



POLITECNICO
MILANO 1863

Cognome: **BERNESCHI**

Nome: **ANGIOLO**

Codice Fiscale: **BRNNGI90M10A390E**

Luogo e Data di Nascita: **Arezzo, 10/08/1990**

Domicilio: **Loc. Ponte Buriano 64/e, Arezzo, Cap. 52100 (IT)**

Matricola Politecnico di Milano: **818275**

Titolo tesi:

"ENHANCING THE USE OF EXTERNALLY-BONDED FRP LAMINATES WITH FRP ANCHOR SPIKES"

Sessione:

III) Recupero di edifici, sperimentazione e controlli nella verifica di funzionalità, nel ripristino e nell'adeguamento statico e sismico.

Relatore di riferimento:

Prof. Carlo Poggi - Professore Ordinario del Politecnico di Milano

Referente straniero:

Prof. Antonio Nanni - Professore Ordinario e Presidente del Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering della University of Miami

Ente ospitante:

University of Miami, Miami, FL, Stati Uniti d'America.

Partner e Ruoli:

Il progetto nasce dalla collaborazione fra il Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito del Politecnico di Milano e il Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering della University of Miami rispettivamente nella figura del Prof. Carlo Poggi e del Prof. Antonio Nanni. Questa collaborazione, iniziata nel 2012, ha come tema lo studio dell'integrazione dei materiali compositi come elementi di rinforzo per le costruzioni, tema di grande rilevanza per la realtà Italiana e sul quale l'università americana ospitante ha un'esperienza di ricerca quasi decennale.

Abstract TESI:

I sistemi compositi FRP (materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica) sono materiali ideali per il rinforzo di strutture esistenti in calcestruzzo. L'efficienza del sistema di rinforzo dipende principalmente da un'adeguata adesione tra la lamina di FRP ed il substrato di calcestruzzo. Tra tutte le tecniche di ancoraggio che potrebbero migliorare tale legame, in questa tesi vengono analizzati gli ancoraggi in CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) per la loro efficienza, facile maneggevolezza ed alta resistenza. Questo tipo di ancoraggio permette alla lamina di raggiungere deformazioni ben oltre quelle di "debonding", creando così i presupposti per una miglior efficienza del rinforzo strutturale. Inoltre, essendo le lamine fabbricate con lo stesso materiale degli ancoraggi stessi, questi ultimi hanno un ulteriore pregio, cioè quello di non essere corrosivi e pericolosi per il sistema di rinforzo.

Un ancoraggio in FRP consiste in un fascio di fibre di carbonio con un'estremità inserita nel foro nel substrato di calcestruzzo precedentemente riempito di resina epossidica, e con l'altra aperta a ventaglio sulla lamina di FRP. In generale, gli ancoraggi sono sottoposti a due tipi di azione: trazione e taglio. La loro efficacia largamente dipende dalla loro resistenza a tali sollecitazioni. Attualmente non esistono criteri progettuali o linee guida che possano aiutare il progettista a quantificare il miglioramento, in termini di resistenza della struttura esistente, in seguito all'installazione degli ancoraggi nei sistemi di rinforzo esterno in FRP.

Lo scopo della mia ricerca è di comprendere a fondo il comportamento di tali ancoraggi e di identificare i parametri chiave che ne influenzano l'efficacia. La campagna sperimentale prevede quindi diversi tipi di esperimenti volti allo studio del loro funzionamento. Inizialmente viene effettuato un primo pullout test volto alla determinazione della resistenza degli ancoraggi sottoposti a pura trazione. A questo è seguito un altro pullout test in cui il parametro analizzato è il raggio di curvatura della smussatura del foro. Infine, viene eseguito un double shear test in cui vari tipi di configurazione del ventaglio dell'ancoraggio sono stati analizzati. Sulla base dei risultati ottenuti, verrà redatta una linea guida per l'utilizzo degli ancoraggi in FRP

che possa dare informazioni agli ingegneri riguardo l'utilizzo degli ancoraggi durante la fase di progettazione del rinforzo strutturale per strutture esistenti.

Obiettivi generali:

L'evoluzione di materiali e tecniche alternative per la riabilitazione strutturale è di essenziale importanza per la preservazione o adeguamento di strutture esistenti in calcestruzzo armato e muratura. I sistemi compositi FRP (materiali compositi fibrorinforzati) rappresentano un eccellente metodo di rinforzo strutturale, sviluppato soprattutto in seguito agli eventi sismici che si sono verificati in Italia negli ultimi anni. Il progetto di ricerca nasce con lo scopo di indagare come migliorare l'efficacia di tali sistemi di rinforzo mediante l'utilizzo di ancoraggi, anch'essi costruiti in materiale composito FRP.

A seguito di indagini sperimentali sviluppate negli anni, è emerso come gli FRP dipendano in maniera rilevante dal legame con il substrato di calcestruzzo o muratura, evidenziando come la principale problematica legata all'utilizzo di tali materiali sia il collasso per distacco del rinforzo dal substrato.

Per ridurre o eliminare questo fenomeno è stata studiata una tecnologia con ancoraggi in materiale composito FRP, nello specifico chiamati connettori, da inserire nella struttura da rinforzare ed aperti a ventaglio, in grado di incrementare così la resistenza al distacco del rinforzo in FRP (Figura 2).

