

I fenomeni di adattamento nei calcestruzzi giovani

Si espongono i risultati delle misure di fluage, effettuate su provini in calcestruzzo caricati giovani oltre il limite elastico e si interpretano gli effetti statici dei fenomeni riscontrati.

È ormai entrato nella pratica costruttiva l'ammettere che nelle strutture in calcestruzzo l'intervento di fenomeni naturali, inerenti alla composizione stessa del materiale, dia luogo ad una ridistribuzione delle tensioni atte a migliorarne le condizioni statiche.

L'interpretazione di tali fenomeni di adattamento è stata fondata sull'ipotesi di un intervento istantaneo di deformazioni di origine plastica e di un intervento nel tempo di un fluimento viscoso (1).

È stato possibile pertanto isolare nel fenomeno generale questi due fatti teoricamente ben distinti; ciò che ha portato alla enunciazione delle teorie elastoplastica ed elasticoviscosa.

È da notare però come le strutture in calcestruzzo presentino senza dubbio nella loro prima fase di indurimento un fenomeno plastico-viscoso, i cui risultati non possono venire ritrovati separatamente. Se si analizzano infatti in tale fase questi due fenomeni attraverso le loro teorie elementari, si ritroverebbero dei risultati contrari a quanto detto sugli adattamenti naturali del calcestruzzo e negativi quindi degli insegnamenti di quella scuola che faceva loro credito.

Le deformazioni plastiche che si manifestano in strutture giovani quando venga superato in qualche punto il limite di proporzionalità, hanno influenze ben precise e diverse che si consideri localmente la sezione plasticizzata, o la struttura nel suo insieme.

Nella sezione plasticizzata esse servono a limitare le tensioni massime, compensando tale fatto con un accrescimento delle tensioni negli altri punti; nell'insieme, qualora la struttura presenti una indeterminazione statica, la comparsa di deformazioni non congruenti da origine ad uno stato di coazione, il cui effetto è assimilabile a quello di una distorsione di Volterra, creatasi in corrispondenza della sezione plasticizzata.

Sovrapponendo ora all'effetto plastico il fluimento viscoso, supposto lineare, troviamo che l'intervento della viscosità ha come conseguenza lo smorzamento degli effetti della distorsione pla-

(1) Intendiamo secondo le classiche definizioni, per fenomeno plastico l'annullamento istantaneo del modulo senza caduta di tensione, e per fluimento viscoso la deformazione permanente che il materiale subisce nel tempo sotto l'azione di una sollecitazione prolungata.

stica che nella struttura si era realizzata sotto l'effetto del carico (2).

In strutture giovani ove il disarmo preventivo permette di realizzare in pieno gli opportuni adattamenti plastici, la viscosità specifica assume ben presto valori elevati. In conseguenza il fenomeno viscoso sarebbe fortemente nocivo, e riporterebbe la struttura in condizioni sfavorevoli, proprio quando per l'avvenuta maturazione, nuovi adattamenti sarebbero difficilmente realizzabili.

La pratica costruttiva ci insegna che questo in effetti non avviene.

Per spiegare allora tale fenomeno sarà lecito ammettere che, così come nelle strutture sottoposte a distorsioni artificialmente impresse è necessario restituire alla carica il valore iniziale perduto per effetto viscoso, nelle strutture sottoposte a distorsioni plastiche naturali l'aumento della deformazione impressa venga data in modo continuo dalla viscosità, per effetto locale nella sezione in cui tale deformazione si è realizzata.

È infatti probabile che nelle fibre deformate plasticamente, la deformazione plastica si inserisca nella funzione ereditaria del fenomeno viscoso, modificandone sostanzialmente l'andamento (3).

Diremo dunque che mentre lo stato di tensione elastica prodotto nel complesso della struttura dalla distorsione impressa viene influenzato nel modo noto dalla viscosità lineare, tutto sembra indicarci che le fibre deformate plasticamente subiscono un fluimento viscoso caratterizzato dalla deformazione rapidamente crescente col valore della sollecitazione.

È quindi evidente che, presupponendo che l'entità del fenomeno viscoso sia proporzionale alla sollecitazione normale nel punto considerato, i risultati teorici ritrovati non siano applicabili al caso.

