



Teoria e Progetto di Ponti

A. Recupero

1

CONTENUTI e INDICE

- LA CLASSIFICAZIONE;
- LE AZIONI
- LA NORMATIVA ITALIANA;
- GLI EFFETTI REOLOGICI;
- L'IMPALCATO A GRATICCIO;
- L'IMPALCATO A CASSONE;
- LA PRECOMPRESSIONE ESTERNA;
- LA SISMICA

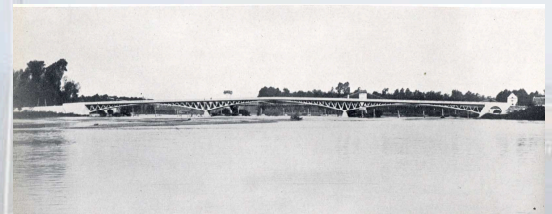
2

GLI EFFETTI REOLOGICI:

- *Le radici storiche*

3

- ✓ Durante i primi decenni del novecento la nuova tecnica del cemento armato fu impiegata senza che ci si preoccupasse degli effetti del fluage



E. Freyssinet, Ponte di Veurede sull'Allier, 1910

Archi a tre cerniere di 73 m di luce fortemente ribassati ($f/l = 1/15$)

- Incremento di freccia in 3 anni: 12-13 cm (*attribuito unicamente al ritiro**)
- 1913: nuova forzatura con martinetti, e bloccaggio cerniera di chiave

* *Le Génie Civil*, No. 2033, 1921

4

- ✓ Durante i primi decenni del novecento la nuova tecnica del cemento armato fu impiegata senza che ci si preoccupasse degli effetti del fluage

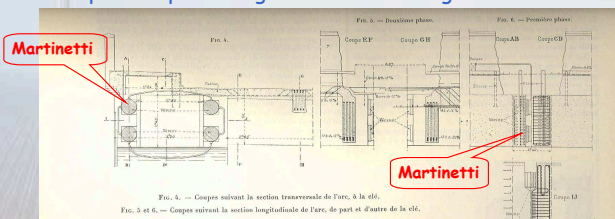


FIG. 4. — Coupes suivant la section transversale de l'arc, à la clé.
FIG. 5 et 6. — Coupes suivant la section longitudinale de l'arc, de part et d'autre de la clé.
FIG. 7. — Plan-coupe du joint de clé.

E. Freyssinet, Ponte di Villeneuve-sur-Lot, 1915

Arco incastrato di 73 m di 96 m, forzato con martinetti in chiave

5

- ✓ Oggi sappiamo che i due problemi ignorati da Freyssinet nei ponti di Veurede e Villeneuve rappresentano due casi classici di:

- *creep problem* il primo (incremento delle deformazioni sotto carico),
- *relaxation problem* il secondo (diminuzione dello stato di tensione sotto deformazione impressa).

- ✓ Sappiamo anche che le soluzioni di questi problemi si deducono immediatamente rispettivamente dal primo e dal secondo teorema della viscoelasticità lineare, e che le funzioni risolventi (funzione viscosità e funzione rilassamento) sono legate fra di loro da una equazione integrale di Volterra*.

* *Leçons sur les fonctions de lignes*, Paris, 1913

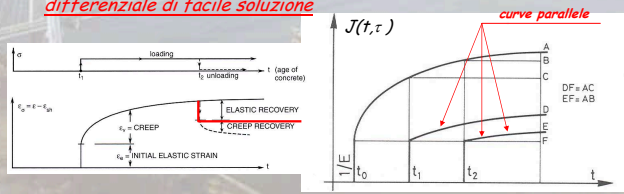
6

✓ E' negli anni trenta del novecento che si inizia a riscontrare una attenzione specifica per gli effetti della viscosità sulle strutture in cemento armato

✓ Dischinger (1937)

Formulazione matematica semplificata, che oggi giudichiamo inadeguata, per la rappresentazione del fenomeno ereditario:

- assenza di elasticità differita
- nucleo di memoria funzione della sola età τ dalla messa in carico
- l'equazione integrale di Volterra si riduce ad una equazione differenziale di facile soluzione



✓ Maslov (1941)

- il suo pionieristico studio – noto in occidente solo in anni successivi – utilizza l'equazione integrale di Volterra

