

COMPORTAMENTO A LUNGO TERMINE SOTTO CARICHI STATICI DI TRAVI IN C.A. PLACCATE CON LAMINE IN FRP

L. Ascione, V.P. Berardi, G. Mancusi

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, Via Ponte Don Melillo – 84084 Fisciano (SA), e-mail: l.ascione@unisa.it; berardi@unisa.it; g.mancusi@unisa.it

SOMMARIO

Il lavoro presenta i risultati di uno studio degli effetti della viscosità sul comportamento statico di travi in conglomerato cementizio armato (c.a.) rinforzate con laminati in FRP (Fiber Reinforced Polymer). In particolare, viene focalizzata l'attenzione sulla redistribuzione delle tensioni tra nucleo in c.a e rinforzo in FRP, conseguente agli effetti viscosi a carico di quest'ultimo. L'analisi numerica è basata su un affinamento del ben noto metodo del modulo elastico efficace (EM). I risultati ottenuti evidenziano come gli effetti differiti possano provocare nel tempo una sensibile migrazione delle tensioni verso il nucleo in c.a..

ABSTRACT

This paper presents some numerical results relative to the creep behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with fiber reinforced polymer (FRP) composites. In particular, the stress redistribution between the RC core and the FRP reinforcement, related to the viscous behavior of the last one, is analysed. The numerical analysis here developed utilises a refinement of the well known effective modulus method (EM). The results obtained show FRP creep behavior may produce a sensible stress transition from the FRP reinforcement to the concrete core.

1. INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni il tema della riabilitazione e del ripristino delle strutture in c.a. con materiali e tecniche innovative sta riscuotendo un notevole interesse nel campo dell'Ingegneria Civile. In tale contesto è andato infatti emergendo sempre più l'impiego di materiali plastici fibrorinforzati (Fiber Reinforced Polymers o FRP) per i vantaggi connessi alla semplicità e all'efficacia di questo tipo di intervento.

Gli aspetti strutturali che intervengono in tale ambito possono riguardare sia il comportamento a breve termine che quello a lungo termine dei sistemi rinforzati con FRP. Mentre il primo è stato ampiamente indagato da più autori nel corso degli ultimi anni, il

comportamento a lungo termine è stato invece affrontato solo in tempi più recenti in seguito alla messa in opera di numerosi interventi di riabilitazione con FRP e quindi all'esigenza di valutare la durabilità e l'affidabilità di tale tecnica.

A tal riguardo un ruolo di fondamentale importanza è svolto dal comportamento viscoso delle colle e delle lamine di composito, entrambi materiali di natura polimerica con proprietà reologiche non affatto trascurabili ed inoltre fortemente influenzate dalla temperatura.

Nasce, quindi, il problema di analizzare l'influenza legata alla disuniformità dei comportamenti differiti a carico dei singoli componenti sulla risposta strutturale complessiva dell'elemento rinforzato.

Nel caso in esame i suddetti componenti sono rappresentati dal nucleo in c.a. e dal rinforzo in FRP. In particolare, nel presente lavoro si riterrà che il fenomeno di viscosità del calcestruzzo sia ormai esaurito, situazione quest'ultima ampiamente verificata nei casi reali, laddove l'intervento di placcaggio interessa una struttura in servizio da svariati anni. I fenomeni viscosi riguarderanno quindi il solo rinforzo in composito.

Il problema esaminato è analogo a quello, ampiamente investigato, delle strutture miste acciaio-calcestruzzo, in cui è invece il calcestruzzo "giovane" a esibire deformazioni viscosi mentre l'acciaio è praticamente esente da creep [1-2].

Sulla base di quanto detto, è agevole intuire come una valutazione inadeguata del problema possa causare seri errori in fase di progettazione, tali da poter vanificare addirittura l'efficacia dell'intervento di riabilitazione.

La pericolosità e l'entità degli effetti viscosi negli FRP per le applicazioni strutturali è infatti riconosciuta anche dalle linee guida attualmente disponibili a livello internazionale, che a tale riguardo suggeriscono opportune restrizioni tensionali per limitare il creep ed evitare il concomitante fenomeno di fatica statica [4-6].

Gli studi sulla durabilità ed affidabilità degli interventi di placcaggio strutturale con FRP attualmente disponibili in letteratura sono ancora pochi e non consentono di trarre delle conclusioni definitive [3]. Inoltre, i numerosi studi sulla viscosità dei materiali compositi sono stati condotti in campo aeronautico e pertanto non possono essere estesi al placcaggio strutturale in ambito civile, soprattutto per le differenti modalità di preparazione del composito.