Nè sono applicabili d'altronde i risultati delle numerose esperienze eseguite sul calcestruzzo sia semplice che armato

(2) Ciò avviene dato che gli stati di tensione dovuti alla distorsione plastica generano nella struttura uno stato di deformazione non congruente. La deformazione viscosa essendo per ipotesi in ogni punto affine alla deformazione elastica corrispondente, sarà essa stessa non congruente. Genererà quindi uno stato di tensione, che si sovrappone negativamente all'effetto elastico della distorsione impressa, la cui intensità è regolata dalla legge di invarianza dello stato di deformazione (isomorfismo).

(3) F. LEVI, *Sugli effetti statici dei fenomeni viscosi*, Acc. Naz. Lincei, fasc. 3, vol. IV.

nella ricerca dei fattori che influenzano la deformazione nel tempo di provino sottocarico (4).

Tali esperienze sono infatti eseguite imponendo ai provini dei carichi costanti nel tempo, i quali non realizzano sollecitazioni superiori al limite elastico, con sicura comparsa di deformazioni plastiche.

I risultati di queste ricerche si sono dimostrati applicabili ad una buona parte dei problemi che si presentano nelle normali costruzioni in calcestruzzo con speciale riguardo alle costruzioni precomprese ove ci si è accontentati in genere della conoscenza del valore specifico asintotico del raccorciamento residuo.

Ma per le ragioni su esposte non è possibile nel nostro studio fare riferimento a tali serie di esperienze.

È stato ritenuto quindi interessante istituire delle nuove indagini, i cui risultati possano essere, almeno qualitativamente, di orientamento nello studio del fenomeno plastico-viscoso.

Ci si è proposti di iniziare nell'ambito del Centro Studi sulle Coazioni elastiche lo studio del problema partendo dalla ricerca di una eventuale nuova legge della viscosità specifica, cercando di rilevare cioè la legge sforzi deformazioni di provini caricati giovani oltre il limite elastico.

Generalità sull'esperienza.

L'attuazione sperimentale dello studio presentava diverse difficoltà dovendosi realizzare sui provini dei forti carichi, tali da garantire la presenza di deformazioni plastiche. In conseguenza di ciò era necessario un preciso controllo della centratura del carico stesso, dato che una pressoflessione avrebbe facilmente fatto raggiungere ad una delle facce del provino la sollecitazione di rottura.

Il controllo della centratura del carico, effettuata per mezzo di estensimetri meccanici posti simmetricamente sui provini stessi, si mostrò insufficiente per evitare la rottura. Tale mezzo non permetteva il preciso rilevamento del carico impresso, il cui valore viene sostanzialmente modificato nel trasferimento della macchina di prova alle molle del telaio metallico entro cui viene posto il provino.

Il dispositivo da noi adoperato è stato il seguente: il provino ingabbiato è posto verticalmente in una robusta intelaiatura;

(4) Il fenomeno in campo elastico viscoso è stato sistematicamente studiato da diversi sperimentatori fra i quali ad es. Whitney, Glanville, Graf, Freyssinet, ed altri. Un estesa bibliografia sull'argomento può venire trovata sul Bericht n. 124 della Empa (Haller).

il carico viene applicato per mezzo di un martinetto, e controllato su un dinamometro ad anello interposto fra il martinetto e la gabbia. Su ognuna delle quattro aste della gabbia sono fissati due estensimetri R.S.4 a variazione di resistenza elettrica, collegati in serie al circuito misuratore.

Portando i dati, posti sulle teste filettate delle aste, a contatto colla piastra superiore della gabbia e scaricando il martinetto, il carico viene trasferito alla gabbia stessa. Le letture degli estensimetri indicano le eventuali eccentricità ed il valore del carico trasferito. Piccoli spostamenti dei dati permettono allora una rapida e controllata centratura.

La sensibilità degli S.R.4, essendo come è noto di 1×10^{-6} , si comprende come l'operazione stessa possa venir seguita con la massima esattezza.

Per la misura delle deformazioni del provino venne adoperato uno speciale dispositivo che sfruttava lo stesso principio del comparatore da interni.

Furono misurati gli spostamenti delle due piastre superiori della gabbia, dopo avere scartato tutte le misure da effettuarsi direttamente sulla superficie dei provini. La fig. 1 mostra il dispositivo adoperato.

