

# ANALISI A LUNGO TERMINE DI TRAVI COMPOSTE ACCIAIO-CALCESTRUZZO IN FASE FESSURATA E NON FESSURATA

C. Amadio<sup>1</sup>, M. Fragiaco<sup>2</sup>, L. Macorini<sup>3</sup>, S. Lovato<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Trieste

<sup>2</sup>Dipartimento di Architettura, Design e Urbanistica, Università di Sassari

<sup>3</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, Imperial College London, UK

## ABSTRACT

This paper presents the results of numerical-experimental comparisons carried out on steel-concrete composite beams subjected to long-term test under the service load. The numerical analyses were performed using a uniaxial finite element code purposely developed to account in a rigorous way for the cracking, creep and shrinkage of concrete. The finite element is made of two parallel beams, the concrete slab and the steel profile, connected with a continuous spring system with non-linear behaviour schematizing the shear connection as if it was smeared along the beam length. Concrete cracking is schematized using a non-linear stress-strain relationship with softening branch once the tensile strength of concrete is exceeded.

The numerical-experimental comparison demonstrates that the model is able to predict the beam behaviour in the long-term both in cracked and uncracked phase. It also suggests that the creep and shrinkage of concrete in cracked phase can be modeled with the same functions used in uncracked phase.

## SOMMARIO

In questo lavoro si presentano i risultati di una comparazione numerica a lungo termine di travi composte acciaio-calcestruzzo in condizioni di esercizio, effettuata con riferimento a prove sperimentali di recente pubblicazione. Le analisi numeriche sono condotte utilizzando un codice agli elementi finiti, appositamente ideato per effettuare analisi evolutive nel tempo tenendo conto della fessurazione del calcestruzzo e dei fenomeni reologici dovuti a ritiro e alla viscosità. L'elemento finito è di tipo unidimensionale, costituito da due travi parallele connesse da un sistema di continuo di molle a comportamento non lineare. La fessurazione del calcestruzzo viene schematizzata mediante una legge tensioni-deformazioni di tipo non lineare, con ramo di softening una volta ecceduta la resistenza a trazione.

Il confronto fra i risultati numerici e quelli sperimentali, conferma la validità dell'approccio numerico utilizzato sia in fase non fessurata che fessurata. Esso evidenzia la possibilità di utilizzare anche a fessurazione avvenuta la stessa legge di viscosità lineare adottata in campo non fessurato e la stessa funzione di ritiro.

## 1 INTRODUZIONE

La trave composta acciaio-calcestruzzo rappresenta, come noto, un sistema strutturale che trova largo impiego nella realizzazione di impalcati civili e di travi da ponte. L'utilizzo di elementi misti in acciaio e calcestruzzo, oltre a benefici di carattere economico legati alla velocità di realizzazione dell'opera, garantisce infatti una notevole rigidezza e resistenza strutturale. La trave, costituita da una soletta in calcestruzzo armato piena o composta su lamiera grecata e da un profilo metallico collegati mediante un dispositivo meccanico di connessione generalmente realizzato mediante pioli dotati di testa, può essere realizzata, in funzione delle esigenze progettuali, o in uno schema di semplice appoggio o in uno schema continuo con appoggi intermedi. L'analisi della risposta strutturale in esercizio di questa tipologia strutturale è generalmente rilevante ai fini progettuali. Essa risulta particolarmente complessa a causa del possibile comportamento non lineare degli elementi componenti (fessurazione della soletta, plasticizzazione della trave metallica e della connessione) e dei fenomeni lenti nel calcestruzzo (viscosità e ritiro) e nella connessione (viscosità). Per tali motivi, numerose modellazioni sono state recentemente sviluppate per cogliere correttamente la soluzione [1, 2, 3]. Allo scopo di approfondire queste tematiche, nel presente lavoro, attraverso l'uso della modellazione agli elementi finiti sviluppata in [1], viene effettuata una estesa comparazione tra i risultati ottenuti utilizzando il modello proposto e quelli sperimentali riportati recentemente in letteratura [4, 5]. Particolare attenzione viene rivolta alla

modellazione dei fenomeni lenti, con l'obiettivo di valutare se le leggi di viscosità lineare e di ritiro, normalmente utilizzate in fase non fessurata, risultano applicabili anche in fase fessurata.

## 2 IL MODELLO NUMERICO AGLI ELEMENTI FINITI

Come detto in premessa, per le analisi a lungo termine delle travi composte acciaio-calcestruzzo, si utilizza un modello numerico agli elementi finiti, appositamente sviluppato [1] per valutare il comportamento di travi composte dotate di connessione deformabile, tenendo conto degli effetti reologici del calcestruzzo e non lineari dei materiali.

### 2.1. Elemento finito e ipotesi cinematiche

L'elemento finito che sta alla base della procedura possiede sei nodi, per un totale di dieci gradi di libertà, che rappresentano gli spostamenti nodali  $u_c$  e  $u_s$  in corrispondenza delle sezioni terminali e della sezione di mezzeria, gli abbassamenti  $v_a$  e le rotazioni  $v_r$  sulle sezioni terminali (Figura 1). Le ipotesi cinematiche su cui si basa sono le seguenti:

- piccoli spostamenti;
- conservazione delle sezioni piane nelle singole travi;
- deformabilità a taglio trascurabile;
- uguaglianza degli spostamenti verticali tra trave superiore ed inferiore;
- perfetta aderenza tra barre di armatura e calcestruzzo della soletta.

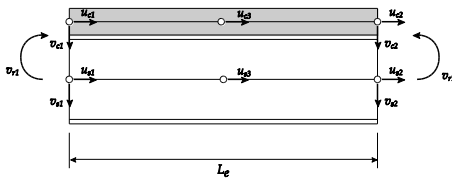


Figura 1: nodi e gradi di libertà dell'elemento finito

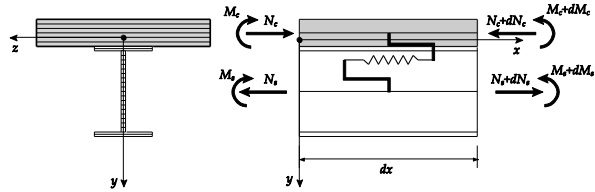


Figura 2: rappresentazione delle caratteristiche del modello di trave.

Sulla base di tali assunzioni il campo di deformazione del generico punto  $P = P(x, y, z)$  della trave è dato da:

$$\begin{aligned}\varepsilon_c &= \frac{\partial u_c}{\partial x} - y_c \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \\ \varepsilon_s &= \frac{\partial u_s}{\partial x} - y_s \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\end{aligned}\quad (1)$$

essendo  $\varepsilon$ ,  $y$  rispettivamente la deformazione e la distanza del generico punto  $P = P(x, y, z)$  dal centro geometrico della sezione trasversale della singola trave, mentre  $u$  e  $v$  sono gli spostamenti assiale e verticale del centro geometrico  $G$  e  $x$  l'ascissa della sezione trasversale. Per ciascuna delle armature è stato applicato, in virtù dell'ipotesi di perfetta aderenza col calcestruzzo, una relazione analoga alle (1) considerando l'effettiva ordinata  $y_{r1}, y_{r2}$  delle stesse. Lo scorrimento relativo  $s_f$  tra la soletta in calcestruzzo armato e la trave d'acciaio, nelle ipotesi cinematiche adottate, è dovuto a:

$$s_f = \frac{\partial v}{\partial x} H - (u_c - u_s) \quad (2)$$

dove  $H$  rappresenta la distanza tra il centro geometrico della soletta e del profilo in acciaio.

