

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

DA PAG. 345 A PAG. 406 (FASC. DI OTT. E NOV.) SONO RIPORTATE LE RELAZIONI GENERALI DEL
2° CONGRESSO DELLA "FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE"
(AMSTERDAM - 28 AGOSTO - 3 SETTEMBRE 1955)

L'Istituto di Scienza delle Costruzioni del Politecnico di Torino, che da tanti anni si occupa attivamente dei problemi attinenti all'introduzione di sforzi artificiali nelle costruzioni, in collaborazione con il Centro di Studio sugli stati di Coazione del Consiglio Nazionale delle Ricerche, è stato ben lieto di accogliere l'invito della Direzione della Rivista per la realizzazione di un numero dedicato al cemento armato precompresso.

Volendo presentare un quadro aggiornato della teoria e della tecnica della precompressione, abbiamo stimato che un'occasione unica ci veniva offerta dal recente svolgimento del secondo Congresso della Federazione Internazionale del Cemento Armato Precompresso, in occasione del quale tutti i problemi più importanti posti dalla nuova tecnica erano stati discussi a fondo dagli specialisti più qualificati. Abbiamo quindi riunito, nelle pagine che seguono, i rapporti generali e le comunicazioni riassuntive che sono servite di base ai lavori del Congresso. In una nota introduttiva abbiamo inoltre cercato di riassumere brevemente i risultati dei dibattiti che si sono svolti sui vari argomenti durante le sedute,

delineando altresì le più importanti conclusioni che ci sembrano scaturite dalle discussioni.

Per completare il quadro della situazione, con particolare riferimento alle condizioni esistenti nel nostro Paese, abbiamo stimato opportuno concludere questi fascicoli con la presentazione del testo delle « Norme per l'impiego delle strutture in cemento armato precompresso » recentemente messo a punto da una apposita Commissione istituita dal Ministero dei Lavori Pubblici.

Il testo delle Norme e quello delle Note ad esse allegate, sono preceduti da un articolo introduttivo nel quale, fatto il punto sul problema della regolamentazione, si chiariscono i singoli argomenti trattati.

Ci sia consentito di esprimere l'augurio che l'attuale pubblicazione, nel mettere a disposizione degli specialisti e degli utilizzatori le nozioni più aggiornate sui recenti sviluppi del cemento armato precompresso, contribuisca ad incrementarne viepiù il campo di applicazione, onde l'Italia possa conservare, anche in questo settore, la posizione di primo piano che i suoi studiosi e tecnici hanno saputo sin qui assicurarle.

Franco Levi

Il 2° Congresso della "Fédération Internationale de la précontrainte"

(Amsterdam - 28 agosto - 3 settembre 1955)

L'Autore svolge una rassegna dei temi trattati al 2° Congresso della F.I.P. e pone in rilievo le conclusioni raggiunte nel corso delle discussioni ed indica l'orientamento che ne deriva per gli studi futuri.

Più di mille specialisti provenienti dai cinque continenti si sono riuniti nei giorni scorsi ad Amsterdam per partecipare ad un congresso che ha definitivamente consacrato l'avvento del cemento armato precompresso fra i metodi costruttivi di normale impiego.

Nata in Francia verso il 1930, la nuova tecnica ha dovuto attraversare un periodo di gestazione di quasi venti anni prima di uscire dalla fase di avviamento durante la quale essa sembrò conservare a lungo il carattere di una ingegnosa curiosità. Dal 1949-50 il suo sviluppo è invece tanto impetuoso da sorprendere anche coloro che ne erano stati sin dall'inizio i più tenaci assertori. Si è giunti così all'attuale situazione caratterizzata dalla molteplicità delle applicazioni nei più diversi paesi, dal rapido evolversi degli studi teorici e delle nozioni

sperimentali, infine dalla comparsa dei primi regolamenti destinati a codificare le condizioni d'impiego delle costruzioni precomprese.

Si comprende quindi l'importanza assunta dal Congresso di Amsterdam al quale hanno partecipato, a fianco degli specialisti dei Paesi d'Europa Occidentale, studiosi delle più svariate provenienze, dagli Stati Uniti all'Unione Sovietica, dal Giappone e dalla Cina all'America del Sud.

I temi fissati per le discussioni, accuratamente prescelti dagli organizzatori, si riferivano ai problemi essenziali posti dal cemento armato precompresso nel campo degli studi e delle applicazioni. Essi erano:

Ia - Influenza dell'iniezione dei cavi e degli ancoraggi sul comportamento degli elementi pre-

I testi dei rapporti generali che seguono sono stati tradotti dal francese o dal tedesco a cura dell'ing. A. M. Sassi-Perino.