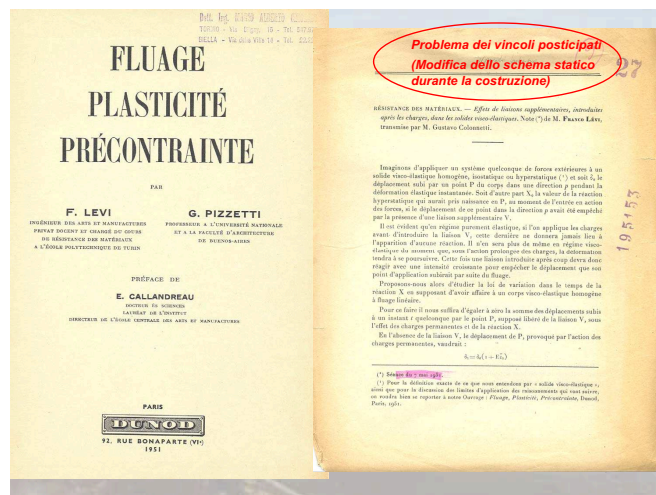
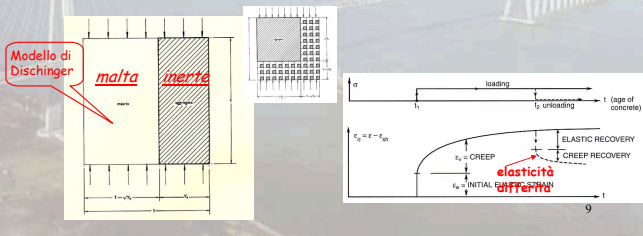
✓ Mc Henry (1943)

- enuncia, su base sperimentale il principio di sovrapposizione per le deformazione indotte da incrementi di sforzi applicati in tempi successivi,
- lo estende dualmente, in via di tentativo, alle risposte viscosi in termini di tensione a deformazioni impresse applicate in tempi successivi
- introduce la funzione rilassamento, duale della funzione viscosità e riconosce il legame costituito dalla equazione integrale di Volterra fra queste due funzioni
- enuncia, senza peraltro fornire una dimostrazione efficace, il primo e secondo teorema della viscoelasticità lineare –
- mancano tuttavia nella memoria di Mc Henry esempi di applicazioni a problemi concreti relativi agli effetti della viscosità sulle strutture

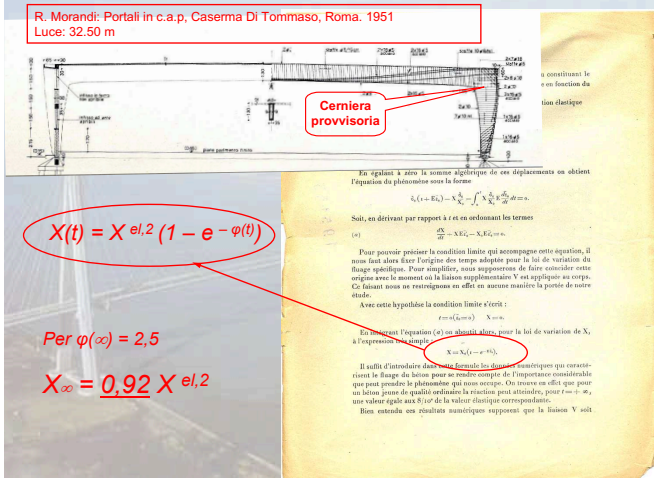
8

✓ Levi (1948-51)

- istituisce un collegamento fra il problema degli effetti strutturali della viscosità e la teoria degli stati di coazione
- dimostra il teorema relativo alle distorsioni isomorfe che contiene in nuce il primo e secondo teorema della viscoelasticità lineare
- associato al modello di viscosità semplificato di Dischinger consente di risolvere i più svariati problemi: deformazione impressa costante e variabile, solidi eterogenei, instabilità dell'equilibrio, ecc.
- propone un modello reologico per tenere conto della elasticità differita



R. Morandi: Portali in c.a.p., Caserma Di Tommaso, Roma. 1951
Luce: 32.50 m



✓ Arutyunian (1952)

- Formulazione matematica semplificata per la funzione viscosità (con elasticità differita ma ancora inadeguata) per consentire equazione differenziale (sviluppi matematici pesanti)

✓ Bazant (1972)

- Algebrizzazione della equazione integrale di Volterra mediante la introduzione dell' aging coefficient χ (in alcuni casi l'approssimazione non è adeguata)

✓ Rüsch e Jungwirth (1973-76)

- Modifica della impostazione originaria di Dischinger basata sul modello invecchiante e sulla corrispondente equazione differenziale; si tiene conto della elasticità differita attraverso l'inserimento di una componente di deformazione elastica aggiuntiva.

