

---

ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI  
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI

# RENDICONTI

---

FRANCO LEVI, VITELMO BERTERO

## Conferma sperimentale di una interpretazione meccanica di taluni aspetti della reologia del calcestruzzo

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,  
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 40 (1966), n.1, p. 58–63.*

Accademia Nazionale dei Lincei

<[http://www.bdim.eu/item?id=RLINA\\_1966\\_8\\_40\\_1\\_58\\_0](http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1966_8_40_1_58_0)>

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

---

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma  
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)  
SIMAI & UMI*

<http://www.bdim.eu/>

**Scienza delle costruzioni.** — *Conferma sperimentale di una interpretazione meccanica di taluni aspetti della reologia del calcestruzzo.*

Nota di FRANCO LEVI e VITELMO BERTERO, presentata (\*) dal Socio G. COLONNETTI.

RÉSUMÉ. — Vérification expérimentale de prévisions théoriques, formulées dans une note précédente, concernant l'influence, sur la loi rhéologique du béton, de la présence des contraintes internes provoquées par la fluage de la fraction visco-élastique du mélange. Les expériences montrent qu'un traitement consistant en une humidification modérée provoque deux phénomènes simultanés qui ont des effets contraires sur la déformation: une augmentation du fluage, la disparition totale ou partielle des contraintes internes. Après le traitement, la disparition de l'état de coaction apparue pendant la période antécédente de chargement réduit fortement l'influence de l'âge à la mise en charge.

La presa in conto degli stati di coazione che nascono fra gli elementi di un solido eterogeneo quando uno dei costituenti dà luogo ad una deformazione lenta sotto carico, costituisce la base per l'istituzione di una rappresentazione molto soddisfacente delle principali proprietà del calcestruzzo proposta da uno degli Autori dell'attuale Nota [1]. L'equazione reologica a tre termini ottenuta per questa via è analoga a quella che si può desumere partendo dal classico schema reologico di Kelvin. Ma l'adozione di un modello reologico più aderente alla realtà fisica consente di mettere in luce l'interdipendenza che deve necessariamente sussistere, nei vari aspetti del comportamento, fra le proprietà fisico-chimiche del solido eterogeneo e le leggi meccaniche che ne regolano l'equilibrio interno. Peraltro, per correggere le inevitabili imprecisioni derivanti dal carattere schematico del modello, i valori dei coefficienti che figurano nell'equazione vengono desunti da una interpretazione statistica dei risultati sperimentali disponibili.

In tal senso è lecito considerare l'interpretazione di cui trattasi come un tentativo per fornire una immagine sintetica del funzionamento interno del conglomerato cementizio; o quanto meno per superare le interpretazioni necessariamente unilaterali cui si è condotti partendo da schemi reologici astratti, o mettendo l'accento soltanto sugli aspetti fisico-chimici dei fenomeni.

Precisiamo che l'interpretazione testè ricordata si riferiva allo studio del cosiddetto « fluage di base », quello cioè che è provocato dall'azione prolungata di una sollecitazione esterna in condizioni ambientali invariabili. Ricordiamo altresì che l'indirizzo di cui trattasi porta a ricollegare l'andamento delle leggi di fluage e di elasticità ritardata a due cause fondamentali: l'invecchiamento della pasta cementizia, l'effetto frenante che la presenza degli elementi elastici esercita sull'evoluzione della deformazione lenta della frazione viscosa della pasta.

(\*) Nella seduta dell'8 gennaio 1966.

Poiché tale effetto frenante comporta l'apparizione nell'impasto di stati di coazione che tendono a trasferire gli sforzi dalla pasta cementizia all'inerte (per lo più attraverso l'intervento di azioni tangenziali), era stato proposto, nella Nota [1], d'istituire apposite esperienze mediante le quali l'influenza esplicata dalle tensioni interne avrebbe dovuto essere posta in evidenza.

Scopo dell'attuale Nota è d'illustrare brevemente i risultati ottenuti in una serie di esperimenti condotti secondo i criteri proposti e di mettere in luce il sostanziale accordo fra rilievi sperimentali e previsioni teoriche. Mostriamo inoltre come talune ulteriori osservazioni, effettuate nel corso delle prove, consentano di spiegare alcuni interessanti aspetti del comportamento del conglomerato cementizio al variare delle condizioni ambientali.