In questo contesto si inserisce il presente lavoro, che si prefissa l'obiettivo di sviluppare un'indagine numerica relativa agli effetti reologici sul comportamento statico di travi in c.a. rinforzate con placche o laminati in FRP.

Tale indagine è svolta nell'ambito della viscoelasticità lineare, utilizzando il modello di Findley [16]. Il problema viscoelastico viene qui affrontato per via numerica attraverso un approccio che costituisce un'estensione ed un affinamento del ben noto metodo EM [10], opportunamente particolarizzato ai materiali elastici lineari ortotropi. L'approccio, come sarà evidenziato in seguito, ha il pregio della semplicità, riconducendo l'analisi ad una successione di classici problemi di elasticità lineare.

Il modello meccanico utilizzato per la trave rinforzata è quello proposto in [11-12].

Per la caratterizzazione del comportamento reologico dei laminati fibrorinforzati ci si avvale delle preziose indagini sperimentali presentate in [18].

2. COMPORTAMENTO REOLOGICO DEGLI FRP

I materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica sono ottenuti, come ben noto, dalla combinazione di due macrocostituenti: la matrice, che agisce da legante, e le fibre, che assolvono alla funzione di rinforzo.

Il comportamento differito di questi materiali è pertanto influenzato sia dal carattere viscoso della matrice, notevolmente accentuato per la natura polimerica del mezzo, sia limitatamente

da quello delle fibre. Queste ultime, in particolare, esibiscono generalmente delle deformazioni viscosi di ridotta entità o addirittura trascurabili, come nel caso delle fibre in carbonio.

Il comportamento a lungo termine degli FRP può essere studiato attraverso una prova di creep [7-9]. Essa consente di rilevare tre fasi successive: una prima fase in cui alla deformazione elastica istantanea fa seguito un incremento crescente della deformazione (creep primario); una fase successiva in cui essa continua ad evolvere con una velocità pressoché costante (creep secondario) durante un intervallo di tempo più esteso di quello della fase precedente; un'ultima fase (creep terziario), che si manifesta generalmente solo per valori elevati della tensione o della temperatura, in cui la deformazione cresce a dismisura accumulando danneggiamento nel provino, fino a provocarne la rottura.

Com'è ben noto, almeno nelle fasi di creep primario e secondario, gli effetti differiti nei polimeri possono essere studiati nell'ambito della viscoelasticità lineare.

In tal modo, riferendosi per semplicità al caso monodimensionale di un campione di composito soggetto ad uno sforzo assiale centrato variabile nel tempo, è possibile esprimere agevolmente la deformazione relativa ad un generico istante di tempo $\varepsilon=\varepsilon(t)$, provocata dall'arbitrario processo di carico $\sigma=\sigma(t)$. Invocando infatti il principio di sovrapposizione degli effetti, basterà scomporre quest'ultimo in incrementi infinitesimi $d\sigma(\tau)$, considerati applicati in istanti successivi a quello iniziale t_0 , ed integrare le corrispondenti deformazioni (Fig. 1).

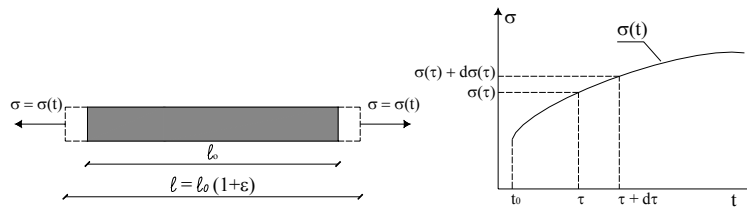


Fig. 1 - Provino soggetto ad un processo di carico arbitrario

Tutto quanto sopra espresso può essere sintetizzato analiticamente attraverso la seguente relazione:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)\Phi(t, t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)d\sigma(\tau), \quad (1)$$

dove la quantità $\Phi(t, \tau)$, detta funzione di viscosità, rappresenta la deformazione complessiva al tempo t prodotta da una tensione unitaria applicata all'istante τ e mantenuta costante nell'intervallo $[\tau, t]$.

La funzione di viscosità è desumibile dal modello reologico adottato. Per i compositi a matrice polimerica le leggi comportamentali più accreditate presenti in letteratura sono quella di Maxwell [13-15] e di Findley [16-18].

