



Università degli Studi di Trento  
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

*Abstract*

## **“Analisi sperimentale del comportamento a lungo termine di solai composti legno-legno con controfreccia”**

Laureando: Daniele Riccadonna

### **Introduzione**

Il legno come materiale strutturale presenta buone capacità di resistenza comparate a quelle dei materiali da costruzione “moderni” quali acciaio o calcestruzzo armato, specie se rapportate alla massa volumica del materiale. Tuttavia questa caratteristica non si accompagna a proprietà di rigidità del materiale ligneo ugualmente performanti. Questo aspetto si evidenzia soprattutto nella progettazione di solai in legno per i quali le verifiche di deformabilità, a breve e a lungo termine, costituiscono in genere il vincolo di progetto più restrittivo. L'accoppiamento degli elementi lignei dell'orditura principale con una soletta in calcestruzzo resa collaborante tramite l'inserimento di connettori metallici rappresenta una delle soluzioni più utilizzate per il miglioramento delle prestazioni degli impalcati sia in termini di resistenza che di rigidità.

Un'ulteriore possibilità è rappresentata dal collegamento degli elementi trave in legno costituenti l'orditura del solaio con un pannello anch'esso in legno. I possibili vantaggi di tale configurazione sono molteplici: l'uso di un pannello ligneo al posto della soletta in calcestruzzo consente di poter effettuare la realizzazione a secco evitando eventuali problemi dovuti a infiltrazioni d'acqua nell'elemento trave. Un ulteriore vantaggio consiste nel contenimento del peso, fattore non di poco conto soprattutto alla luce della progettazione antisismica dell'edificio a cui appartiene l'impalcato. L'uso dei connettori a vite permette altresì di aumentare la velocità di montaggio del solaio e, nel caso di recupero di solai esistenti, di realizzare

un intervento reversibile, caratteristica sempre auspicabile quando si agisce su edifici esistenti. In ogni caso per questa soluzione permangono i problemi legati all'eccessiva deformabilità del materiale legno dato che l'aumento della capacità resistenziale del solaio composto non è sfruttabile appieno per via dell'aumento non sufficiente delle proprietà di rigidità.

Per tale ragione nel corso degli ultimi anni presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Trento sono state condotte specifiche ricerche riguardanti lo sviluppo di una procedura per l'imposizione di una controfreccia nel caso di solai composti legno-legno mediante l'utilizzo di soli connettori a vite. Il metodo sviluppato per ottenere tale controfreccia è basato sull'inserimento sequenziale di viti inclinate di 45° rispetto all'asse longitudinale della trave. Una caratteristica fondamentale del connettore è il tiro che esso riesce ad applicare ossia la forza di compressione esercitata sui due elementi che unisce. Per questo motivo nei test presentati in questa tesi si è fatto uso di due tipologie di viti: viti doppio filetto e viti a filetto semplice con rondella. Le prime sviluppano il tiro per effetto della differenza di passo dell'elica costituente le due porzioni di filetto e la conseguente differenza di velocità di penetrazione nei due elementi lignei, le seconde invece per contrasto con l'elemento superiore mentre il filetto penetra nell'elemento inferiore.

Questa procedura è già stata validata per quanto concerne gli aspetti relativi al breve termine mentre non è ben chiaro come il solaio così assemblato possa comportarsi nel lungo termine ed in particolare l'effetto che la variazione del tiro della vite possa avere sulla deformabilità della struttura. Il presente studio ha quindi l'obiettivo di verificare se vi siano perdite di tiro dei connettori non trascurabili nel tempo che provochino una diminuzione della controfreccia iniziale e quindi aumenti della freccia a lungo termine non prevedibili considerando la sola viscosità degli elementi lignei e della connessione.

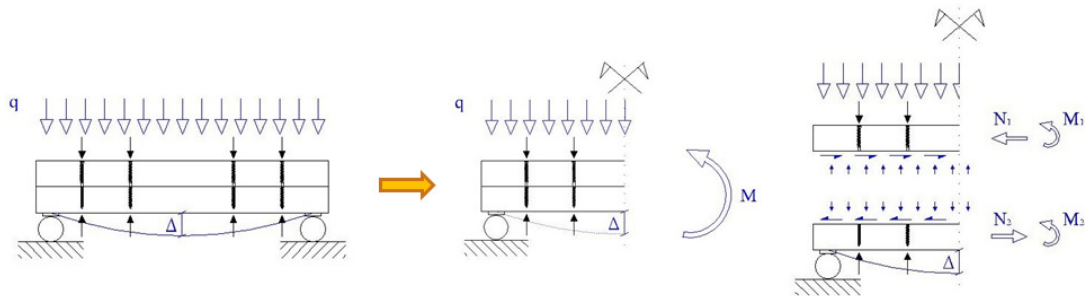
La campagna sperimentale approntata per questo scopo è stata divisa in due fasi successive. Nella prima fase sono stati effettuati test di push-out per la determinazione della rigidità e della resistenza delle connessioni utilizzate nei test a lungo termine e test di tiro mediante un set-up appositamente approntato per stimare la componente orizzontale del tiro dei connettori inclinati a 45°. La seconda fase invece ha riguardato l'esecuzione dei test a lungo termine veri e propri; si sono realizzati quattro solai composti in legno di conifera e per controllare meglio la componente di viscosità le prove sono state condotte all'interno di una camera climatica ad una temperatura costante di 20°C e un'umidità relativa del 60% anch'essa costante.

Infine, avvalendosi di un modello numerico sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Trento, è stata proposta una disposizione di viti ottimizzata per massimizzare la controfreccia ottenuta e la configurazione così ricavata è stata usata nella realizzazione di due dei quattro test effettuati.