Al momento purtroppo non vi sono norme vigenti che regolino l'utilizzo di tali ancoraggi e tutto è rimandato al buon senso dell'ingegnere civile.

La mia tesi ha previsto una ricerca sperimentale dettagliata volta allo studio dei parametri che regolano l'efficacia di tali connettori nel miglioramento dei sistemi di rinforzo esterno in FRP. A partire da questi risultati sperimentali, sono stati redatti consigli tecnici che potranno aiutare i progettisti nel loro lavoro di recupero e preservazione di strutture esistenti.



Figure 1 - Tipico Connettore (Righello in Inch)

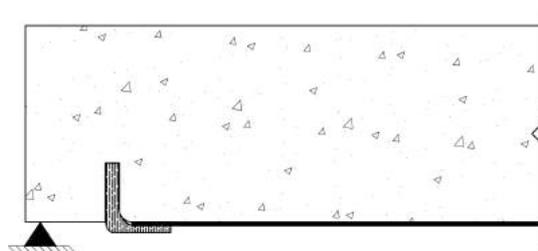


Figure 2 - Tipica applicazione di un connettore nel sistema rinforzo a flessione di trave in C.A

Obiettivi specifici :

In generale, il principio di funzionamento dei rinforzi esterni in FRP è basato sul trasferimento degli sforzi agenti sull'elemento strutturale ad un tessuto di materiale polimerico ad alta resistenza mediante una resina organica. Fin dagli anni '80 gli FRP sono stati la tecnologia di rinforzo maggiormente impiegata, nonostante alcuni suoi grandi limiti siano stati fin da subito messi in evidenza.

L'utilizzo di ancoraggi in FRP ha permesso di prevenire o limitare notevolmente uno dei più grandi problemi legati all'utilizzo di questi rinforzi esterni, il distacco prematuro della lamina dal substrato in calcestruzzo.

I connettori permettono alla lamina di raggiungere deformazioni ben oltre quelle di "debonding" creando così i presupposti per una miglior efficienza del rinforzo strutturale. Inoltre, essendo le lamine fabbricate con lo stesso materiale degli ancoraggi stessi, quest'ultimi hanno un ulteriore pregio, cioè quello di non essere corrosivi e pericolosi per il sistema di rinforzo.

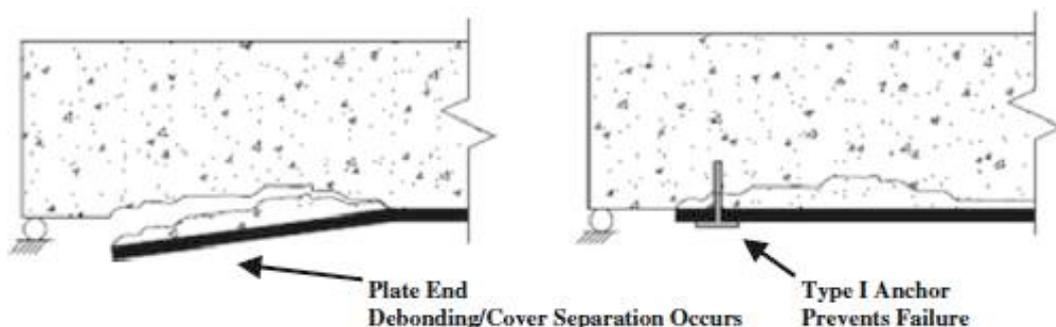


Figure 3 - Efficacia dei connettori nel prevenire il distacco della lamina dal substrato

Lo studio eseguito nel mio lavoro di ricerca è stato finalizzato alla quantificazione del miglioramento apportato dagli ancoraggi sulle lamine di FRP, in termini di deformazione massima e quindi di carico massimo applicabile all'elemento strutturale.

In generale, i connettori sono soggetti ad un' azione di taglio e trazione e la loro resistenza complessiva dipende da alcuni parametri quali la lunghezza di ancoraggio del connettore, la smussatura che deve avere il foro e le varie configurazioni che il ventaglio può assumere sopra la lamina. Tali proprietà sono state studiate nel dettaglio mediante tre tipologie diverse di test eseguiti in laboratorio.

Contenuto Scientifico:

Attualmente i test sui connettori in FRP non sono regolati da alcuna norma e la ricerca bibliografica è stata di fondamentale importanza in una prima fase della campagna. La volontà iniziale è stata quindi quella di giungere alla pianificazione di un processo sperimentale atto alla caratterizzazione dell'ancoraggio in ogni sua parte, analizzandone i parametri fondamentali che ne governano il comportamento.

Lo studio è risultato essere di fondamentale importanza da un punto di vista scientifico in quanto pone le basi per una futura analisi ancora più approfondita dell'argomento presso l'University of Miami e presso il Politecnico di Milano, che porterà alla redazione di linee guida e consigli tecnici per l'utilizzo dei sistemi di ancoraggio in fase di progetto. Un ulteriore tesista proveniente dal Politecnico di Milano sta infatti proseguendo i miei studi presso questa importante università americana.

Come detto precedentemente, i connettori sono sottoposti a due tipi di azione: trazione e taglio. La loro efficacia largamente dipende dalla loro resistenza a tali sollecitazioni. La campagna sperimentale ha previsto quindi diversi tipi di esperimenti volti allo studio del loro comportamento.