Degli incavi emisferici sono ricavati superiormente nella piastra direttamente, ed inferiormente sulla punta di una asta di acciaio. Scelta una lunghezza base a per il misuratore, tale base è stata realizzata su tutte le gabbie, dopo la compressione mediante spostamento verticale del pezzo di acciaio inferiore.



Fig. 1. - Telaio di prova con estensimetri elettrici sulle aste e dispositivo di misura.

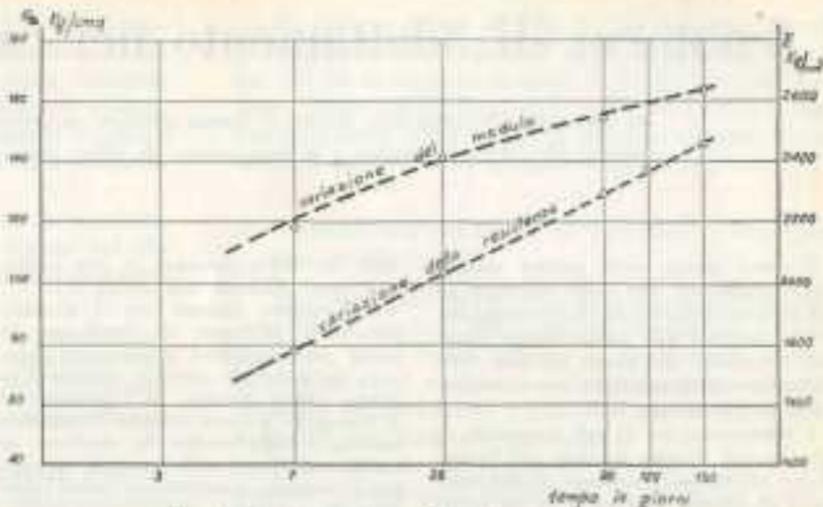


Fig. 2. - Variazione nel tempo della resistenza e del modulo.

La misura si effettua con sensibilità di 1/100 di min. attraverso la ricerca del punto di minima lettura (max distanza tra i punti 1 e 2). Per il controllo dei dati asintotici si è predisposto su due altri lati del provino un'apparecchiatura a controllo ottico con sensibilità di 3/100 di mm.

Per i provini è stato adoperato un calcestruzzo dosato a 300 Kg/mc. di cemento tipo 500, con un rapporto acqua/cemento di 0,4 e granulometria regolamentare (calcestruzzo da cantiere).

Le provette utilizzate sono state di due tipi: il primo con dimensioni $10 \times 10 \times 30$ ed il secondo con dimensioni $7 \times 7 \times 21$ cm.

Per la misura del ritiro vennero ancora preparati dei provini $10 \times 10 \times 50$ al fine di utilizzare la nota attrezzatura Amsler.

I dati desunti dal ritiro di tali provini, furono facilmente applicabili ai vari tipi di provette sottocarico, in base alle esperienze Ross-L'Hermite.

I provini vennero conservati in acqua per 7 giorni e selezionati quindi per le determinazioni e le prove.

a) Scelta dei carichi.

La scelta dei carichi da imporre ai provini per la esperienza è stata fatta in base alla curva sforzi-deformazioni rilevata a 7 giorni di maturazione. La curva è stata ricavata con la media dei valori delle esperienze eseguite su tre provini.

Si notava facilmente come a circa 0,4 del carico di rottura si ha nel diagramma un andamento lineare con residui pressoché nulli. A partire da tale valore del carico la tangente alla curva si abbassa lentamente verso l'asse delle ascisse, aumentando in pari tempo i residui. A circa 0,8 del carico di rottura la tangente stessa si abbassa rapidamente.

I carichi da imporre sono stati scelti in conseguenza. È stato stabilito innanzi tutto di caricare una serie di provini a 30 Kg/cm^2 dato che sotto questa sollecitazione non si denotano deformazioni plastiche sensibili.

Intendendo con σ_k la sollecitazione di rottura, si sono stabiliti ulteriormente i seguenti carichi: $0,6\sigma_k$, $0,7\sigma_k$, $0,8\sigma_k$.

Le quattro serie di provini vennero messi in carico nel modo precedentemente descritto, e quindi posti in camera termostatica nelle condizioni

$$t = 18^\circ \text{C} \pm 1, \quad U = 60\% \pm 5$$

b) Variazione del modulo elastico e della resistenza a rottura.

