

(Settembre) - 1951 - P. 9

RASSEGNA TECNICA

La "Rassegna tecnica" „vuole essere una libera tribuna di idee e, se del caso, saranno graditi chiarimenti in contraddittorio; pertanto le opinioni ed i giudizi espressi negli articoli e nelle rubriche fisse non impegnano in alcun modo la Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino

ATTUALI ORIENTAMENTI NEL CALCOLO DELLE COSTRUZIONI IN CALCESTRUZZO

Rilevata la sempre maggiore complessità dei problemi che gli studiosi si pongono in materia di calcolo delle costruzioni in calcestruzzo, si afferma che questa tendenza si giustifica pienamente per la necessità di colmare il divario fra ipotesi usuali e reale comportamento del materiale. A titolo di esempio viene svolto lo studio delle variazioni nel tempo della spinta addizionale creata mediante disarmo di un arco con martinetti in chiave. Con l'ipotesi sin qui adottata di un fluage uniforme, i vantaggi conseguiti col procedimento appaiono effimeri. Tenendo invece conto di un fluage variabile da concio a concio, in relazione alle condizioni locali di conservazione, si giunge a conclusioni più aderenti ai risultati pratici ottenuti.

Chiunque segua la letteratura tecnica internazionale, in materia di calcoli di strutture in calcestruzzo, non può che rimaner colpito dalla tendenza che si va manifestando un po' ovunque a prendere in considerazione aspetti sempre più complessi del comportamento di questo materiale. Molti fenomeni sui quali oggi si discute sono stati per molti anni ignorati, o per lo meno quasi completamente trascurati, nei calcoli classici mentre ora si ha tendenza ad attribuir loro una funzione statica di prim'ordine; alcuni dei risultati dei nuovi studi sembrano anzi rimettere in questione concetti che parevano ormai definitivamente acquisiti.

Come si spiega tutto ciò? È lecito il sospetto che gli studiosi di oggi, cedendo alle lusinghe di una moda passeggera indulgano a complicazioni inutili? Si deve auspicare un ritorno alla tradizione dei grandi costruttori che si fidavano più del loro intuito che di calcoli ardui e sovente incerti?

Per rispondere a queste domande occorre seguire lo sviluppo delle nostre conoscenze sul comportamento statico del conglomerato cementizio e l'evoluzione dei metodi di calcolo relativi. È quello che cercheremo di fare brevemente seguendo, più che un stretto ordine cronologico, la logica sequenza dei concetti.

Le prime regole di calcolo, che per molti anni guidarono i progettisti ed i calcolatori nei vari Paesi, furono le Norme Francesi del 1906, compilate da un gruppo di studiosi e di tecnici a seguito di una vasta mole di studi sperimentali. Queste Norme consacravano l'elasticità del calcestruzzo. In esse l'esistenza di un « modulo elastico » del conglomerato era ammessa esplicitamente attraverso l'adozione di un rapporto fisso fra moduli dell'acciaio e del calcestruzzo. Né su questo punto

risulta che vi siano stati, in seno alla commissione redattrice, gravi dissensi. Si discusse a lungo sui valori dei margini di sicurezza, sul modo di tener conto dell'effetto del taglio e su altri concetti, ma i commissari, evidentemente influenzati dai metodi di calcolo in uso per le costruzioni metalliche, non esitarono ad estendere la legge di Hooke anche al nuovo materiale ⁽¹⁾.

Eppure, sin d'allora, alcuni ricercatori avevano constatato che il conglomerato cementizio aveva in realtà un comportamento assai diverso dalla perfetta elasticità; che, in particolare, al crescere del carico, si verificava assai presto ciò che essi chiamavano una « caduta del modulo ». Ma i compilatori delle Norme non presero in considerazione tali fenomeni, preoccupati più che altro di codificare alcuni principi che consentissero a qualunque tecnico addestrato di calcolare una struttura in cemento armato con un minimo di sicurezza. Né, alla luce dei risultati ottenuti, si può ragionevolmente deplorare questa attitudine: lo sviluppo prodigioso del cemento armato, la scarsità dei crolli verificatisi, sono infatti la migliore prova della oculatezza di queste Norme, i cui principi informatori sono d'altronde ancora oggi alla base di molti Regolamenti ufficiali.