Inizialmente è stato eseguito un primo pull-out test volto alla determinazione della resistenza degli ancoraggi sottoposti a pura trazione. Parametro determinante in questa fase è stata la lunghezza di ancoraggio, cioè la parte di connettore immersa nel substrato di calcestruzzo. Mediante l'utilizzo di potenziometri è stato calcolato lo scorrimento del connettore all'interno del substrato così da poterne studiare a fondo l'andamento delle tensioni.

Le seguenti foto mostrano la geometria del provino ed il set up di prova.

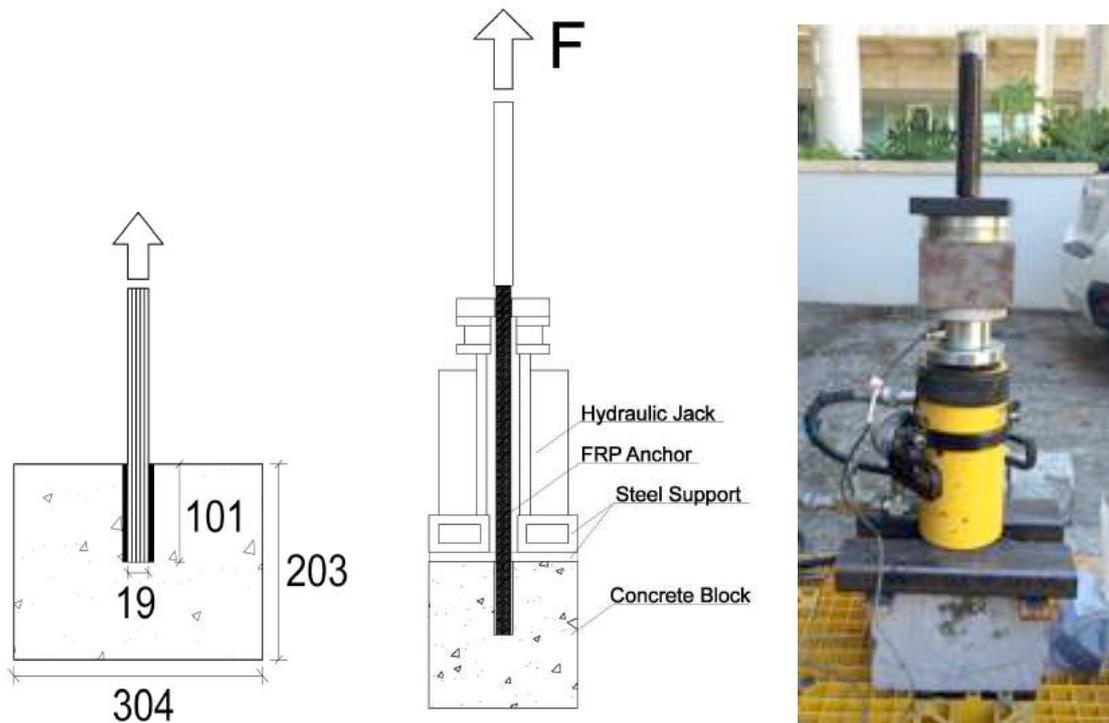


Figure 4 - Test 1

A questo test è seguito un altro pull-out test in cui il parametro analizzato è stato il raggio di curvatura della smussatura del foro (Figure 5). In particolare, si è potuto studiare come questo sia determinante nella formazione di eventuali picchi di tensione nel connettore all'attacco del foro. Tre diversi valori di raggio di smussatura sono stati analizzati: 0 mm, 6 mm e 12 mm.

Come è possibile notare nelle foto sottostanti, il “bonding” tra ancoraggio e parete interna del foro è stato evitato mediante l'utilizzo di un tubo di plastica inserito all'interno. Il connettore risulta essere attaccato al substrato soltanto in corrispondenza della smussatura e della superficie inferiore del provino, su cui preventivamente è stata installata una lamina di FRP, per essere coerenti con la situazione reale nel campo. Le seguenti foto mostrano il set up di prova.