Delle provette provenienti dal medesimo impasto e conservate nel medesimo modo vennero sottoposte a compressione a diverso tempo di maturazione, per la determinazione del modulo.

I risultati sono riportati nella fig. 2, ove le ascisse sono in funzione logaritmica del tempo.

Nello stesso diagramma sono riportati i carichi di rottura prismatica delle provette in esame. Si nota come la resistenza a rottura cresca in funzione logaritmica del tempo, mentre la variazione del modulo elastico se ne distacca alquanto, seguendo invece una legge approssimativamente di tipo esponenziale.

Notiamo come nei calcestruzzi cosiddetti da cantiere (medio tenore di cemento e alto rapporto A/C) il modulo crescerebbe più rapidamente che nei calcestruzzi fortemente dosati a basso rapporto A/C.

Si riscontra infatti in questa esperienza come il rapporto (E_t/E_0) per $t=150$ gg.

sia pari a 1,30 circa mentre il corrispondente rapporto nelle curve EMPA per un calcestruzzo con modulo a 7 giorni di 400.000 Kg/cm², sia di 1,10.

L'aumento di resistenza, seguendo una legge sensibilmente logaritmica si presta assai bene ad essere interpretata secondo un'espressione della forma

$$\sigma_k(t) = \alpha + \beta \left(\sqrt{\frac{\log t}{\log 24}} \right)$$

come già proposto dall'Empa.

Contemporaneamente alle prove di resistenza prismatica (schiacciamento su provini $10 \times 10 \times 30$) sono state effettuate prove di resistenza cubica. Si è trovato un rapporto pari a 0,65 sensibilmente minore del coefficiente 0,8 normalmente adottato.

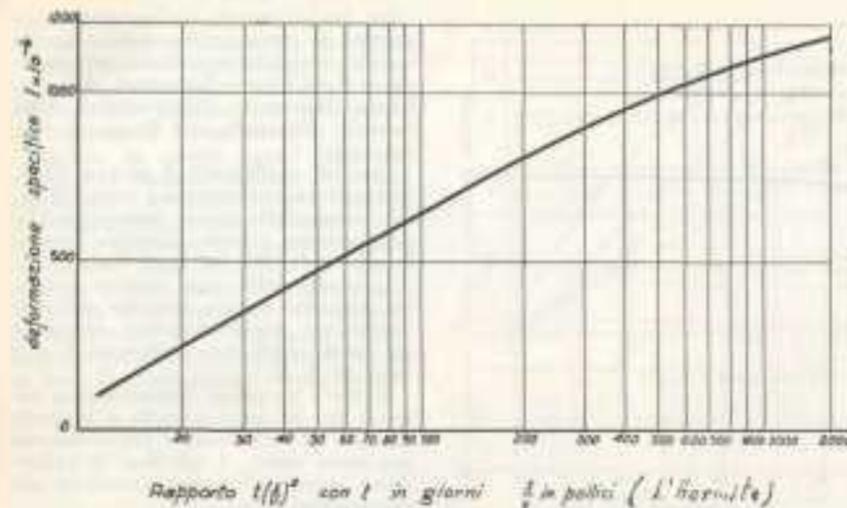


Fig. 3. - Curve Ross-L'Hermite per la variazione del ritiro in provini di forma diretta.

c) Ritiro.

Nelle esperienze in oggetto fu data grande importanza alle misure di ritiro dato che queste influenzavano notevolmente la determinazione dei valori della viscosità specifica.

L'impasto infatti con cui erano gettati il provino conteneva come già detto una forte percentuale di acqua.

D'altra parte è da notare come i provini sotto carico fossero di differente grandezza. Essendo indubbio che le dimensioni e il volume dei provini influiscono sul valore del loro ritiro, si è provveduto alla correzione dei dati ottenuti sui provini standar Amsler.

Tale correzione è stata effettuata in base ai risultati delle esperienze del Ross sopra il ritiro di provini di dimensioni diverse, elaborati poi da L'Hermite (5).

In fig. 3 è stata riportata la curva che esprime la variazione dei ritiri in funzione del prodotto $t(t)^2$ (t = tempo

espresso in giorni, s v superficie e volume del provino espressi in pollici). Tale curva si presta assai bene alla correzione dei nostri dati per la perfetta concordanza dei dati da noi ricavati con quelli riportati dal Ross. La curva del ritiro è mostrata in fig. 4 assieme ai dati della viscosità ritrovati dalle esperienze in esame.