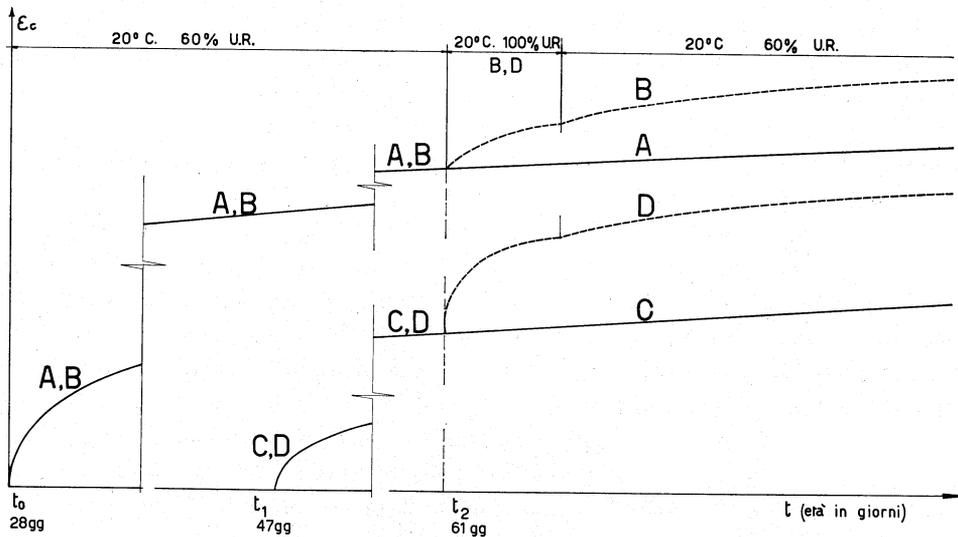


Fig. 1.

Le esperienze sono consistite nel sottoporre a momento torcente costante (esercitato a mezzo di pesi) delle provette in calcestruzzo di forma cilindrica. Le deformazioni angolari venivano rilevate con grande precisione a mezzo di comparatori millesimali contrastanti su appositi bracci. Senza entrare nei dettagli della tecnica sperimentale, che verrà compiutamente illustrata in altra sede, ci limiteremo a sottolineare che, rispetto alle classiche apparecchiature di compressione o flessione, il dispositivo adottato presentava i seguenti vantaggi: indipendenza della sollecitazione applicata dal regime di deformazione; indipendenza della legge deformazione angolare-tempo dalle variazioni di volume del campione di qualsiasi origine (ritiro, mutamento delle condizioni ambientali).

Alcuni fra i risultati più significativi sono illustrati nelle figg. 1 e 2. Come risulta dalla fig. 1, due campioni identici A e B sono stati collocati all'età di 28 giorni in ambiente termogrignometrico costante (20°C - 60% di U.R.) e sottoposti a momento torcente costante. All'età di 61 giorni, il campione B

veniva sottoposto ad un trattamento igrometrico della durata di 50 ore durante il quale esso veniva messo a contatto con acqua alla temperatura di 20° C. Alla fine del trattamento, dopo evacuazione dell'acqua, il provino veniva a ritrovarsi nelle condizioni ambientali iniziali.

Appare dalla figura che il trattamento determinava i seguenti effetti:

a) rapido incremento della deformazione, pari a circa il 20% della deformazione accumulata fra 28 e 61 giorni;

b) dopo il trattamento, aumento della pendenza della curva di fluage del provino B rispetto a quella del provino A.

L'effetto a) era facilmente prevedibile. È noto infatti che un aumento del grado di umidità determina un forte incremento del fluage della pasta cementizia [2]. Dal punto di vista reologico, il fenomeno si spiega ammettendo che l'aumento di umidità accentui la deformabilità della frazione visco-elastica. Donde risulta un incremento della deformabilità globale dell'elemento eterogeneo, al quale corrisponde un aumento della deformazione d'insieme. Dal nostro punto di vista, è anche importante sottolineare che il fenomeno descritto implica necessariamente la tendenza della sollecitazione esterna applicata a riportarsi sull'elemento inerte.

È tuttavia evidente che l'interpretazione suddetta, ed in particolare l'ultima osservazione riportata, è in contraddizione con l'aspetto del comportamento di cui al punto b). Se infatti il trattamento igrometrico si traducesse soltanto in un aumento della deformabilità della pasta, con trasferimento della maggior parte della sollecitazione sull'elemento inerte, si dovrebbe osservare, dopo il trattamento, un rallentamento del fluage, data la minore tensione cui si troverebbe soggetta la frazione viscosa della pasta cementizia. Né l'aumento della pendenza della curva B potrebbe spiegarsi con una persistente riduzione della viscosità della pasta dopo la fine del trattamento, dato che l'effetto dei trattamenti igrometrici si smorza notoriamente molto rapidamente [2].