I primi accenni a delle regole di calcolo non più rigorosamente fondate sull'ipotesi della perfetta elasticità si ebbero praticamente quando ci si preoccupò di codificare il calcolo degli effetti del ritiro del conglomerato. Rendendosi conto che, in campo elastico, si sarebbe stati condotti a valori molto elevati delle sollecitazioni, sicuramente supe-

⁽¹⁾ Si veda in proposito: *Cent ans de beton arme* • Ed. Science et Industrie - Paris, 1949.

riori a quelli che si verificavano in realtà, si ricorse all'artificio della diminuzione del modulo.

Nel frattempo alcuni progettisti, guidati da un sicuro intuito, non esitavano ad andare assai più avanti sulla strada delle innovazioni, accettando decisamente l'ipotesi di un comportamento non elastico del conglomerato nei punti più sollecitati delle strutture e fondando su di essa la progettazione di opere particolarmente ardite. Allo stesso indirizzo si possono ricollegare alcuni artifici costruttivi quali il disarmo con martinetti o la creazione di cerniere provvisorie poichè tali metodi tendono, in definitiva, a correggere il regime statico mediante l'introduzione di stati di coazione opportunamente dosati.

Sarebbe vano però cercare nei regolamenti recenti la traduzione in Norme di questi nuovi orientamenti che pur hanno dato luogo a brillanti successi. Se si escludono alcuni tentativi di tener conto del comportamento elastoplastico locale delle sezioni resistenti e qualche estensione del metodo assai impreciso della variazione del modulo elastico, le leggi che regolano il calcolo del cemento armato sono ancora quasi esclusivamente fondate sulla Scienza delle Costruzioni classica. Ciò deriva evidentemente dal fatto che gli studiosi, pur rendendosi conto delle incongruenze cui conduce talvolta l'applicazione dei metodi usuali di calcolo, hanno sempre esitato ad abbandonarli per evitare le complicazioni eccessive cui ci si urta appena si tralasci l'ipotesi della perfetta elasticità. D'altronde, l'impostazione di nuovi metodi non si sarebbe potuta giustificare mancando ancora l'indispensabile bagaglio di nozioni sperimentali sul quale fondare i nuovi procedimenti d'indagine.

Una novità non trascurabile appare tuttavia nel più aggiornato dei regolamenti vigenti, le Norme B.A. 1945 del Ministero francese della Ricostruzione: la possibilità di giustificare i calcoli con metodi fondati sulla diretta interpretazione di apposite esperienze. Tale innovazione costituisce un riconoscimento ufficiale della possibilità di superare i metodi usuali di calcolo attraverso una presa in considerazione più accurata del reale comportamento del materiale cementizio. Ma la genericità stessa della formulazione adottata costituisce un implicito riconoscimento della complessità del problema e della scarsità delle nostre attuali conoscenze.

Tenendo presenti queste considerazioni possiamo allora rispondere ai quesiti che ci eravamo posti all'inizio di queste righe. Risulta infatti da quanto abbiamo esposto che esiste attualmente un importante divario fra metodi di calcolo consacrati e reale comportamento delle costruzioni. Su questo punto le nostre conoscenze non lasciano ormai alcun dubbio. Ma è altrettanto certo che la mole dei dati sperimentali, il corredo di procedimenti d'indagine teorica di cui disponiamo non possono ancora costituire una esauriente, indiscutibile, base di studio. Donde la necessità di proseguire le ricerche in tutti i campi; necessità che si traduce nella fioritura di lavori, di memorie, di proposte a cui alludevamo all'inizio.

