



Università degli Studi di Salerno
Dipartimento di Ingegneria Civile

Corso di dottorato in
Rischio e sostenibilità nei sistemi di ingegneria civile, edile ed
ambientale

Titolo della tesi di dottorato:

Safeability of a beam-to-column adhesive
connection for large scale pultruded structures:
experimental investigation and modeling

PhD candidate: Luigi Granata

PhD Supervisor: prof. Francesco Ascione
PhD Coordinator: prof. Fernando Fraternali

Ciclo XXXIV (aa 2018-2021)



Sintesi

I materiali polimerici rinforzati con fibre (FRP) sono interessanti come alternativa ai materiali da costruzione tradizionali grazie alla loro elevata resistenza alla trazione, all'eccellente resistenza agli ambienti aggressivi, all'elevato rapporto resistenza/peso, al tempo di installazione semplice e rapido. Inoltre, a causa dei loro bassi requisiti di manutenzione, questi materiali offrono un'alternativa promettente per lo sviluppo di strutture più durevoli e sostenibili. I collegamenti nelle strutture GFRP sono ritenuti essenziali per fornire le capacità di carico richieste.

La tecnologia di connessione per profili GFRP pultrusi presenta numerose sfide a causa della natura fragile e anisotropa del materiale. I profili GFRP sono solitamente collegati tramite bullonatura, adottando le regole di progettazione per connessioni in acciaio simili, ma nell'ultimo decennio la tecnica adesiva ha guadagnato sempre più interesse.

Le norme internazionali stabiliscono che le connessioni incollate non dovrebbero essere consentite per i componenti portanti primari. Il loro uso è consentito solo in combinazione con o come backup per connessioni imbullonate. La ragione principale del divieto di connessioni vincolate è la mancanza di conoscenza ed esperienza con le prestazioni di tali connessioni. Quindi, c'è bisogno di ricerche sulle connessioni legate al fine di comprendere il loro comportamento, in termini di resistenza e rigidità, e di valutare le loro prestazioni rispetto a connessioni bullonate simili. Le conoscenze così acquisite possono essere utilizzate dai progettisti per progettare in sicurezza strutture composite con connessioni incollate, a condizione che si possa dimostrare che sono più vantaggiose rispetto all'utilizzo di connessioni imbullonate.

Teoricamente, ci sono ragioni per credere che le connessioni legate possano essere superiori alle connessioni imbullonate nelle strutture composite FRP.

Infatti, rispetto alle tradizionali tecnologie di assemblaggio meccanico (ad esempio, metodi imbullonati, appuntati o rivettati), l'incollaggio adesivo presenta molti vantaggi. Prima di tutto, quasi tutti i tipi di materiali, compresi i materiali compositi in particolare, possono essere incollati da adesivi. In secondo luogo, la tecnologia di incollaggio adesivo rende le strutture incollate leggere rispetto ad altre tecnologie di assemblaggio (ad esempio elementi di fissaggio meccanici). In terzo luogo, a causa della caratteristica di non praticare fori nella superficie prima dell'incollaggio, la concentrazione di stress può essere ridotta rispetto ad altri metodi come la bullonatura e / o la rivettatura.

Tuttavia, come confermato dalla letteratura corrente, la risposta meccanica degli adesivi strutturali in generale e quella dei giunti incollati, in particolare, dipende significativamente da diversi fattori come la temperatura (sia valori alti che bassi) e l'umidità che possono limitare l'applicabilità degli adesivi strutturali. La temperatura ambientale può superare la temperatura di transizione vetrosa (T_g) della formulazione adesiva comportando rilevanti variazioni delle sue proprietà, determinando un passaggio da un comportamento duro a uno gommoso, compromettendone così la specifica applicazione. A causa dei diversi parametri ambientali sperimentati dalle strutture assemblate durante l'uso, tra cui i valori di temperatura, l'adesivo può essere naturalmente sottoposto a un ritardo o aumento del grado di polimerizzazione. Ciò può portare a cambiamenti avversi o positivi



nella forza e nella rigidità. La velocità e l'entità delle variazioni dipendono dall'entità e dalla durata delle temperature sperimentate dall'adesivo.

La temperatura e l'umidità possono anche produrre effetti sulle proprietà a lungo termine degli adesivi. In questo quadro, sono stati condotti diversi studi sulla durata degli adesivi epossidici.

In questo quadro, al fine di favorire ulteriormente la diffusione delle connessioni vincolate, con particolare riguardo al campo dell'ingegneria civile dove il beam-to-column è il collegamento più comune, gli scopi della presente attività di ricerca sono: 1) trovare la geometria più accurata per tale connessione; 2) valutare l'energia di frattura (in funzione della durabilità igrotermica) delle resine epossidiche che sono in generale quelle più adatte all'incollaggio tra loro di profili pultrusi; 3) valutare la resistenza e la rigidità con l'approccio del "testing by testing" al fine di creare un ampio database che potrebbe essere utile nella costruzione di modelli meccanici predittivi; 4) cercare di superare alcune peculiarità negative di tale connessione come il guasto fragile e la non riparabilità.

PARTE I: Il comportamento meccanico di una connessione trave-colonna completamente adesiva. Oggetto della presente Parte I della tesi è lo studio del comportamento globale di una connessione trave-colonna biadesiva da un punto di vista sia sperimentale che numerico. Più in dettaglio, viene indagato il ruolo svolto dall'invecchiamento igro-termico, dall'estensione dell'area legata e dalla condizione di carico. Per quanto riguarda lo studio dell'influenza dell'invecchiamento, viene presentato un ampio studio sperimentale preliminare sulla durabilità delle resine epossidiche, adatte ad incollare tra loro profili pultrusi (Capitolo 1). Questo argomento è stato sviluppato in collaborazione con la professoressa Liberata Guadagno e il dottor Carlo Naddeo del Dipartimento Industriale dell'Università di Salerno.

