

Estratto dagli atti del 16° Congresso C.T.E.  
Parma, 9-10-11 novembre 2006

## **EFFETTI DELLA VISCOSITA' SU PONTI A CONCI COSTRUITI PER SEGMENTI SUCCESSIVI**

*LUISA RAPPA, Università di Palermo*  
*MARCELLO ARICI, Università di Palermo*  
*MARIO A. CHIORINO, Politecnico di Torino*

### **SUMMARY**

*In this paper themes about the theory of aging linear viscoelasticity are presented. In particular, in order to propose methods to estimate creep effects in concrete structures that are characterized by a complex sequence of construction, such as the construction of segmental bridges, an extension and adaptation of the 3<sup>th</sup> and 4<sup>th</sup> theorem of aging linear viscoelasticity are proposed. Moreover, a discussion about the influence of the application of one or multiple additional internal or external restraints and the removal of provisional ones is reported.*

### **1. EFFETTI STATICI E DEFORMATIVI SULLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO IN REGIME ELASTO-VISCOSO**

Gli effetti della viscosità del calcestruzzo possono mutare in modo significativo il quadro sollecitativo e deformativo di una struttura soggetta a carichi permanenti nel tempo.

Di tali effetti i principali sono:

- incremento delle deformazioni indotte dai carichi permanenti applicati;
- rilassamento delle tensioni dovute a deformazioni permanenti applicate (sia naturali che artificiali);
- nel caso di variazione dello schema statico dovuta all'aggiunta di vincoli, una redistribuzione delle tensioni dovute a carichi permanenti. In tal caso infatti i vincoli posticipati, aggiunti in fasi successive rispetto all'applicazione dei carichi, limitano le deformazioni elasto-viscose che continuerebbero a manifestarsi se essi non venissero inseriti nella struttura, sicché il quadro tensionale tende teoricamente a quello che la struttura avrebbe avuto se tutti i vincoli fossero stati pre-esistenti all'applicazione dei carichi.

Gli effetti della viscosità, assieme a quelli prodotti dal ritiro, influenzano principalmente la durabilità a lungo termine delle strutture e il rispetto dello stato limite di servizio. In particolare è necessario porre attenzione allo stato limite di deformazione, quando la viscosità del calcestruzzo ha principalmente un effetto di incremento delle deformazioni nel tempo, e allo stato limite di fessurazione, quando è la variazione del quadro tensionale ad essere maggiormente influenzata [06, 12].

La funzione di viscosità  $J(t, t_0)$  descrive l'evoluzione delle deformazioni dovute all'applicazione di una tensione unitaria al tempo  $t_0$  su una struttura in calcestruzzo. Se le tensioni applicate variano nel tempo, essendo valido il *principio di sovrapposizione degli effetti* (matematicamente formulato da Boltzmann per materiali non invecchianti nel 1876 e da Volterra per materiali invecchianti nel 1909-1913, applicato da McHenry nel 1943, [07]), la variazione delle deformazioni, ovvero delle tensioni, è descritta dall'equazione di Volterra, che somma nel tempo le risposte elasto-viscose di tutti gli incrementi di tensione applicati per tempi successivi a  $t_0$ .

La funzione di viscosità  $J(t, t_0)$  si ottiene dall'elaborazione statistica di dati sperimentali su provini di calcestruzzo; diversi sono i modelli di viscosità proposti negli ultimi decenni, fra cui il modello CEB 90 [05], introdotto nel CEB Model Code 1990 e nell'Eurocodice 2 [12], il modello B3 proposto da Bazant [04], il modello GL2000, proposto da Gardner [13] e il modello ACI 209 [01].

Indipendentemente dal modello di viscosità, quattro teoremi riassumono le proprietà viscose del calcestruzzo: il primo e il secondo teorema della teoria visco-elastica lineare formulano in maniera esatta gli effetti della viscosità sulle strutture indotti rispettivamente dall'applicazione di carichi e deformazioni; il terzo e il quarto teorema (o *Teorema del parziale riacquisto dello schema statico modificato*) risolvono il problema dell'aggiunta di uno o più vincoli posticipati rispetto all'applicazione dei carichi sulla struttura, rispettivamente nel caso di variazione dello schema statico in un unico tempo o in tempi differenti [06, 10].

Per il primo teorema l'applicazione di azioni statiche costanti o variabili nel tempo produce l'insorgere di deformazioni variabili nel tempo per effetto della viscosità. Per il secondo teorema l'applicazione di deformazioni costanti o variabili nel tempo produce lo sviluppo di tensioni variabili nel tempo per effetto della viscosità. Se le azioni impresse sono variabili nel

tempo, deformazioni e tensioni seguono rispettivamente l'espressione matematica dell'equazione integrale di Volterra.

Il terzo e il quarto teorema restituiscono la espressione esatta della legge di variazione dello stato di sollecitazione conseguente a una variazione singola o multipla nel tempo di schema statico. La soluzione è una combinazione lineare data dalla somma delle tensioni elastiche valutate nello schema statico di partenza e dalle differenze fra le tensioni elastiche valutate fra ogni successivo schema e il precedente, immaginando di aggiungere i vincoli prima dei carichi. I coefficienti di questa combinazione sono rappresentati dalla funzione di ridistribuzione nel tempo  $\xi(t, t_0, t_i)$  che esprime la percentuale di recupero dello schema statico modificato, essendo  $t_0$  il tempo di applicazione dei carichi e  $t_i$  il tempo di applicazione dell' $i$ -esimo gruppo di vincoli posticipati. Tale funzione assume valori compresi fra  $\xi=0$  in relazione alla condizione di recupero nullo,  $\xi=1$  per esprimere invece la condizione di recupero totale [06, 10].

Condizione necessaria perché i quattro teoremi, nella loro formulazione classica, conducano a soluzioni esatte dei problemi mostrati è che la struttura in esame sia viscosamente omogenea e a vincoli rigidi.

Il caso di vincoli elastici è stato trattato da Mola ed altri [08, 15]. Un'applicazione di particolare interesse riguarda i ponti strallati con impalcato in calcestruzzo e impalcato misti [08, 14].

## **2. L'INCIDENZA DEL FENOMENO DELLA VISCOSITÀ NELLE STRUTTURE COMPLESSE**

I teoremi della viscosità lineare, nella loro forma classica, non risolvono quindi problemi inerenti la valutazione degli effetti della viscosità in strutture non omogenee, circoscrivendo fortemente il loro campo di applicazione ad una limitata casistica di strutture. Infatti gran parte delle costruzioni moderne sono difficilmente assimilabili a strutture viscosamente omogenee.

D'altro canto, l'incidenza del fenomeno della viscosità diventa piuttosto significativo per strutture la cui configurazione finale è il risultato di una complessa storia di getti e di assemblaggi, nonché di una articolata storia di applicazione di azioni e di condizioni di vincolo nel tempo, come anche per strutture caratterizzate da significative eterogeneità.

Ci si riferisce in particolare ad opere edilizie realizzate con i moderni metodi costruttivi per strutture in calcestruzzo precompresso e per ponti. Ne sono un esempio costruzioni a mensole bilanciate, realizzate tramite l'assemblaggio successivo di elementi prefabbricati o gettati in opera, a formare due stampelle successivamente solidarizzate con il getto del concio di sutura in mezzera, o ponti costruiti con travi prefabbricate rese continue in opera con getti di sutura. Anche le costruzioni miste acciaio-calcestruzzo, tra cui i ponti strallati, risentono degli effetti della viscosità del calcestruzzo, soprattutto per la ridistribuzione degli sforzi fra gli elementi strutturali in acciaio e in calcestruzzo.

In particolare, nelle strutture non omogenee, dove l'eterogeneità è dovuta alla presenza di materiali diversi, come acciaio e calcestruzzo, o all'associazione di parti di calcestruzzo che hanno differenti proprietà (differenza fra le età di getto e di maturazione delle varie parti, diversa composizione, ecc), le ridistribuzioni delle tensioni dovute alla viscosità possono creare situazioni critiche in relazione ai livelli di tensione raggiunti nell'acciaio e alla fessurazione del calcestruzzo. Ciò è dovuto alla migrazione delle sollecitazioni da parti della struttura più giovani e di conseguenza più viscosi a parti più vecchie e meno viscosi o, nel caso di strutture miste, dal calcestruzzo all'acciaio.