Su un punto tuttavia non abbiamo risposto: l'apparente contraddizione tra l'attitudine degli studiosi e quella dei grandi costruttori del passato e del presente che hanno saputo realizzare opere d'avanguardia senza attendere, per eseguirle, di perfezionare le loro conoscenze sperimentali e teoriche. Ma qui la risposta è ovvia. Nessuno infatti può negare che l'intuito personale di un costruttore, appoggiato su una solida cultura tecnica, possa portarlo a superare le conoscenze teoriche del suo tempo. Ma è altrettanto chiaro che non si può contare sistematicamente sul talento eccezionale di pochi individui, la tecnica dovendo essere, per sua stessa natura, uno strumento a disposizione di tutti.

Il compito delle ricerche sperimentali e teoriche è precisamente quello di allargare il patrimonio comune di conoscenze, onde consentire un progresso generale e stabile dei metodi costruttivi.

Dopo queste premesse di carattere generale, ci sia ora consentito di illustrare, su un esempio particolarmente interessante, l'importanza dei problemi che pone il calcolo delle costruzioni in calcestruzzo quando si cerchi di seguire da vicino il comportamento di questo materiale.

Proponiamoci di studiare la legge di variazione nel tempo della spinta addizionale creata in un arco in conglomerato cementizio (armato o non armato) mediante disarmo con martinetti in chiave.

L'operazione di cui si tratta consiste essenzialmente nell'introduzione, in corrispondenza della chiave dell'arco, di una distorsione di Volterra (moto rigido relativo delle facce del taglio). In pratica, si possono verificare vari casi a seconda del dispositivo adottato. Per semplificare noi ammetteremo che l'arco sia simmetrico e che l'azione dei martinetti determini una semplice traslazione relativa delle facce del taglio in direzione orizzontale. Non sarebbe tuttavia molto difficile estendere i ragionamenti che seguono al caso di una distorsione più complessa, anche se questa fosse accompagnata, come talvolta avviene, da effetti particolari dovuti alla presenza di una cerniera provvisoria all'atto dell'entrata in azione di parte del carico permanente.

Ad una distorsione del tipo descritto corrisponde la comparsa di una spinta addizionale, passante per il baricentro elastico dell'arco, la cui intensità si può valutare molto facilmente in regime elastico ricorrendo, ad esempio, alla teoria dell'ellisse di elasticità. L'aumento di spinta così conseguito viene preso in conto dai progettisti per migliorare il comportamento dell'arco sotto l'azione delle sollecitazioni ulteriori (in particolare per quanto si riferisce all'azione del ritiro e delle variazioni di temperatura).

Da quando l'attenzione degli studiosi è stata attirata dal fenomeno del « fluage » o « viscosità » (deformazione lenta del conglomerato in presenza di una sollecitazione permanente) i calcolatori si sono tuttavia allarmati delle sostanziali modifiche che la spinta addizionale così ottenuta può subire nel tempo.

Alla base del calcolo degli effetti del fluage si pongono usualmente due ipotesi fondamentali ⁽²⁾: si ammette che il fluage sia uniforme (e cioè che, a pari condizioni di sollecitazione, esso assuma valore identico in tutti i punti della costruzione), e lineare (e cioè che la deformazione viscosa sia ad ogni istante proporzionale alla sollecitazione agente nel punto considerato).

Se si indica allora con X_0 il valore iniziale (elastico) della spinta addizionale, con $\epsilon_0(t)$ la legge di variazione nel tempo della viscosità specifica (riferita ad una sollecitazione di 1 Kg/cm^2), la legge di variazione della spinta assume, secondo la teoria del fluage lineare e uniforme, la forma:

$$X = X_0 \cdot \epsilon_0(t) \quad (1)$$

Per un calcestruzzo di cantiere l'ordine di grandezza delle costanti che figurano nella (1), desunte da esperienze di laboratorio, si aggira sui seguenti valori:

$$E = 200.000 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{per } t = +\infty \quad \epsilon_0 = \frac{0,8}{100.000} \text{ Kg}^{-1} \text{ cm}^2$$

Con questi dati la (1) si scrive per $t = +\infty$:

$$X_{\infty} = X_0 \cdot 0,2$$

Dal che si deduce che, a tempo infinito, la spinta addizionale si ridurrebbe al quinto del valore iniziale.