Una spiegazione molto soddisfacente dell'aumento della pendenza della curva B si ha invece ricorrendo al modello reologico ricordato all'inizio della presente Nota: se infatti si ammette che il trattamento igrometrico faccia scomparire, in tutto o in parte, lo stato di coazione istituitosi nell'interno dell'impasto fra l'età della messa in carico e quella del trattamento, si è logicamente indotti a giustificare l'aumento della pendenza con la scomparsa, parziale o totale, dell'effetto frenante che tale stato di coazione esercitava sulla evoluzione del fluage. In effetti, dunque, la temporanea concentrazione di tensioni sull'inerte data dall'aumento della viscosità della pasta sarebbe ampiamente controbilanciata dalla redistribuzione degli sforzi, di carattere duraturo, conseguente alla eliminazione dello stato di mutua costrizione esistente prima del trattamento. Donde l'aumento della pendenza della curva B.

Tale giustificazione teorica riceve conferma dall'esame delle altre curve riportate: quelle relative ai provini C e D nella fig. 1, quelle relative ai provini C, E, F, G nella fig. 2, che ci proponiamo ora di analizzare. Precisiamo, in proposito, che tutti i provini citati erano costituiti dello stesso conglomerato,

gettato alla stessa data e conservato in identiche condizioni prima dell'inizio degli esperimenti. Aggiungiamo che, per brevità, ci asterremo dal descrivere dettagliatamente le operazioni eseguite dato che queste sono già chiaramente illustrate dalle figure. Segnaliamo soltanto che il trattamento applicato ai provini E, G, differiva da quello applicato ai provini B e D in quanto comportava una umidificazione in acqua a 20° C prolungata per sole 4 ore e mezza.

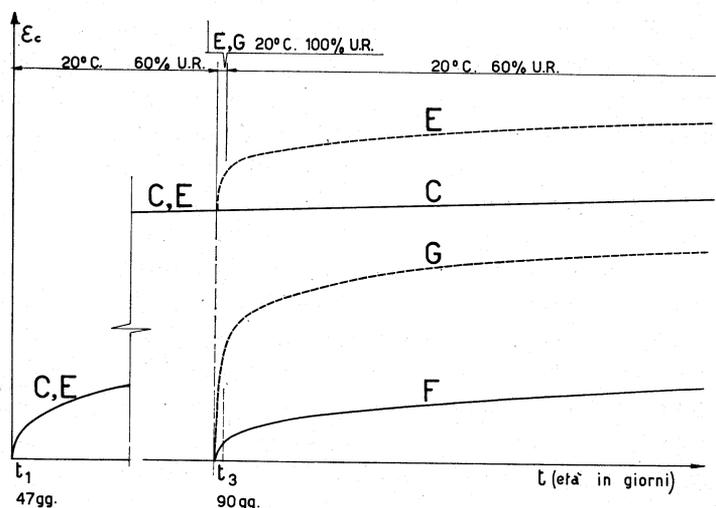


Fig. 2.

I più importanti fenomeni rivelati dalle curve si possono elencare come segue:

a) l'aumento rapido di deformazione osservato durante i trattamenti è diverso da caso a caso. Si ha l'incremento più segnato nel provino G, trattato immediatamente dopo l'applicazione del carico; indi si trovano nell'ordine l'incremento di D, trattato dopo 14 giorni, infine quelli di E e B trattati rispettivamente a 43 e 33 giorni dalla messa in carico;

b) le pendenze dei diagrammi dopo trattamento sono tutte nettamente maggiori di quelle dei campioni di riferimento non trattati se i provini messi a confronto erano stati soggetti al carico per un certo periodo di tempo prima del trattamento. La differenza è invece quasi insensibile nel caso della coppia F-G, per la quale il trattamento di G ha seguito immediatamente la messa in carico.

Mostriamo che tale insieme di osservazioni trova una spiegazione perfettamente coerente nella nostra interpretazione. Secondo i nostri concetti, noi possiamo infatti ammettere che il trattamento di umidificazione determini nei provini i seguenti fenomeni:

1° Mutamento temporaneo della ripartizione dello sforzo esterno fra inerte e pasta, provocato dall'aumento della deformabilità di quest'ultima. Tale fenomeno, già segnalato in precedenza, è accompagnato da un rapido aumento della deformazione d'insieme.

2° Scomparsa delle tensioni interne, con riporto duraturo delle sollecitazioni sulla pasta. Si è già notato che tale aspetto giustifica l'aumento della pendenza della curva di fluage se il provino era sede di uno stato di coazione (se cioè esso era stato caricato da un certo tempo prima del trattamento). Donde una interpretazione soddisfacente delle osservazioni di cui al punto *b*). Il fatto che le pendenze dei provini F e G siano praticamente identiche costituisce peraltro una riprova del fatto che l'aumento della pendenza delle curve di fluage dopo il trattamento non è imputabile al permanere di una riduzione della viscosità della pasta. È tuttavia opportuno notare che se l'eliminazione delle tensioni mutue fosse dovuta ad una semplice rottura di aderenza fra pasta e inerte, ne risulterebbe un regime di deformazione non congruente fra i due costituenti (la pasta conserverebbe infatti la deformazione impressa corrispondente al fluage subito nel periodo di carico).