### 2.2. Leggi costitutive

Mentre l'acciaio nelle verifiche di esercizio si ipotizza dotato di comportamento elastico lineare, il calcestruzzo è modellato come un materiale viscoelastico lineare in compressione e viscoelastico non lineare in trazione. Ipotizzando valida la sovrapposizione degli effetti, la legge costitutiva viscoelastica lineare, formulata mediante l'approccio integrale, può essere espressa come:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) d\sigma(\tau) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t) \quad (3)$$

dove  $\Phi, R, \varepsilon_c, \varepsilon_{cs}, \varepsilon_{cT}, t_0, t$  sono rispettivamente la funzione di viscosità, la deformazione totale del calcestruzzo, la deformazione dovuta al ritiro, quella dovuta alla temperatura, l'istante iniziale e l'istante considerato. La soluzione dell'integrale è calcolata mediante una procedura passo-passo, dividendo il dominio del tempo in  $m$  sottointervalli ( $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$  con  $k = 1, 2, \dots, m$ ) ed applicando la regola dei trapezi per ogni intervallo  $k$ . L'equazione integrale di Volterra (3) è quindi risolta in forma incrementale:

$$\Delta \sigma_{ck} = E'_c(t_k) [\Delta \varepsilon_{ck} - \Delta \varepsilon_{cck} - \Delta \varepsilon_{csk} - \Delta \varepsilon_{cTk}] = E'_c(t_k) \Delta \varepsilon_{cek} \quad (4)$$

dove  $E'_{ck}$  è il modulo elastico fittizio che tiene conto dell'effetto della viscosità mentre  $\Delta \varepsilon_{cek}$  è l'incremento di deformazione viscosa al passo  $k$ :

$$E'_{ck} = \frac{2}{\Phi(t_k, t_k) + \Phi(t_k, t_{k-1})} \quad (5)$$

$$\Delta \varepsilon_{cek} = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\Delta \sigma_{ci}}{2} F(t_k, t_i) \quad (6)$$

dove:

$$F(t_k, t_i) = \Phi(t_k, t_i) + \Phi(t_k, t_{i-1}) - \Phi(t_{k-1}, t_i) + \Phi(t_{k-1}, t_{i-1}) \quad (7)$$

Le quantità  $\Delta \varepsilon_{ck}, \Delta \varepsilon_{cck}, \Delta \varepsilon_{csk}, \Delta \varepsilon_{cTk}, \Delta \varepsilon_{cek}$  sono rispettivamente l'incremento di deformazione totale per ogni passo  $k$ , quella viscosa, da ritiro, dovuta alla temperatura ed elastica.

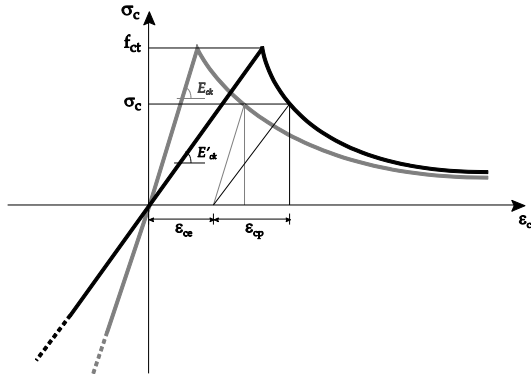


Figura 3: legge costitutivo del calcestruzzo

La formulazione appena descritta, risolve il problema viscoelastico lineare del calcestruzzo compresso e teso fintantoché la tensione è inferiore o uguale alla resistenza a trazione. In fase fessurata, invece, il legame tensione-deformazioni è non lineare e viene schematizzato tramite una curva di softening che tiene conto, in modo indiretto, del fenomeno di tension stiffening dovuto alla presenza delle barre d'armatura, mediante una modellazione continua del processo di fessurazione (Figura 3). Come legge, di tipo esponenziale, è stata adottata quella proposta da Stevens [6], modificata per ovviare al problema del size-effect, utilizzando la relazione:

$$\sigma_c = f_{ct} \left[ (1 - \alpha) e^{-\lambda A (\varepsilon_c - \varepsilon_{ct})} + \alpha \right] \quad (8)$$

dove  $\varepsilon_{ct}$  è la deformazione in corrispondenza della resistenza a trazione,  $\varepsilon_c$  è la deformazione in campo fessurato, mentre  $\lambda$  è un parametro che indica la rapidità della caduta di resistenza ed è legato al coefficiente  $\alpha$  tramite una relazione sperimentale.  $A$  è un parametro che modifica la legge di softening per tener conto del size-effect, e vale  $A = h/L$ , dove  $h$  è lo spessore della soletta e  $L$  è la lunghezza dell'elemento finito.

Nella formulazione adottata per il calcolo a lungo termine la curva di softening è ulteriormente modificata per tener conto dell'influenza della viscosità sull'aliquota elastica della deformazione, che dipende dal modulo elastico fittizio  $E'_{ck}$ , mentre il contributo deformativo in fase fessurata risulta indipendente dalla viscosità. La modifica della legge costitutiva in fase fessurata al generico tempo  $t_k$  di analisi, viene condotta a partire dal legame precedentemente descritto (eq.(8)) mantenendo costante il

valore della tensione e modificando la parte elastica della deformazione totale in funzione del modulo elastico fittizio  $E'_{ck}$  (Figura 3):

$$\sigma_c = f_{ct} \left[ (1-\alpha) e^{-(\lambda A \varepsilon_p + \lambda AB(\varepsilon_{ce} - \varepsilon_{ct}))} + \alpha \right] \quad (9)$$

dove  $B = E'_{ck} / E_{ck}$ .

In definitiva nella procedura di calcolo, ad ogni passo temporale  $k$  e per ogni iterazione  $i$  l'incremento di deformazione totale è la somma dei seguenti contributi:

$$\Delta \varepsilon_{ck,i} = \Delta \varepsilon_{cek,i} + \Delta \varepsilon_{epk,i} + \Delta \varepsilon_{cck,i} + \Delta \varepsilon_{csk,i} + \Delta \varepsilon_{ctk,i} \quad (10)$$

dove le quantità incrementali sono rispettivamente la deformazione totale, l'aliquota elastica, quella in fase fessurata, quella dovuta alla viscosità, da ritiro e dovuta alle dilatazioni termiche.

### 3 ANALISI A LUNGO TERMINE

Utilizzando l'algoritmo appena descritto, si riportano ora i risultati ottenuti relativamente ad alcune travi composte di recente pubblicazione, caratterizzate da una descrizione particolarmente completa dei risultati sperimentali e dei dati strutturali variabili nel tempo. I lavori in oggetto sono quelli svolti da Al-Deen, Ranzi e Vrcelj [4] presso i laboratori della School of Civil Engineering dell'Università di Sidney, e da Fan, Lie, Ni e Wang [5] presso i laboratori Engineering structure dell'Università di Tsinghua.