Tale risultato, già per se stesso assai vistoso, riesce poi ancora accentuato se, oltre a prendere in considerazione l'effetto del fluage, si tiene conto anche della variazione del modulo elastico che accompagna l'invecchiamento del calcestruzzo ⁽²⁾. Con un aumento del modulo del 70 % fra l'istante iniziale e l'infinito la caduta di spinta sale infatti al 90 % del valore iniziale. Nè tale proporzione riesce sostanzialmente ridotta quando si tenga conto della elasticità ritardata ⁽²⁾.

La conclusione che si ricava da questa indagine è ovviamente che se l'ipotesi del fluage uniforme fosse veramente attendibile la pratica del disarmo con martinetti non darebbe che dei risultati effimeri. È noto infatti che nei calcestruzzi giovani l'evoluzione del fenomeno viscoso è molto rapida. Basterebbero dunque pochi giorni o poche settimane per ridurre la spinta addizionale ad un tasso trascurabile.

Al contrario sembra ormai accertato che i numerosi archi che sono stati disarmati con l'ausilio di martinetti si comportino egregiamente, anche dopo molti anni di esercizio.

Il disaccordo fra risultati pratici e previsioni teoriche risulta poi ancor più netto se si osserva che le conclusioni cui si giunge per la spinta addizionale artificiale, ottenuta con i martinetti, valgono anche per gli effetti di adattamento naturale che si verificano in molte opere all'atto del disarmo a

⁽²⁾ Cfr. F. LEVI, *Fluage, Plasticité, Précontrainte*, Dunod, Paris, 1951.

seguito della comparsa di deformazioni plastiche nelle zone sovraccaricate. Le conseguenze statiche delle deformazioni plastiche così ottenute, assimilabili anch'esse all'effetto di una distorsione di Volterra, dovrebbero infatti subire la riduzione dovuta al fluage in proporzioni analoghe a quelle dianzi prospettate ⁽³⁾.

Da tutto ciò deriva il dubbio che le ipotesi poste alla base del nostro studio comportino qualche grave inesattezza. Donde l'opportunità di rivedere la posizione del problema alla luce delle più aggiornate nozioni sul comportamento viscoso del conglomerato.

Ora, fra i fattori che influiscono sul fluage, sembra che l'ipotesi del fluage uniforme ne trascuri alcune che possono assumere, nel caso degli archi, una importanza notevole: vogliamo alludere all'influenza delle dimensioni del pezzo e a quella dell'esposizione alle condizioni atmosferiche.

Non è raro infatti che le dimensioni lineari della sezione trasversale di un arco subiscano variazioni sostanziali: molto sovente lo spessore della sezione di imposta supera del 60-70 %, e anche più, quello della sezione in chiave. A questo si aggiunge che spesso le condizioni di esposizione al sole e all'umidità delle varie parti dell'arco sono sostanzialmente diverse. Basta pensare al caso di un arco cellulare nel quale l'imposta è necessariamente protetta dalla essiccazione per la sua stessa conformazione, oppure al caso di un arco avente le sue spalle profondamente incassate nella valle e la chiave esposta all'azione combinata del vento e del sole.

Se allora si osservano le fig. 1 e 2 ⁽⁴⁾, nelle quali l'influenza sul fluage delle dimensioni trasversali e dell'ambiente di conservazione sono chiaramente illustrate, non ci si può esimere dal pensare che lo studio del problema che ci occupa debba essere ripreso ammettendo che l'entità del fluage specifico sia assai più forte in chiave che all'imposta.

Non disponendo di dati sperimentali sufficientemente precisi, noi ci limiteremo ad uno studio di massima riferito ad un esempio particolare. Nella nostra trattazione noi conserveremo inoltre l'ipotesi del « fluage lineare », il che ci autorizzerà ad appoggiarci ancora sul principio di sovrapposizione. D'altra parte, per fissare un punto di partenza, noi osserveremo che i dati sulla misura del fluage che

⁽³⁾ In realtà, è stato dimostrato che le zone plasticizzate del conglomerato subiscono nel tempo una deformazione viscosa più segnata. Si ha dunque una « ricarica » della distorsione plastica. Non sembra però che tale fenomeno possa giustificare da solo la persuasione che gli effetti di adattamento plastico si conservino nel tempo (Cfr. C. CASTIGLIA, *I fenomeni di adattamento nei calcestruzzi giovani*, Atti e Rassegna Tecnica, n. 1, 1951).