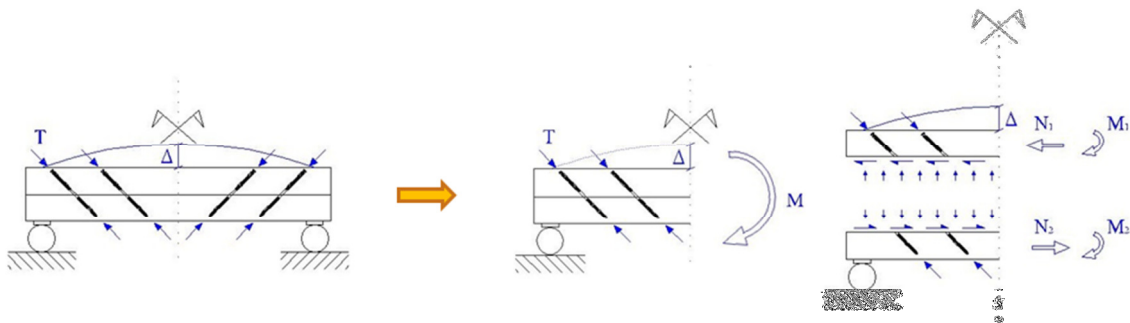
## **Formulazione analitica**

Il punto chiave per comprendere il funzionamento del sistema è la modalità di inserimento delle viti nei due elementi, in particolare la loro inclinazione rispetto all'asse longitudinale.

Si consideri la trave composta con i connettori inseriti ortogonalmente rispetto all'asse, quando non è applicato nessun carico esterno le forze di compressione, dovute alla forza di tiro delle viti, sono in equilibrio e la trave rimane indeformata. Non appena viene applicato il carico gli elementi iniziano a scambiarsi un sistema di forze e la trave si inflette; il momento flettente esterno si divide nei due momenti  $M_1$ ,  $M_2$  e nella coppia data dalle forze assiali  $N_1$  ed  $N_2$  come rappresentato in figura.



Inserendo le viti con un'inclinazione di  $45^\circ$  rispetto all'asse, in assenza di carico, la forza di tiro della vite può essere scomposta nella componente ortogonale e nella componente parallela all'interfaccia dei due elementi; quindi, mentre la prima rimane auto-equilibrata, la seconda provoca un momento esterno opposto rispetto a quello dato dal carico e per tale ragione la trave si inflette verso l'alto:



È noto inoltre che lo scorrimento è massimo agli appoggi e nullo in mezzera e per questo motivo si otterranno valori di controfreccia maggiori se l'inserimento delle viti avviene dall'interno verso le estremità della trave rispetto alla modalità opposta (ipotesi confermata da test sperimentali effettuati presso il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento).

La trattazione teorica del problema è stata proposta da Giongo et al. (2012). Per comprenderne al meglio i dettagli conviene riportare le equazioni differenziali della teoria di Newmark per le travi composte descritte in precedenza:

$$N_1''(x) - \alpha^2 N_1(x) = \beta M(x)$$

$$w^{IV}(x) - \alpha^2 w''(x) = \alpha^2 \frac{M(x)}{(EJ)_\infty} + \frac{q(x)}{(EJ)_0}$$

Il problema principale per l'applicazione di questa teoria nel caso in esame è rappresentato dal fatto che la rigidità del connettore è ipotizzata costante. La procedura per l'ottenimento della controfreccia si basa invece sull'inserimento sequenziale dei mezzi di unione. Perciò la rigidità della connessione deve essere considerata dipendente dal tempo di messa in opera e varia lungo l'asse della trave durante l'assemblaggio. In questa fase una parte della trave verrà caricata e irrigidita dalle viti mentre la parte restante rimarrà libera.

Per semplificare il problema si può immaginare che le viti collocate alla stessa distanza dalla mezzeria, ma in posizione opposta, vengano inserite simultaneamente. È così possibile sfruttare la simmetria del problema e considerare metà struttura composta come una trave a mensola con l'incastro nella sezione di mezzeria della trave completa. Va ricordato che tale procedura analitica è valida solo per assemblaggio che avviene dall'interno verso l'esterno e, come avviene per la teoria di Newmark, per una spaziatura costante dei connettori.

Poiché sia i materiali che compongono la trave sia il connettore sono considerati elastici lineari può essere applicato il principio di sovrapposizione lineare ed in definitiva il valore di controfreccia finale risulta pari a:

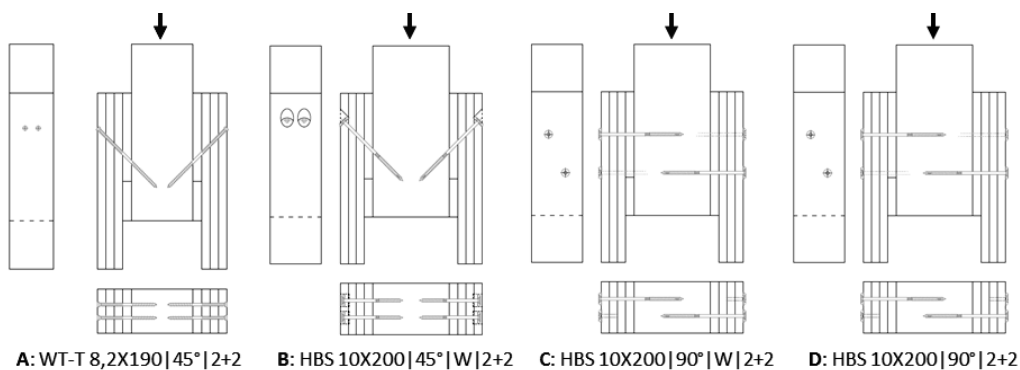
$$w_{l/2} = \sum_{i=1}^n \Delta w_{i,l/2} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{Ta[\cosh(\alpha si)(2si - l) + l]}{\sinh(\alpha si) \cdot (EJ)_0 \cdot \alpha} \right\} - \frac{nTa}{\alpha^2 \cdot (EJ)_0}$$