#### 3.1. Analisi delle prove sperimentali svolte da Al-Deen, Ranzi e Vrcelj

Le prove sperimentali in oggetto [4], riguardano una serie di tre travi composte in acciaio calcestruzzo, denominate B1, B2 e B3, delle quali è stato monitorato il comportamento nel tempo (461 giorni per B1 e B2, 222 per B3). I provini presentano il medesimo schema statico, di trave in semplice appoggio ad una campata di luce 8,00m. La sezione trasversale è composta da un profilo in acciaio del tipo 310UB40 (standard australiano) e una soletta in calcestruzzo, priva di lamiera grecata, di spessore 125mm e di larghezza 2000mm. La connessione tra acciaio e calcestruzzo è affidata a pioli di 19mm di diametro, con un'altezza pari a 95mm ed un'interasse di 500mm, realizzando in tal modo un grado di connessione pari a 0,5. L'armatura della soletta è composta da 10 barre d'acciaio di 12mm di diametro, sia inferiormente che superiormente (Figura 4). La soletta della trave B1 è stata gettata senza l'ausilio di puntelli, utilizzando un sistema di casseforme portate interamente dal profilo in acciaio, e non è stato applicato alcun sovraccarico. La trave B2 presenta la medesima procedura realizzativa, ma al giorno 29 dopo il getto è stato applicato un carico distribuito pari a 13,4kN/m. Il provino B3 invece è stato sostenuto con puntelli fino al giorno 29, dopo il quale sono stati rimossi ed è stato applicato un carico distribuito sempre di 13,4kN/m. Il monitoraggio è stato condotto in un ambiente la cui umidità relativa media è stata del 70%, mentre la temperatura media di 21°C.

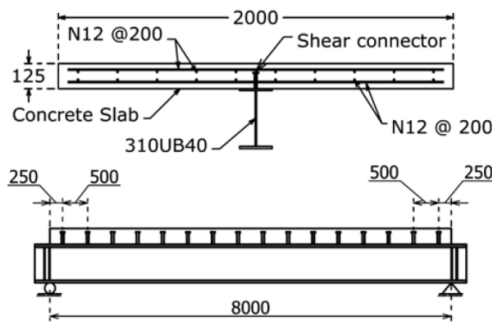


Figura 4: schema statico e sezione trasversale [4]

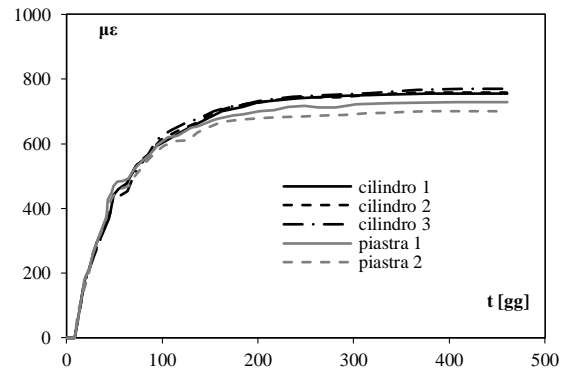


Figura 5: ritiro sperimentale [4]

Il calcestruzzo utilizzato è stato caratterizzato mediante prove di compressione su provini cilindrici, desumendo un modulo elastico secante pari a 24600MPa. Il ritiro è stato misurato, per tutta la durata delle prove, sia su provini cilindrici che su provini aventi la stessa sezione trasversale della soletta (Figura 5),

mentre l'effetto viscoso è stato monitorato su provini cilindrici di 150mm di diametro. Per ovviare al problema della differente spessore fittizio ( $h_0 = A_c/u$ ) tra cilindro e soletta e quindi poter utilizzare nelle analisi il coefficiente di viscosità desunto dalle prove, nota la curva sperimentale del coefficiente di viscosità, considerando il modello di previsione del CEB90 [7] e fissato lo spessore fittizio pari al raggio del provino cilindrico  $h_0 = 75mm$ , si è ricercato un valore di umidità relativa tale da permettere la sovrapposizione della curva di previsione; si ha una buona approssimazione per una RH=40%. Determinata l'umidità relativa "equivalente" si è calcolata la curva di previsione per un  $h_0 = 118mm$  (spessore fittizio della soletta); tale curva è quella utilizzata nelle analisi (Figura 6).

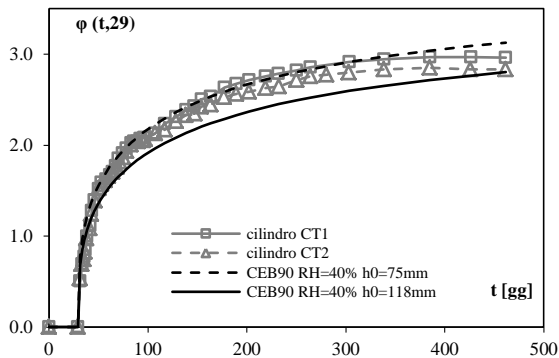


Figura 6: coefficiente di viscosità sperimentale [4]

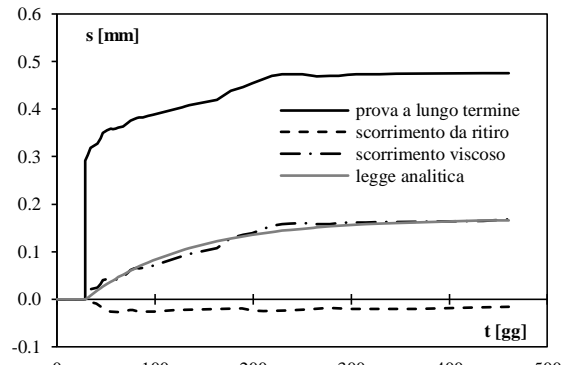


Figura 7: prove a lungo termine sul dispositivo di connessione [4]

Il dispositivo di connessione è stato caratterizzato in termini sforzo-scorrimento attraverso prove di push-out, svolte sia a 29gg dal getto del calcestruzzo, che a 550gg. Su uno di questi è stata svolta una prova a lungo termine sotto carico costante, dalla cui curva è stata desunta la componente viscosa dello scorrimento (Figura 7), approssimata nel modello mediante una legge esponenziale. Nelle analisi a lungo termine tale comportamento viscoso è messo in conto, analogamente a quanto si fa con il calcestruzzo, ipotizzando un comportamento viscoelastico lineare.

Il modello agli elementi finiti è stato realizzato sfruttando la simmetria e modellando metà trave, mediante 20 elementi di 20cm ciascuno. Il primo nodo è stato vincolato con un carrello orizzontale, mentre l'ultimo con un doppio pendolo verticale; nel modello B3, fino al tempo di analisi  $t=29gg$ , sono stati vincolati anche i nodi intermedi con un carrello orizzontale per simulare la presenza dei puntelli. La connessione è stata assunta con comportamento viscoelastico lineare con rigidezza del connettore a 29 giorni pari a 140kN/mm. Il ritiro del calcestruzzo è considerato nel calcolo come deformazione impressa, utilizzando l'andamento sperimentale. È stata dapprima condotta un'analisi elastica lineare, successivamente un'analisi elastica lineare con ritiro, viscoelastica lineare con ritiro ed infine considerando la connessione a comportamento viscoelastico lineare.