12

Formulazione razionale dei problemi di analisi viscoelastica

13

- Formulazione integrale del problema (utilizzazione della equazione integrale di Volterra per i fenomeni ereditari)
- Funzione viscosità $J(t, \tau)$ a formulazione analitica non predefinita: si sceglie la più idonea a rappresentare il comportamento viscoso del calcestruzzo
- Utilizzazione sistematica del primo e dal secondo teorema della viscoelasticità lineare, rispettivamente per problemi a carico imposto (azioni statiche) o a deformazione imposta (azioni geometriche)
- Utilizzazione di un terzo e quarto teorema della viscoelasticità lineare, per i problemi (frequenti) di vincolo posticipato, rispettivamente per:
 - singolo cambiamento di schema statico
 - successivi cambiamenti

14

Le soluzioni

Azioni statiche (carichi imposti)

Per effetto del 1° teorema la distribuzione elastica degli sforzi S non è modificata dal comportamento viscoso del materiale, mentre le deformazioni D sono modificate dall'operatore integrale di viscosità:

$$S(t) = S^{el}(t)$$

$$D(t) = E_c \int_0^t J(t, \tau) dD^{el}(\tau)$$

Azioni geometriche (deformazioni impresse)

Per effetto del 2° teorema la distribuzione elastica delle deformazioni D non è modificata dal comportamento viscoso del materiale, mentre gli sforzi S sono modificati dall'operatore integrale di rilassamento:

$$D(t) = D^{el}(t)$$

$$S(t) = 1/E_c \int_0^t R(t, \tau) dS^{el}(\tau)$$

15

Le soluzioni

Singola variazione dello schema statico al tempo $t_1 \geq t_0^*$

Per effetto del 3° teorema, in una struttura soggetta a carichi costanti e il cui schema statico iniziale 1 venga modificato in uno schema statico finale 2 al tempo $t_1 \geq t_0^*$, la distribuzione degli sforzi evolve per $t > t_1$, avvicinandosi alla distribuzione che si avrebbe applicando i carichi sulla struttura nel suo schema statico finale 2 , sulla base della seguente espressione:

$$S^2(t) = S^{el,1} + \Delta S^1(t) = S^{el,1} + \xi(t, t_0, t_1) (S^{el,2} - S^{el,1})$$

Funzione redistribuzione

• Variazioni successive multiple dello schema statico ai tempi $t_i \geq t_0^*$
Per effetto del 4° teorema, in una struttura soggetta a carichi costanti, il cui schema statico iniziale 1 è progressivamente modificato con l'aggiunta di nuovi vincoli ai tempi $t_i \geq t_0^*$, gli effetti di redistribuzione degli sforzi conseguenti a ciascuna variazione di schema statico possono essere sovrapposti Funzione redistribuzione:

$$S^{j+1}(t) = S^{el,1} + \sum_{i=1}^j \xi(t, t_0, t_i) \Delta S^{el,i}$$

16

Casi tipici di strutture soggette a variazione di schema statico



17

Funzioni fondamentali e loro determinazione

Funzione viscosità $J(t, \tau)$

La funzione viscosità è fornita dal modello di previsione del comportamento viscoso del calcestruzzo al quale si fa riferimento (formulazione analitica non predefinita)

Funzione rilassamento $R(t, \tau)$

Funzione viscosità e funzione rilassamento sono legate fra loro dalla equazione integrale di Volterra (da risolvere numericamente):

$$1 = R(t_0, t_0) J(t, t_0) + \int_{t_0}^t J(t, \tau) dR(\tau, t_0)$$

Funzione redistribuzione $\xi(t, t_0, t_1)$

Funzione viscosità e funzione rilassamento sono legate fra loro dalla equazione integrale di Volterra (da risolvere numericamente):

$$J(t, t_0) - J(t_1, t_0) = \int_{t_1}^t J(t, \tau) d\xi(\tau, t_0, t_1)$$

18

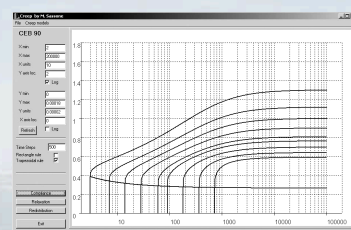
✓ Solutore numerico per l'equazione integrale di Volterra

- procedimento di integrazione al passo mediante la regola dei trapezi [Bazant 1972]
- il procedimento richiede la conservazione in memoria delle operazioni svolte nei passi precedenti.
- al fine di non sovraccaricare la memoria dei computer, sfruttando la caratteristica smorzante dei fenomeni viscosi, i passi di tempo vengono fatti crescere in progressione geometrica
- l'enorme aumento della potenza di calcolo degli elaboratori consente oggi di ottenere la funzione ricercata quasi in tempo reale
- il solutore numerico, assieme alla libreria delle funzioni fondamentali J , R e ξ per i modelli di previsione delle proprietà viscosi oggi più accreditati, è disponibile all'interno del sito web del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino (<http://www.polito.it/creepanalysis>)