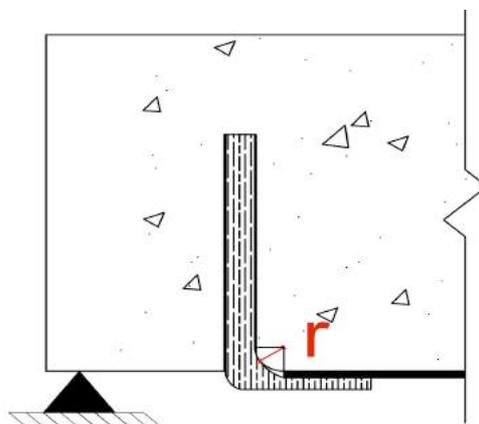


Figure 5 - Raggio di smussatura del foro

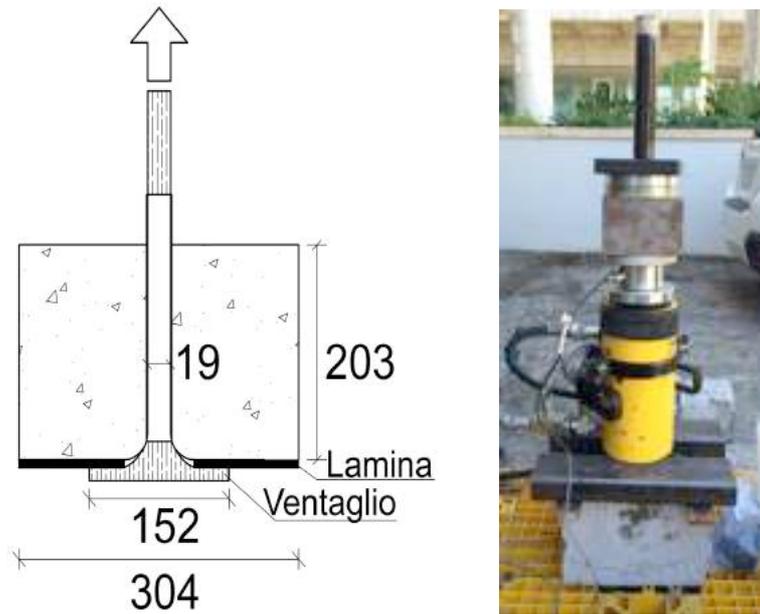


Figure 6 - Test 2

Infine, è stato eseguito uno Double Shear Test in cui vari tipi di configurazione del ventaglio dell'ancoraggio sono stati analizzati. In questa fase, la più importante, si è studiata la distribuzione delle tensioni d'interfaccia tra lamina in FRP e substrato, ed in particolare i miglioramenti dati dalla presenza dell'ancoraggio nel sistema di rinforzo, in termini di deformazione della lamina e carico di distacco.

Le configurazioni del ventaglio studiate sono osservabili nella figura sottostante, Figura 8. Vi sono quattro tipologie diverse di provino; la prima è chiamata benchmark ed è rappresentata dal provino privo di ancoraggi, sulla base del quale si confronteranno i risultati ottenuti dai provini ancorati. Le altre tre tipologie riguardano invece i provini ancorati, dove il ventaglio assume un angolo di 90° e 60° . L'ultima tipologia, chiamata sandwich, prevede un ancoraggio con ventaglio a 60° , coperto da un'ulteriore lamina di FRP (FRP cover).

Le seguenti foto mostrano le varie configurazioni ed il set up di prova.

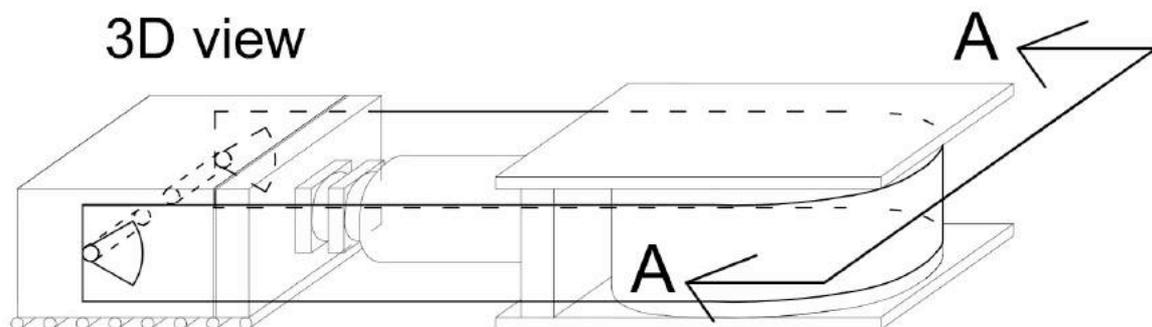


Figure 7 - Test 3 - Double shear test

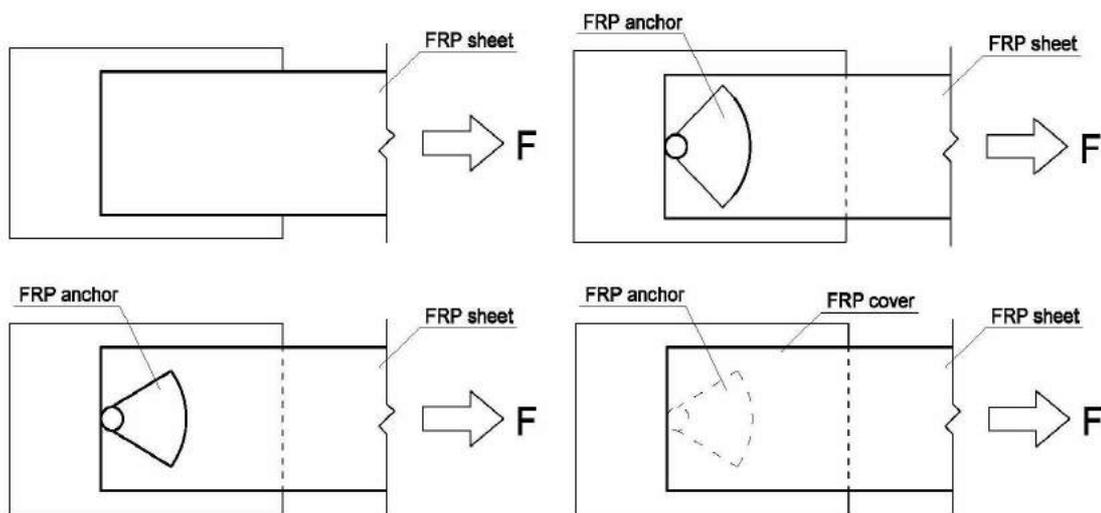


Figure 8 - Configurazioni del ventaglio



Figure 9 - Test 3 – Double Shear Test

La campagna sperimentale si è conclusa con una fase di analisi e presentazione dei risultati.