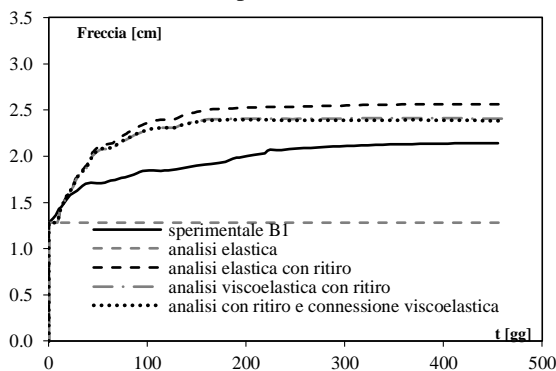


Figura 8: analisi in termini di freccia del modello B1

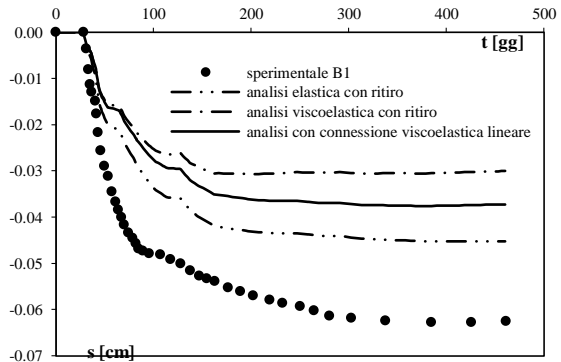


Figura 9: scorrimenti all'appoggio del modello B1

Dall'analisi del modello B1 (figure 8 e 9), si nota come l'effetto di contrazione della soletta, dovuta al ritiro, sia la caratteristica più rilevante (analisi elastica con ritiro) e come gli effetti della viscosità del calcestruzzo e della connessione diano un contributo limitato in termini di freccia. Per quanto riguarda invece lo scorrimento all'appoggio l'influenza della viscosità del calcestruzzo e della connessione sono rilevanti e contrapposti. Il comportamento sperimentale risulta comunque molto particolare in quanto ad una freccia sperimentale ridotta rispetto a quella sperimentale, corrispondono scorrimenti più elevati, come se la rigidezza del dispositivo di connessione fosse minore di quella assunta nel calcolo.

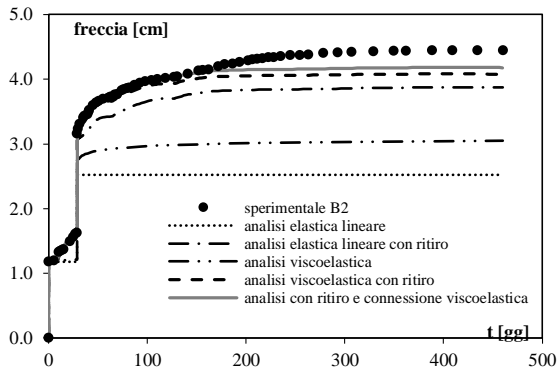


Figura 10: analisi in termini di freccia del modello B2

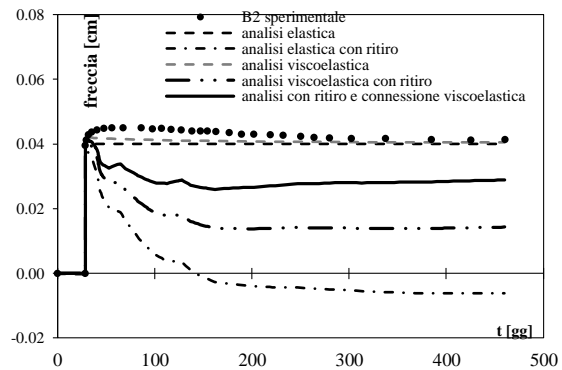


Figura 11: scorrimenti all'appoggio per B2

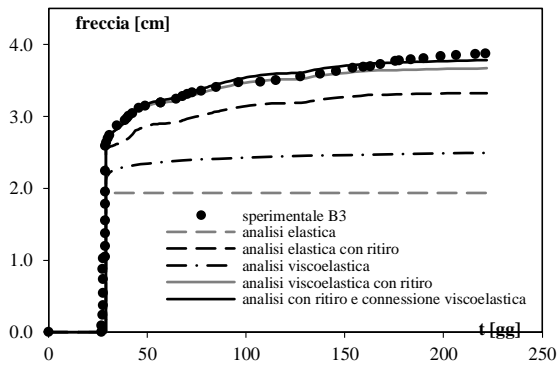


Figura 12: analisi in termini di freccia del modello B3

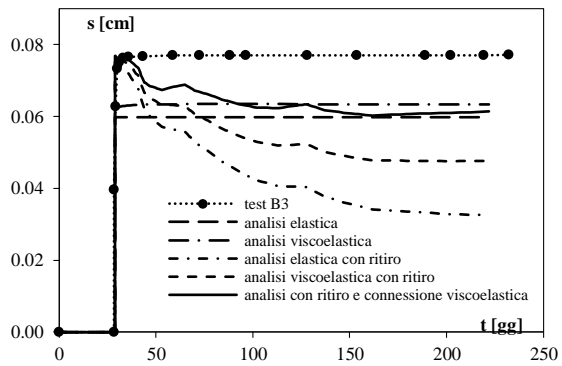


Figura 13: scorrimenti all'appoggio per B3

Dall'analisi dei risultati della trave B2 in termini di freccia, riportati nella Figura 10, si osserva come l'analisi viscoelastica con ritiro, considerando anche la connessione viscoelastica riesca a cogliere correttamente il comportamento tra 0 e 150 giorni, mentre nel periodo successivo c'è una leggera sottostima della freccia. Si ipotizza che tale comportamento sia dovuto a due cause concomitanti: una sottostima della viscosità del calcestruzzo da 150 giorni in poi, e una sottostima della viscosità della connessione nello stesso periodo. Queste considerazioni si possono ritenere valide, studiando i grafici relativi al confronto tra gli scorrimenti all'appoggio (Figura 11). Infatti, si nota come l'andamento degli scorrimenti sperimentali, una volta esaurito lo scorrimento istantaneo a 29 giorni dovuto all'applicazione del sovraccarico, abbia un leggero decremento con il tempo. Tale comportamento sta a significare che gli scorrimenti da ritiro (negativi in segno) sono dello stesso ordine di grandezza di quelli viscosi (positivi) e si elidono a vicenda. Dall'esame invece dei risultati di calcolo si vede come ci sia una netta predominanza dello scorrimento da ritiro su quello viscoso, e si evidenzia come il comportamento viscoso della connessione (analisi viscoelastica con ritiro e connessione viscoelastica) comporti un notevole aumento di scorrimento rispetto al caso in cui non lo si considera (analisi viscoelastica con ritiro).