Inoltre, l'indagine sperimentale relativa al comportamento meccanico globale delle connessioni adesive trave-colonna in scala reale presentate nel Capitolo 3 è stata sviluppata in collaborazione con la Dott.ssa Giulia Carozzi delle TopGlass Industries.

Il primo passo è lo studio della durabilità igro-termica di due resine epossidiche commerciali, adatte ad applicazioni di ingegneria civile, rispetto all'immersione in acqua di rubinetto e acqua di mare per un periodo di quindici mesi alla temperatura di 30°C. A tal fine è stato sviluppato un ampio programma sperimentale che comprende sia test End Notch Failure (ENF) sui campioni adesivi (aderente in polimero rinforzato con fibra di vetro, GFRP) per valutare l'energia di frattura pura in modalità II delle resine e i test di assorbimento e desorbimento dell'acqua per resine e materiali GFRP.

Parallelamente al programma sperimentale, sono state sviluppate simulazioni analitiche, basate sull'applicazione della legge di Fick, al fine di simulare gli assorbimenti d'acqua osservati sperimentalmente.

Nell'ottica di una progettazione sicura di un giunto legato, limitandone il comportamento al solo campo elastico, viene presentato un valore di energia di frattura inferiore rispetto a quello classico. Più in dettaglio, è stato costruito un modello agli elementi finiti (FEM), utilizzando il codice commerciale Abaqus. È in grado di descrivere perfettamente, da un lato, il test End Notch Failure (ENF) utilizzato per valutare l'energia di frattura in modalità II come richiesto dalle norme vigenti,



mentre dall'altro, per valutare la rigidità degli stadi elastici e ammorbidenti in caso di invecchiamento.

Il programma sperimentale ha previsto la realizzazione e la prova di laboratorio di trenta connessioni in polimero rinforzato con fibra di vetro (GFRP) in scala reale composte da una sezione cava quadrata, che funge da colonna, collegata a una trave costruita composta da due profili a U per mezzo della resina epossidica. Questo capitolo studia l'influenza di diversi parametri, come l'estensione dell'area legata, la condizione di carico e l'invecchiamento igro-termico sulla risposta meccanica globale dei giunti adesivi trave e colonna. Il gruppo trave-colonna ha formato un telaio a forma di L testato applicando un carico puntuale all'estremità libera della trave (flessione) e vicino alla colonna (taglio), mentre la colonna è stata fissata alla sua base. Inoltre, sono state considerate e testate cinque diverse configurazioni di area legata, tenendo conto di due diverse condizioni di invecchiamento: condizionamento in acqua di rubinetto e acqua di mare per un anno alla temperatura costante di 30 ° C.

Sulla base di un ampio database vengono presentati due modelli meccanici con soluzioni in forma chiusa al fine di prevedere sia la resistenza che la rigidità di tale connessione. Il confronto con i risultati sperimentali disponibili in letteratura ha permesso di verificare l'efficacia della formulazione proposta che coinvolge solo pochi parametri geometrici e meccanici come meglio descritto di seguito.

PARTE II: Connessione ibrida GFRP/acciaio adatta per materiali compositi rinforzati con fibre
Oggetto della presente Parte II della tesi è lo studio di un innovativo collegamento ibrido dissipativo trave-colonna tra profili pultrusi adatti a strutture di grandi dimensioni.

Il giunto è stato inizialmente progettato e prodotto, dopo essere stato testato attraverso un ampio programma sperimentale composto da oltre settanta campioni in scala reale.

Questo argomento è stato sviluppato in collaborazione con il professor Luciano Feo dell'Università di Salerno e con i professori Raffaele Landolfo e Mario D'Aniello dell'Università di Napoli "Federico II".

Grazie agli ottimi e incoraggianti risultati ottenuti, gli inventori hanno deciso di richiedere un brevetto nazionale/internazionale. Poiché la procedura è ancora in corso, l'autore di questa tesi non può pubblicare alcun disegno o risultato sull'invenzione. Di conseguenza, una descrizione generale dell'invenzione è presentata solo alla base delle caratteristiche principali.

Sulla base della connessione integrale trave-colonna studiata da un punto di vista sperimentale e meccanico nella Parte I di questa Tesi, è stata progettata, prodotta e testata una connessione ibrida complementare. Il concetto alla base di questa nuova connessione è che gli elementi rinforzati con fibra devono essere legati (al fine di preservare la continuità della fibra) a quelli in acciaio mentre gli elementi in acciaio sono imbullonati l'un l'altro come di solito accade nella pratica.

I due scopi principali di questa innovativa connessione sono: 1) fornire duttilità al sistema mediante l'introduzione di un'anima in acciaio; 2) localizzare il guasto in uno specifico elemento in acciaio (come un fusibile) che potrebbe essere facilmente riparato e/o sostituito con uno nuovo anticipando e quindi prevenendo il guasto negli adesivi (che non sono facilmente riparabili come è noto).



La connessione è stata testata attraverso un ampio programma sperimentale condotto presso il Laboratorio di Forza dell'Università di Salerno composto da oltre settanta campioni in scala reale. Le prove quasi statiche nel controllo dello spostamento sono state eseguite utilizzando una macchina di prova universale. I parametri chiave finora studiati sono stati: 1) l'estensione dell'area di legame tra gli elementi GFRP e quelli in acciaio; 2) lo spessore del "fusibile". I risultati finora ottenuti sono incoraggianti e il programma sperimentale proseguirà nei prossimi mesi eseguendo test ciclici.