Durante l'attività sperimentale tutti i provini sono stati testati dal sottoscritto con il grande aiuto e sostegno da parte del team del Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering dell' University of Miami.

Dopo la fase sperimentale presso l'università americana, ho deciso di concludere il lavoro presso il Politecnico di Milano dove ho portato avanti una modellazione numerica mediante codice ad elementi finiti.

Risultati:

Mediante lo studio dei parametri fondamentali che governano il comportamento dei connettori, è stato possibile definire quelle proprietà che i connettori in FRP dovrebbero avere per rendere più efficace la loro azione. Inoltre, come già menzionato, il progetto di ricerca si propone di porre una base per futuri studi ancora più approfonditi che portino alla stesura di norme tecniche in grado di aiutare gli ingegneri progettisti nel loro lavoro. Infine, grazie all'intensa attività di laboratorio, è stato possibile inoltre fornire alcune considerazioni pratiche sulla modalità di installazione dei connettori, argomento sempre ostico data la notevole difficoltà di messa in opera dei sistemi FRP.

Le seguenti foto mostrano le principali modalità di rottura dei provini nei tre diversi tipi di test.



Figure 11 - Test 1 - Cono di rottura e splitting del provino



Figure 10 - Test 2 - Rottura del ventaglio e debonding della lamina dal substrato



Figure 12 - Test 3 - Debonding e rottura della lamina

Le seguenti tabella mostrano l'effetto del raggio di smussatura (Chamfer Radius) sulla forza di trazione massima applicabile all'ancoraggio (Average Peak). Questi risultati si riferiscono al Test 2.

Come è possibile vedere nella seconda tabella, c'è un graduale incremento di carico nel passare dal provino in cui non ho smussatura, a quello con raggio di smussatura di 6 mm (incremento del 26%) e 12 mm (incremento del 37%). Questo dimostra come questo parametro incida fortemente sulla formazione di eventuali picchi di tensione sugli ancoraggi.