⁽⁴⁾ Queste figure sono ricavate da un recente studio del LYSE: *Flow of concrete*. Bulletin de l'Association Internationale des Laboratoires d'Essai, n. 5, 1951. Esse figurano peraltro in: *Plastic flow of concrete under sustained load*, di H. E. DAVIS, R. E. DAVIS, J. S. HAMILTON, Proc. of the A.S.T.M., voi. 34, p. 354, 1934.

Fig. 1. - Influenza della forma del pezzo sulla viscosità specifica.

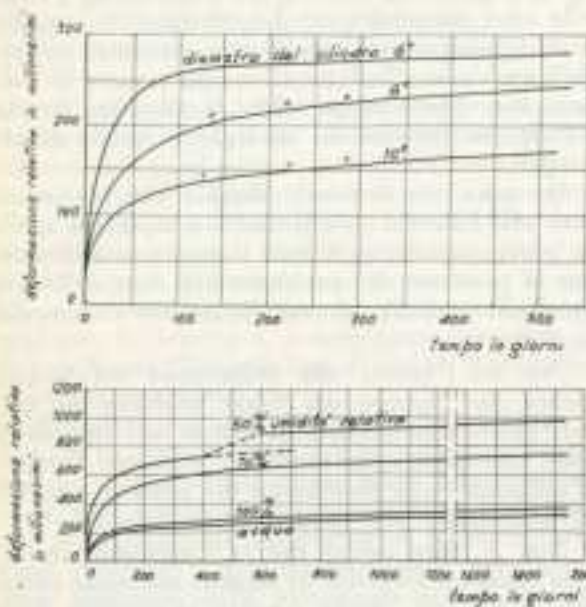


Fig. 2. - Influenza dell'umidità dell'ambiente di conservazione sulla viscosità specifica.

si trovano nella bibliografia sono stati tutti desunti da misure effettuate su provini di piccole dimensioni; tali dati noi potremo dunque considerarli validi per la chiave dell'arco, essendo invece inteso che per tutti gli altri conci la viscosità specifica assumerà valori più bassi.

Sia allora l'arco raffigurato nella fig. 3, il quale, per ipotesi, si trova, all'istante iniziale, soggetto ad una distorsione consistente in una traslazione relativa orizzontale (positiva) delle facce del taglio in chiave. A tale distorsione corrisponde evidentemente una spinta addizionale rivolta verso l'interno che caratterizza il regime statico in campo elastico.

Se ci si limita a tener conto del momento flettente e dello sforzo normale, e se si prendono come assi di riferimento gli assi dell'ellisse centrale di elasticità di tutto l'arco, il valore della spinta Z risulta dall'equazione:

$$\int_0^L N \frac{\partial N}{\partial Z} \frac{ds}{EA} + \int_0^L M \frac{\partial M}{\partial Z} \frac{ds}{EI} + \int_0^L \lambda \frac{\partial N}{\partial Z} ds + \int_0^L \mu \frac{\partial M}{\partial Z} ds = 0$$

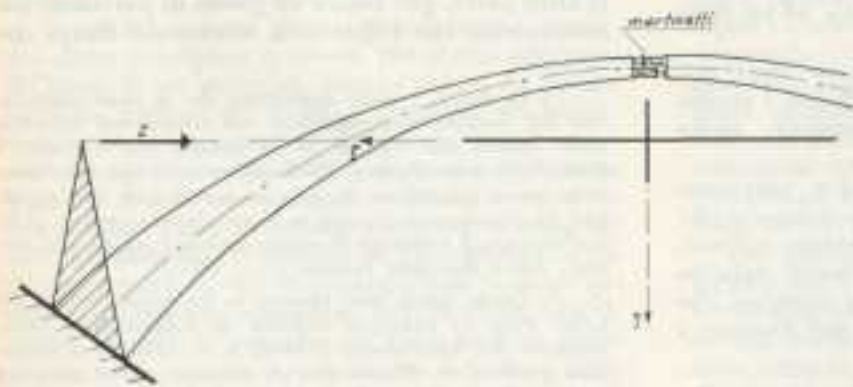


Fig. 3.

dove λ e μ rappresentano la deformazione longitudinale impressa e la curvatura impressa nel punto generico ⁽³⁾.