Risultati sperimentali.

Come è noto l'analisi delle deformazioni nel tempo di provini di calcestruzzo sotto carico può venire svolta in due distinti periodi.

Infatti sotto l'azione di un carico P , imposto staticamente, il provino presenta una deformazione istantanea d , somma di una deformazione elastica d_e e di una deformazione plastica d_p . L'una e l'altra deformazione possono venire individuate a mezzo di prove di modulo preventivamente eseguite. La deformazione cresce poi nel tempo per

(5) L'HERMITE, *Le retrait des ciments, mortiers et bétons*, Inst. Tecn. du Bâtiment et des Travaux Publics, Série F n. 30.

dai primi giorni dell'esperienza. Prendendo in considerazione la deformazione viscosa specifica a 28 gg. per la classe dei provini a 30 Kg/cm^2 , la quale risulta pari a $1,45 \times 10^{-5} \text{ Kg.}^{-1} \text{ cm}^2$, si ha un dato circa tre volte superiore a quello ottenuto dal Le Camus (6) (calcestruzzi con modulo di 250.000 a 6 gg. messi in carico a 30 gg.) e di circa dieci volte a quello ottenuto da Haller con calcestruzzo a basso dosaggio da diga, messo in carico a 60 gg.) (7).

Introducendo allora il valore da noi trovato nella formula che dà la riduzione delle sollecitazioni dovute ad una distorsione e cioè:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\lambda t}$$

in cui:

$\sigma(t)$ = sollecitazione elastica al tempo in un punto considerato.

σ_0 = Sollecitazione elastica iniziale dovuta alla distorsione.

$c_v(t)$ = Deformazione viscosa specifica allo stesso tempo t .

si ha che, per $t = 28$ gg lo smorzamento della sollecitazione iniziale sarà di

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} \approx \frac{1}{40}$$

Questo dato è di piena conferma per quanto affermato precedentemente circa l'entità della riduzione subita dalle tensioni determinate nel solido in calcestruzzo dalle distorsioni impresse.

Infatti il rapporto 1/40 indica, nell'ambito delle sollecitazioni prese in esame, uno smorzamento pressoché totale.

Per potere ora confrontare la curva 30 Kg/cm^2 , assunta a rappresentare l'andamento del fenomeno in campo puramente elastico-viscoso, con quelle ottenute per carichi maggiori, ne precisaremo l'andamento analitico nella forma consueta:

$$\bar{\sigma}_0 = \sigma_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

(6) LE CAMUS, *Recherches expérimentales sur la déformation du béton et du béton armé*, Inst. Tecn. du Bâtiment et des Travaux Publics, Série F n. 32.

(7) V. nota 3.

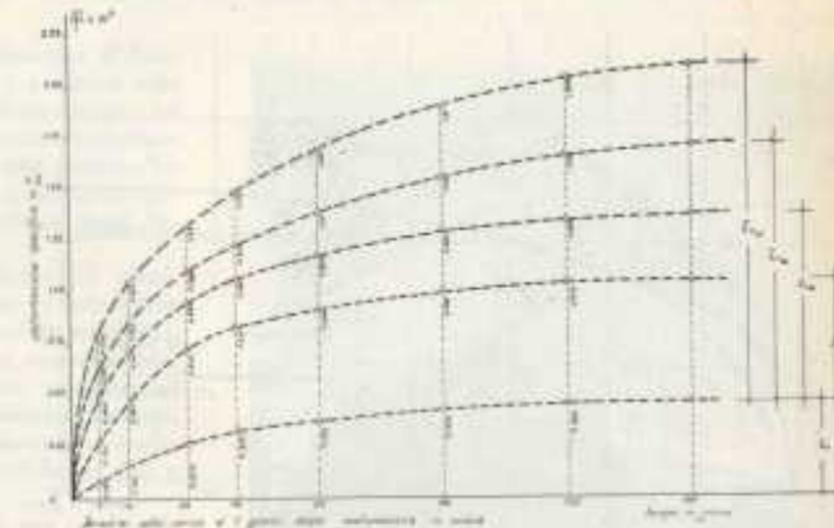


Fig. 4. - Curve del ritiro e di viscosità per sollecitazioni di 20, 42, 55 e 82 Kg/cm².