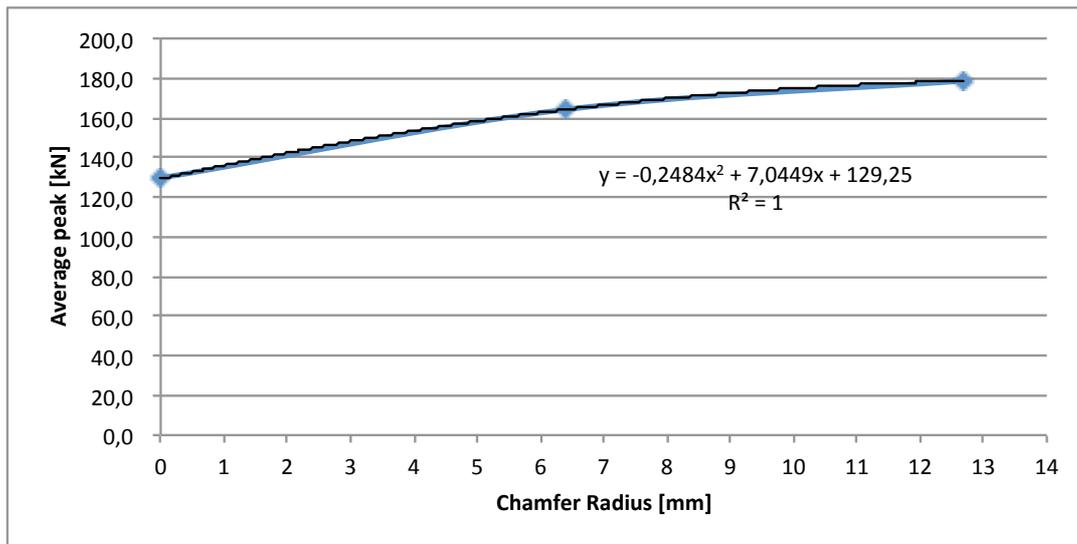


Figure 13 - Raggio di smussatura VS carico massimo

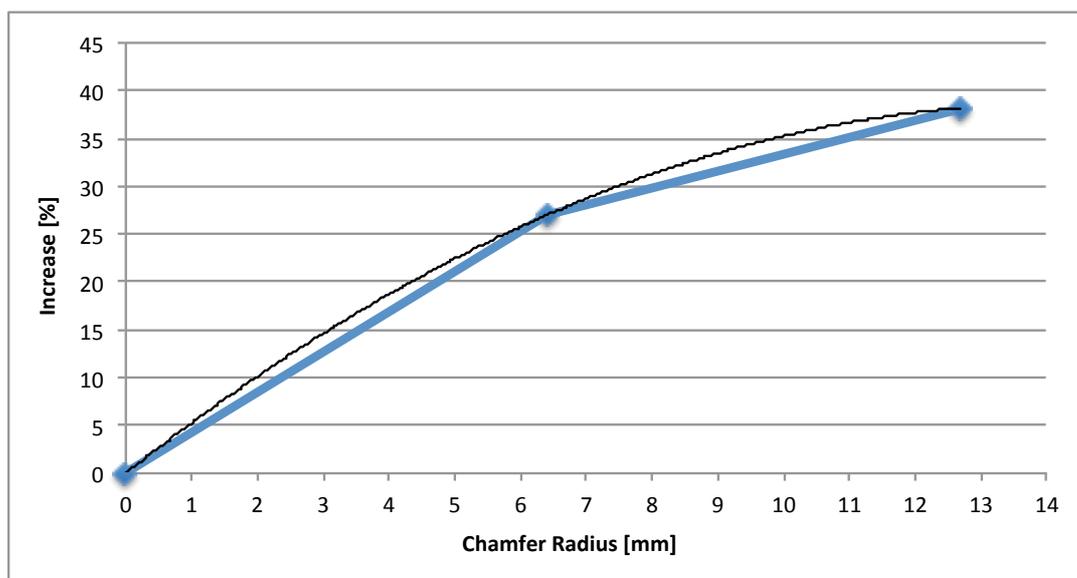


Figure 14 - Raggio di smussatura VS incremento del carico

Le seguenti tabelle (Figura 16 e Figura 17) illustrano i risultati ottenuti nel Double Shear Test mentre la Figura 15 mostra la distribuzione delle forze nelle due lamine ancorate simmetricamente durante il test.

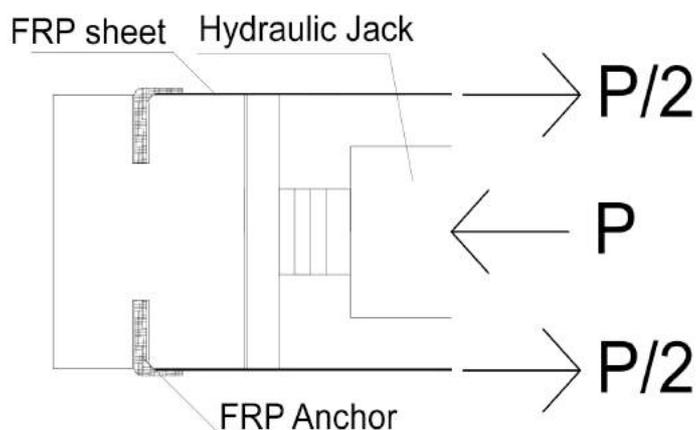


Figure 15 - Test 3 - Doble Shear Test

La seguente tabella (Figura 16) mostra il carico medio di distacco agente su una lamina (Average Peak Load, $P/2$).

Come detto precedentemente, il provino "Benchmark" rappresenta un sistema di rinforzo FRP privo di ancoraggi, mentre il "60°" and il "90°" rappresentano rispettivamente sistemi di rinforzo ancorati con ancoraggi aventi ventagli con apertura di 60° e 90°. Il provino "60°S" rappresent il sandwich.

La seconda tabella (Figura 17) mostra invece l'incremento, in percentuale, del carico di distacco medio. È possibile vedere come vi sia un importante incremento di carico nel caso dei sistemi ancorati, rispetto a quelli non ancorati. L'incremento maggiore è registrato nel caso del provino di tipo "60°S" (incremento del 100%), anche se notevoli incrementi sono comunque misurati anche nel caso di provini di tipo "60°" e "90°" (incremento rispettivamente del 37% e 58%).

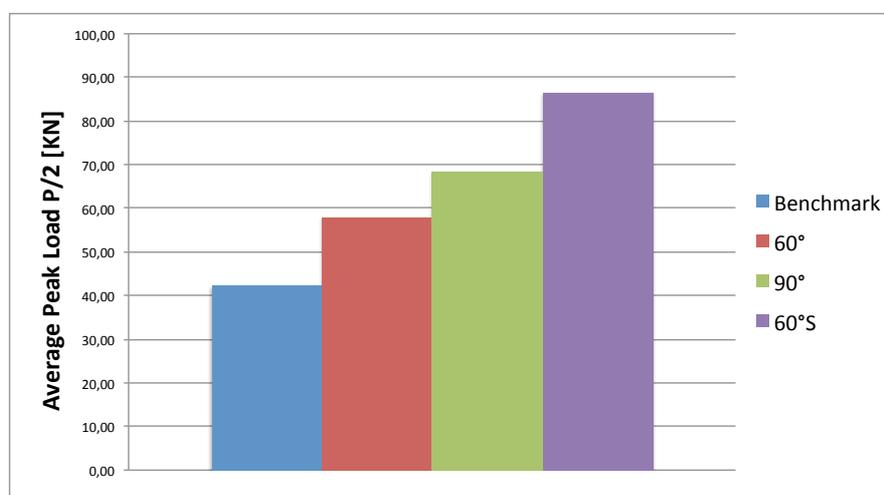


Figure 16 - Carico medio di distacco nelle varie tipologie di provino

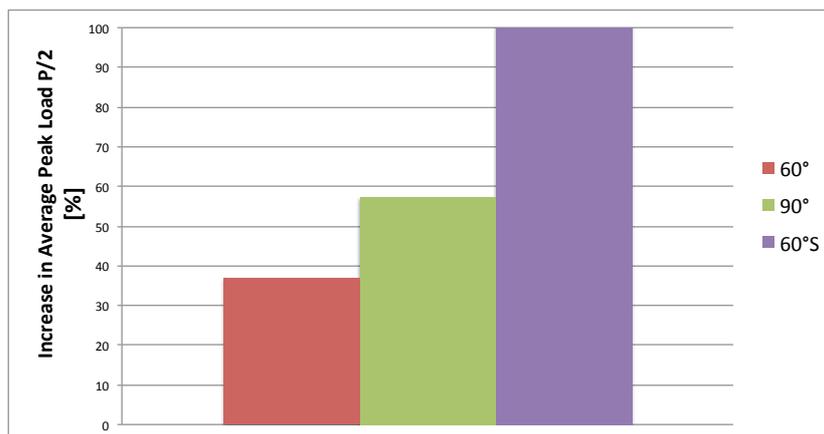


Figure 17 - Incremento del carico medio di distacco nelle varie tipologie di provino, rispetto al provino non ancorato (Benchmark)

Inoltre, mediante l'uso di numerosi Strain Gauges, è stato analizzato l'andamento delle deformazioni nella lamina di FRP davanti all'ancoraggio.