Nel presente lavoro, il comportamento viscoso del composito fibrorinforzato sarà descritto secondo il secondo modello. Con riferimento ad una prova monoassiale di creep realizzata a temperatura costante T sotto la tensione costante σ_0 , la legge costitutiva di tale modello è esprimibile nella forma:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0(\sigma_0) + m(\sigma_0) (t - t_0)^n = \sigma_0\Phi(t, t_0), \quad (2)$$

in cui t_0 è l'istante di tempo di applicazione del carico; n è un parametro del modello costitutivo, assunto nella generalità dei casi indipendente dallo stato tensionale; ε_0 ed m rappresentano ulteriori parametri del modello relativi alla tensione σ_0 ed alla temperatura di esercizio T . Questi ultimi sono ricavati attraverso un'opportuna interpolazione dei dati sperimentali relativi alla prova di creep sul provino in composito soggetto alla tensione costante pari a σ_0 e mantenuto a temperatura costante pari a T .

3. FORMULAZIONE DI UN METODO ALGEBRIZZATO

L'utilizzo della (1) presuppone la conoscenza della legge di variazione nel tempo della tensione, generalmente incognita. Ne discende che la risoluzione di un problema di viscoelasticità lineare comporta la risoluzione di un sistema di equazioni integro-differenziali.

Una possibile semplificazione può essere ottenuta sostituendo all'integrale in (1) una sua espressione approssimata di tipo algebrico.

Tra i metodi algebrizzati, il più comune ed immediato è il ben noto metodo EM. Esso adotta, come espressione approssimante del suddetto integrale, il prodotto dell'incremento tensionale relativo al passaggio da t_0 a t per il competente valore della funzione di viscosità $\Phi(t, t_0)$.

In altri termini:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \sigma(t_0)\Phi(t, t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)d\sigma(\tau) = \\ &= \sigma(t_0)\Phi(t, t_0) + [\sigma(t) - \sigma(t_0)]\Phi(t, t_0) = \sigma(t)\Phi(t, t_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Accettando di trascurare le variazioni di tensione nell'intervallo $[t_0, t]$, il metodo EM consente di ricondurre la risoluzione di un problema viscoelastico lineare a quella di un problema elastico lineare, caratterizzato da un modulo di elasticità normale pari a: $E(t) = 1/\Phi(t, t_0)$.

Il metodo EM è stato utilizzato dagli autori in [20] per indagare il comportamento reologico di strutture in c.a. rinforzate con FRP.

Attesa la marcata influenza che gli effetti viscosi inducono sul comportamento strutturale delle membrature così rinforzate, nell'ambito del presente lavoro gli autori intendono procedere ad una validazione dei suddetti risultati, confrontandoli con quelli ottenibili attraverso un opportuno affinamento del metodo EM.

A differenza di quest'ultimo, l'affinamento proposto consente di tenere conto delle progressive variazioni tensionali a carico del composito fibrorinforzato nel corso del processo viscoelastico.

A titolo esemplificativo, ai fini dell'esposizione della procedura algebrizzata, ci si riferirà ad un elemento teso costituito da un nucleo centrale e da due lamine uguali di rinforzo applicate simmetricamente rispetto ad esso. Sia il materiale costituente il nucleo che quello delle lamine si supporranno isotropi: siano rispettivamente E_c il modulo di elasticità normale del nucleo ed E_f quello delle lamine. Si supporrà inoltre che il materiale del nucleo sia elastico lineare e quello delle lamine viscoelastico lineare con comportamento alla Findley.

Nelle condizioni di simmetria ipotizzate nella Fig. 2, l'elemento misto sarà soggetto a sforzo normale centrato. Le tensioni nel nucleo (σ_c) e nelle lamine (σ_f) potranno essere determinate agevolmente sotto le usuali ipotesi di indeformabilità della sezione retta e di perfetta aderenza tra i componenti.