Generalmente accade che le tipologie strutturali caratterizzate da complesse modalità di costruzione sono allo stesso tempo strutture che presentano spiccate caratteristiche di non omogeneità nel senso appena detto.

La concomitanza di entrambi questi fattori amplifica gli effetti dovuti al comportamento viscoso del calcestruzzo e ne rende quindi necessaria un'attenta valutazione.

## **3. ESTENSIONE E ADATTAMENTO DEL TERZO E QUARTO TEOREMA DELLA VISCOSITÀ LINEARE**

In riferimento a una struttura da ponte formata da due stampelle realizzate con l'assemblaggio successivo di conci a sbalzo e loro successiva solidarizzazione, si propone un'estensione e un adattamento del terzo teorema della viscosità lineare a una struttura eterogenea [16]. L'adattamento del quarto teorema consiste in una estensione di quanto si propone per il terzo teorema.

### **3.1. LA STRUTTURA OGGETTO DI STUDIO**

La struttura studiata è un ponte in calcestruzzo armato precompresso, costituito da due

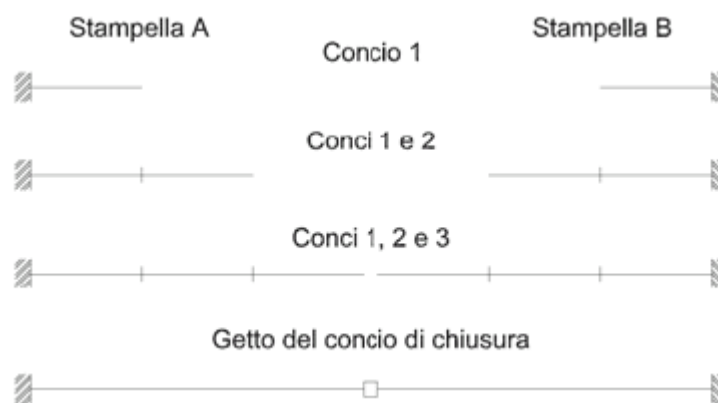
mensole simmetriche sia dal punto di vista geometrico che di carico applicato, a formare le due stampelle del ponte. Ogni stampella viene realizzata con l'assemblaggio successivo di conci; quando entrambe le mensole sono realizzate, esse vengono solidarizzate con il getto del concio di sutura in mezzeria. Si ottiene infine un impalcato formato da una trave a cassone, realizzata con l'assemblaggio di conci. Prima della chiusura in mezzeria, contemporaneamente alla messa in opera di ciascun concio, vengono inseriti dei cavi per la precompressione superiore, necessaria a bilanciare gli effetti deformativi e le sollecitazioni dovute al peso proprio; dopo la chiusura viene aggiunta la precompressione inferiore per ridurre le tensioni di trazione che nascono nella parte inferiore dell'impalcato per effetto della ridistribuzione delle sollecitazioni e dei carichi che si applicano dopo la chiusura.

In questa breve descrizione delle fasi di costruzione vanno evidenziati alcuni importanti elementi da tenere presenti per la valutazione degli effetti viscosi sulla struttura, di seguito enumerati.

1. Eterogeneità della struttura per effetto dei diversi tempi di getto dei vari conci, nonché della possibile differenza dei tempi di maturazione fra un concio e un altro.
2. Le due stampelle possono essere realizzate contemporaneamente oppure in tempi fra di loro successivi. Quest'ultimo caso è il più realistico nella pratica cantieristica, nella prospettiva di usare la stessa attrezzatura per realizzare sia l'una che l'altra stampella. La dissimmetria nei tempi di realizzazione delle due mensole inserisce una nuova fonte di disomogeneità per la struttura, anche questa da tenere in conto.
3. Aggiunta di un vincolo posticipato rispetto all'applicazione dei carichi (peso proprio e precompressione superiore), in conseguenza del quale lo schema statico evolve progressivamente da una struttura a mensola a una struttura a trave incastrata-incastrata.

Queste eterogeneità sono ancor più preponderanti nel calcolo strutturale se i conci non sono prefabbricati ma vengono gettati in opera, perché viene meno la possibilità di farli maturare per un periodo di tempo congruo perché si possa esaurire gran parte del fenomeno della viscosità. Viceversa, nel caso di conci prefabbricati, si possono ottenere dei tempi di maturazione maggiori, riducendo in tal modo la risposta viscosa. A parità di differenza di età alla messa in carico, si riduce anche la differenza di risposta viscosa. Inoltre si riesce a ridurre anche le differenze di età alla messa in carico perché si accelerano le operazioni di montaggio e/o si possono effettuare delle programmazioni intelligenti fra tempi di produzione dei conci e tempi di montaggio che possono contribuire a ridurre tali differenze di età.

Nella fig. 1 si mostrano le varie fasi di realizzazione dell'opera, esemplificando il caso studiato con l'assemblaggio di un totale di 6 conci, 3 per ogni stampella.



**Figura 1.** Fasi di realizzazione del ponte

### 3.2. IPOTESI DI LAVORO

Le ipotesi di lavoro scelte sono di seguito riportate.

1. Validità del legame costitutivo elasto-viscoso lineare.
2. Validità del principio di sovrapposizione degli effetti.
3. Trascurabilità della disomogeneità di sezione e longitudinale per la presenza di armatura lenta e di precompressione.
4. Struttura reologicamente non omogenea per effetto di:
  - getto non contemporaneo dei conci;

- possibilità che, generalmente, i tempi di maturazione di ciascun concio rispetto ad ogni altro siano diversi;
- realizzazione per fasi successive del ponte.

In virtù di ciò ogni concio è caratterizzato da un comportamento viscoso diverso da qualsiasi altro.

5. Qualsiasi tipo di spostamento viene valutato come somma di tanti contributi allo spostamento quante sono le parti omogenee della struttura; ciascuno di essi viene calcolato applicando il carico solo sulla parte in esame della struttura e considerando tutti gli altri conci rigidi.

In questo modo, il generico spostamento di una sezione qualsiasi della struttura nel tempo sarà dato dalla somma di tanti spostamenti elasto-viscosi quante sono le parti singolarmente omogenee della struttura, ognuno di questi valutato secondo la funzione J relativa alla parte considerata.

### 3.3. I QUATTRO CASI STUDIATI

Separando l'eterogeneità fra i conci e l'eterogeneità fra le due stampelle, si analizzano i seguenti casi.

#### 1. Stampelle mutuamente e intrinsecamente omogenee.

Stampelle realizzate contemporaneamente, ognuna delle quali formata da un solo concio, cioè si trascurano entrambe le fonti di disomogeneità.

#### 2. Stampelle mutuamente eterogenee e intrinsecamente omogenee.

Stampelle realizzate non contemporaneamente, ognuna delle quali formata da un solo concio, trascurando in questo modo l'eterogeneità dovuta all'assemblaggio di conci con tempi di getto e di maturazione diversi tra loro.

#### 3. Stampelle mutuamente omogenee e intrinsecamente eterogenee.

Stampelle realizzate contemporaneamente, tenendo in conto solo la disomogeneità dovuta all'assemblaggio di conci con caratteristiche viscosive differenti.

#### 4. Stampelle mutuamente e intrinsecamente eterogenee.

Stampelle realizzate non contemporaneamente, tenendo in conto in questo caso anche la disomogeneità dovuta all'assemblaggio di conci con caratteristiche viscosive differenti.

#### 3.3.1. Stampelle mutuamente e intrinsecamente omogenee

Questo è il caso di struttura perfettamente omogenea, la cui soluzione si ottiene direttamente dalla scrittura del terzo teorema della teoria elasto-viscosa lineare nella sua forma classica [06, 10]. Nel caso in esame il vincolo posticipato impedisce l'incremento di rotazione relativa fra le estremità delle due stampelle, reagendo con una coppia  $C(t)$  variabile nel tempo, responsabile della redistribuzione delle tensioni, ovvero delle sollecitazioni, sulla struttura. Nella fig. 2 la parte a) mostra l'andamento delle deformazioni senza l'aggiunta del vincolo, la parte b) con l'aggiunta del vincolo posticipato.