Esaminando i risultati del modello B3 (Figura 12) si nota come l'analisi viscoelastica eseguita considerando sia il ritiro che la connessione a comportamento viscoelastico, descriva con buona approssimazione il comportamento sperimentale. Analizzando il comportamento istantaneo a 29 giorni, momento in cui la trave è stata spuntellata ed applicato il sovraccarico, si coglie quasi completamente il valore della freccia, che sperimentalmente è stata rilevata in 2,6 cm mentre dal calcolo risulta 2,5 cm.

Questo dimostra come le assunzioni fatte, principalmente in termini di modulo elastico del calcestruzzo pari a 24600MPa e rigidità del connettore, pari a 140kN/mm, risultino adeguate per la descrizione del problema.

Dall'osservazione della Figura 13 si osserva come nel lungo termine la curva degli scorrimenti decresca a causa della contrazione della soletta dovuta al ritiro. Aggiungendo poi a questa curva le quote di scorrimento offerte dalla viscosità del calcestruzzo e della connessione, che sono positive in segno si ha una decrescita inferiore della curva. Sperimentalmente la curva degli scorrimenti, dopo aver esaurito la quota istantanea dovuta all'applicazione del sovraccarico, rimane pressoché orizzontale. Questo fatto starebbe ad indicare come gli scorrimenti sperimentali dovuti al ritiro (negativi in segno), siano praticamente compensati da quelli dovuti alla viscosità (positivi in segno)

### 3.2. Analisi delle prove sperimentali svolte da Fan, Lie, Ni e Wang

Le prove riguardano il monitoraggio per tre anni di due coppie di travi composte acciaio calcestruzzo, due soggette a momento positivo e due a momento negativo [5].

#### 3.2.1. Travi soggette a momento positivo

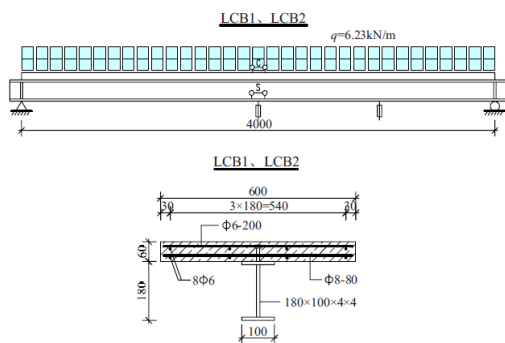


Figura 14: schema statico e sezione trasversale [5]

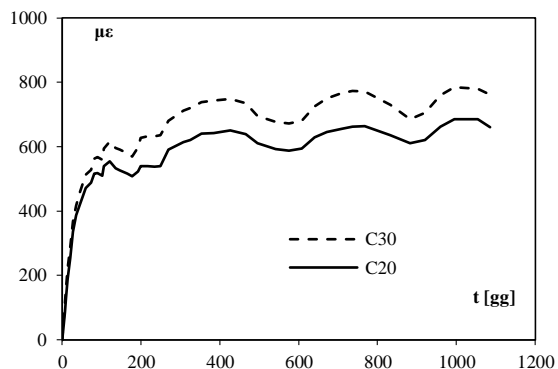


Figura 15: deformazione da ritiro sui provini [5]

Le due travi in semplice appoggio ad una campata, denominate LCB1 e LCB2, presentano la medesima luce di 4,00m e la stessa sezione trasversale, con un profilo metallico simmetrico a doppio T di altezza 180mm, larghezza 100mm e spessore 4mm, ed una soletta larga 600mm e spessa 60mm. L'armatura della soletta è di 4 barre da 6mm di diametro sia superiormente che inferiormente (Figura 14). Nella Figura 17 è riportato l'andamento nel tempo della umidità relativa ambientale RH.

	t [gg]	R <sub>ck</sub> [MPa]	f <sub>ck</sub> [MPa]
<b>C20</b>	7	24.3	18.5
	28	32.3	24.5
<b>C30</b>	7	33.4	25.4
	28	44.7	34.0

Tabella 1: resistenza dei calcestruzzi

Entrambi i provini possiedono un grado di connessione completo, essendo il dispositivo di connessione composto da una fila di connettori di 10mm di diametro, un'altezza di 45mm ed un passo di 80mm. I calcestruzzi utilizzati sono di due classi, C20 per LCB1 e C30 per LCB2 e sono caratterizzati mediante prove a compressione a 7 e a 28 giorni (Tabella 1); ne è stata misurata anche la contrazione da ritiro su appositi provini

di forma parallelepipedica per tutto il tempo della prova (Figura 15).

Le due travi durante le fasi di costruzione sono state puntellate fino al settimo giorno dopo il getto, quando sono state sovraccaricate con un carico distribuito di 6,23kN/m, per un totale di 7,29kN/m, considerando anche il peso proprio. Per la realizzazione della soletta sono state utilizzate delle casseforme, le quali sono state poi rimosse due giorni dopo il getto.

Il modello agli elementi finiti su cui si basa l'analisi è costruito sfruttando la simmetria, mediante 20 elementi da 10cm ciascuno per un totale di 2m, vincolando il primo nodo con un carrello orizzontale e l'ultimo con un doppio pendolo verticale. Per simulare il programma di sostegno e di carico delle travi svolto nella prova sperimentale, si sono vincolati i nodi intermedi con dei carrelli fra il tempo di analisi t=0gg e t=7gg, quando i vincoli sono stati rimossi ed applicato il sovraccarico.

Per modellare il comportamento nel tempo del calcestruzzo, si utilizzano le leggi di previsione proposte dal Model Code CEB90 [7], sia per definire l'evoluzione del modulo elastico, sia per la funzione di viscosità. Per quanto riguarda il ritiro, sono impiegate nell'analisi direttamente la deformazione rilevate sperimentalmente, essendo lo spessore fittizio della soletta prossimo a quello dei provini. Non avendo a disposizione dati relativi al comportamento del dispositivo di connessione in termini di sforzo e scorrimento, si è impiegata la legge non lineare di Ollgard [8], con i coefficienti proposti da Johnson [9].

