:  $F_u^{(\alpha)} = (F_{u^{(\alpha)},1} + F_{u^{(\alpha)},2} + F_{u^{(\alpha)},3}) / 3$ .

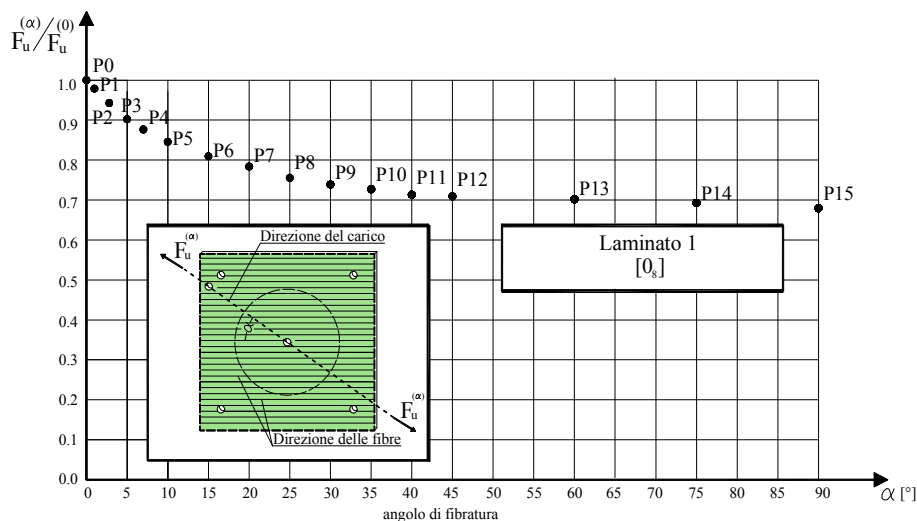


Figura 5: Curve  $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$  in funzione dell'angolo  $\alpha$  e del diametro del bullone centrale (laminato 1)

Com'è possibile osservare, le suddette curve decrescono sensibilmente nell'intervallo di valori dell'angolo  $\alpha$  compresi tra  $0^\circ$  e  $10^\circ$ . In particolare, in corrispondenza del valore  $\alpha=10^\circ$  (provino P5), le curve sono caratterizzate da una riduzione del carico di rottura pari a circa il 15% rispetto al valore massimo registrato  $F_u^{(0)}$  (provino P0 -  $\alpha = 0^\circ$ ).

Per valori superiori dell'angolo di inclinazione dello sforzo ( $10^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) si registra un'ulteriore riduzione della resistenza a rifollamento di tutti i provini esaminati, sebbene le curve  $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$  presentino una pendenza meno accentuata rispetto a quella del primo tratto ( $0^\circ < \alpha < 10^\circ$ ). Come era da attendersi, la resistenza a rifollamento attinge il valore minimo in corrispondenza del provino P15 ( $\alpha=90^\circ$ ), con un abbattimento del carico di rottura pari a circa il 32% rispetto a quello del provino P0 ( $\alpha=0^\circ$ ). In Tabella 4 sono riportati i valori del carico di rottura per rifollamento di tutti i provini testati.

Tabella 4: Valori del carico ultimo

Provino n°	$\alpha \pm 0.2$	$F_u^{(\alpha)}, 1$	$F_u^{(\alpha)}, 2$	$F_u^{(\alpha)}, 3$	$F_{u, medio}^{(\alpha)}$	varianza
	[°]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	
1 (P1)	1	32.60	32.44	32.94	32.58	0.0172
2 (P2)	3	32.76	30.24	31.74	31.38	0.0972
3 (P3)	5	31.13	30.07	30.12	30.03	0.0133
4 (P4)	7	29.90	29.90	27.71	29.17	0.0433
5 (P5)	10	28.22	29.13	25.90	28.15	0.0948
6 (P6)	15	25.72	28.01	26.73	27.01	0.0813
7 (P7)	20	25.92	27.52	25.22	26.22	0.0841
8 (P8)	25	26.46	26.46	24.00	25.64	0.0075
9 (P9)	30	25.20	26.42	25.33	25.15	0.0616
10 (P10)	35	24.67	25.96	23.92	25.15	0.0886
11 (P11)	40	24.01	25.40	24.51	24.84	0.0220
12 (P12)	45	24.57	23.82	24.93	24.44	0.0283
13 (P13)	60	23.62	23.63	23.55	23.60	0.0019
14 (P14)	75	22.99	23.00	23.19	23.06	0.0127
15 (P15)	90	22.68	22.42	22.76	22.62	0.0316

#### 4.2 Laminati 2 e 3

Nelle figure 6 e 7 sono illustrate le curve  $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$  al variare dell'angolo  $\alpha$  ottenute dalle prove a rifollamento dei laminati pluristrato 2 e 3, rispettivamente. Le suddette curve si riferiscono ai valori medi del carico  $F_u^{(\alpha)}$ .