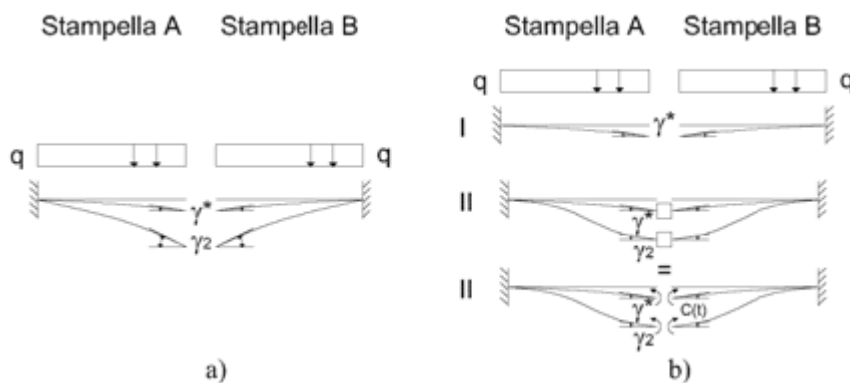


Figura 2. L'effetto della coppia  $C(t)$  - Struttura viscosamente simmetrica

L'equazione di congruenza che risolve il problema è la seguente:

$$\gamma_0(t) - \gamma_0(t^*) = E_{28} \gamma_1 \int_{t^*}^t J(t, \tau) dC(\tau) \quad (1)$$

Il primo membro dell'equazione rappresenta l'incremento di rotazione relativa a partire dal tempo  $t^*$  in cui viene variato lo schema statico ed è uguale a:

$$\gamma_0(t) - \gamma_0(t^*) = E_{28} \gamma_0 [J(t, t_0) - J(t^*, t_0)] \quad (2)$$

essendo  $E_{28}$  il modulo elastico di riferimento,  $\gamma_0$  la rotazione elastica di estremità della stampella per effetto dei carichi ivi applicati al tempo  $t_0$ ,  $J(t, t_0)$  la funzione di viscosità.

Il secondo membro dell'equazione (1) rappresenta invece la rotazione elasto-viscosa che va sviluppandosi nella sezione dove viene aggiunto il vincolo per effetto della nascente coppia  $C(t)$ , dove  $\gamma_1$  rappresenta la rotazione elastica di estremità della stampella per effetto di una coppia unitaria. La coppia  $C(t)$  può essere scritta tramite la seguente posizione:

$$C(t) = (C_{el}'' - C_{el}') \xi(t, t_0, t^*) \quad (3)$$

dove  $C_{el}'$  è il valore della coppia nello schema iniziale (nel caso della costruzione a mensola esso è nullo),  $C_{el}''$  è il valore della coppia nello schema elastico finale,  $\xi$  è la funzione di ridistribuzione valutata al generico tempo  $t > t^*$ .

Introducendo la posizione (3) nell'equazione di congruenza (1) si ottiene la seguente forma integrale:

$$J(t, t_0) - J(t^*, t_0) = \int_{t^*}^t J(t, \tau) d\xi(\tau, t_0, t^*) \quad (1')$$

la cui integrazione numerica [17] conduce alla determinazione della funzione di distribuzione  $\xi(t, t_0, t^*)$  [06].

Per effetto della ridistribuzione, la generica caratteristica di sollecitazione assume la seguente espressione, per tempi maggiori di  $t^*$ :

$$S(t) = S_{el}' + (S_{el}'' - S_{el}') \xi(t, t_0, t^*) \quad (4)$$

### 3.3.2. Stampelle mutuamente eterogenee e intrinsecamente omogenee

La struttura non è più omogenea; infatti, a causa della realizzazione non contemporanea delle due stampelle, insorge un differenziale di invecchiamento fra le due mensole generando, al momento della solidarizzazione, una condizione di dissimmetria per la struttura relativamente alle caratteristiche viscose delle due parti [02].

Le due stampelle, gettate in due tempi diversi  $t_{gA}$  e  $t_{gB}$  a partire dall'origine dell'asse dei tempi cui ci si riferisce, caricate in due tempi diversi  $t_{0A}$  e  $t_{0B}$  con conseguenti periodi di maturazione  $\Delta t_A = t_{0A} - t_{gA}$  e  $\Delta t_B = t_{0B} - t_{gB}$  diversi, vengono infine solidarizzate al tempo  $t^*$ . Oltre alla coppia nasce un taglio che impedisce l'incremento di spostamento relativo fra le estremità delle due stampelle. Nelle fig. 3 e fig. 4 le parti a) mostrano l'andamento delle deformazioni senza l'aggiunta del vincolo, le parti b) con l'aggiunta del vincolo posticipato. Si risolve il problema con un metodo approssimato e con un metodo generale.

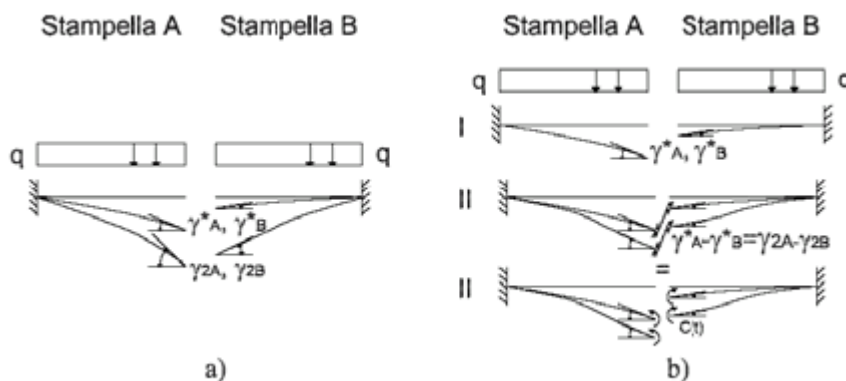


Figura 3. L'effetto della coppia  $C(t)$  - Struttura viscosamente dissimmetrica

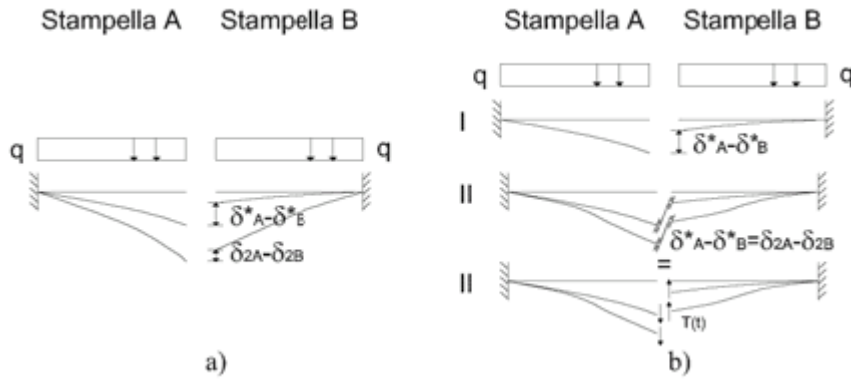


Figura 4. L'effetto del taglio  $T(t)$  - Struttura viscosamente dissimetrica

**Metodo approssimato**

Il metodo approssimato è una estensione di quello presentato da Chiorino, Dezi e Tarantino [09], per il caso di travi prima semplicemente appoggiate e successivamente rese continue, al caso dello schema costruttivo a mensola.

La fig. 5 mostra l'effetto dell'aggiunta del vincolo posticipato costituito dal concio di sutura. Essa mostra inoltre una sua interpretazione di seguito esposta.

Al tempo di chiusura si può pensare di introdurre sulla struttura, nella sezione ove viene aggiunto il concio di sutura, un incastro perfetto quale vincolo ausiliario posticipato che genera l'insorgere delle seguenti reazioni: coppie  $C_{Av}(t)$  e  $C_{Bv}(t)$  e forze  $T_{Av}(t)$  e  $T_{Bv}(t)$ , impedendo in questo modo le rotazioni e gli spostamenti verticali. Tuttavia questo non esaurisce il problema, perchè all'introduzione del vincolo ausiliario, funzionale a cogliere la coppia e la forza associati al vincolo posticipato, che ha reso indipendenti le due campate, deve seguire la rimozione del vincolo ausiliario. Ciò equivale all'applicazione sulla struttura finale della coppia e della forza eguali e opposti a quelli introdotti con il vincolo ausiliario. La coppia da applicare è data quindi dalla differenza fra  $C_{Av}(t)$  e  $C_{Bv}(t)$ , la forza complessiva invece dalla somma fra  $T_{Av}(t)$  e  $T_{Bv}(t)$ , dove in queste espressioni coppie e forze vanno intese con il loro segno.