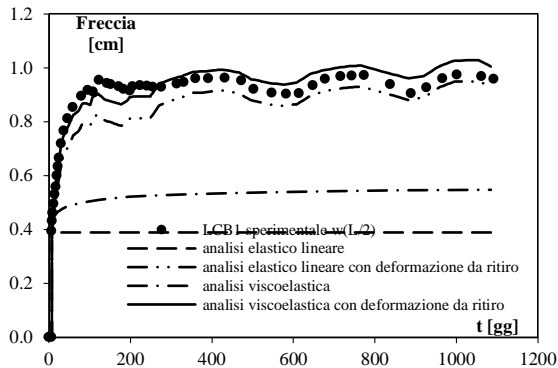


Figura 16: freccia per LCB1

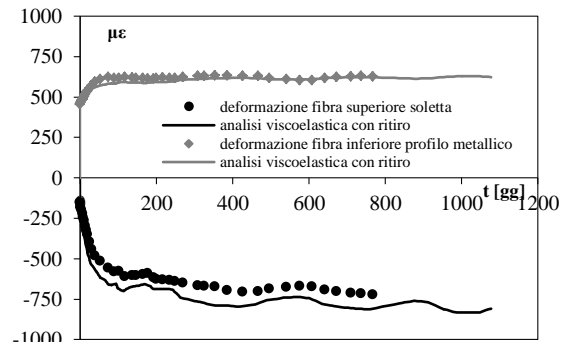


Figura 17: deformazioni nella sezione di mezzeria per LCB1

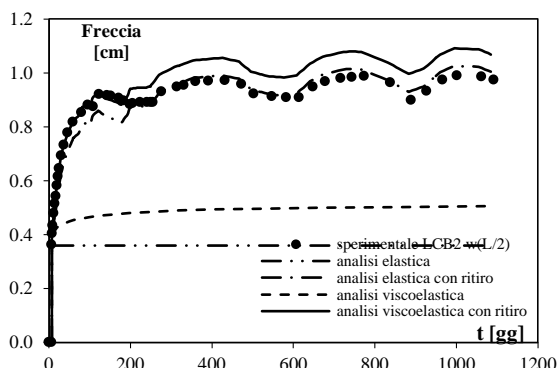


Figura 18: freccia per LCB2

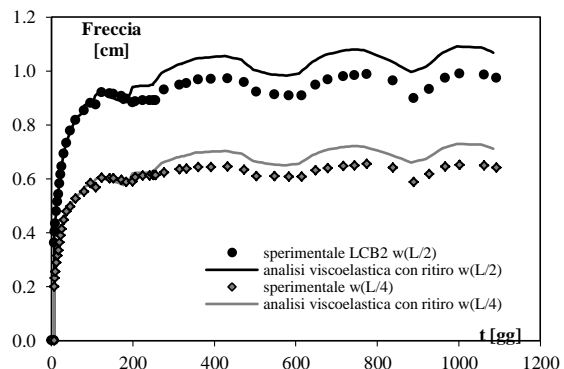


Figura 19: deformazioni nella sezione di mezzeria per LCB2

Dal confronto dei risultati del modello con i valori sperimentali (da Figura 16 a Figura 19) emerge che il comportamento viscoso sperimentale della trave si manifesta con un rapido incremento di freccia tra i 7 e i 200 giorni circa, incremento maggiore di quello calcolato. Oltre, l'incremento di deformazione viscosa non sembra più manifestarsi in modo significativo ed il comportamento della freccia è governato dalle deformazioni da ritiro. Complessivamente la modellazione numerica si dimostra in grado di seguire con ottima corrispondenza la risposta sperimentale.

### 3.2.2. Travi soggette a momento negativo

Le travi soggette a momento negativo sono quelle rappresentate in Figura 20. Esse possiedono un profilo metallico a I, con la piattabanda di larghezza 100mm e spessore 4 mm, mentre l'anima è alta 172mm e spessa 4mm. La soletta ha le stesse dimensioni nei due modelli pari a 60mm di altezza e 600mm di larghezza. L'armatura nella soletta LCB3 è pari a 4φ12 superiormente, mentre inferiormente è pari a 4φ6, mentre in LCB4 è stata disposta un'armatura aggiuntiva di 4φ12 solo superiormente. Il dispositivo di connessione tra la soletta e il profilo è realizzato mediante pioli a testa di diametro 10mm e di altezza, una volta saldati, pari a 45mm. Il passo per LCB3 è di 150mm, mentre per LCB4 80mm. Per entrambe le travi è stato utilizzato lo stesso calcestruzzo C30.

Durante il getto della soletta le travi sono state sostenute da puntelli fino al giorno 7, quando sono stati tolti i puntelli ed è stato applicato il sovraccarico. Il comportamento rilevato durante la prova è particolarmente complesso da esaminare. Si nota, infatti, come all'applicazione del carico si abbia un aumento di freccia istantaneo, che poi diminuisce per effetto del ritiro. Questo andamento continua nel



tempo fintantoché non sopraggiunge la fessurazione (Figura 21) all'ottantesimo giorno circa, quando vi è un'inversione di tendenza. Dopo tale data, l'andamento della freccia è influenzato in maniera marcata dal ritiro, con fluttuazioni dovute alle variazioni stagionali dell'umidità relativa ambientale, e comunque con un aumento tendenziale della freccia dovuto alla viscosità.

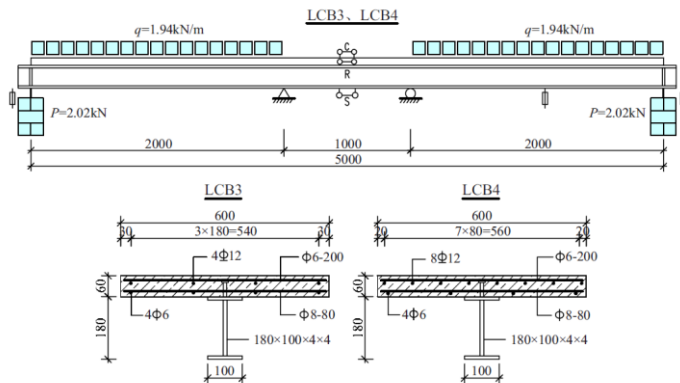


Figura 20: travi composte LCB3 e LCB4 [5]

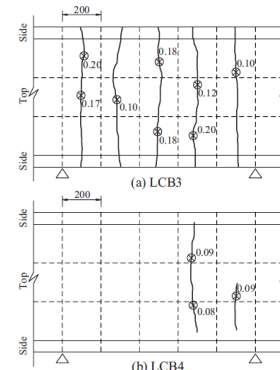


Figura 21: fessurazione delle travi [5]

Le travi, essendo simmetriche, sono state modellate considerando metà struttura. Il modello è stato suddiviso in 10 elementi finiti da 25cm ciascuno, vincolando per tutta l'analisi il primo nodo con un doppio pendolo verticale, mentre al terzo, distante 50cm dal primo, si è applicato un carrello (appoggio della trave); i restanti nodi sono stati vincolati con carrelli, per simulare la presenza dei puntelli, dal tempo di analisi  $t=0$ gg a  $t=7$ gg. Il calcestruzzo utilizzato nella prova è lo stesso (classe C30) delle prove precedentemente menzionate.

Per descrivere correttamente il comportamento di queste travi, è di fondamentale importanza valutare la resistenza a trazione del calcestruzzo, la quale innesca il fenomeno della fessurazione. Non avendo a disposizione il valore sperimentale si è fatto riferimento alla formulazione proposta dal Model Code CEB90 [7]. Nel calcolo, analogamente a quanto fatto in precedenza, si considera il ritiro sperimentale misurato su provini.

Nelle figure 22-25 si propongono i risultati delle analisi. L'analisi puramente elastica, in entrambi i modelli, fornisce una freccia istantanea più elevata di quella rilevata sperimentalmente. Questo si spiega con il fatto che la misura sperimentale è iniziata a 7 giorni, dopo che sono stati rimossi i sostegni e prima dell'applicazione del sovraccarico, la freccia rilevata è la somma del contributo istantaneo dovuto al peso proprio (positiva in segno) e alla deformazione accumulata (negativa in segno). La stessa analisi, condotta considerando il ritiro fornisce una freccia istantanea prossima a quella misurata. All'aumentare del tempo, la soluzione decresce a causa della contrazione della soletta, che essendo parzialmente impedita dalla collaborazione con la trave in acciaio, provoca anche delle tensioni di trazione nel calcestruzzo. L'analisi puramente viscoelastica mette in mostra la componente elastica e viscosa della freccia. Si vede come l'andamento sia crescente nel tempo, come è lecito aspettarsi. Considerando anche il ritiro, lo scarto tra questa curva e quella elastica con ritiro è dovuto alla componente viscosa della freccia (Figura 22 e 23).