### Test di *push-out*

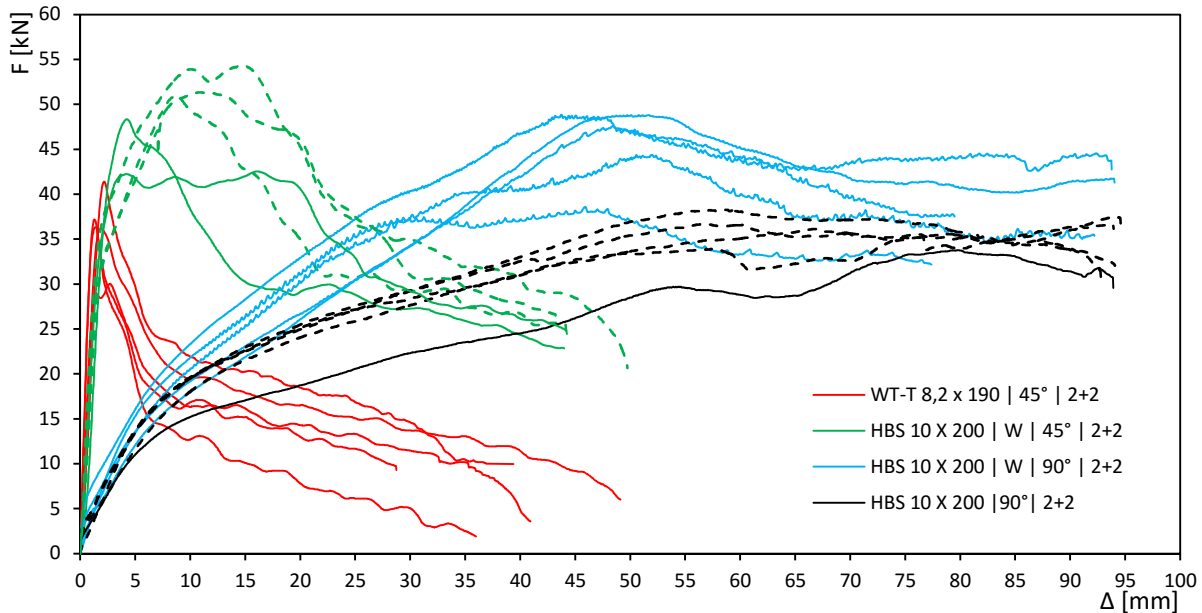
La campagna sperimentale riguardante i test di push-out è stata condotta per misurare la rigidità a taglio-trazione dei due tipi di connessione utilizzati nelle prove in camera climatica (viti a doppio filetto e a filetto semplice con rondella inclinate di 45°). Si sono eseguiti i test presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture dell'Università di Trento e sono stati testati un totale di 20 provini.

Sono state testate 4 tipologie di provini:

- TEST A: viti doppio filetto WT-T-8,2x190 inclinate di 45°;
- TEST B: viti HBS 10x200 con rondella inclinate di 45° (con svasatura per il posizionamento della testa della vite con rondella);
- TEST C: viti HBS 10x200 con rondella inclinate di 90°;
- TEST D: viti HBS 10x200 senza rondella inclinate di 90°.



Dai risultati dei test di *push-out* è immediato constatare, come più volte espresso in questo capitolo, che l'inserimento di viti inclinate a 45° (test A e B) che lavorino per taglio-trazione comporta delle rigidzze molto più elevate rispetto al classico inserimento ortogonale rispetto al piano di taglio dato che già per piccoli spostamenti oltre alla resistenza a taglio del gambo della vite interviene anche la resistenza ad estrazione del filetto.



Test	$F_{max}$ [kN]	$F_{max,R}$ [kN]	$k_s$ [N/mm]	$k_i$ [N/mm]
A	9,45	9,45	7916,58	7734,94
B	12,37	12,37	5636,28	5205,34
C	6,24	11,41	707,66	848,09
D	5,60	9,07	624,22	751,00

### Test di tiro per viti inclinate

Uno dei parametri essenziali per stimare il valore della controfreccia ottenuta con il procedimento illustrato in questa tesi consiste nel tiro della vite, ossia nella forza che essa riesce ad applicare nel comprimere tra loro i due elementi lignei che unisce.

Per quanto riguarda l'inserimento di viti in posizione ortogonale è già nota una formula empirica per stimare il valore del tiro (Giongo et al. 2013):

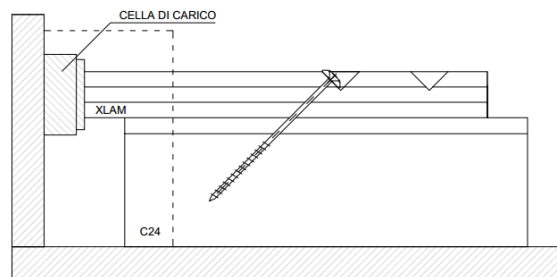
$$T = \gamma \cdot (d \cdot l_f)^\alpha \cdot \rho^\beta \cdot \varphi$$

Per la quale si osserva che il tiro dipende dal diametro  $d$  e dalla lunghezza del filetto  $l_f$  del connettore e dalla massa volumica  $\rho$  degli elementi lignei collegati, mentre i restanti sono parametri determinati sperimentalmente.

Nella configurazione che andiamo ad analizzare la vite viene inserita a 45° e non ortogonalmente ed in particolare è la componente orizzontale che contribuisce al momento che inflette la trave composta verso l'alto. Quindi, dato che tale forza tende a fare scorrere gli elementi lignei uno contro l'altro, viene interessata anche da fenomeni di attrito che probabilmente ne riducono l'efficacia:

$$T_{hor. ridotto} = T_{\parallel} - \mu \cdot T_{\perp}$$

Per valutare sperimentalmente il tiro di viti inclinate a 45° è stato approntato il seguente set-up:



Il campione di prova è formato dai due elementi costituenti il solaio composto: il travetto in C24 è stato reso solidale al set-up tramite l'inserimento di viti nella parte inferiore mentre il pannello in CLT è libero di scorrere sulla superficie del travetto ed è posto in contatto con la cella di carico montata sulla parte verticale del set-up.