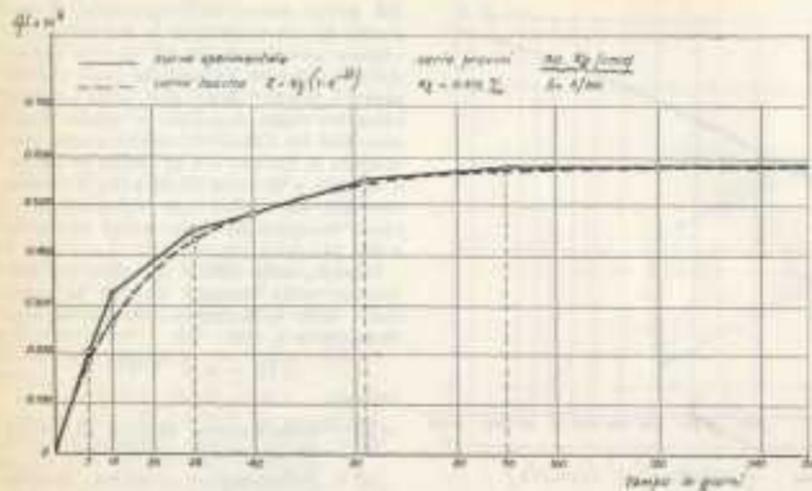


Fig. 1. - Curve teoriche e sperimentali della viscosità per la sollecitazione di 30 Kg/cmq.

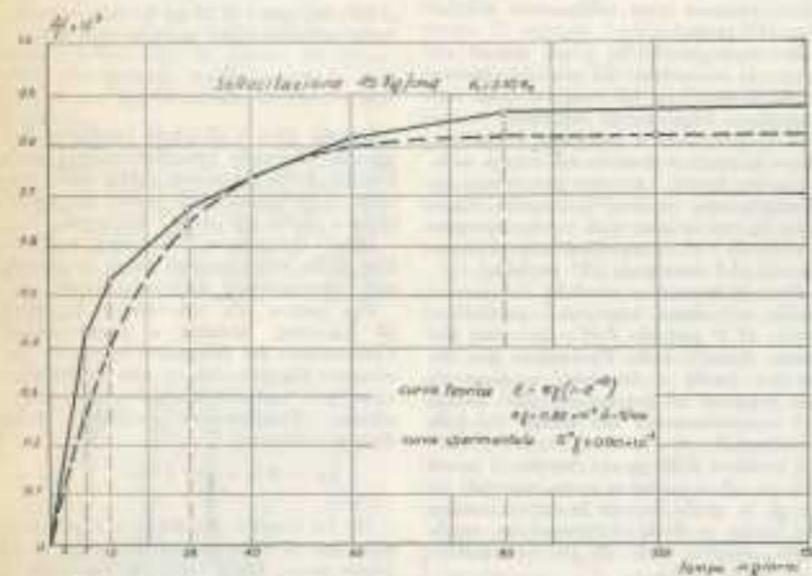


Fig. 6. - Curve teorica e sperimentale della viscosità per la sollecitazione di 45 Kg/cmq.

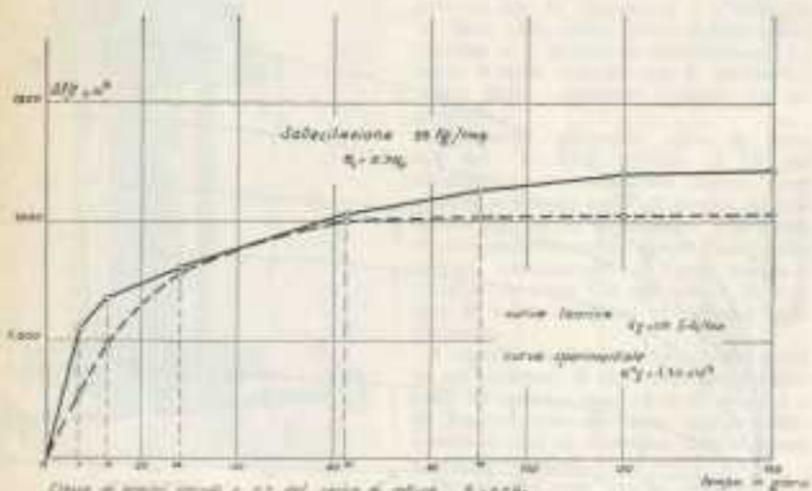


Fig. 7. - Curve teorica e sperimentale della viscosità per la sollecitazione di 55 Kg/cmq.