I risultati delle analisi viscoelastica fessurata sono profondamente influenzati dalla resistenza a trazione del calcestruzzo, assunta pari a 3,17MPa a 28 giorni, come previsto dal modello di previsione per un calcestruzzo con  $f_{cm}=42$ MPa. Si nota come l'andamento della freccia sia al di sotto di quello sperimentale, evidenziando una sovrastima della resistenza a trazione, oppure una sottostima della deformazione da ritiro. Una deformazione da ritiro maggiore imporrebbe nel calcolo un aumento della tensione di trazione nella soletta e quindi una fessurazione anticipata.

Abbassando gradualmente la resistenza a trazione ci si avvicina alla curva sperimentale, infatti con l'entità del ritiro considerato la curva ha un comportamento migliore in prossimità di una resistenza media a trazione pari a 2,5MPa a 28 giorni per LCB3 (Figura 24) e 2,85MPa per LCB4 (Figura 25).

È da sottolineare l'influenza fornita dalla rigidità della connessione nella risposta della trave. Infatti, una rigidità più o meno grande, comporta una diversità di collaborazione tra i due elementi costituenti la trave, ed una variazione dello stato tensionale della soletta, influenzando perciò la sopraggiunta della fase fessurata. Il modello LCB4 (Figura 23) avendo una rigidità della connessione diversa da quella del

LCB3, presenta infatti, a parità di materiali e di fenomeni reologici del calcestruzzo, un comportamento diverso sia a livello sperimentale che analitico.

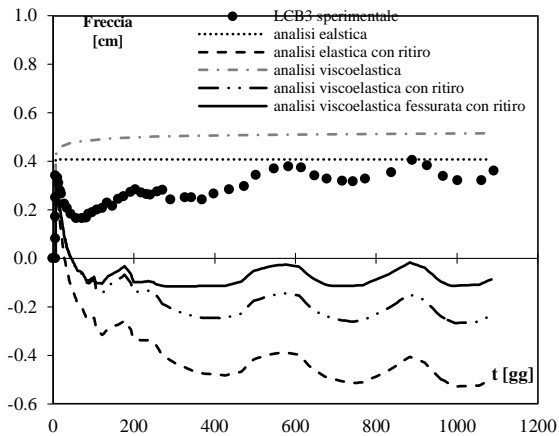


Figura 22: risultati delle analisi per il modello LCB3

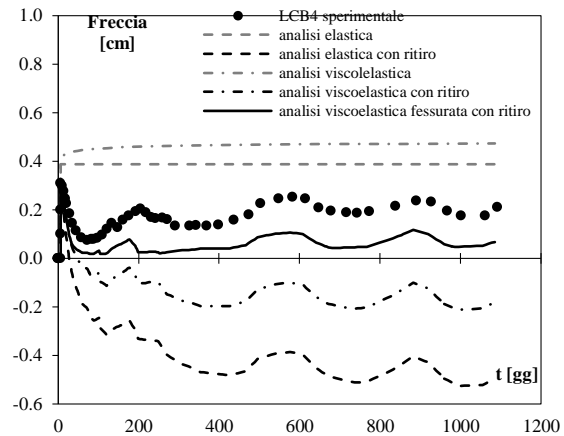


Figura 23: risultati delle analisi per il modello LCB4

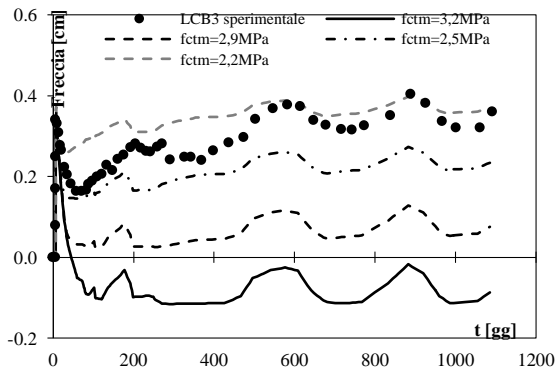


Figura 24: risultati al diminuire della resistenza a trazione per LCB3

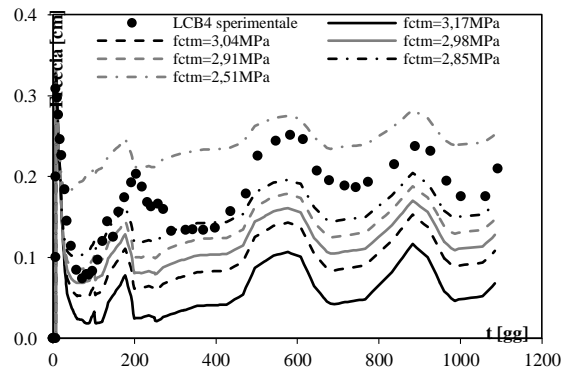


Figura 25: risultati al diminuire della resistenza a trazione per LCB4

### 3.2.3. Studio della risposta al variare del coefficiente di viscosità in fase fessurata

Recenti studi sperimentali hanno evidenziato come l'effetto viscoso diminuisca in fase fessurata. Al-Deen, Ranzi, Vrcelj [4, 10], hanno testato una serie di travi composte soggette a momento negativo aventi lo stesso schema statico e sezione trasversale, ma caricate diversamente (Figura 26).

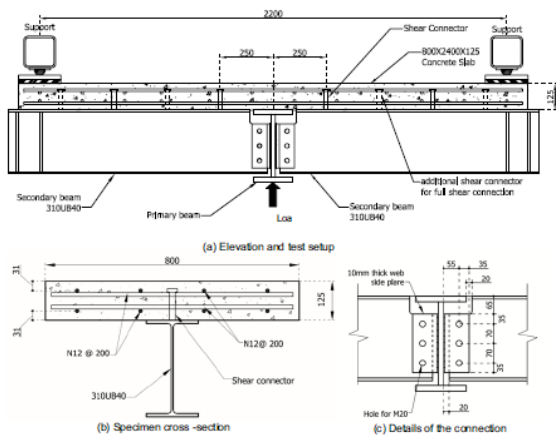


Figura 26: trave tipo oggetto di prova [4]

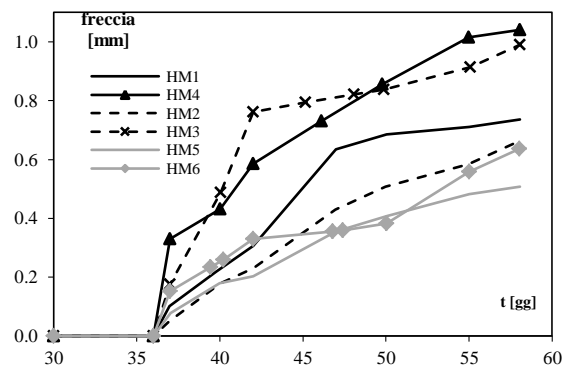


Figura 27: monitoraggio della freccia dei vari provini [4]