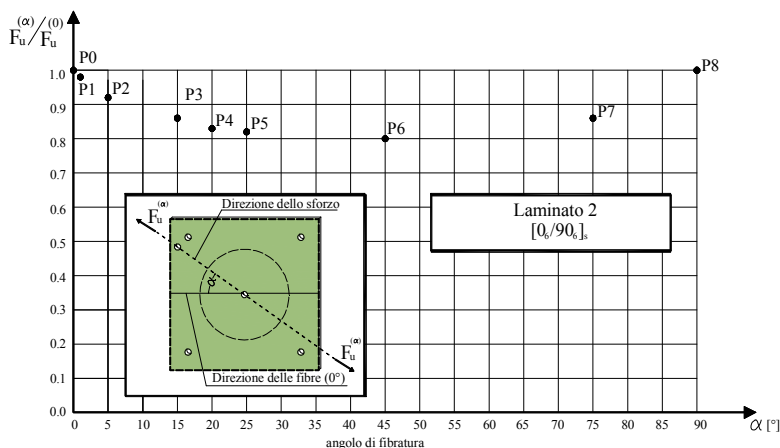


Figura 6: Curva del rapporto  $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$  in funzione dell'angolo  $\alpha$  per il laminato 2

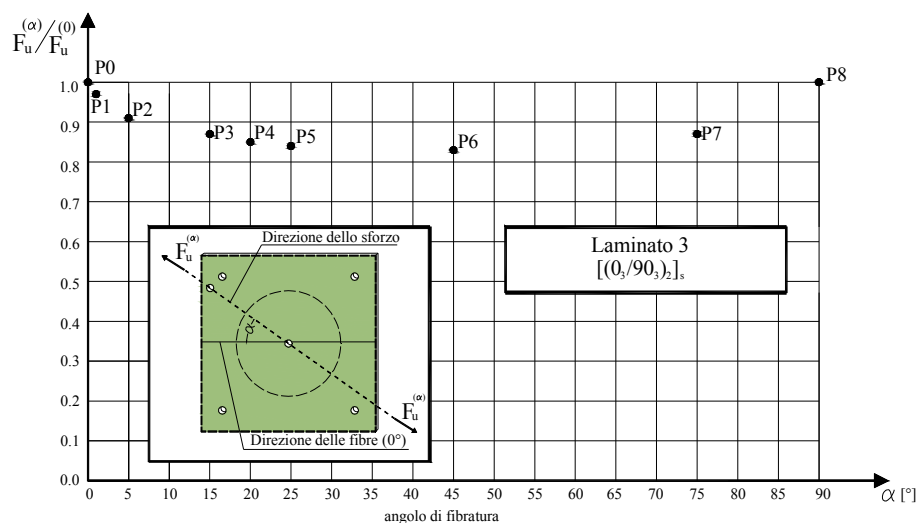


Figura 7: Curva del rapporto  $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$  in funzione dell'angolo  $\alpha$  per il laminato 3

Com'è possibile osservare, le curve  $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$  presentano un asse di simmetria in corrispondenza del valore dell'angolo  $\alpha=45^\circ$  e sono caratterizzate da un sensibile decremento della resistenza a rifollamento per valori dell'angolo  $\alpha$  compresi tra  $0^\circ$  e  $15^\circ$ . In particolare, per il laminato 2, il rapporto  $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$  assume valore pari a 0.86 nel caso del provino P3 ( $\alpha=15^\circ$ ), corrispondente ad una riduzione del carico di rottura per rifollamento pari a circa il 14% rispetto al valore massimo registrato (provino P0,  $\alpha=0^\circ$ ). All'aumentare dell'angolo  $\alpha$ , si osserva un'ulteriore riduzione della resistenza a rifollamento anche se la curva  $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$  risulta caratterizzata da una pendenza meno accentuata rispetto a quella relativa al primo tratto ( $0^\circ < \alpha < 15^\circ$ ).