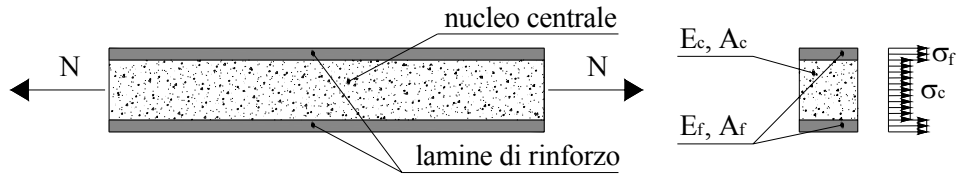


Fig. 2 - Nucleo rinforzato con due lamine isotrope simmetriche

Ciò premesso, suddividendo l'intervallo di osservazione $[t_0, t]$ in n sottointervalli $[t_{i-1}, t_i]$ (con $i = 1, n$) ed assumendo $t_n = t$, la procedura algebrizzata proposta si sviluppa nei seguenti passi, consistenti essenzialmente nella risoluzione di una successione di problemi elastici lineari, ottenuti fissando opportunamente il modulo E_f :

- i) si risolve il problema elastico lineare all'istante t_0 di applicazione del carico, assumendo quale modulo di elasticità normale delle lamine il valore iniziale $E_f(t_0)$ e valutando in particolare la tensione $\sigma_f(t_0)$ ivi mobilitata;
- ii) essa viene assunta costante nell'intervallo $[t_0, t_1[$ (Fig. 3a);
- iii) per effetto della viscosità si accumulerà nei rinforzi una deformazione crescente (Fig. 3b), che al termine di tale intervallo sarà pari a: $\varepsilon_f(t_1) = \Phi(t_1, t_0) \sigma_f(t_0)$;
- iv) all'istante t_1 si aggiorna il modulo elastico delle lamine di rinforzo (Fig. 3c) secondo la relazione: $E_f(t_1) = \frac{\sigma_f(t_0)}{\varepsilon_f(t_1)}$;
- v) assumendo per i rinforzi il modulo di elasticità aggiornato $E_f(t_1)$ e risolvendo il corrispondente problema elastico lineare, si valuta la nuova tensione $\sigma_f(t_1)$ nelle lamine, che sarà assunta costante nell'intervallo $[t_1, t_2[$ (Fig. 3a);
- vi) durante tale intervallo si mobiliterà una deformazione viscoelastica complessiva (Fig. 3b), dovuta in parte all'impronta della tensione $\sigma_f(t_0)$, attiva a partire dall'istante t_0 , ed in parte a quella della differenza di tensione $\sigma_f(t_1) - \sigma_f(t_0)$, attiva a partire dall'istante t_1 : $\varepsilon_f(t_2) = \Phi(t_2, t_0) \sigma_f(t_0) + \Phi(t_2, t_1) [\sigma_f(t_1) - \sigma_f(t_0)]$;
- vii) all'istante t_2 si riaggiorna il modulo elastico dei rinforzi (Fig. 3c) in accordo con la relazione: $E_f(t_2) = \frac{\sigma_{media}^{(1-2)}}{\varepsilon_f(t_2)}$, essendo $\sigma_{media}^{(1-2)} = \frac{\sigma_f(t_0)(t_1 - t_0) + \sigma_f(t_1)(t_2 - t_1)}{(t_2 - t_0)}$;
- viii) nel successivo intervallo $[t_2, t_3[$ si ripercorrono i passi da v) a vii) fino a riaggiornare all'istante t_3 il modulo elastico delle lamine (Fig. 3c): $E_f(t_3) = \frac{\sigma_{media}^{(1-3)}}{\varepsilon_f(t_3)}$, dove $\sigma_{media}^{(1-3)}$ è la media pesata delle tensioni nell'intervallo $[t_0, t_3[$ e precisamente:

$$\sigma_{media}^{(1-3)} = \frac{\sigma_f(t_0)(t_1 - t_0) + \sigma_f(t_1)(t_2 - t_1) + \sigma_f(t_2)(t_3 - t_2)}{(t_3 - t_0)}$$
- ix) si reitera il procedimento nei successivi intervalli di tempo fino all'istante $t_n = t$.