Vite	$T_{formula+attrito}$ [kN]	$T_{sperim.}$ [kN]	Errore [%]
WT-T	2,13	0,47	-78,12%
HBS	1,97	2,59	31,64%

In seguito ai risultati dei test rappresentati sopra in tabella, per la stima della monta con la formula analitica e con il modello numerico, si sono assunti i seguenti valori di tiro:

- Per le viti doppio filetto WT-T 8,2x190 il valore stimato con la formula empirica per viti inserite a 90° opportunamente ridotto:

$$T_{connessione WT-T} = 2 \cdot T_{stimato WT-T} = 2 \cdot 2,13 = 4,26 \text{ kN}$$

- Per le viti a filetto semplice con rondella HBS 10x200 il valore misurato con i test di tiro:

$$T_{connessione HBS} = 2 \cdot T_{misurato HBS} = 2 \cdot 2,59 = 5,18 \text{ kN}$$

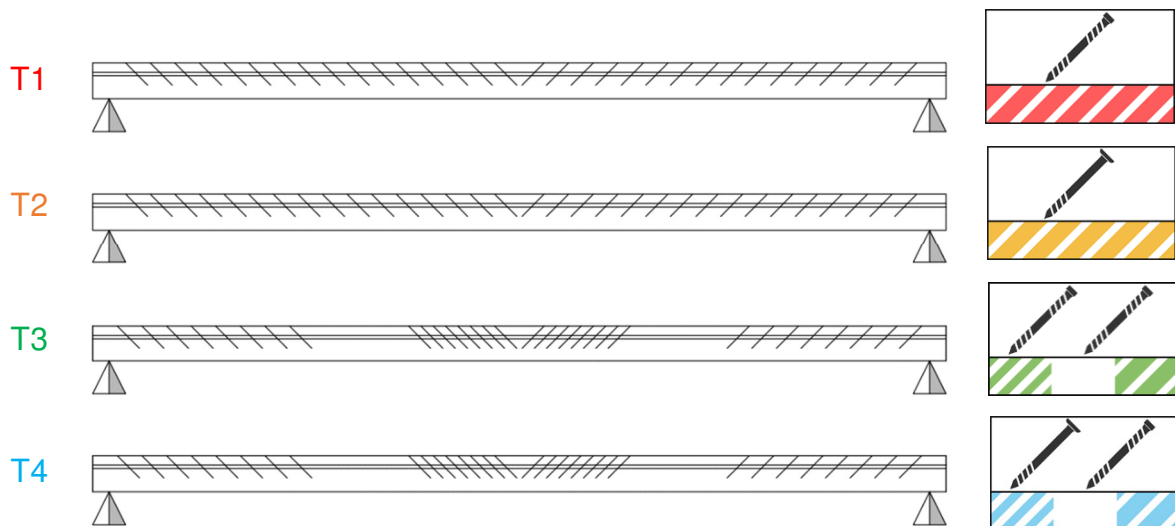
## Modellazione numerica

Prima di iniziare i test veri e propri in camera climatica si sono effettuate delle analisi numeriche facendo uso del codice sviluppato nel corso della tesi di Antonio Zeni (2012) condotta sempre presso l'Università degli Studi di Trento in modo da scegliere le migliori configurazioni con cui realizzare le prove sperimentali.

In particolare tramite il modello numerico si sono volute indagare le soluzioni con passo variabile del connettore, dato che non è possibile studiarle per via analitica.

Si è poi deciso di realizzare i seguenti test:

- Test T1: soluzione con viti doppio filetto a passo costante ( $s = 150 \text{ mm}$ );
- Test T2: soluzione con viti a filetto semplice con rondella a passo costante ( $s = 150 \text{ mm}$ );
- Test T3: soluzione con viti doppio filetto a passo variabile ( $s_{\text{int}} = 75 \text{ mm}$ ,  $s_{\text{est}} = 150 \text{ mm}$ );
- Test T4: soluzione mista a passo variabile ( $s_{\text{int}} = 75 \text{ mm}$ ,  $s_{\text{est}} = 150 \text{ mm}$ ).



In tabella vengono riportati i risultati dei test in camera climatica simulati con il codice di calcolo ed il numero di viti doppio filetto (SFS WT-T-8,2x190) e a filetto semplice con rondella (HBS 10x200) necessarie per realizzarli:

	T1	T2	T3	T4
$n^{\circ}$ viti WT-T [ ]	64	-	64	32
$n^{\circ}$ viti HBS [ ]	-	64	-	32
$U_{\text{monta}}$ [mm]	11,76	17,25	11,26	13,33
$U_{\text{rara}}$ [mm]	-3,53	0,58	-4,72	-2,73
$U_{\text{netta}}$ [mm]	-15,29	-16,67	-15,98	-16,06

### Test sui solai

Le prove sono state condotte all'interno della camera climatica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (DICAM) dell'Università di Trento ad una temperatura costante di  $20^{\circ}\text{C}$  ed un'umidità relativa del 60% anch'essa costante.