La fig. 5 mostra sullo stesso diagramma la curva sperimentale e quella teorica, tracciata prendendo un coefficiente $\delta = 5/100 \text{ t}^{-1}$. I risultati del confronto dimostrano l'applicabilità della formula allo studio del fenomeno sperimentale.

Con un coefficiente δ pari a $5/100$, l'asintoto viene raggiunto a circa 120 gg. dal tempo della messa sottocarico. La deformazione viscosa asintotica, assume il valore di $1,9 \times 10^{-5} \text{ Kg.}^2 \text{ cm}^2$.

Lo studio delle curve relative ai carichi maggiori è stato eseguito per confronto con quelle tracciate adottando gli stessi valori dei coefficienti δ e γ (figg. 6, 7, 8).

Si rileva un primo distanziamento notevole fra le curve teoriche e le sperimentali, ed un successivo riaccostamento per breve tratto. A tale fase di coincidenza seguono dei tratti ascendenti più rapidamente (8).

In fig. 9 sono state riportate le curve sforzi applicati-deformazioni viscosi, variabili in funzione del tempo.

Si nota in tale diagramma il rapido abbassamento della curva verso l'asse delle ascisse durante un primo periodo di tempo (corrispondente alla diversità dei valori sperimentali dai teorici) a cui segue un successivo allinearsi dei punti relativi alle sollecitazioni di 30,45 e 55 Kg./cmq. (coincidenza delle curve). Il fenomeno viscoso per i prismi caricati a 65 Kg./cmq. (molto prossimi cioè al carico di rottura iniziale) si mantiene sempre più segnato che negli altri provini.

Dopo tale periodo ad andamento rettilineo (oltre i 60 gg.), le curve tendono sempre più rapidamente a piegarsi verso l'asse delle ascisse, segno che, se pure per l'avvenuta maturazione del calcestruzzo, le sollecitazioni più basse ritornano entro il limite elastico, l'ereditarietà del fenomeno viscoso tiene ancora conto della deformazione plastica iniziale, ritardando il raggiungimento dell'asintoto.

Dall'esame dei risultati sperimentali è possibile rilevare come proprio in quel periodo iniziale in cui la viscosità lineare riduce nelle fibre deformate plasticamente le sollecitazioni dovute alla distorsione impressa, il fluimento viscoso segue una legge più rapidamente crescente col carico laddove si è verificata inizialmente una deformazione plastica. Si nota quindi come il fenomeno non lineare (al quale abbiamo dato il nome di elasto-plastico-viscoso) continui nel tempo aumentando gradualmente l'entità della distorsione plastica.

Ricollegandoci a quanto detto nelle premesse, possiamo ora distinguere, in base ai nostri risultati sperimentali, due aspetti nettamente diversi del comportamento delle costruzioni in calcestruzzo nelle quali il limite elastico è stato superato.

Da un lato l'intervento delle deformazioni viscosi proporzionali alla sollecitazione impressa, induce una riduzione dell'effetto delle distorsioni plastiche attraverso il processo di invarianza dello

(8) Nelle figg. 6, 7, 8 è stato indicato con δ e γ il valore asintotico della curva sperimentale.

stato di deformazione, dall'altro nelle fibre deformate plasticamente una deformazione viscosa rapidamente crescente col carico determina un incremento della deformazione plastica, non rispettando più la legge di isomorfismo.

Sarebbe in questo punto opportuno mettere in termini analitici i risultati sperimentali ottenuti. Non è difficile però comprendere come, mentre è stato possibile riportare i fenomeni viscosi nell'ambito della resistenza dei materiali per la presupposta relazione lineare fra sforzi e deformazioni, è ora assai laborioso voler tenere ben conto dell'andamento reale del fenomeno testè messo in luce, il quale appare essenzialmente