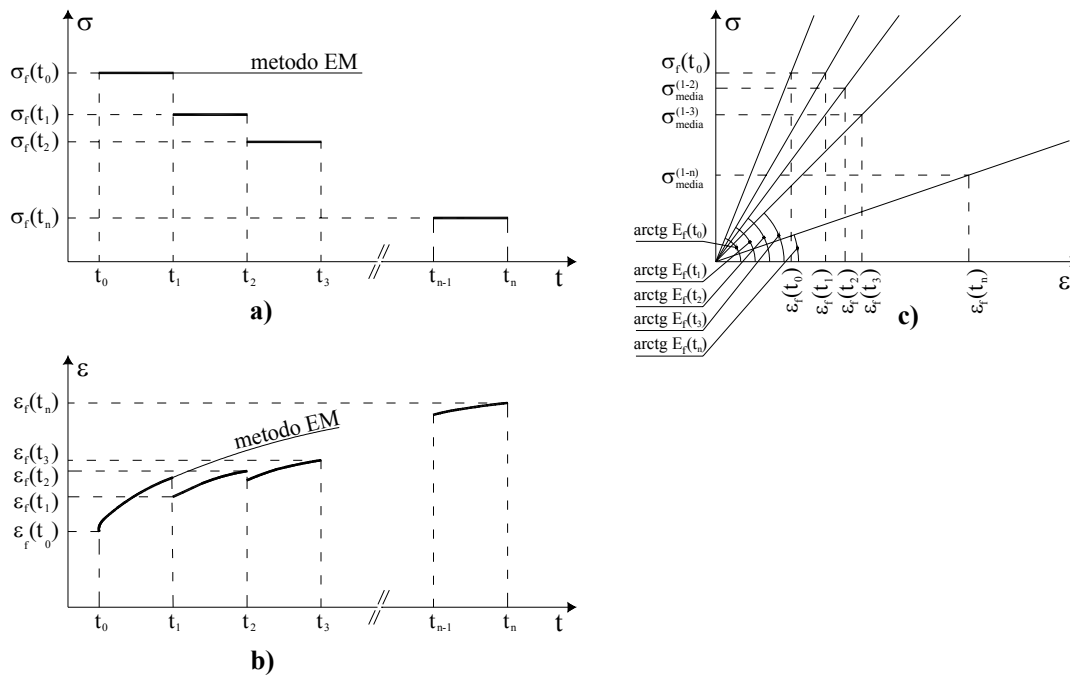


Fig. 3 - Andamento nel tempo delle tensioni e delle deformazioni nei rinforzi di FRP

Rispetto al metodo EM la procedura algebrizzata appena descritta consente di tenere conto, almeno in media, dei successivi decrementi tensionali nel rinforzo nel corso del processo viscoelastico.

Tale procedura può essere agevolmente generalizzata al caso del placcaggio flessionale di una trave in c.a. rinforzata con lamine ortotrope in FRP secondo l'approccio suggerito in [20].

4. APPLICAZIONI NUMERICHE

In questo paragrafo si prendono in esame alcune sperimentazioni numeriche condotte con l'ausilio del metodo algebrizzato proposto e relative al comportamento viscoelastico di alcune travi in c.a. placcate a flessione con laminati in FRP.

Lo schema statico considerato è quello di trave semplicemente appoggiata caricata da due forze F di pari entità poste ad una distanza pari ad $L/3$ dagli appoggi (Fig. 4). In Tabella 1 sono riportati rispettivamente per il calcestruzzo e l'acciaio la resistenza caratteristica (f_{ck} , f_{sk}), il modulo di elasticità normale (E_c , E_s), ed altresì la deformazione ultima (ϵ_{cu} , ϵ_{su}).

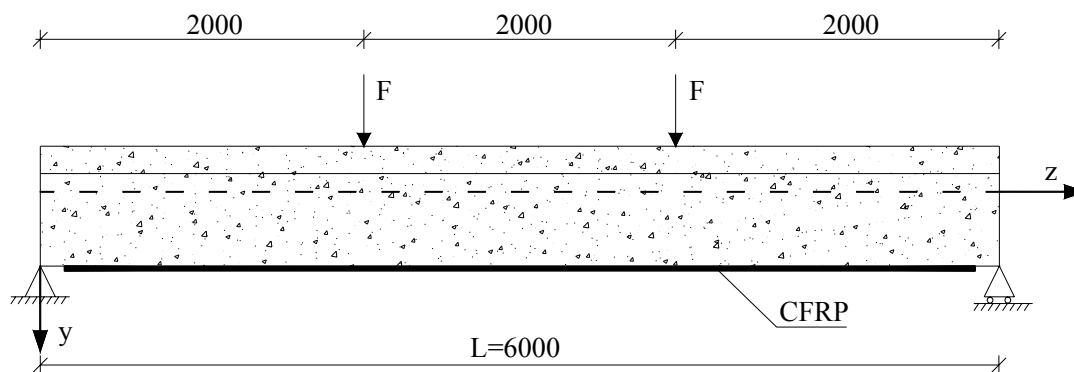


Fig. 4 - Schema statico della trave rinforzata (dimensioni in mm)

Tabella 1- Caratteristiche meccaniche del cls e dell'acciaio

Calcestruzzo			Acciaio		
f_{ck} [N/mm ²]	E_c [N/mm ²]	ϵ_{cu}	f_{sk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]	ϵ_{su}
17.6	28500	0.0035	440.0	206000	0.01

Al fine di poter utilizzare nell'ambito del presente lavoro i dati sperimentali disponibili in [18], il rinforzo esterno è stato schematizzato come un laminato equivalente in composito con fibre in carbonio (CFRP) disposte parallelamente all'asse z della trave. Tale orientamento delle fibre garantisce che la direzione naturale del composito denotata con l'indice 1 sia coincidente con l'asse z.