L'esecuzione delle prove per ciascun test prevedeva i seguenti passi:

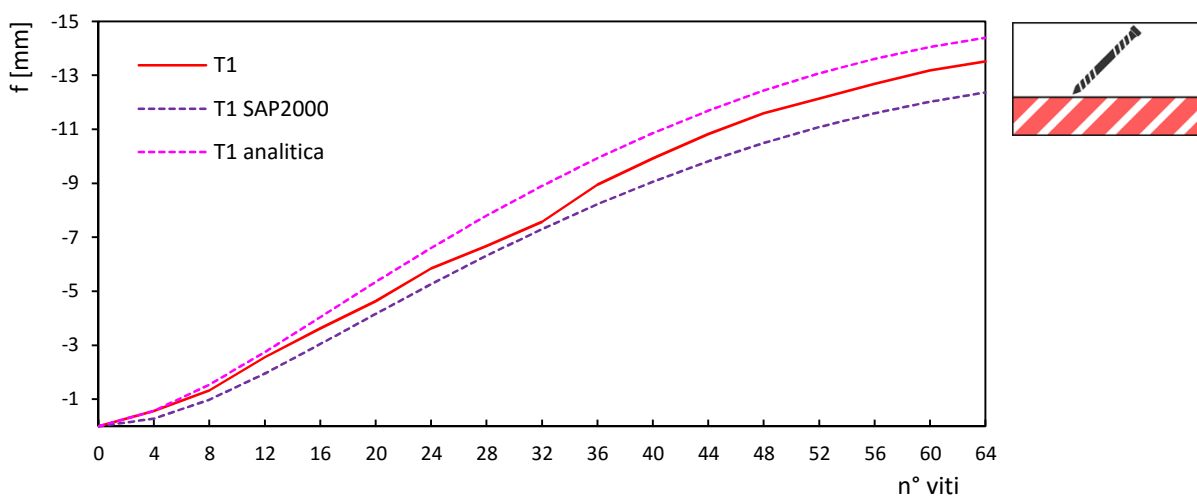
1. Imposizione della controfreccia mediante l'inserimento sequenziale delle viti;
2. Applicazione del carico in combinazione rara;

3. Scarico del provino e recupero della freccia elastica istantanea;
4. Applicazione del carico in combinazione quasi permanente;
5. Monitoraggio nel lungo termine della freccia in mezzeria e degli scorrimenti alle testate.

Durante le prime quattro fasi per le misurazioni si è fatto uso di strumenti digitali (potenziometri a filo, trasduttori estensimetrici AEP LDT 100, trasduttori di spostamento induttivi LVDT e *strain gauges*) ed i dati sono stati salvati mediante un sistema di acquisizione dati multicanale.

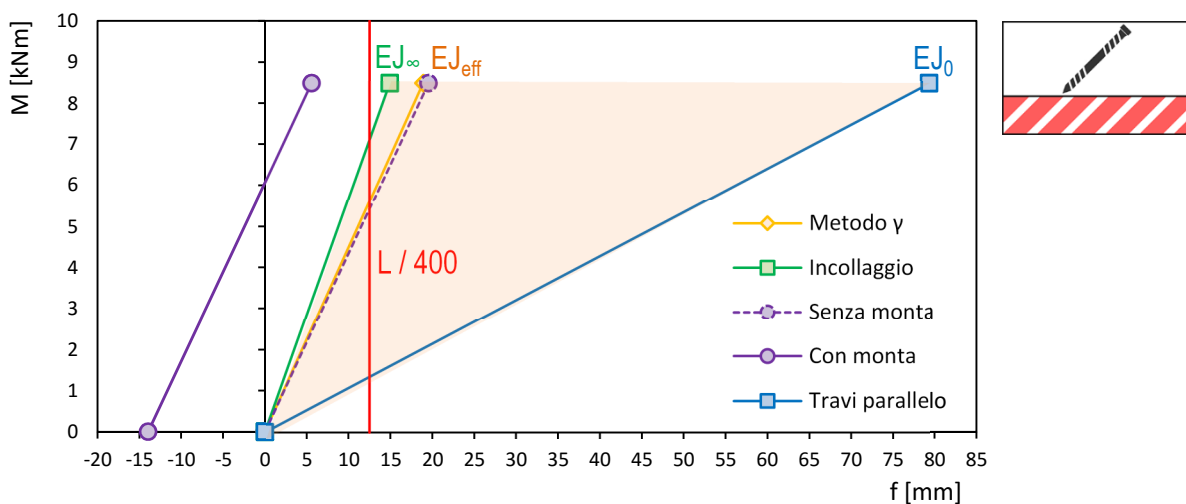
Per quanto riguarda invece la fase di monitoraggio del lungo termine sono stati usati strumenti analogici per ovvie ragioni di carattere pratico.

Per quanto riguarda le fasi di applicazione della controfreccia e carico in combinazione rara si riporta come esempio il solo caso relativo al test T1:



$f_{\text{sperimentale}}$ [mm]	$f_{\text{SAP2000}}$ [mm]	$f_{\text{analitica}}$ [mm]	Err.SAP2000 [%]	Err.analitica [%]
-13,51	-12,37	-14,40	-8,44%	6,56%

È immediato constatare come sia la formula analitica che il modello numerico forniscano delle stime abbastanza accurate del valore di controfreccia ottenuto poi effettivamente per via sperimentale.





Nel grafico precedente sono riportati sull'asse delle ordinate il valore del momento sollecitante in mezzeria per il carico in combinazione rara e sull'asse delle ascisse il valore della freccia con segno positivo e il valore della contrefreccia con segno negativo. È interessante notare che anche nel caso di travi incollate non si riesce a soddisfare i requisiti di deformabilità proposti dalla normativa qui rappresentati tramite la linea rossa (in fase di progetto sarebbe richiesta un  $\eta > 1$ ).

Appare quindi evidente come la soluzione proposta in questa tesi possa risultare vantaggiosa: è infatti possibile verificare il solaio per il livello di carico considerato senza dover variare la dimensione degli elementi strutturali (in un certo senso sarebbe come ottenere un'efficienza  $\eta$  della connessione maggiore di 1).