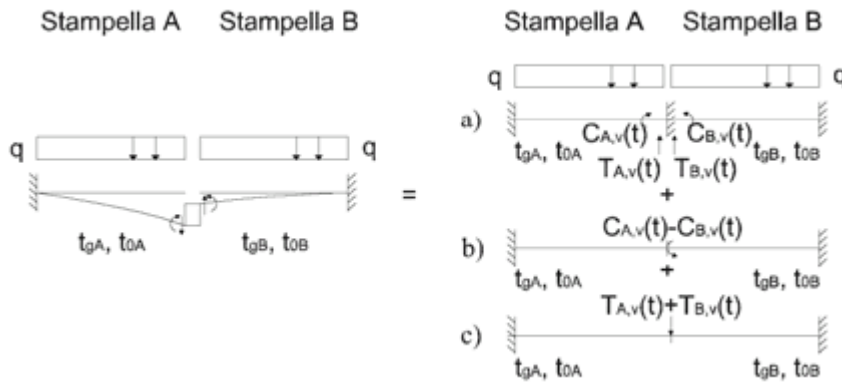


Figura 5. La struttura reale

Poiché, come si è detto, l'incastro perfetto rende indipendenti le due campate, lo schema a) di fig. 5 è uno schema che non risente dell'eterogeneità fra le due stampelle, mentre gli schemi b) e c) sono schemi con caratteristiche viscosi eterogenee.

A questo punto si introduce la seguente approssimazione: la coppia  $C_{Av}(t)$  e la forza  $T_{Av}(t)$  vengono applicati sulla struttura considerata per intero omogenea alla stampella A e analoga cosa per la coppia  $C_{Bv}(t)$  e la forza  $T_{Bv}(t)$  della stampella B, applicate cioè sulla struttura considerata per intero omogenea alla stampella B, e non sulla struttura reale che consta di due parti eterogenee tra di loro.

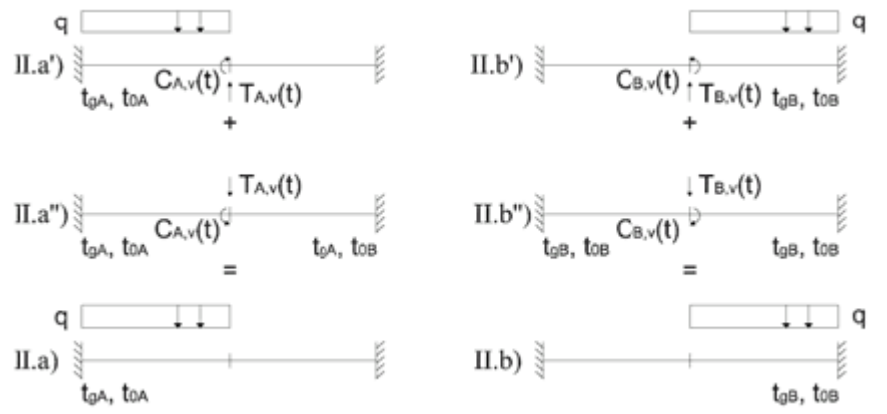


Figura 6. Approssimazione della struttura reale

Con questa approssimazione, ricombinando le azioni, risolvere la struttura in esame significa valutare le sollecitazioni sulla somma dei due schemi II.a) e II.b), come si evince dalla fig. 6, la quale rappresenta l'approssimazione dello schema reale di fig. 5. Ognuno di questi schemi, entrambi elastici, viscosamente omogenei e con vincolo posticipato, è la somma rispettivamente dei sottoschemi a'), a'') e b'), b'').

Il momento e il taglio nella sezione di mezzeria, dopo l'introduzione del vincolo posticipato assumono le seguenti espressioni:

$$M(t) = M''_{A,el} \xi(t-t_{gA}, \Delta t_A, t^*-t_{gA}) + M''_{B,el} \xi(t-t_{gB}, \Delta t_B, t^*-t_{gB}) \quad (5)$$

$$T(t) = T''_{A,el} \xi(t-t_{gA}, \Delta t_A, t^*-t_{gA}) + T''_{B,el} \xi(t-t_{gB}, \Delta t_B, t^*-t_{gB}) \quad (6)$$

essendo  $M''_{A,el}$  e  $T''_{A,el}$  le sollecitazioni in mezzeria dello schema elastico II.a),  $M''_{B,el}$  e  $T''_{B,el}$  le sollecitazioni in mezzeria dello schema elastico II.b) dove, per la simmetria della struttura,  $M''_{A,el} = M''_{B,el}$  e  $T''_{A,el} = -T''_{B,el}$ .

In una generica sezione, le sollecitazioni nel tempo, per effetto del carico applicato sullo schema II.a) (schema di sinistra della fig. 6), assumono infine la seguente espressione:

$$S_A(t) = S'_{A,el} + (S''_{A,el} - S'_{A,el})\xi(t-t_{gA}, \Delta t_A, t - t_{gA}) \quad (7)$$

Analogamente, per lo schema II.b) (schema di destra della fig.6):

$$S_B(t) = S'_{B,el} + (S''_{B,el} - S'_{B,el})\xi(t-t_{gB}, \Delta t_B, t - t_{gB}) \quad (8)$$

Il significato dei simboli usati si evince dalla fig. 7. Le sollecitazioni finali nella sezione considerata vanno valutate sommando nel tempo le  $S_A(t)$  con le  $S_B(t)$ .

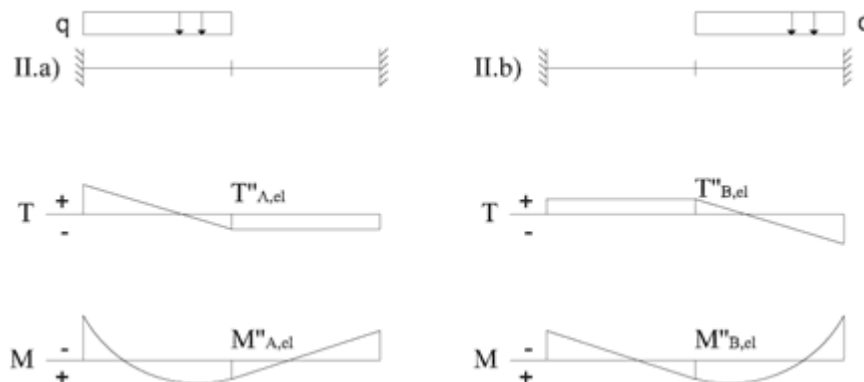


Figura 7. Le sollecitazioni

### Metodo generale

Il metodo è una estensione di quello esposto da Dezi, Menditto e Tarantino in [11], per il caso di travi prima semplicemente appoggiate e successivamente rese continue, al caso dello schema costruttivo a mensola. Esso si basa sulla scrittura dell'equazione di congruenza, come per il caso perfettamente omogeneo (vedi eq. (1)). La struttura è unica ma le equazioni sono due, una in termini di rotazione e l'altra in termini di abbassamento dell'estremità della stampella. La struttura generale, essendo "a" la generica deformazione (rotazione o

spostamento verticale), è la seguente:

$$\begin{aligned}
 & E_{28} a_{0A}^q [J(t - t_{gA}, \Delta t_A) - J(t^* - t_{gA}, \Delta t_A)] + \\
 & - E_{28} a_{0B}^q [J(t - t_{gB}, \Delta t_B) - J(t^* - t_{gB}, \Delta t_B)] = \\
 & = E_{28} \left[ a_{1A}^C \int_t^t J(t - t_{gA}, \tau - t_{gA}) dC(\tau) + \right. \\
 & \left. + a_{1A}^T \int_t^t J(t - t_{gA}, \tau - t_{gA}) dT(\tau) \right] + \\
 & - E_{28} \left[ a_{1B}^C \int_t^t J(t - t_{gB}, \tau - t_{gB}) dC(\tau) + \right. \\
 & \left. + a_{1B}^T \int_t^t J(t - t_{gB}, \tau - t_{gB}) dT(\tau) \right]
 \end{aligned} \quad (9)$$

Il significato dei simboli usati è il seguente:  $a_{0A}^q$  e  $a_{0B}^q$  rappresentano rispettivamente la generica deformazione dell'estremità della stampella A e B per effetto dei carichi esterni applicati  $q$ ;  $a_{1A}^C$  e  $a_{1A}^T$  rappresentano rispettivamente il contributo alla generica deformazione dell'estremità della stampella A per effetto di una coppia unitaria e di una forza unitaria ivi applicati;  $a_{1B}^C$  e  $a_{1B}^T$  rivestono significato analogo ai due precedenti simboli in riferimento alla stampella B;  $E_{28}$  è il modulo elastico di riferimento; le due funzioni  $J$  sono le funzioni di viscosità della stampella A e B;  $C(t)$  e  $T(t)$  rappresentano la coppia e la forza che nascono nella struttura in seguito all'introduzione del concio di sutura in mezzeria. Esse corrispondono al momento flettente e al taglio che nascono in mezzeria dopo l'applicazione del vincolo posticipato.