Le proprietà meccaniche e reologiche del composito, desunte nell'ambito del modello di Findley dai dati sperimentali disponibili nella su citata pubblicazione, sono riportate nella successiva Tabella 2 e sono riferite ad un'espressione del tempo in minuti.

Tabella 2 - Caratteristiche meccaniche e reologiche del composito

$E_{r1}(t_0)$ [N/mm ²]	f_{rk} [N/mm ²]	T [°C]	σ_0 [N/mm ²]	ϵ_0	m	n
18500	315.00	25	31.46	0.0030	0.00100	0.112
			62.92	0.0096	0.006785	0.112
			94.38	0.0250	0.01250	0.112

Le simulazioni numeriche sono state effettuate con l'ausilio del modello meccanico formulato in [11-12], nell'ipotesi di comportamento elastico perfettamente plastico dell'acciaio ed elasto-plastico del calcestruzzo. In particolare, per quest'ultimo ci si è riferiti al legame costitutivo di Saenz e si è tenuto altresì conto della sua incapacità a resistere a sforzi di trazione. Sono state adottate diverse discretizzazioni temporali, caratterizzate però, nell'ambito della singola simulazione, da una stessa ampiezza Δt dei diversi sottointervalli di osservazione $[t_{i-1}, t_i]$. I risultati conseguiti consentono di valutare, nella sezione di mezzeria ed all'istante finale t , i valori massimi delle tensioni normali nel calcestruzzo compresso ($\sigma_c(t)$), nell'armatura tesa ($\sigma_s(t)$) e nel rinforzo ($\sigma_r(t)$), nonché le relative variazioni percentuali ($\Delta\sigma_i(t)$, $i = c, s, r$) rapportate alla soluzione elastica iniziale. Inoltre nella stessa sezione sono state valutate le variazioni percentuali esibite dalle tensioni finali nel composito rispetto ai risultati conseguiti in [20] con il metodo EM ($\Delta\sigma_r(t)^{(EM)}$).

Nei casi di seguito presentati risultano soddisfatte all'istante iniziale di applicazione del carico t_0 le prescrizioni suggerite dalle linee guida internazionali [4-6] per la condizione di carico quasi permanente. In particolare, i valori massimi della tensione di compressione nel calcestruzzo $\sigma_{c,max}(t_0)$ e di trazione nell'FRP $\sigma_{r,max}(t_0)$ soddisfano all'istante t_0 le seguenti limitazioni:

$$\begin{aligned} \sigma_{c,max}(t_0) &\leq 0.45 f_{ck}, \\ \sigma_{r,max}(t_0) &\leq 0.55 f_{rk}. \end{aligned} \quad (4)$$

4.1 Esempio 1

Nel primo esempio proposto si ipotizza che le due forze sollecitanti la trave siano di entità pari a: 75570 N e che il rinforzo sia costituito da uno strato di 1 mm di composito. La generica sezione retta della trave rinforzata è riportata in Fig. 5.

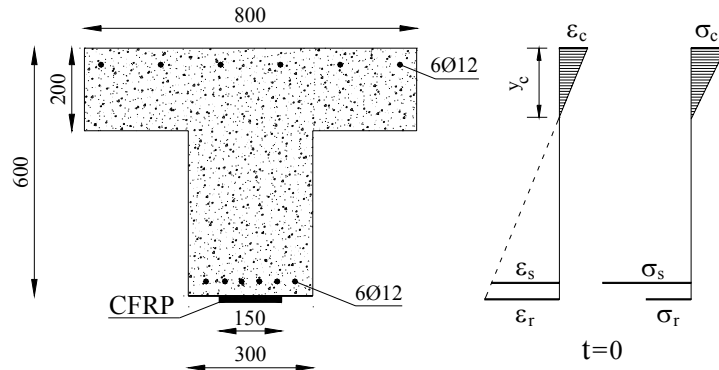


Fig. 5 - Sezione retta della trave placcata con CFRP (dimensioni in mm)

Nella Tabella 3 sono messi a confronto i risultati ottenuti al variare della mesh temporale e cioè dell'ampiezza di tempo Δt comune a tutti i sottointervalli $[t_{i-1}, t_i]$.