Per verificare il comportamento a lungo termine della soluzione qua adottata e confrontarlo con le stime secondo la teoria classica delle travi composte si è fatto riferimento al modello reologico proposto da Toratti (1992) per il calcolo del coefficiente di viscosità degli elementi lignei e della connessione:

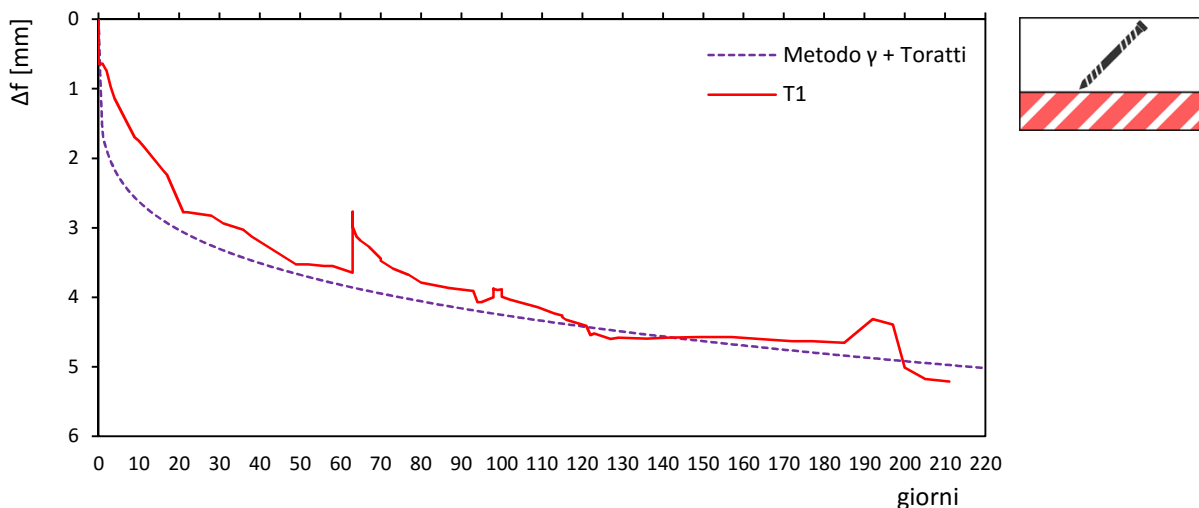
$$\Phi_w(t - t_0) = \Phi_{w,vis}(t - t_0) + \Phi_{w,ms}(t - t_0) = \left(\frac{t - t_0}{t_d}\right)^m + \Phi_\infty \left(1 - e^{-c\frac{2\Delta u}{100\Delta t}(t-t_i)}\right)$$

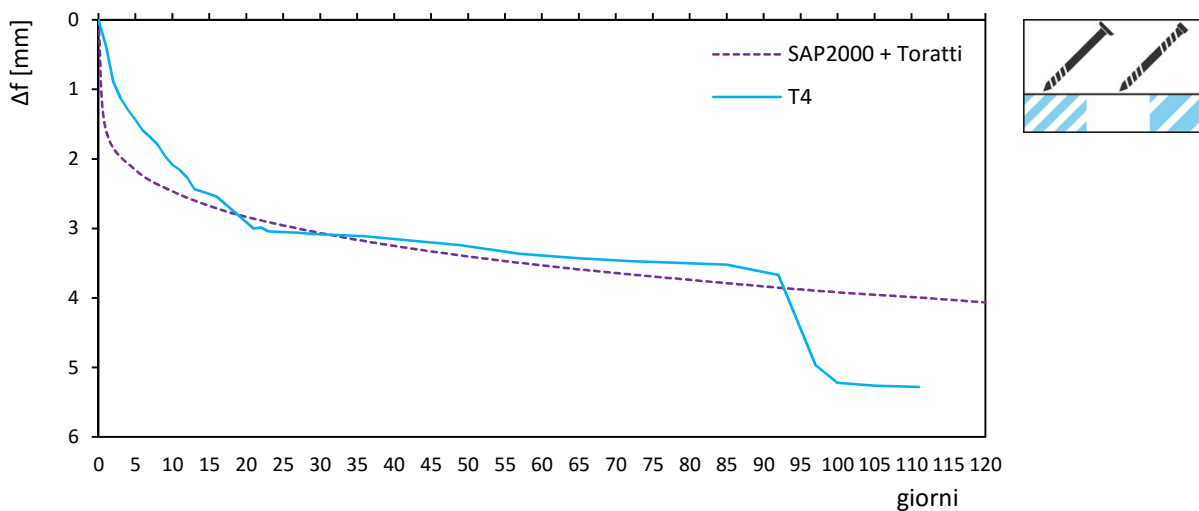
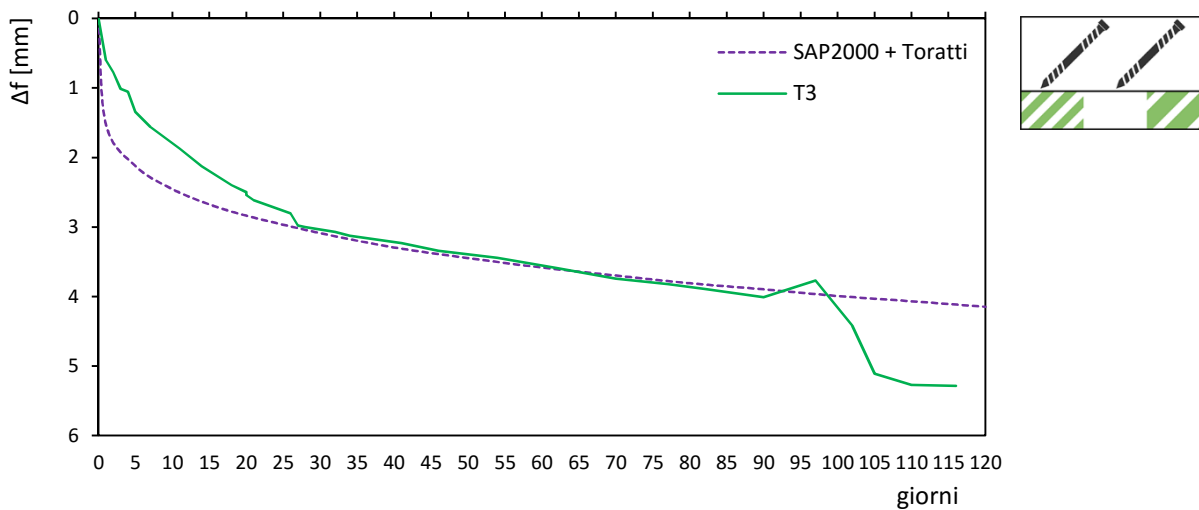
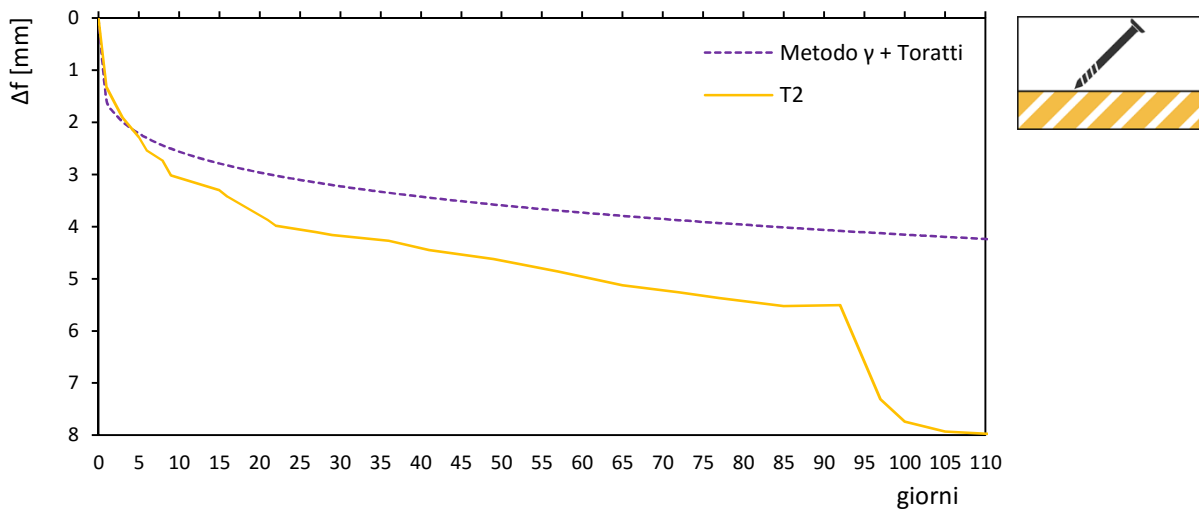
$$E_{1,eff}(t) = \frac{E_1}{1 + \Phi_w(t - t_0)}$$