La figura a destra illustra la posizione e la nomenclatura degli Strain Gauges utilizzati durante le prove, nel caso dei provini ancorati e nel caso del benchmark. La tabella sottostante, Figura 18, mostra il valore della deformazione al centro della lamina, davanti al ventaglio dell'ancoraggio (Posizione SG2). Questa posizione risulta essere la più importante in quanto si tratta delle fibre che maggiormente risentono dell'azione dell'ancoraggio.

È importante sottolineare come nel caso del provino sandwich non sia stato possibile analizzare le deformazioni a causa della presenza della lamina di FRP sopra l'ancoraggio (FRP cover).

Come è possibile vedere nella tabella sottostante, le deformazioni delle fibre centrali della lamina di FRP (posizione SG2) passano dallo 0,44% nel caso di sistema non ancorato, allo 0,86% nel caso di sistema ancorato con ancoraggio a 60°, allo 0,70% nel caso di sistema ancorati con ancoraggio a 90°.

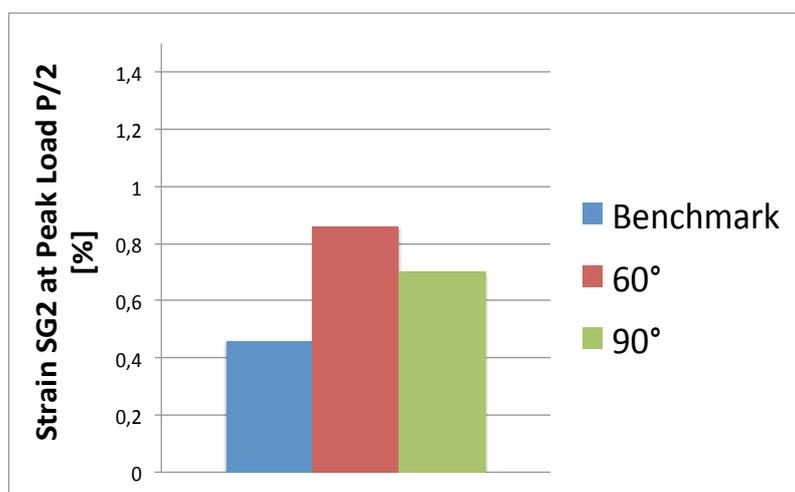
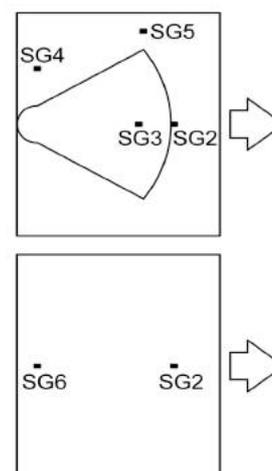


Figure 18 - Deformazione della lamina nella posizione SG2

Conclusioni:

Al termine della campagna sperimentale è emerso come il miglior raggio di smussatura sia quello intermedio, cioè di 6 mm. Questa conclusione è dovuta al fatto che abbiamo un miglioramento del carico massimo del 28% ma un tempo di preparazione della smussatura molto minore rispetto al caso con raggio di smussatura massimo. Questo implica notevole risparmio di tempo sul campo.

Sulla base dei risultati ottenuti dagli Strain Gauges, sono stati inoltre ipotizzati gli andamenti delle deformazioni sulla lamina di FRP davanti agli ancoraggi.

La figura sottostante mostra tali andamenti, che sono di tipo gaussiano, simmetrici rispetto all'asse della lamina.

Nel caso del ventaglio a 90° , la gaussiana è più larga e più bassa, mentre nel caso del ventaglio a 60° , è più stretta e più alta. Inoltre, basandoci sui risultati in termini di carico di distacco medio ed assumendo un comportamento elastico lineare fino a rottura, l'area sottesa dalla gaussiana è maggiore nel caso del ventaglio a 90° .

Se ne conclude che il ventaglio a 60° è più efficiente di quello a 90° gradi, in quanto le deformazioni raggiunte sono maggiori, ma è necessario coprire tutta la lamina per ottenere un carico maggiore, in quanto altrimenti soltanto le fibre centrali sono influenzate dall'azione dell'ancoraggio.

La maggior efficienza dei ventagli a 60° , in termini di deformazioni raggiunte nella lamina, è dovuta al fatto che in questo caso, a parità di diametro dell'ancoraggio, c'è un numero maggiore di fibre nella direzione della forza.

Quindi, nel caso di lamine larghe, in cui cioè un ancoraggio con ventaglio a 60° non è in grado di coprire tutta la lamina, potremmo disporre due connettori accanto in modo da coprire tutta la larghezza, come illustrato nella Figura 20.