Si osserva inoltre che il carico di rottura per rifollamento attinge il valore minimo in corrispondenza del provino P6, per entrambe le tipologie di laminato pluristrato considerate, le cui fibre sono disposte a  $45^\circ$  rispetto alla direzione dello sforzo sollecitante, con un abbattimento del suddetto carico di circa il 20%.

Si precisa infine che la massima differenza percentuale dei valori del carico di rottura per rifollamento relativi alle due diverse tipologie di laminato pluristrato considerate è pari a circa il 5%. Pertanto, la sequenza di laminazione può essere, in prima approssimazione, considerata ininfluyente nei casi studiati. Nelle tabelle 5 e 6 sono riportati tutti i valori del carico di rottura per rifollamento dei provini pluristrato.

Tabella 5: Valori del carico ultimo (laminato 2)

Provino n°	$\alpha \pm 0.2$	$F_u^{(\alpha)}, 1$	$F_u^{(\alpha)}, 2$	$F_u^{(\alpha)}, \text{medio}$	varianza
	[°]	[KN]	[KN]	[KN]	
0 (P0)	0	76.10	75.78	75.94	0.0520
1 (P1)	1	74.20	74.60	74.40	0.0800
2 (P2)	5	70.10	69.90	70.00	0.0200
3 (P3)	15	64.91	65.09	65.00	0.0160
4 (P4)	20	63.32	62.68	63.00	0.2000
5 (P5)	25	61.85	62.15	62.00	0.0450
6 (P6)	45	60.87	61.13	61.00	0.0330
7 (P7)	75	65.21	64.79	65.00	0.0880
8 (P8)	90	76.00	75.88	75.94	0.0078

Tabella 6: Valori del carico ultimo (laminato 3)

Provino n°	$\alpha \pm 0.2$	$F_u^{(\alpha)}, 1$	$F_u^{(\alpha)}, 2$	$F_u^{(\alpha)}, \text{medio}$	varianza
	[°]	[KN]	[KN]	[KN]	
0 (P0)	0	72.40	72.04	72.22	0.0630
1 (P1)	1	70.34	69.66	70.00	0.2310
2 (P2)	5	65.88	66.12	66.00	0.0280
3 (P3)	15	63.22	62.78	63.00	0.0960
4 (P4)	20	62.17	61.83	62.00	0.0570
5 (P5)	25	60.91	61.09	61.00	0.0160
6 (P6)	45	60.11	59.89	60.00	0.0240
7 (P7)	75	62.89	63.11	63.00	0.0240
8 (P8)	90	72.40	72.04	72.22	0.0600

## 5. CARICO DI ROTTURA PER RIFOLLAMENTO: FORMULA DI PROGETTO

Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti viene proposta la seguente formula che fornisce il valore del carico di rottura per rifollamento di laminati simmetrici di GFRP in funzione dell'angolo di fibratura:

$$F_{u,\alpha} = F_{u,0} \left[ \left( 1 - \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} \right) \cdot (A_\alpha)^5 + \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} + C \cdot (m \alpha)^3 \cdot (A_\alpha)^3 \right], \quad [\alpha \text{ in radianti}] \quad (1)$$

I simboli presenti nella (1) assumono le seguenti espressioni:

$$A_\alpha = \frac{\pi/2 - (m \alpha)}{\pi/2}, \quad (2)$$

$$C = \left( \frac{\pi}{8} \right)^{-3} \left[ \frac{F_{u,(\pi/4)}}{F_{u,0}} - \left( 1 - \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} \right) \left( \frac{1}{2} \right)^5 - \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} \right], \quad (3)$$

$$F_{u,0} = \text{carico di rottura per } \alpha \text{ pari a } 0^\circ, \quad (5)$$

$$F_{u,\pi/4} = \text{carico di rottura per } \alpha \text{ pari a } 45^\circ, \quad (6)$$

$$F_{u,\pi/2} = \text{carico di rottura per } \alpha \text{ pari a } 90^\circ. \quad (7)$$

Il coefficiente  $m$ , denominato “modulo di replicabilità”, rappresenta, invece, il numero di rotazioni uguali intorno all'asse perpendicolare al piano del laminato necessarie per riportare quest'ultimo su sé stesso (si trascura l'influenza dello schema di laminazione). Nel caso di laminati monostrato unidirezionali,  $m$  assume valore unitario, mentre nel caso di laminati pluristrato tipo “cross-ply”, esso assume il valore 2.