$$E_{2,eff}(t) = \frac{E_2}{1 + \Phi_w(t - t_0)}$$

$$K_{eff}(t) = \frac{K_{ser}}{1 + \Phi_w(t - t_0)}$$

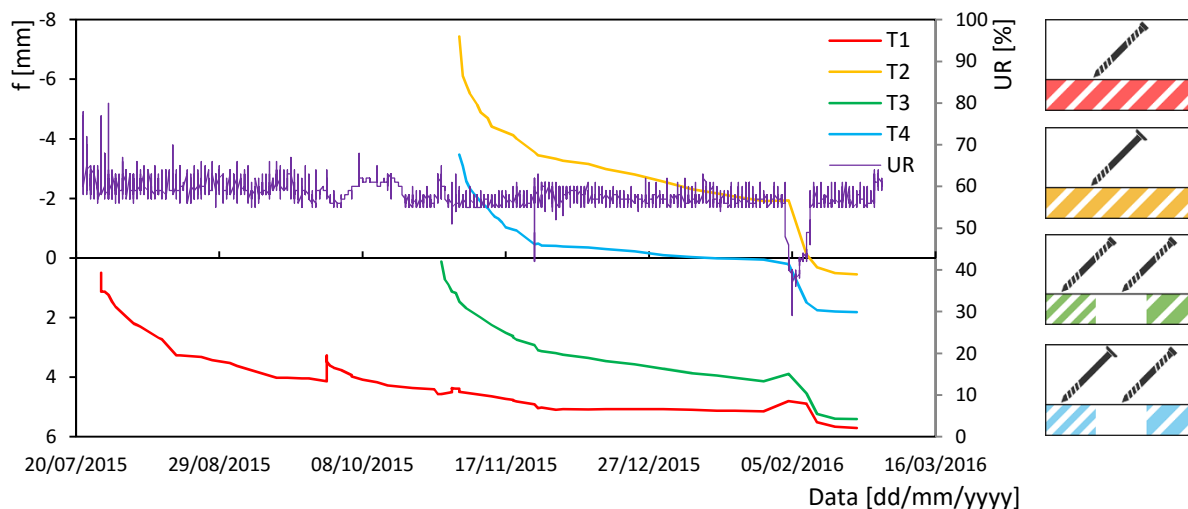
Nei grafici seguenti si riportano gli incrementi della freccia quasi permanente istantanea nel tempo ottenuti per via sperimentale e stimati mediante il modello reologico di Toratti:





Dai quattro grafici salta subito all'occhio come si abbia una grande discrepanza tra i valori teorici e sperimentali dopo un certo numero di giorni. Questo aspetto può essere meglio compreso andando ad

osservare il grafico relativo alla effettiva cronologia dei test messo in relazione con il valore dell'UR misurato nella camera climatica:



Dal grafico emerge che il comportamento precedentemente identificato è causato dalla brusca variazione di umidità relativa avuta nel periodo tra il 03/02/2016 e il 10/02/2016 dovuta ad un malfunzionamento dell'unità di controllo della camera climatica.