L'analisi condotta evidenzia rilevanti variazioni di tensione (ad esempio $\Delta\sigma_r = -49\%$), tali da vanificare l'efficacia dello stesso placcaggio.

Tabella 3 - Risultati numerici - Esempio 1 -

T [°C]	t [h]	Δt [h]	$\sigma_c(t)$ [N/mm ²]	$\sigma_s(t)$ [N/mm ²]	$\sigma_r(t)$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_c(t)$ [%]	$\Delta\sigma_s(t)$ [%]	$\Delta\sigma_r(t)$ [%]	$\Delta\sigma_r(t)^{(EM)}$ [%]
25	0	-	7.20	382.60	62.92	-	-	-	-
	30000	30000	10.77	382.60	29.70	+50	-	-53	-
	30000	15000	10.50	382.60	31.08	+46	-	-50	5
	30000	10000	10.48	382.60	31.85	+45	-	-49	7

Esempio 2

Il secondo esempio è relativo ad una trave rinforzata con uno strato di 1 mm di composito e sollecitata da due forze di entità pari a: 74670 N. La geometria della trave in c.a. e del rinforzo sono riportate in Fig. 6.

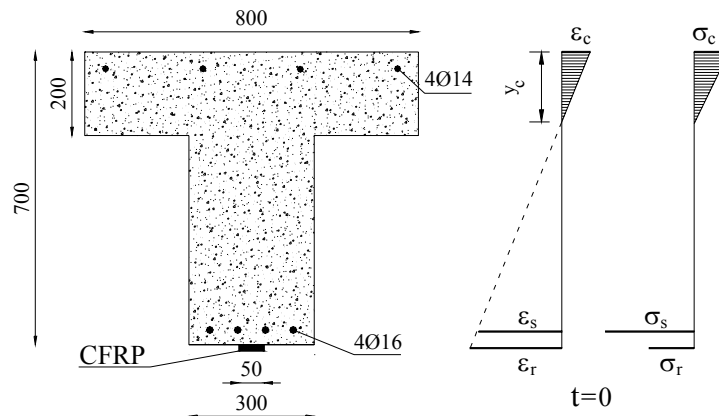


Fig. 6 - Sezione retta della trave placcata con CFRP (dimensioni in mm)

I risultati dalle elaborazioni riportati in Tabella 4 mettono in evidenza che, anche in questo caso, gli effetti viscosi nel rinforzo in FRP provocano nel tempo una marcata variazione dello stato tensionale (ad esempio $\Delta\sigma_r = -74\%$).

Tabella 4 - Risultati numerici - Esempio 2 -

T [°C]	t [h]	Δt [h]	$\sigma_c(t)$ [N/mm ²]	$\sigma_s(t)$ [N/mm ²]	$\sigma_r(t)$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_c(t)$ [%]	$\Delta\sigma_s(t)$ [%]	$\Delta\sigma_r(t)$ [%]	$\Delta\sigma_r(t)^{(EM)}$ [%]
25	0	-	7.38	382.60	94.38	-	-	-	-
	30000	30000	10.80	382.60	23.00	+46	-	-76	-
	30000	15000	10.46	382.60	23.92	+41	-	-75	4.00
	30000	10000	10.37	382.60	24.86	+40	-	-74	8.08

5. CONCLUSIONI

L'indagine numerica sviluppata in questo lavoro è stata volta alla valutazione degli effetti del comportamento viscoso dei laminati fibrorinforzati negli interventi di placcaggio su travi in c.a..

Lo studio è stato condotto nell'ambito della viscoelasticità lineare ipotizzando per i materiali fibrorinforzati un comportamento viscoso alla Findley. In particolare, il problema viscoelastico è stato trattato con una procedura algebrizzata che estende il classico metodo EM ai materiali ortotropi e nel contempo permette di tenere conto delle progressive variazioni tensionali nell'FRP nel corso del processo viscoelastico.

I risultati ottenuti confermano le stime piuttosto severe già rilevate in [20], evidenziando una modesta attenuazione degli effetti viscosi conseguente alla migliore approssimazione adottata.