In figura 8 è mostrato un confronto tra i valori sperimentali del carico di rottura e quelli ottenuti per il tramite della (1) per i laminati monostrato. Le differenze, in termini percentuali, non sono superiori al 2% per ciascun valore dell'angolo di fibratura considerato.

In figura 9 è inoltre mostrato lo stesso confronto riferito ai laminati pluristrato.

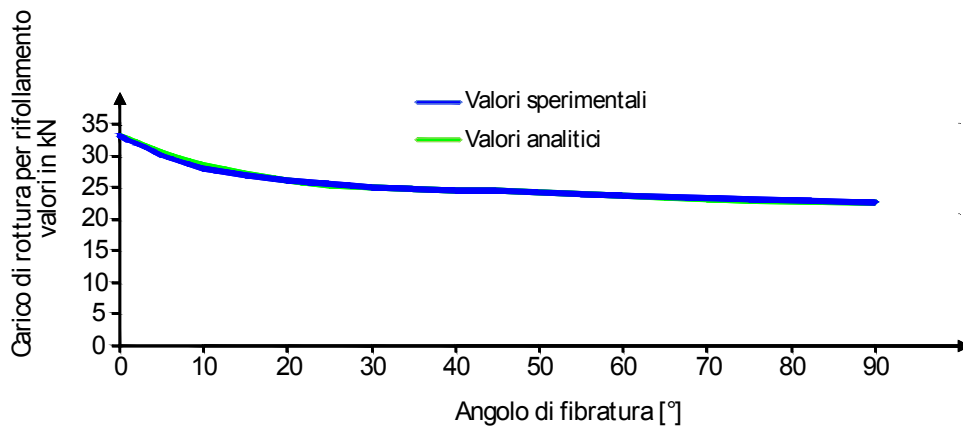


Figura 8: Confronto tra i valori sperimentali e quelli analitici del carico di rottura per rifollamento (laminato 1)

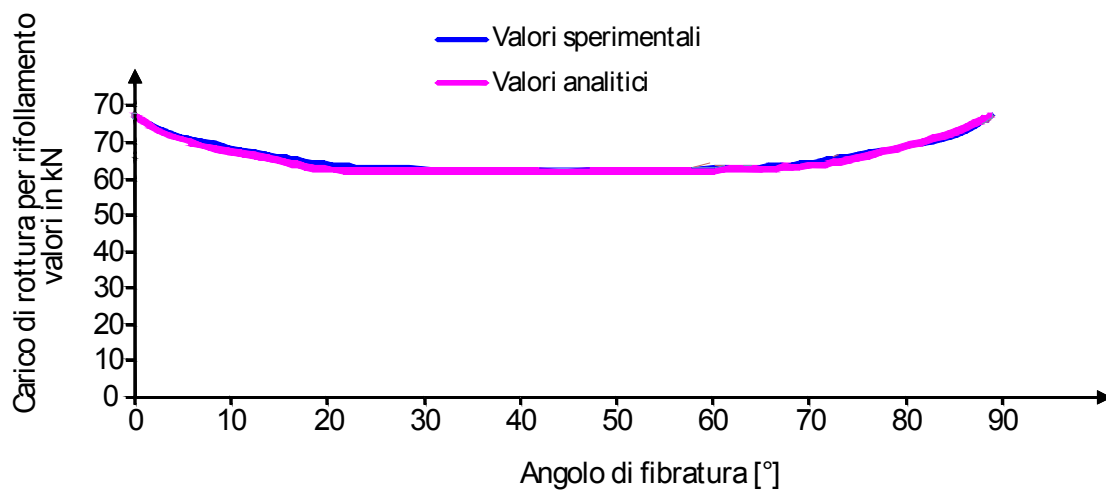


Figura 9: Confronto tra i valori sperimentali e quelli analitici del carico di rottura per rifollamento (laminato 2 e 3)

## 6. CONCLUSIONI

Lo studio sperimentale ha riguardato l'analisi dell'influenza dell'angolo di fibratura e dello schema di laminazione sul carico di rottura per rifollamento di laminati compositi di GFRP sia monostrato che pluristrato.

I risultati ottenuti permettono di concludere quanto di seguito riportato:

- il valore del carico di rottura per rifollamento dipende sensibilmente dall'angolo di inclinazione delle fibre rispetto alla direzione del carico;
- lo schema di laminazione dei compositi pluristrato esaminati non influenza marcatamente il carico di rottura per rifollamento.

E' stata infine proposta una formula di progetto del carico limite per rifollamento in funzione dell'angolo di fibratura del laminato.