Altra conclusione importante è che, non avendo riscontrato modalità di rottura del sistema per rottura a taglio o trazione dell'ancoraggio durante il Double Shear Test, le dimensioni del connettore adottate per la campagna sperimentale sono risultate essere ottimali per garantire una corretta gerarchia delle resistenze al sistema.

Altro fattore da tenere in considerazione è sicuramente la messa in opera. La pulizia del substrato, la corretta miscelatura della resina epossidica e la saturazione delle lamine, sono problematiche ormai ben note sin dalla nascita dei rinforzi esterni in FRP. A queste però si aggiungono quelle dovute alla foratura del substrato ed inserimento del connettore.

Linee guida che diano indicazioni su come installare questi tipi di dispositivi sono quindi necessarie per garantire una corretta progettazione ed un funzionamento affidabile.

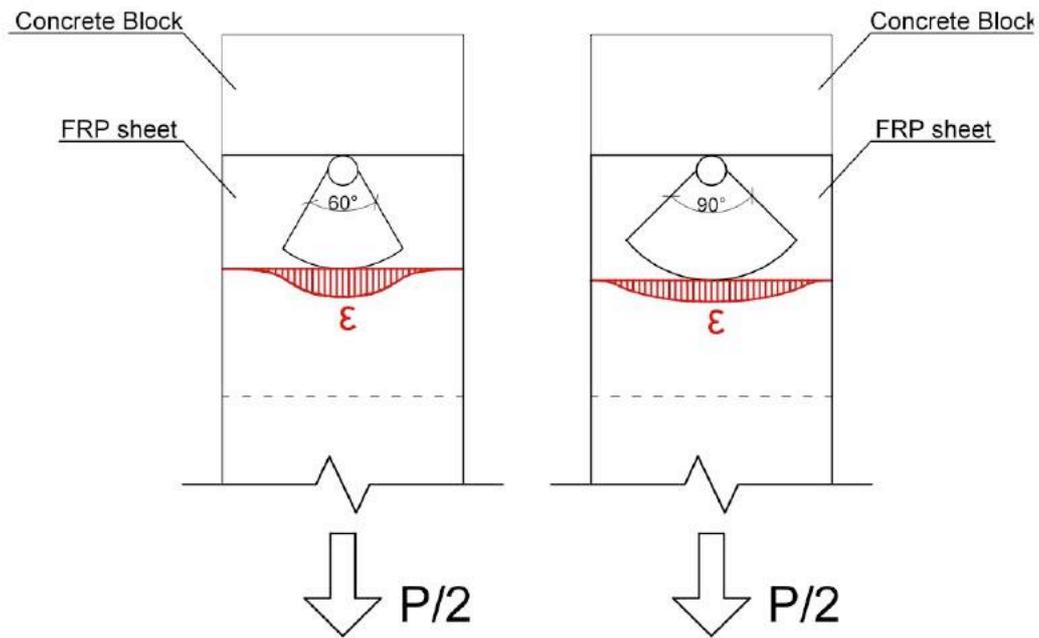


Figure 19 - Andamento delle deformazioni nel caso di sistemi ancorati

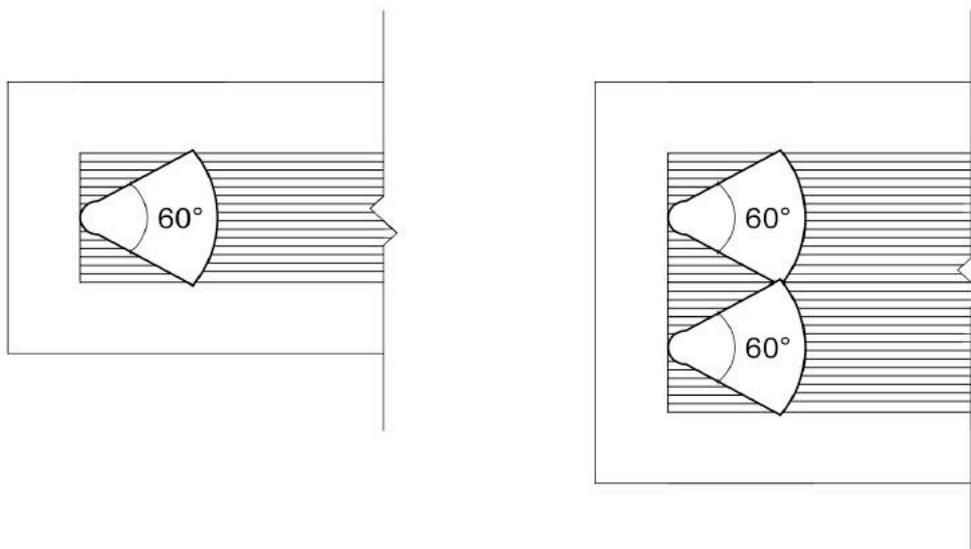


Figure 20 - Miglior configurazione adottabile

Appendice, preparazione dei provini ed installazione delle lamine e degli ancoraggi:

Le principali attività previste durante il periodo di ricerca sono state prove sperimentali su vari tipi di provini in FRP. Questo ha implicato attività quali la costruzione dei casseri in legno, il getto del calcestruzzo, la preparazione dei provini, il set-up della strumentazione e l'esecuzione della prova. Le foto seguenti mostrano alcune momenti di lavoro presso la University of Miami.