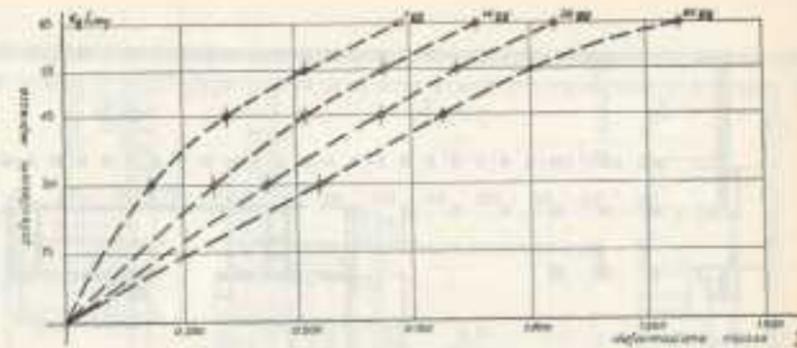


Fig. 9. - Diagramma sforzi impressi-deformazioni viscosi.

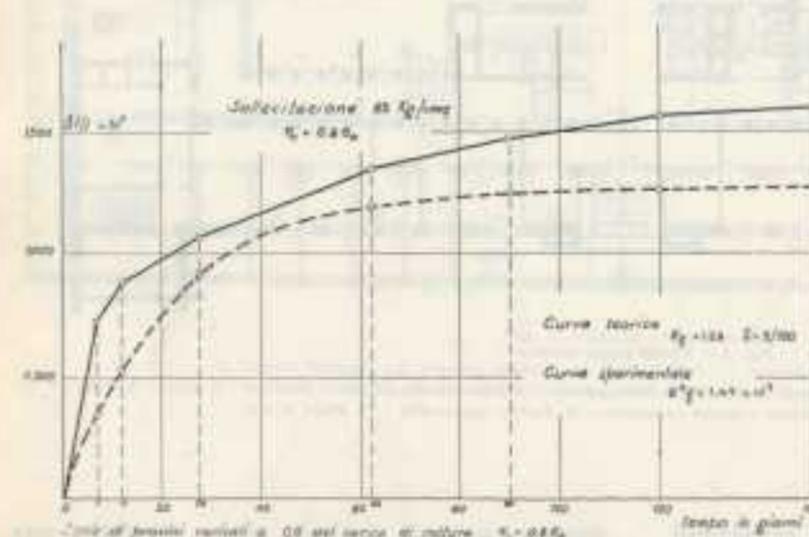


Fig. 8. - Curve teorica e sperimentale di viscosità per la sollecitazione di 65 Kg/cmq.

basato su uno stretto legame dei fenomeni plastici e viscosi.

In definitiva l'analisi delle curve sperimentali, in relazione a quelle teoriche, ha messo in luce due particolarità: la variazione della forma della curva nel tempo con andamento non proporzionale al carico, ed un raggiungimento asintotico meno rapido.

Questo può servirci almeno ad avere una idea qualitativa del fenomeno complessivo, e può anche esserci di guida nelle pratiche costruzioni.

Ci sembra interessante infatti far notare che qualora le deformazioni siano artificialmente impressi (costruzioni in calcestruzzo precompresso) a strutture assai giovani, le cadute di tensione andranno calcolate prendendo dei valori della deformazione viscosa notevolmente elevati, e superiori senza dubbio a quanto precedenti indagini lascerebbero ammettere.

Cesare Castiglia

Un nuovo edificio per uffici in Torino (La sede della Compagnia Anonima d'Assicurazione Torino)

L'Autore illustra il nuovo edificio per uffici in quelle particolari disposizioni caratteristiche, che possono essere soprattutto interessanti ai progettisti.

L'edificio, che la Compagnia Anonima d'Assicurazione di Torino ha or ora eretto a nuova sede dei suoi uffici, presenta alcune disposizioni ed installazioni caratteristiche che possono interessare i colleghi progettisti e costruttori, e che perciò s'illustrano qui di seguito brevemente, a richiesta dell'organo della nostra benemerita Società degli Ingegneri e degli Architetti.

Il fabbricato, destinato interamente ad uffici, presenta nel piano tipo (fig. 3) una caratteristica disposizione di quattro grandi saloni perimetrali, uno per fronte dell'edificio, disposti anularmente, col relativo corridoio di disimpegno, attorno ad un cortile centrale; un corpo di fabbrica interno, perpendicolare ai lati maggiori e contenente scale, ascensori e montacarte, divide il cortile in due e costituisce scorciatoia all'anello.

I predetti quattro grandi saloni per piano, le cui aperture all'esterno ed all'interno sono coas-