Senza introdurre alcuna fonte di approssimazione, le equazioni di cui si è mostrata la struttura generale che insieme formano un sistema di due equazioni in due incognite, possono risolversi solo con l'uso di una soluzione numerica step-by-step, poichè non è possibile esplicitarne l'espressione della generica incognita iperstatica  $X(t)$ , coppia o forza.

Le sollecitazioni infine saranno date dalla somma delle sollecitazioni nello schema iniziale e quelle nello schema finale dove agiscono le iperstatiche  $C(t)$  e  $T(t)$  dedotte dalla soluzione del sistema presentato.

### 3.3.3. Stampelle mutuamente omogenee e intrinsecamente eterogenee

Si tiene in considerazione la sola eterogeneità intrinseca, quindi in questo caso le due stampelle sono costruite contemporaneamente. La fig. 8 mostra la tempistica di riferimento. L'equazione di congruenza è una sola, poichè unica è l'incognita iperstatica, ovvero la coppia. Essa si scrive nel seguente modo:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^n E_{28} \gamma_{(i)0} [J(t - t_{g,i}, \Delta t_i) - J(t^* - t_{g,i}, \Delta t_i)] = \\
 & = \sum_{i=1}^n E_{28} \gamma_{(i)1} \int_t^t J(t - t_{g,i}, \tau - t_{g,i}) dC(\tau)
 \end{aligned} \quad (10)$$

risolvibile solo con una procedura numerica step-by-step.

In generale, come nei casi precedenti, le sollecitazioni finali saranno date dalla somma delle sollecitazioni nello schema iniziale e quelle nello schema dove agisce la coppia  $C(t)$  dedotta dalla soluzione dell'equazione (10).

Solo quando si assuma che i tempi di getto dei conci siano tutti uguali tra di loro, si può evitare la procedura numerica più complessa step-by-step considerando la sovrapposizione di  $n$  soluzioni elastiche. Per fare ciò occorre utilizzare le  $n$  funzioni di ridistribuzione  $\xi(t, \Delta t_i, t^*)$  [11]. Esse possono essere ottenute dall'integrazione numerica di  $n$  equazioni di Volterra scritte nella forma classica (1') per ogni schema elastico in cui è deformabile e caricato il solo concio  $i$ -esimo mentre tutti gli altri conci sono considerati rigidi. Si ottiene in questo modo che l'espressione del momento flettente in mezzeria vale in questo caso:

$$M(t) = \sum_{i=1}^n M_{i,el}^0 \xi(t, \Delta t_i, t^*) \quad (11)$$

In questo caso le sollecitazioni nel tempo, in una sezione generica, assumono la seguente espressione:



$$S(t) = S_{el}^I + \sum_{i=1}^n (S_{i,el}^{II} - S_{i,el}^I) \xi_i(t, \Delta t_i, t^*) \quad (12)$$

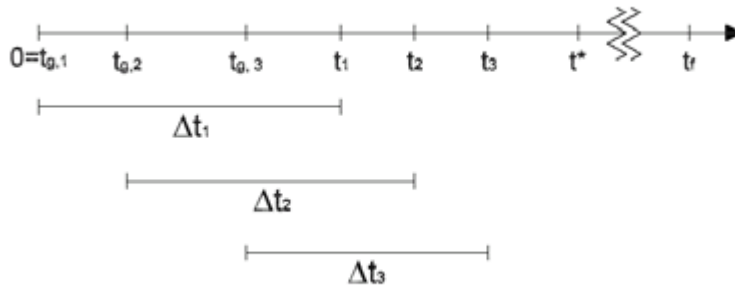


Figura 8. Asse dei tempi

### 3.3.4. Stampelle mutuamente e intrinsecamente eterogenee

Fra le combinazioni studiate questo è il caso che tiene conto di entrambi i fattori di eterogeneità, ovvero eterogeneità fra i conchi di ogni stampella e fra le due stampelle nel loro insieme a causa della realizzazione non contemporanea. La fig. 9 mostra la tempistica di riferimento.

Il metodo proposto per la soluzione del problema è di tipo generale, con la scrittura delle due equazioni di congruenza; la struttura generale è la seguente:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n E_{28} a_{(i)0A}^q [J(t - t_{g,iA}, \Delta t_{iA}) - J(t^* - t_{g,iA}, \Delta t_{iA})] + \\ & - \sum_{i=1}^n E_{28} a_{(i)0B}^q [J(t - t_{g,iB}, \Delta t_{iB}) - J(t^* - t_{g,iB}, \Delta t_{iB})] = \\ & = \sum_{i=1}^n E_{28} \left[ a_{(i)1A}^C \int_{t^*}^t J(t - t_{g,iA}, \tau - t_{g,iA}) dC(\tau) + \right. \\ & \left. + a_{(i)1A}^T \int_{t^*}^t J(t - t_{g,iA}, \tau - t_{g,iA}) dT(\tau) \right] + \\ & - \sum_{i=1}^n E_{28} \left[ a_{(i)1B}^C \int_{t^*}^t J(t - t_{g,iB}, \tau - t_{g,iB}) dC(\tau) + \right. \\ & \left. + a_{(i)1B}^T \int_{t^*}^t J(t - t_{g,iB}, \tau - t_{g,iB}) dT(\tau) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Il significato dei simboli usati è analogo al precedente; tuttavia ognuna delle componenti della generica deformazione è somma di tante aliquote quanti sono i conchi di cui si compone una stampella, singolarmente caricati ed essi soltanto deformabili (in generale n per ognuna di esse, e quindi 2n per l'intera struttura).

Anche in questo caso le equazioni di congruenza possono risolversi solo con una soluzione numerica step-by-step.

Le sollecitazioni infine saranno date dalla somma delle sollecitazioni nello schema iniziale e quelle nello schema finale dove agiscono le iperstatiche C(t) e T(t) dedotte dalla soluzione del sistema presentato.

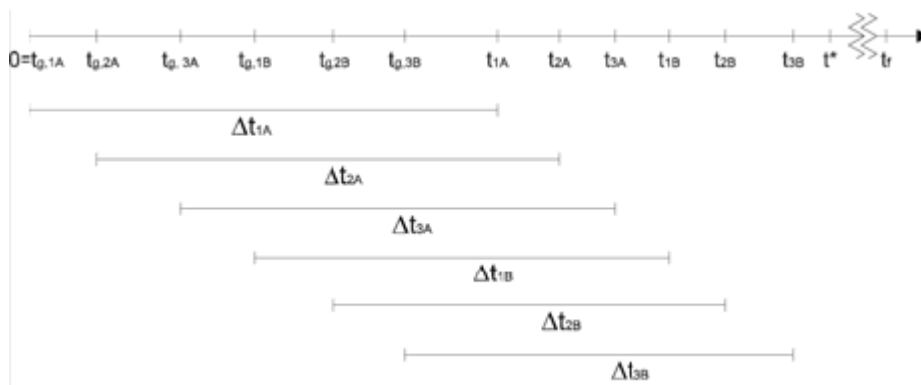


Figura 9. Asse dei tempi

#### 4. EFFETTO MUTUO TRA L'AGGIUNTA DI VINCOLI POSTICIPATI E LA RIMOZIONE DI VINCOLI PROVVISORI

In una complessa sequenza di costruzione di un'opera accade molto spesso che, oltre ad essere aggiunti dei vincoli posticipatamente rispetto all'applicazione di taluni carichi sulla struttura, ne vengano rimossi di provvisori, cioè vincoli che sono stati introdotti sulla struttura solo per un periodo di tempo limitato ad una particolare fase di realizzazione dell'opera e che non rimarranno ad opera ultimata. Molti sono gli esempi: ponte a telaio con pila inclinata temporaneamente sorretta da una pila verticale provvisoria, centine e puntelli nei ponti ad arco, ecc. Si propone di seguito un'analisi degli effetti dell'aggiunta e della rimozione di vincoli su una struttura e come questi due elementi si influenzano vicendevolmente [16]. In particolare si perviene a delle generalizzazioni del *Teorema del parziale riacquisto dello schema statico modificato*, aggiungendo i due seguenti elementi nella valutazione degli effetti prodotti su una struttura dall'introduzione posticipata di vincoli.