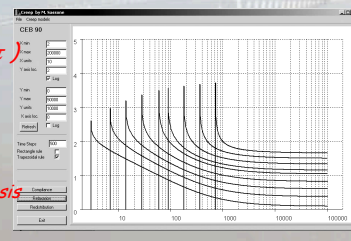
19

Modello CEB 1990

• Funzione viscosità $J(t, \tau)$

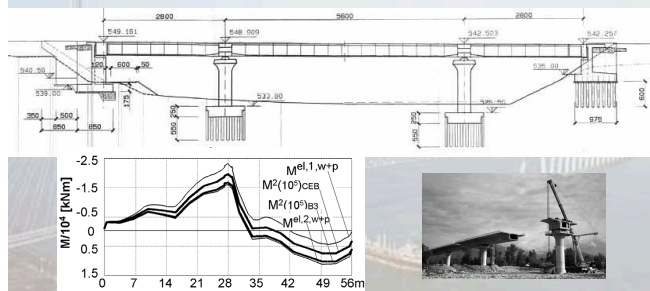


• Funzione rilassamento $R(t, \tau)$



<http://www.polito.it/creepanalysis>

Esempio di applicazione Struttura soggetta a variazione di schema statico



$$M^2(t) = M^1 + \xi(t, t_0, t_1) \Delta M^{el,1}$$

$$M^2(t=100 \text{ anni}) = M^1 + 0.49 \Delta M^{el,1}$$

$$M^2(t=100 \text{ anni}) = M^1 + 0.89 \Delta M^{el,1}$$

$$t_0 = 28 \text{ giorni}, t_1 = 90 \text{ giorni}$$

Modello CEB

Modello B3

21

✓ Problemi aperti

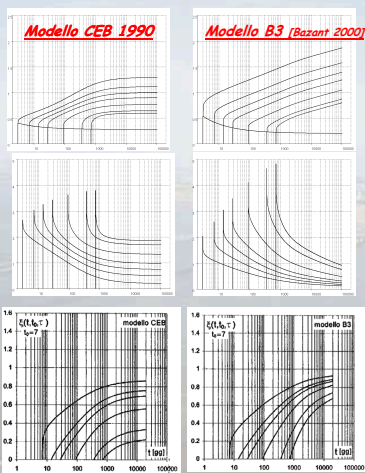
- presenza nella letteratura scientifica, nei codici di pre-normativa e nei codici di calcolo di modelli di previsione della viscosità fortemente differenziati fra di loro
- valori a lungo termine per le funzioni fondamentali J , R e ξ che intervengono nella soluzione dei problemi relativi agli effetti statici dei fenomeni viscosi notevolmente diversi fra un modello e l'altro

22

Funzione viscosità $J(t, \tau)$

Funzione rilassamento $R(t, \tau)$

Funzione ridistribuzione $\xi(t, t_0, t_1)$



✓ Cause

- il fenomeno viscoso è un fenomeno intrinsecamente complesso che coinvolge una ampia serie di fenomeni fisici e chimici attivi a diverse scale,
- l'insieme dei dati sperimentali disponibili nella letteratura scientifica, per quanto ampio e recentemente raccolto sotto l'egida della RILEM in una banca dati, presenta una elevata dispersione statistica intrinseca
- la durata massima delle campagne sperimentali raggiunge, anche nei casi più favorevoli, i dieci o venti anni, ed è inferiore quindi quasi di un ordine di grandezza alla durata di vita rispetto alla quale si intende oggi effettuare le verifiche di affidabilità delle costruzioni in calcestruzzo armato moderne
- i modelli di previsione sono costretti pertanto a fondarsi su una estrapolazione dei dati sperimentali
- un limitato soccorso viene per ora dalla interpretazione e modellazione dei fenomeni fisico-chimici che stanno alla base del comportamento viscoso (mancanza di accordo).

24

✓ *Punto della situazione*

- La modellazione degli effetti strutturali del comportamento reologico del calcestruzzo ha compiuto ampi progressi negli ultimi anni,
- una estesissima gamma di problemi può essere risolta in modo estremamente compatto attraverso l'impiego dei **4 teoremi** della teoria della viscoelasticità lineare per materiali invecchianti
- le tre funzioni fondamentali ***viscosità J , rilassamento R e ridistribuzione ξ*** svolgono un ruolo fondamentale
- questo impianto chiaro, sintetico e rigoroso consente la corretta interpretazione dei fenomeni strutturali
- la sua chiarezza e compattezza lo rendono particolarmente idoneo all'inserimento nei documenti di guida normativa
- Pertanto è stato adottato da:
 - *Codice Modello CEB-FIP 1990*
 - *Manuale CEB sugli effetti strutturali della viscosità*
 - *ultima bozza dell'Eurocodice 2, Parte 2 dedicato ai ponti.*