I sei provini oggetto della prova, indicati con HM01 a HM06, hanno le stesse caratteristiche, tranne che per il grado di connessione, che vale 0,5 per HM01 e HM04, e 1 per i restanti. La metodologia di prova per mettere in evidenza il comportamento suddetto, è stata quella di indurre istantaneamente, all'atto di applicazione del carico, un maggior grado di fessurazione nelle travi HM01, HM02 e HM05, per poi scaricare leggermente la trave (passando da un momento massimo negativo iniziale pari a 68,75kNm, mediante uno scarico immediato a 57,2kNm). Nei restanti provini è stato imposto un momento massimo negativo sin dall'inizio pari a 53,35kNm. In questo modo, lo stato di sollecitazione nelle travi (con eguali caratteristiche) risulta analogo, ma diverso è il grado di fessurazione, per cui è possibile confrontare il comportamento delle travi al variare di quest'ultima. Dal confronto delle rilevazioni in termini di freccia emerge come, tra provini con eguali caratteristiche, in quelli in cui è stata indotta una maggiore fessurazione la deformazione viscosa sia inferiore (si confronti la freccia di HM1 e HM4, HM2 e HM3, HM5 e HM6 di Figura 27).

Per questi motivi si è voluto valutare l'influenza della viscosità sui modelli LCB3 e LCB4 precedentemente considerati (Figure 28, 29). In fase fessurata sono state effettuate le analisi al variare del coefficiente di viscosità rispetto a quello elastico  $\varphi$ , considerando oltre a questo i valori ( $0.1\varphi$ ,  $0.5\varphi$ ,  $2\varphi$ ,  $3\varphi$ ,  $4\varphi$ ). In particolare, dalla figura 29 si può notare come all'aumentare del coefficiente di viscosità ci sia una appiattimento della curva della freccia, in controtendenza con il comportamento sperimentale. Al contrario riducendo il coefficiente di viscosità fino a 0,1 volte quello convenzionale elastico, si vede come il comportamento tendenziale migliori e segua meglio l'andamento sperimentale. Queste risposte numeriche sembrano quindi in linea con i risultati sperimentali riportati in figura 27. L'adozione della stessa funzione di viscosità in fase fessurata e non fessurata può, a parere degli autori, essere quindi un buon compromesso. Ulteriori approfondimenti, con riferimento a questo aspetto, si rendono comunque necessari.

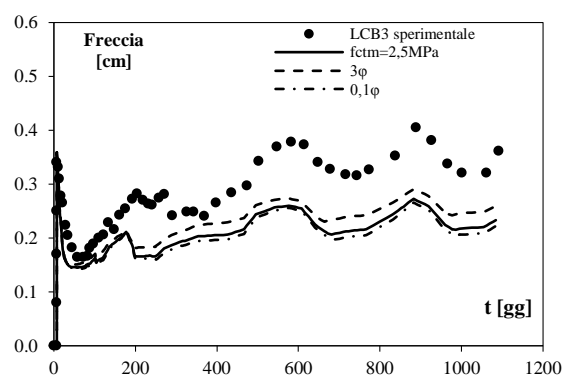


Figura 28: LCB3

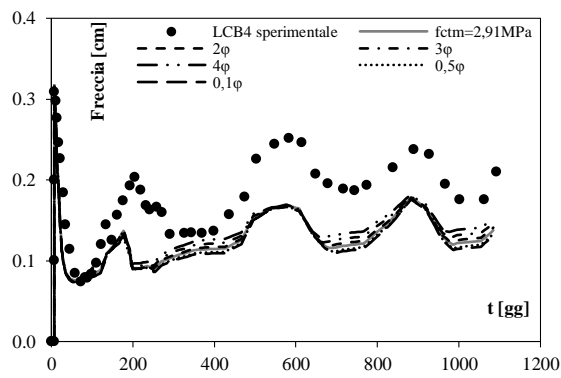


Figura 29: LCB4

## 4 CONCLUSIONI

In questo lavoro si sono riportati i risultati di un confronto numerico-sperimentale, effettuato su travi continue ed in semplice appoggio, in condizioni di esercizio. Si è posto in evidenza come solo attraverso una modellazione accurata dei fenomeni viscosi e dei materiali sia possibile ottenere un'adeguata corrispondenza tra risposta sperimentale e numerica. Dalle analisi è emerso come il ritiro sia un parametro che influenza fortemente la risposta nel tempo della trave composta, assieme alla viscosità del materiale. La viscosità della connessione influenza invece in modo meno rilevante la risposta.

Dallo studio della trave continua in fase fessurata è emerso come l'adozione di una legge di viscosità e ritiro, analoga a quella adottata in fase non fessurata, costituisca un buon compromesso pratico e fornisca risultati adeguati. Su questo aspetto, di notevole importanza per una corretta modellazione a lungo termine, ulteriori approfondimenti sia di tipo numerico che sperimentale sono ancora necessari.

## 5 RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Prof. Ranzi per avere messo a disposizione degli autori i dati sperimentali della sua ricerca.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Fragiaco, C. Amadio and L. Macorini, "Finite-Element Model for Collapse and Long-Term Analysis of Steel-Concrete Composite Beams," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, pp. 489-497, 2004.
- [2] G. Ranzi, A. Zona, "A steel-concrete composite beam model with partial interaction including the shear deformability of the steel component." *Engineering Structures*, 29(11), pp. 3026-3041, 2007.
- [3] F. Gara, G. Ranzi, G. Leoni, "Time analysis of composite beams with partial interaction using available modelling techniques: A comparative study." *Journal of Constructional Steel Research*, 62(9), pp. 917-930, 2006.
- [4] S. Al-deen, G. Ranzi and Z. Vrcelj, "Full-scale long-term experiments of simply supported composite beams with solid slabs," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, pp. 308-321, 2011.
- [5] J. Fan, J. Nie, Q. Li and H. Wang, "Long-Term Behavior of Composite Beams under Positive and Negative Bending. I: Experimental Study," *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, pp. 849-857, 2010.
- [6] N. J. Stevens, S. M. Uzumeri, M. P. Collins and G. T. Will, "Constitutive model for reinforced concrete finite element analysis," *ACI Structural Journal*, vol. 88(1), pp. 49-59, 1991.
- [7] *CEB-FIP model code 1990*, 1993.
- [8] J. G. Ollgard, R. G. Slutter and J. W. Fischer, "Shear strength of stud connectors in lightweight and normal concrete," *AISC Engineering journal*, pp. 55-64, 1971.
- [9] R. P. Johnson and N. Molenstra, "Partial shear connection in composite beams in building," *Proceeding Institute of Civil Engineers*, pp. 679-704, 1991.
- [10] S. Al-Deen, G. Ranzi and Z. Vrcelj, "Long term experiments on composite floor systems: members with continuous configuration and subjected to hogging moment with composite connections," in *Steel & Composite Structures - Proceedings of the 4th international conference*, pp. 125-130, 2010.

### PAROLE CHIAVE

Travi composte, fenomeni lenti, acciaio-calcestruzzo, fessurazione.