##### 1. Generalizzazione dei carichi applicati.

Fin ora si è parlato di strutture a vincoli posticipati soggette solamente all'applicazione di azioni statiche permanenti; si definiscono gli effetti dell'aggiunta di vincoli posticipati se sulla struttura sono applicate precedentemente anche delle distorsioni.

##### 2. Rimozione di un vincolo provvisorio ad un tempo precedente o successivo all'applicazione dei vincoli posticipati.

Si valuta l'effetto della rimozione di un vincolo provvisorio precedentemente o successivamente all'applicazione di vincoli posticipati sulla struttura purché chiaramente, nel caso di rimozione precedente all'aggiunta di un vincolo, si parta da una struttura iperstatica.

Per semplicità ci si riferisce all'applicazione di un solo *vincolo semplice posticipato* al tempo  $t_1$  ed alla rimozione di un solo *vincolo semplice provvisorio* al tempo  $t_R$ . Con l'analisi che segue si mostra che diverse combinazioni dei *fattori tipo di carico e tempi di applicazione dei vincoli posticipati e provvisori* creano le condizioni perché avvenga o meno la redistribuzione delle sollecitazioni in una struttura.

#### 4.1. RIMOZIONE DEL VINCOLO PROVVISORIO SUCCESSIVA ALL'AGGIUNTA DEL VINCOLO POSTICIPATO

Si analizza il caso di azioni statiche applicate (fig. 10) e quello di distorsioni impresse (fig. 13); per ognuno di questi casi si delinea il quadro sollecitativo e deformativo conseguente a una prima variazione di schema strutturale associata all'aggiunta di un vincolo posticipato e, una seconda variazione dovuta alla rimozione di un vincolo provvisorio al tempo  $t_R > t_1$ .

##### 4.1.1. Applicazione di sole azioni statiche sullo schema iniziale

Per il primo teorema della viscosità lineare, i carichi applicati producono sulla struttura deformazioni viscosi variabili nel tempo.

Il vincolo posticipato introdotto sulla struttura al tempo  $t_1$  impedisce l'incremento delle deformazioni viscosi variabili nel tempo che fino a quel momento erano invece possibili. Per cui il vincolo posticipato deve sviluppare delle reazioni anch'esse variabili.

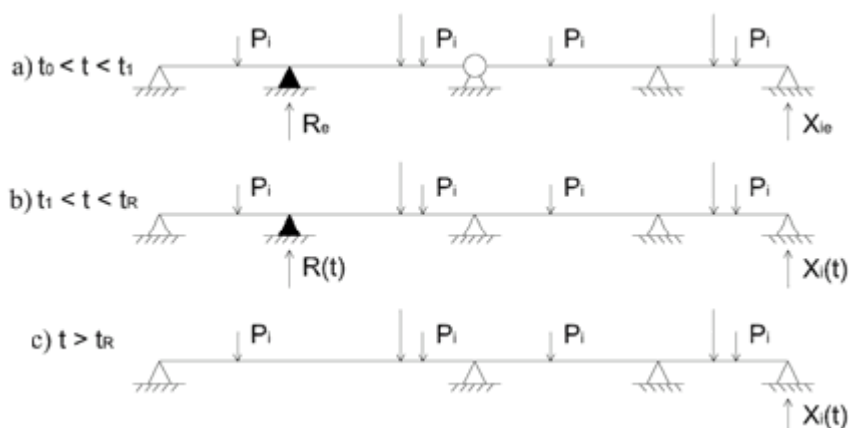


Figura 10. Caso I: applicazione di azioni statiche

La somma delle sollecitazioni associate allo schema statico iniziale per effetto dei carichi ivi applicati e delle sollecitazioni variabili nel tempo prodotte dal vincolo posticipato determinano il cosiddetto fenomeno della redistribuzione delle sollecitazioni.

Se ad un tempo  $t_R$  successivo a  $t_1$  viene rimosso un vincolo che era stato applicato sulla struttura solo provvisoriamente, perché venga mantenuto l'equilibrio nel tempo, la rimozione del vincolo equivale ad applicare sulla struttura una reazione pari a  $-R(t)$ , in ogni tempo eguale e opposta a quella che esso continuerebbe ad esplicare se non venisse rimosso. La variabilità nel tempo della reazione dipende dalla redistribuzione in atto nella struttura. La fig. 11 mostra l'andamento della reazione  $R(t)$ .

La generica sollecitazione  $S(t)$  assume la seguente espressione [03]:

$$\begin{aligned}
 S(t) &= S^I + (S^{II} - S^I)\xi(t, t_0, t_1)H(t - t_1) + \\
 &+ (S^{III} - S^{II})\frac{R^I + (R^{II} - R^I)\xi(t, t_0, t_1)}{R^{II}}H(t - t_R) = \\
 &= S^I + (S^{II} - S^I)\xi(t, t_0, t_1)H(t - t_1) + \\
 &+ (S^{III} - S^{II})\left[\frac{R^I}{R^{II}}(1 - \xi(t, t_0, t_1)) + \xi(t, t_0, t_1)\right]H(t - t_R)
 \end{aligned} \tag{14}$$

Il significato della simbologia usata è il seguente:  $S^I$ ,  $S^{II}$  e  $S^{III}$  rappresentano rispettivamente le sollecitazioni elastiche indotte dai carichi nello schema strutturale iniziale (I), nello schema modificato con l'aggiunta del vincolo posticipato (II) e nello schema ulteriormente modificato con la rimozione del vincolo provvisorio (III) (fig. 12).

Dividendo  $(S^{III} - S^{II})$  per  $R^{II}$  si ricavano le sollecitazioni che nascono sullo schema elastico con vincolo posticipato aggiunto e vincolo provvisorio rimosso quando agisce una forza unitaria verso il basso al posto del vincolo rimosso; trattandosi di viscosità lineare è lecito moltiplicare tale rapporto per il valore corretto di reazione, che è una funzione del tempo per effetto della redistribuzione in atto nella struttura, ottenendo quindi il valore esatto delle sollecitazioni cercate. In particolare tale reazione è la somma di una parte costante e una variabile nel tempo: la parte costante è il valore che la reazione assume al momento dell'applicazione sullo schema iniziale (I) dei carichi, ovvero  $R^I$ ; la parte variabile è quella che continuerebbe a svilupparsi per effetto della redistribuzione dal tempo  $t_R$  in avanti, variabile con la funzione di redistribuzione  $\xi(t, t_0, t_1)$ , ovvero  $(R^{II} - R^I)\xi(t, t_0, t_1)$ .

$H(t - t_1)$  e  $H(t - t_R)$  è la funzione di Heaviside, dove  $t_1$  rappresenta il tempo di aggiunta del vincolo posticipato e  $t_R$  il tempo di rimozione del vincolo provvisorio.