3° Tale ultima incongruenza scompare tuttavia se si ammette che, durante il trattamento, l'inerte elastico, nella sua tendenza a liberarsi dallo stato di coazione, induca nella pasta delle deformazioni impresse di segno opposto a quelle date dal carico. La conseguente riduzione del valore assoluto delle deformazioni impresse residue sarebbe la causa della scomparsa (o della riduzione) delle tensioni interne di coazione. Si avrebbe, in altri termini, come un acceleramento dell'elasticità ritardata, cui corrisponderebbe una deformazione di segno opposto a quella segnalata al punto 1°.

Si può anche dire che i fenomeni 1° e 3° traducono l'effetto esercitato dall'aumento della viscosità della pasta sui due termini di segno opposto che figurano nella equazione reologica di cui alla Nota [1] (termine di fluage e termine di elasticità ritardata). Da notare che l'effetto segnalato al punto 3° si esercita sicuramente anche sulle tensioni interne che tenderebbero a prodursi durante il trattamento per l'incremento del fluage segnalato al punto 1°.

Secondo tali interpretazioni, la deformazione osservata durante il trattamento varierebbe dunque a seconda dell'importanza relativa dei due effetti di segno opposto che la determinano. Si spiegano così le osservazioni esposte in *a*): la deformazione è più segnata nei provini che, prima del trattamento, hanno sopportato l'azione del carico per un periodo di tempo più breve. Unica discordanza: la minore entità del salto di B rispetto a quello di E, che aveva subito un periodo di carico leggermente più corto. Fenomeno che trova però una spiegazione se si considera che il provino B era stato caricato quando aveva raggiunto un minor grado di maturazione. È infatti evidente che le nostre previsioni qualitative non possono in alcun modo prescindere dal tener conto del grado d'idratazione conseguito dalla pasta.

\* \* \*

Noi riteniamo che i risultati sperimentali riportati costituiscano una convincente conferma delle previsioni teoriche esposte nella Nota [1]. Ci sembra inoltre che le interpretazioni riportate nei punti 1°, 2°, 3° rechino un interessante contributo alla conoscenza dei fenomeni che accompagnano

le variazioni delle condizioni ambientali. Altre osservazioni d'importanza sostanziale verranno illustrate nella pubblicazione nella quale verranno riportati in dettaglio i risultati delle prove.

Sin d'ora noi vorremmo tuttavia sottolineare il carattere qualitativo dei nostri studi e la necessità di proseguire le indagini per giungere a valutazioni quantitative, ciò che richiederà sicuramente una disamina approfondita della natura complessa delle configurazioni tensionali segnalate. In particolare, tale restrizione dovrebbe essere tenuta presente qualora si volesse tentare di estendere i dati sopraesposti ad elementi strutturali soggetti a tipi di sollecitazione diversi da quello da noi considerato. È infatti probabile che il passaggio da regimi di sforzi prevalentemente tangenziali a regimi di altra natura possa comportare mutamenti sostanziali nell'andamento dei fenomeni.

Dal punto di vista pratico, quanto precede sembra dimostrare la necessità di tener conto dell'interdipendenza fra comportamento reologico ed equilibri interni nel definire le leggi di deformazione e nell'istituire le esperienze atte a determinare i valori dei parametri caratteristici dei materiali eterogenei. Ciò vale, in particolare, per il conglomerato cementizio nell'ambito del quale non sarà dunque lecito generalizzare dati ricavati da esperienze condotte in condizioni termoigrometriche variabili. Analoghe considerazioni dovranno essere tenute presenti nello studio del comportamento di altri materiali eterogenei quali i metalli, le materie plastiche o i bitumi.

#### BIBLIOGRAFIA.

- [1] F. LEVI, *Ulteriori considerazioni sulla reologia del conglomerato cementizio*, « Accad. Naz. Lincei », fasc. 4, ser. VIII, vol. XXXVIII - aprile 1965.
- [2] RUETZ WALTER, *Das Kriechen des Zementsteins im Beton und Seine Beeinflussung durch Gleich-zeitiges schwinden. Experimentelle Studien zur Klärung des Mechanismus*. Techn. Hochschule Munchen 1965 - Bericht n. 621.