Si sottolinea inoltre come la cospicua migrazione tensionale dal rinforzo in FRP al nucleo in c.a. avvenga anche per livelli tensionali nel rinforzo ben al di sotto di quelli massimi suggeriti dalle linee guida disponibili in campo internazionale.

Il problema merita dunque un ulteriore approfondimento sia dal punto di vista teorico che sperimentale. A tal riguardo gli autori hanno svolto altre simulazioni numeriche adottando il modello di Maxwell [21].

Soprattutto, si ravvisa la necessità di una più accurata caratterizzazione delle proprietà reologiche dei materiali compositi fibrorinforzati sia nei riguardi del creep secondario che nei riguardi di quello terziario.

Sull'argomento, presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno, è in corso un'estesa campagna di indagini sperimentali sul creep di laminati compositi fibrorinforzati nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca cofinanziato dal MIUR [22].

BIBLIOGRAFIA

- [1] A.M. Price, D. Anderson, Composite Beams in Constructional Steel Design, Elsevier Applied Science Publishers, 4.1, 1992.
- [2] R.P. Johndon, Composite Structures of Steel and Concrete, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994.
- [3] T.C. Triantafillou, N. Plevris, "Time-dependent behavior of RC members strengthened with FRP laminates", *Journal of Structural Engineering*, 120(3): 1016-1042, 1994.
- [4] ACI Committee 440, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, 2000.

- [5] CEB-FIP, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, 2001.
- [6] JSCE, Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials, 1997.
- [7] E. Barbero, Introduction to composite materials design, Taylor & Francis, 1998.
- [8] J.D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, New York: J. Wiley & Sons, 1980.
- [9] L.E. Malvern, Introduction to the mechanics of a continuous medium, Prentice-Hall, 1969.
- [10] CEB-FIP, Manual on Structural Effects of Time-Dependent Behaviour of Concrete, Bulletin d'Information n. 142-142bis, 1984.
- [11] L. Ascione, L.Feo, F. Fraternali, "The Wrapping of Reinforced Concrete Beams with FRP Plates: A Mechanical Model", *Advancing with Composites '97*, Milano, 1997.
- [12] L. Ascione, L. Feo, G. Mancusi, "On the Statical Behaviour of Fibre-Reinforced Polymer Thin-Walled Beams", *Composites Journal: Part B*, 31(8): 643-654, 2000.
- [13] E. Barbero, J.S. Harris, "Prediction of creep properties from matrix creep data", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 17(4), 1998.
- [14] R.D. Maksimov, E. Plume, "Long-Term creep of hybrid aramid/glass fiber-reinforced plastics", *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 37, No. 4, 2001.
- [15] J.Petermann, K.Schulte, "The effects of creep and fatigue stress ratio on the long-term behavior of angle-ply CFRP", *Composite Structures*, 57, 205-210, 2002.
- [16] W. N. Findley, "26-year creep and recovery of poly(vinyl chloride) and polyethylene", *Polym. Eng Sci.*, Vol.27, 8, 1987, pp. 582-585.
- [17] D.W. Scott, A. Zureick, "Compression creep of a pultruded E-glass/vinilester composite", *Composites Science and Technology*, Vol. 58, 1998.
- [18] C.C.M. Ma, N.H. Tai, S.H. Wu, S.H. Lin, J.F. Wu, J.M. Lin, "Creep behaviour of carbon-fiber-reinforced PEEK [+/-45] laminated composites", *Composites: Part B*, Vol. 28, 1997, 407-417.
- [19] V.P. Berardi, E. Di Nardo, A. Giordano, "On the creep behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP: a numerical investigation", *International Conference Composites in Constructions CCC 2003*, Cd-Rom Proceedings, Cosenza (accettato per la pubblicazione sugli Atti del convegno stesso).
- [20] V.P. Berardi, A. Giordano, G. Mancusi, "Modelli costitutivi per lo studio della viscosità nel placcaggio strutturale con FRP", *XXXII Congresso AIAS*, Cd-Rom Proceedings, Salerno, 2003.
- [21] L.Ascione, V.P. Berardi, "Gli effetti reologici nel placcaggio strutturale di elementi in c.a. con laminati fibrorinforzati", *XVI Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata*, Cd-Rom Proceedings, Ferrara, 2003 (accettato per la pubblicazione sugli Atti del convegno stesso).
- [22] Progetto strategico MIUR – Legge 449/97 dal titolo: "Metodi e modelli predittivi del comportamento strutturale di manufatti in presenza ed in assenza di danno", 2000.