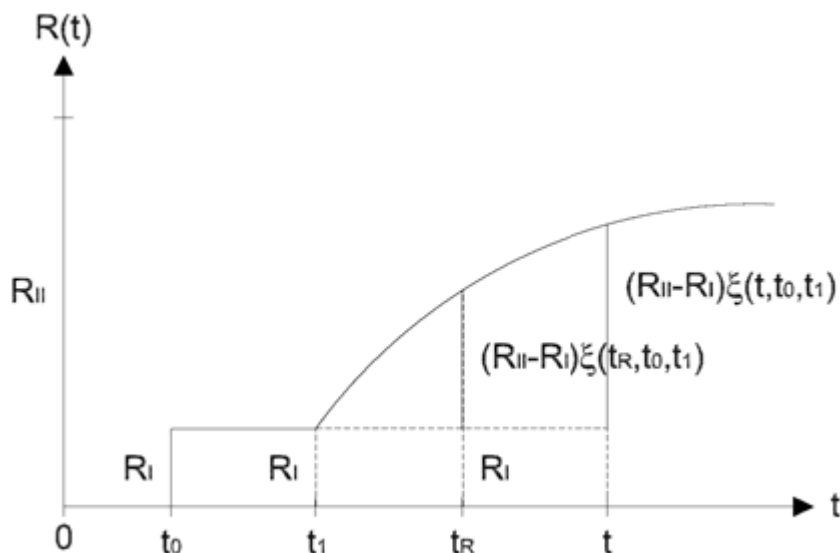


Figura 11. Andamento qualitativo della reazione  $R(t)$  nel tempo

Nel caso di schema iniziale isostatico la (14), attraverso opportuni passaggi, si può anche scrivere in una forma più esplicita dal punto di vista fisico-meccanico:

$$S(t) = S^I + (S^{II} - S^I)\xi(t, t_0, t_1)[H(t - t_1) - H(t - t_R)] + (S^{III} - S^I)H(t - t_R) \tag{14'}$$

La relazione (14') mostra che dopo aver applicato i carichi sullo schema isostatico I, non appena viene inserito un vincolo posticipato al tempo  $t_1 > t_0$ , inizia la classica redistribuzione delle sollecitazioni sullo schema irrigidito dalla presenza del nuovo vincolo, nella forma del

terzo teorema della viscosità lineare. Non appena al tempo  $t_R$  viene rimosso un qualunque vincolo interno od esterno che riporta la struttura ad essere isostatica, cessa il fenomeno della redistribuzione e le sollecitazioni passano istantaneamente a quelle elastiche ottenute applicando il carico sullo schema finale ( $S'''$ ). A partire dal tempo  $t_1$ , si ha quindi un transitorio nell'intervallo  $\Delta t_R = t_R - t_1$ , nel quale si ha una redistribuzione viscosa per poi passare istantaneamente (al tempo  $t_R$ ) alle sollecitazioni elastiche sullo schema III, che permangono nel tempo fino ad una eventuale e successiva variazione di schema statico. Questo comportamento può essere utilizzato favorevolmente dal progettista strutturale per modificare in fase di costruzione lo schema statico valutando correttamente e minimizzando gli effetti viscosi.

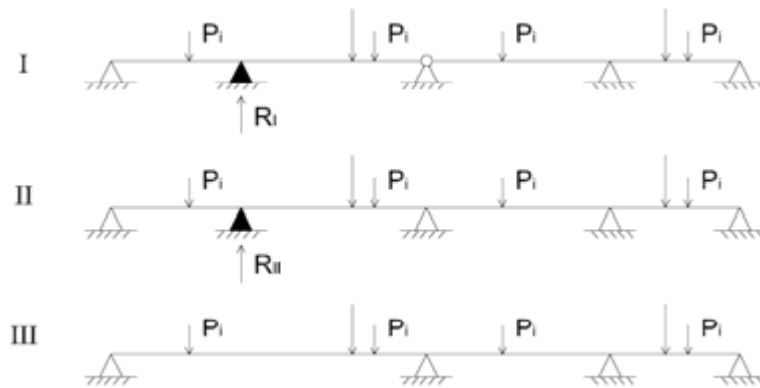


Figura 12. Schemi elastici di riferimento

#### 4.1.2. Applicazione di sole deformazioni impresse sullo schema iniziale

Per il secondo teorema della viscosità lineare le deformazioni applicate sulla struttura producono su di essa deformazioni costanti nel tempo, o meglio indipendenti dal fenomeno della viscosità e, sollecitazioni variabili nel tempo per effetto del rilassamento.

Il vincolo posticipato introdotto sulla struttura al tempo  $t_1$  nel rispetto della congruenza dello schema statico iniziale, contrariamente al caso precedente, si troverebbe a contrastare delle deformazioni che non variano nel tempo, e quindi rimane inattivo come al tempo in cui esso viene applicato. Conseguentemente non v'è alcun motivo per cui si possa parlare di redistribuzione delle sollecitazioni.

Se ad un tempo  $t_R$  successivo a  $t_1$  viene rimosso un vincolo che era stato applicato sulla struttura solo provvisoriamente, la rimozione del vincolo equivale ad applicare una reazione variabile nel tempo pari a  $-R(t)$ , in ogni tempo eguale e opposta a quella che esso continuerebbe ad esplicare se non venisse rimosso. In questo caso la variabilità nel tempo della reazione dipende dal rilassamento in atto nella struttura per effetto dell'applicazione di distorsioni su di essa, non per effetto della redistribuzione perché, come detto, il vincolo posticipato non funziona.

A partire dall'istante della rimozione del vincolo provvisorio, il vincolo posticipato comincia ad agire, ma ciò non dà luogo a redistribuzione perché esso è pre-esistente all'applicazione della reazione  $-R(t)$  che lo attiva.

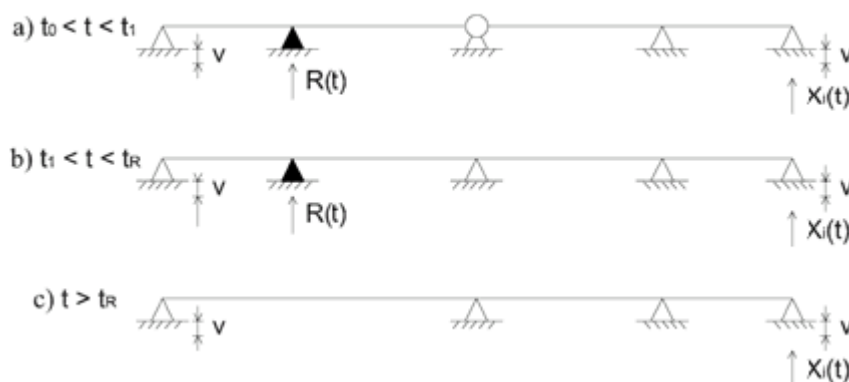


Figura 13. Caso II: applicazione di deformazioni impresse

#### 4.2. RIMOZIONE DEL VINCOLO PROVVISORIO PRECEDENTE ALL'AGGIUNTA DEL VINCOLO POSTICIPATO

Si analizza il caso di azioni statiche applicate (fig. 14) e quello di distorsioni impresse (fig. 15)

su strutture inizialmente iperstatiche; per ognuno di questi casi si delinea, ancora una volta, il quadro sollecitativo e deformativo conseguente a una prima variazione di schema strutturale associata, questa volta, alla rimozione di un vincolo provvisorio al tempo  $t_R$  e, una seconda variazione dovuta all'aggiunta di un vincolo posticipato al tempo  $t_1 > t_R$ .

#### 4.2.1. Applicazione di sole azioni statiche sullo schema iniziale

Per il primo teorema della viscosità lineare i carichi applicati producono sulla struttura deformazioni viscosi variabili nel tempo.

Se ad un tempo  $t_R$  viene rimosso un vincolo che era stato applicato sulla struttura solo provvisoriamente, la rimozione del vincolo equivale ad applicare una reazione in generale variabile nel tempo pari a  $-R(t)$ . La variabilità nel tempo della reazione dipende in questo caso solo dalla possibile variabilità dei carichi statici applicati, ma non dal fenomeno della viscosità. Il vincolo posticipato introdotto sulla struttura al tempo  $t_1$  successivo a  $t_R$  impedisce delle deformazioni viscosi variabili prodotte dai carichi applicati sullo schema ridotto senza il vincolo rimosso. Per cui il vincolo posticipato deve sviluppare delle reazioni anch'esse variabili nel tempo per impedire l'incremento di deformazioni viscosi che si continuerebbero ad avere in assenza del vincolo posticipato.

L'esito è che sulla struttura ha inizio il fenomeno della redistribuzione delle sollecitazioni.

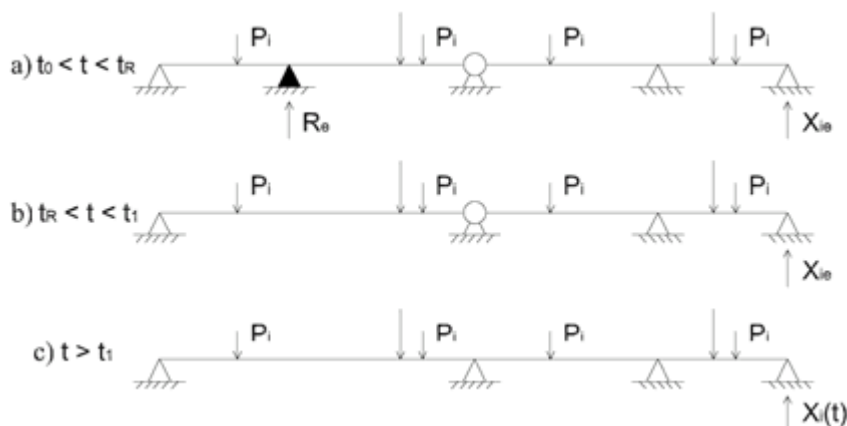


Figura 14. Caso I: applicazione di azioni statiche

#### 4.2.2. Applicazione di sole deformazioni impresse sullo schema iniziale

Per il secondo teorema della viscosità lineare le deformazioni applicate sulla struttura producono su di essa deformazioni costanti nel tempo, indipendenti dal fenomeno della viscosità e, sollecitazioni variabili nel tempo per effetto del rilassamento.