Relativamente invece ai quattro grafici precedenti si può notare come solo nel caso del test T2 ci sia una certa discrepanza tra i dati sperimentali e le previsioni teoriche degli incrementi di freccia a lungo termine mentre per i test T1, T3 e T4 si ha una buona corrispondenza tra le due curve, almeno per quanto riguarda il periodo in cui il valore di UR si è mantenuto all'incirca costante. Questa differenza di comportamento è da andare a ricercare nella tipologia di connettore utilizzato nelle diverse prove. Difatti per il test T2 si è fatto uso di sole viti a filetto semplice con rondella per le quali le perdite di tiro nel tempo risultano essere non trascurabili e comportano quindi decrementi della contrefreccia ottenuta inizialmente equivalenti a incrementi di freccia a lungo termine non previsti considerando la sola viscosità degli elementi lignei e della connessione.

## Conclusioni

Alla luce dei risultati delle prove effettuate nel corso della campagna sperimentale possono essere fatte le seguenti considerazioni (tenendo comunque presente che i dati del lungo termine sono per forza di cose parziali, pertinenti al periodo di tempo trascorso dall'inizio delle prove):

Innanzitutto per quanto riguarda la parte relativa alle analisi nel lungo termine, obiettivo primario dello studio effettuato, si riportano le seguenti valutazioni, facendo particolare attenzione alle due tipologie di connettori utilizzati. I test T1 e T3, realizzati con sole viti doppio filetto, non sembrano presentare perdite di tiro significative, dato che gli incrementi di freccia nel tempo dovuti a fenomeni di natura viscosa seguono in maniera abbastanza fedele le curve dei modelli di comportamento reologico del legno presenti in letteratura.

Anzi nel breve termine, mantenendo il solaio scarico al termine dell'applicazione della monta, è stato osservato un incremento della controfreccia grazie all'aumento del tiro dei connettori rilevato anche nelle precedenti ricerche effettuate presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Trento per il caso di viti inserite a 90°.

Il test T2 invece realizzato con sole viti a filetto semplice con rondella ha manifestato degli incrementi di freccia a lungo termine non previsti, imputabili perciò alla perdita parziale del preserraggio iniziale. Ciò è dovuto alla sostanziale differenza del modo in cui la vite si oppone alla perdita di tiro rispetto all'altro tipo di connettore: nell'elemento inferiore è la stessa parte filettata ad opporsi allo "svitamento" mentre la parte superiore può fare affidamento sui soli fenomeni attritivi tra la testa della vite e la rondella e tra il gambo liscio e l'elemento superiore.

Con il test T4 poi è stata proposta una soluzione mista con lo scopo di sfruttare le migliori caratteristiche di ciascun connettore nella posizione lungo lo sviluppo dell'asse del solaio dove esse risultano più utili: nella zona centrale sono state inserite viti a filetto semplice con rondella che essendo meno rigide e sviluppando un tiro maggiore hanno consentito il conseguimento di una controfreccia maggiore rispetto al caso di sole viti doppio filetto. Nelle zone esterne invece si è andati a posizionare connettori a doppio filetto che essendo più rigidi si oppongono meglio agli scorrimenti relativi tra i due elementi che, come è noto, sono massimi in prossimità degli appoggi.

I risultati sperimentali ricavati nel corso di questa campagna sembrano confermare queste ipotesi poiché per il test T4 si è misurato un valore superiore di monta rispetto ai test T1 e T3 realizzati con sole viti doppio filetto ed il suo comportamento a lungo termine non sembra risentire di perdite di tiro significative nei connettori come accaduto per il test T2 assemblato usando sole viti a filetto semplice con rondella. Relativamente alla fase iniziale di imposizione della controfreccia si è riscontrata una buona corrispondenza dei dati acquisiti sperimentalmente con le previsioni effettuate tramite formulazione analitica e modellazione numerica. Riguardo i test T3 e T4, che prevedevano l'utilizzo di una spaziatura ottimizzata delle viti per massimizzare la controfreccia ottenuta, i confronti sono stati fatti solamente con il modello numerico poiché la formulazione analitica per essere applicata richiede la spaziatura uniforme della connessione.

Un altro aspetto interessante della soluzione progettuale per solai composti illustrata in questa tesi consiste nell'avere, nel caso di carico applicato in combinazione rara, frecce minori rispetto alla configurazione ideale di rigidità infinita della connessione. Nel caso particolare qui esposto il conseguimento della controfreccia consente altresì di soddisfare le verifiche di esercizio senza dover modificare la dimensione degli elementi strutturali, cosa che non sarebbe stata possibile nemmeno nel caso ideale di incollaggio degli elementi. In altre parole è come se la procedura di assemblaggio adottato permettesse di ottenere un'efficienza della connessione maggiore del 100%. Questa particolarità rende quindi tale configurazione competitiva anche nell'ambito delle nuove costruzioni presentando anche il vantaggio di

essere più eco-compatibile e più facilmente smaltibile rispetto alla soluzione che prevede l'incollaggio degli elementi.

Una critica che potrebbe essere mossa verso questa proposta è che impone negli elementi uno stato di pre-sollecitazione, in particolare l'azione di compressione nell'elemento superiore e di trazione nell'elemento inferiore introdotte dalla monta vanno a sommarsi alle azioni assiali di medesimo segno ottenute per effetto dell'applicazione del carico. Andando però a confrontare le verifiche a pressoflessione del pannello e a tensoflessione del travetto nei casi con e senza applicazione della monta, simulati con il modello numerico, è emerso che globalmente la situazione appare migliorata grazie alla diminuzione dell'azione flettente sui due elementi. Solamente nel caso del test T4 l'aumento della sollecitazione assiale sembra portare ad una situazione più gravosa dal punto di vista delle verifiche di resistenza. Tuttavia dai dati acquisiti dagli estensimetri montati durante l'esecuzione della prova si ricava un valore di azione assiale inferiore rispetto a quello stimato dal modello numerico e per questo motivo si rimandano queste considerazioni ai possibili sviluppi futuri di questa ricerca concernenti il miglioramento della fase di modellazione al calcolatore sulla base dei risultati sperimentali ottenuti.