Nel prosieguo della ricerca si intende investigare circa l'influenza del diametro del bullone nei confronti del carico di rottura per rifollamento sia per laminati unidirezionali monostrato che per quelli pluristrato.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] P. R. Head: *Advanced composites in civil engineering – A critical overview at this high interest, low use stage of development*, Second international conference on advanced composite materials in bridges and structures, Montréal, Québec, Canada, pp. 3-15, 1996.
- [2] Structural Plastic Design Manual, Volume 1 e 2, ASCE 1984, American Society of Civil Engineers, 1984.
- [3] Bruno, D., Spadea G., Swamy, R.N., "Composites in constructions". Atti del Convegno Internazionale Composites in Constructions, Cosenza, Italia, 2003.
- [4] Hassan, N.K., Mohamedien, M.A. and Rizkalla, S.H., "Finite element analysis of bolted connections for PFRP composites", *Composites Part B: Engineering*, Volume 27 (3-4), pp. 339-349, 1996.
- [5] Camanho, P.P., Matthews, F. L., "Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: a review", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 28 (6), pp. 529-547, 1997.
- [6] Kelly, G., Hallström, S., "Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance", *Composites Part B: Engineering*, Volume 35, pp. 331-343, 2004.
- [7] Li, R., Kelly, D., and Crosky, A., "Strength improvement by fibre steering around a pin loaded hole", *Composite Structures*, Volume 57, pp. 337-383, 2002.
- [8] Lie, S.T., Yu, G., and Zhao, Z., "Analysis of mechanically fastened composite joints by boundary element methods", *Composites Part B: Engineering*, Volume 31 (8), pp. 693-705, 2000.
- [9] Ekh, J., Schön, J., Melin, L. G., "Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints", *Composites Part B: Engineering*, Volume 36 (8), pp. 195-208, 2005.
- [10] Ekh, J., Schön, J., "Load transfer in multirow, single shear, composite-to-aluminium lap joints", *Composites Science and Technology*, Volume 66, pp. 875-885, 2006.
- [11] Vangrimde, B., Boukhili, R., "Bearing stiffness of glass fibre-reinforced polyester: influence of coupon geometry and laminate properties", *Composite Structures*, 58, pp. 57-73, 2002.
- [12] Vangrimde, B., Boukhili, R., "Descriptive relationships between bearing response and macroscopic damage in GFRP bolted joints", *Composites Part B: Engineering*, Volume 34 (8), pp. 593-605, 2003.
- [13] Xiao, Y., Ishikawa, T., "Bearing strength and failure behaviour of bolted composite joints (part II: modelling and simulation)", *Composites Science and Technology: Engineering*, Volume 65, pp. 1032-1043, 2005.
- [14] Ireman, T., "Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints", *Composites Structures*, Volume 43, pp. 195-216, 1998.
- [15] Yan, Y., Wen, W.-D., Chang, F.-K., and Shyprykevich, P., "Experimental study on clamping effects on the tensile strength of composite plates with a bolt-filled hole", *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, Volume 30, pp. 1215-1229, 1999.
- [16] Starikov, R., Schön, J., Experimental study on fatigue resistance of composite joints with protruding-head bolts, *Composites Structures*, Volume 55, pp. 1-11, 2002.

- [17] F. Ascione, L. Feo, F. Maceri, “Un’analisi numerica preliminare ed un dispositivo sperimentale per lo studio del comportamento di collegamenti bullonati in strutture composite laminate”, Atti del XXXV Convegno AIAS, Ancona, Italia, 2006.
- [18] F. Ascione, L. Feo, F. Maceri, “Primi risultati sperimentali sul comportamento di collegamenti bullonati in strutture composite laminate”, Atti del XXXVI Convegno AIAS, Ischia, Italia, 2007.
- [19] CNR DT 205/2007, *Istruzioni per la progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture realizzate con Profili Sottili Pultrusi di Materiale Composito Fibrorinforzato (FRP)*, CNR, Roma, 2007.
- [20] F. Ascione, L. Feo, F. Maceri, “An experimental investigation on the bearing failure load of glass fibre/epoxy laminates”, in corso di stampa su *Composites Part B*, 2008.
- [21] F. Ascione, “*Modellazione di giunti di FRP*”, Tesi di dottorato di ricerca presso l’Università di Roma “Tor Vergata”, 2008, sito web <http://dspace.uniroma2.it/dspace/index.jsp>.