Nel caso di un arco ribassato, e in assenza di forze esterne, si può porre:

$$\frac{\partial N}{\partial Z} = 1 \quad \frac{\partial M}{\partial Z} = -\lambda$$

$$M = X + \lambda Z - Zx \quad N = Z$$

per cui viene:

$$Z = \frac{\int_0^L \mu \eta ds - \int_0^L \lambda ds}{\int_0^L \lambda^2 \frac{ds}{EI} + \int_0^L \frac{ds}{EA}}$$

Su questa formula si vede immediatamente che la distorsione data dai martinetti, caratterizzata in chiave da $\lambda > 0$, dà luogo ad una spinta negativa (e cioè diretta verso l'interno dell'arco). Vediamo altresì che l'effetto di un fluage uniforme si traduce:

a) nella comparsa tutto lungo l'arco di $\lambda < 0$; il che produce una caduta di spinta; b) nella comparsa nei vari conci di curvature impresse (μ affini alle curvature elastiche preesistenti; donde una ulteriore caduta di spinta poichè gli addendi dell'integrale $\int \mu \eta ds$ risultano positivi fritto lungo l'arco. Non sarebbe anzi difficile, sulla base dell'ipotesi del fluage uniforme, ricavare dalla (2) la legge di variazione nel tempo della Z , ritrovando così nel caso particolare la formula generale (1) e dimostrando altresì che l'intervento del fluage uniforme mantiene lo stato di tensione sempre simile a se stesso (le componenti X e Y rimanendo sempre identicamente nulle).

Si tratta ora d'introdurre la nuova ipotesi del fluage variabile da concio a concio. Per questo, appoggiandoci ancora una volta sul principio di sovrapposizione, noi calcoleremo in un primo tempo la caduta di spinta supponendo che il fluage assuma tutto lungo l'arco valore costante eguale a

⁽³⁾ Cfr. G. COLONNETTI, *Scienza delle Costruzioni*, Einaudi 1948, opera di cui abbiamo adottato le notazioni.

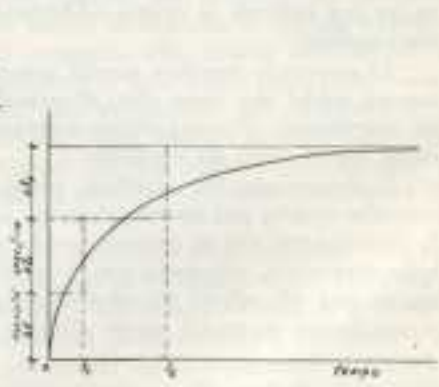


Fig. 4.

quello che spetta al concio in chiave. Dopodichè terremo conto della diminuzione della viscosità specifica che si verifica nei conci, a mano a mano che ci si allontana dalla chiave, ammettendo la comparsa di un fluage negativo, il cui valore assoluto, nullo in chiave, andrà crescendo verso l'imposta.

La (2) ci consentirà allora di valutare in via qualitativa l'effetto di questo fluage differenziale. Si vede infatti:

a) che la comparsa di un fluage negativo fa nascere delle $\lambda > 0$ in tutti i conci, escluso quello in chiave; tale fenomeno si traduce dunque in un aumento di spinta;

b) che il fluage differenziale negativo fa nascere ovunque (esclusa la chiave) delle λ di segno opposto a quello del momento flettente agente nel punto che si considera. Si avranno perciò delle $\mu > 0$ in prossimità della chiave, delle $\mu < 0$ verso l'imposta. Alle une come alle altre corrispondono nell'integrale $\int \mu \eta ds$ degli addendi negativi che conducono ad un ulteriore aumento di spinta ⁽⁶⁾.