Se ad un tempo  $t_R$  viene rimosso un vincolo che era stato applicato sulla struttura solo provvisoriamente, la rimozione del vincolo, equivale ad applicare sulla struttura una reazione variabile nel tempo pari a  $-R(t)$ , che in questo caso varia nel tempo per effetto del rilassamento in atto nella struttura, dovuto all'applicazione di distorsioni su di essa.

Al tempo  $t_R$  si passa istantaneamente dalle sollecitazioni ottenute sullo schema iniziale a quelle elastiche ottenute sullo schema in cui il vincolo è stato rimosso.

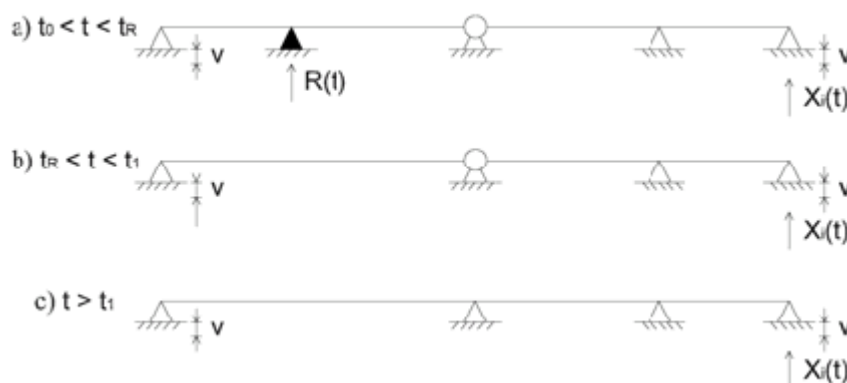


Figura 15. Caso II: applicazione di deformazioni impresse

Il vincolo posticipato introdotto al tempo  $t_1$  successivo a  $t_R$  impedisce delle deformazioni viscosi variabili prodotte dalla sola reazione  $-R(t)$  a partire da  $t_R$  che fino a quel momento

erano invece possibili. Per cui il vincolo posticipato deve sviluppare delle reazioni anch'esse variabili nel tempo per impedire l'incremento di deformazioni viscosi che si continuerebbe ad avere in assenza del vincolo posticipato.

Anche in questo caso sulla struttura ha inizio il fenomeno della redistribuzione delle sollecitazioni.

## 5. CONCLUSIONI

In questo articolo sono stati trattati temi riguardanti la teoria visco-elastica lineare applicata alle strutture in calcestruzzo.

In particolare si è centrata l'attenzione sulla possibilità di estendere concetti propri della viscosità per strutture omogenee a strutture eterogenee.

Su questa scia si sono trattati i casi di aggiunta di vincoli posticipati su una struttura da ponte a conci viscosamente eterogenea, costruita per segmenti successivi. L'eterogeneità trattata è di due tipi:

1. eterogeneità intrinseca per effetto dei diversi tempi di getto e di maturazione dei vari conci;
2. eterogeneità mutua per effetto della realizzazione non contemporanea fra le due stampelle che formano l'intera struttura.

Infine è stata presentata una valutazione degli effetti mutui dell'aggiunta di vincoli posticipati e della rimozione di vincoli provvisori fornendo un quadro utile al progettista strutturale per valutare ed ottimizzare gli effetti della viscosità per diverse combinazioni di cambiamento di schema statico.

## BIBLIOGRAFIA

**[01] ACI 209R-92:** "Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures", reported by ACI Committee 209, pp. 47 reapproved 1997.

**[02] M. Arici, M. F. Granata:** "Structural conception and construction methods in the design of a segmental prestressed rc bridge", proceedings of the 2nd specialty conference on the conceptual approach to structural design, pp. 225-232, Milan, 1-2 July 2003. C.I. Premier Pte-Ltd Ed., Singapore.

**[03] M. Arici, M. F. Granata, S. Bullo, R. Di Marco:** "The role of construction methods on the conceptual design of a segmental prestressed rc bridge", in: Recent Developments in Bridge Engineering, pp. 223-232, edited by K. M. Mahmoud, Swetz & Zeitlinger, 2003.

**[04] Z. P. Bazant:** "Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: model B3", submitted for Adam Neville symposium: creep and shrinkage-structural design effects, ACI SP-194, A. Al-Manaseer, ed. ACI, pp. 1-83, Farmington Hills, Michigan, 2000.

**[05] CEB: Bulletin d'Information, n° 213/214** "CEB-FIP Model code 1990", pp. 437, Thomas Telford, London, 1993.

**[06] M. A. Chiorino:** "Time dependent effects in concrete structures", draft: suggested revision with contributions by M. Sassone, ACI Committee 209 Creep and Shrinkage of Concrete, 83 pp, February 2006.

**[07] M. A. Chiorino:** "Effetti statici dei fenomeni differiti del calcestruzzo: radici storiche e nuovi orientamenti", in M.A. Chiorino (a cura di) "Moderni orientamenti di ingegneria strutturale e geotecnica", FrancoAngeli, pp. 81-152, Milano, 2006.

**[08] M. A. Chiorino, G. Creazza, F. Mola, P. Napoli:** "Analysis of aging viscoelastic structures with n-redundant elastic restraints", proceedings of the 4th RILEM international symposium on creep and shrinkage of concrete: mathematical modelling, Z.P. Bazant ed., pp. 623-644, Northwestern University, Evanston, 1986.

**[09] M. A. Chiorino, L. Dezi, A. M. Tarantino:** "Viscoelastic structures with variable structural system", proceedings of the 5th international RILEM symposium on creep and shrinkage of concrete, Z. P. Bazant and I. Carol ed., E & FN Spon, pp. 579- 584, London, 1993.

**[10] M. A. Chiorino, G. Lacidogna:** "Revision of the design aids of CEB design manual on structural effects of time dependent behaviour of concrete in accordance with the CEB/FIP model code 1990", CEB bulletin d'Information n° 215, pp. 297, march 1993.

**[11] L. Dezi, G. Menditto, A. M. Tarantino:** "Viscoelastic heterogeneous structures with variable structural system", journal of engineering mechanics, Vol. 119, No. 2, february 1993, ASCE.

**[12] Eurocode 2:** "Design of concrete structures, part 2: concrete bridges design and detailing rules", prEN 1992-2 (for stage 49), july 2004.

**[13] J. Gardner, M. J. Lockman:** "Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete", ACI Materials Journal, pp.159-67, March-April 2001.

**[14] F. Giussani, F. Mola:** "Long-term behaviour of cable-stayed bridges - Part I, Theoretical approach", Studies and Researches, Vol. 24, 2003. Italcementi spa Ed., Bergamo.

**[15] F. Mola:** "The reduced relaxation function method: an innovative approach to the analysis of non homogeneous structures", proceedings of the International conference on concrete and structures, Hong-Kong, 1993, C.I. Premier Pte-Ltd Ed., Singapore.

**[16] L. Rappa:** "Studio degli effetti deformativi differiti sulle strutture a vincoli posticipati", tesi discussa presso l'Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Ingegneria, AA 2005-2006; relatori: M. Arici, M. A. Chiorino, M. F. Granata.

**[17] M. Sassone, M. A. Chiorino:** "Design Aids for the Evaluation of Creep Induced Structural Effects", in J. Gardner and J Weiss eds., Shrinkage and Creep of Concrete, ACI SP-227, 2005, pp. 239-259

***Contatti con gli autori:***

Luisa Rappa: [luisarappa@gmail.com](mailto:luisarappa@gmail.com)

Marcello Arici: [arici@diseg.unipa.it](mailto:arici@diseg.unipa.it)

Mario A. Chiorino: [mario.chiorino@polito.it](mailto:mario.chiorino@polito.it)