In definitiva l'effetto del fluage differenziale si traduce dunque sotto tutti gli aspetti in un aumento della spinta, aumento che contrasta la caduta che si avrebbe in regime di fluage uniforme.

Come abbiamo già osservato, le nostre conoscenze sperimentali sono troppo limitate per consentirci di valutare facilmente l'importanza relativa dei due opposti fenomeni. L'entità notevole delle variazioni della viscosità specifica, messe in luce dai diagrammi n. 1 e 2 riportati, ed il meccanismo stesso attraverso il quale si esplica l'effetto statico del fluage differenziale, il quale comporta la comparsa di curvature impresse, sembrano tuttavia giustificare l'opinione che il fenomeno possa assumere una importanza di primo piano.

D'altronde, appena si disporrà di dati numerici attendibili, non sarà difficile portare il problema sul piano quantitativo ricorrendo al seguente procedimento approssimato.

Suddiviso in conci l'arco esaminato, si supponga infatti di aver fissato la legge di variazione nel tempo della viscosità specifica che compete al concio generico (fig. 4). Alla curva rappresentativa reale si potrà, in prima approssimazione, sostituire un andamento a gradini caratterizzato, ad esempio, da tre scatti successivi di entità $\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2, \Delta \epsilon_3$. Ripetuta l'operazione per tutti i conci, per ciascuno dei quali l'ampiezza degli scatti sarà fissata adottando gli stessi intervalli di tempo, si potrà

⁽⁶⁾ A rigore bisognerebbe anche notare che le μ danno ora luogo ad un piccolo spostamento della linea d'azione della spinta.

allora procedere al calcolo elastico-viscoso del nostro arco soggetto a distorsione in chiave mediante le seguenti operazioni:

a) calcolo dell'effetto della distorsione provocata dai martinetti in regime puramente elastico e tracciamento della curva delle pressioni corrispondente (costituita da una retta orizzontale coincidente con l'asse orizzontale dell'ellisse di elasticità).

6) Determinazione delle linee di influenza delle reazioni d'imposta, riferite agli assi dell'ellisse di elasticità, per distorsioni viaggianti ⁽⁷⁾ ⁽⁸⁾. Tale operazione consiste notoriamente nel tracciare i diagrammi del momento flettente e dello sforzo normale determinati nell'arco da certe distorsioni unitarie opportunamente scelte.

e) Calcolo delle A e λx che si verificano nei vari conci, supposti soggetti alle sollecitazioni del regime elastico precedentemente studiato, per effetto della prima frazione $A \epsilon_i$ della deformazione viscosa specifica.

d) Valutazione, a mezzo delle linee di influenza delle distorsioni viaggianti, dell'effetto statico delle A , λx , così calcolate.

e) Tracciamento della nuova curva delle pressioni (consistente questa volta di una retta orizzontale non baricentrica) e ripetizione delle operazioni precedenti per le successive frazioni della viscosità.

Un calcolo così condotto risulta assai spedito, ma evidentemente esso non può condurre che a dei risultati approssimati. Data però l'incertezza dei dati a disposizione sulla misura del fluage, ci sembra lecito considerare il procedimento come sufficientemente preciso in vista delle applicazioni tecniche.

Se non andiamo errati l'esempio che abbiamo esposto conferma assai bene le affermazioni di carattere generale da noi fatte all'inizio: esso mette infatti bene in luce la complessità dei problemi che si pongono al calcolatore delle costruzioni in calcestruzzo, lasciando altresì intravedere la possibilità di eseguire calcoli via via più aderenti alla realtà fisica pur di affinare sempre più i metodi d'indagine sperimentali e teorici.

Franco Levi

⁽⁷⁾ G. COLONNETTI, *NUOVO contributo alla teoria delle coazioni elastiche*, Rend. Ac. Lincei, vol. VIII, 1928, II° sem.

⁽⁸⁾ F. LEVI, *Sugli stati di coazione determinati in un sistema elastico per superamento dei limiti di elasticità*, Rend. Ac. Lincei, vol. XXVII, 1938, I° sem.