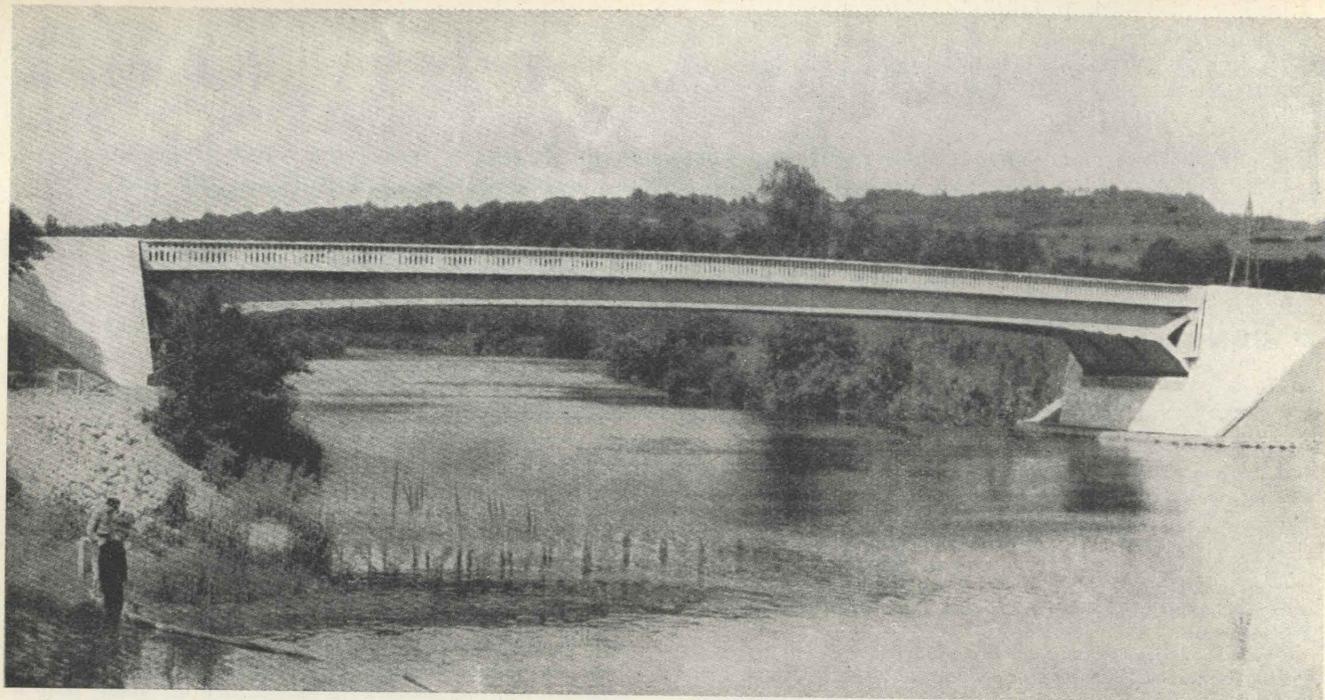


Fig. 1 - Il ponte di Luzaucy sulla Marna. Struttura iperstatica costruita per elementi. Luce 54 m. Una delle prime notevoli realizzazioni del Freyssinet. Ha servito di modello per l'esecuzione di altri cinque ponti, fra i quali quello di Erbly di 74 m. di luce.

compressi (relatore generale: Kelopuu - Finlandia).

Ib - Il problema degli acciai (relatore generale: Bruggeling - Olanda).

II - Progressi nella prefabbricazione di elementi precompressi e nella solidarizzazione in cantiere di elementi prefabbricati mediante precompressione (relatore generale: New - Inghilterra).

IIIa - Distribuzione dei momenti nelle costruzioni precomprese iperstatiche al di là della fase elastica (relatore generale; Guyon - Francia).

IIIb - Influenza della plasticità sulla resistenza e l'instabilità di volte sottili precomprese (relatore generale: Levi - Italia).

Erano inoltre state predisposte due indagini complementari riguardanti: a) L'analisi comparativa delle prescrizioni regolamentari nei vari Paesi (relatore: Paduart - Belgio); b) I vantaggi economici del c. a. precompresso (relatore: Hill - Inghilterra).

Esamineremo successivamente i vari argomenti cercando per ciascuno di essi di far risaltare i risultati più importanti che ci sembrano scaturire dai lavori del Congresso.

Tema Ia. - Su questo argomento di natura prevalentemente tecnologica, più che una discussione vera e propria, si è avuto un confronto fra vari procedimenti ed una messa a punto di nozioni di carattere pratico.

I convenuti si sono trovati unanimi nel riconoscere che la buona riuscita dell'iniezione dei cavi assume importanza fondamentale in quanto assicura la protezione degli acciai dalle azioni corrosive e garantisce, attraverso la creazione di una efficace aderenza fra calcestruzzo e armatura, un compor-

tamento monolitico della struttura. In particolare è ormai generalmente ammesso che, con cavi non iniettati, si ha una riduzione del carico di rottura dell'ordine del 10-20% (vedansi in proposito le comunicazioni del belga Magnel, dell'italiano Rossetti del Centro Studi di Torino e della S.T.U.V.O. olandese). Caratteristiche essenziali della malta per iniezioni devono essere: buona fluidità, scarsa segregabilità, ritiro ridotto, buona aderenza, resistenza alle temperature anormali, assenza di prodotti corrosivi. La composizione più adatta degli impasti varia a seconda delle condizioni di impiego (dimensioni dello spazio disponibile, condizioni climatiche, lunghezza dei cavi, ecc.). Risultati soddisfacenti sono comunque stati ottenuti con miscele fortemente dosate di cemento e sabbie finissime (talvolta sostituite con trass o bentonite) con aggiunta di agenti dispersivi. Il rapporto acqua-cemento deve essere mantenuto più basso possibile. In genere si preconizza l'impiego di miscelatori molto energici e si raccomanda, soprattutto per cavi curvi di grande lunghezza, di scegliere accuratamente la posizione dei fori d'iniezione ad evitare dannose accumulazioni d'acqua.

Per quanto si riferisce ai sistemi di ancoraggio, è risultato al Congresso che esistono ormai molte decine di sistemi che offrono sicure garanzie per il bloccaggio delle armature. Alcune comunicazioni (fra le quali si distingue il rapporto redatto dal gruppo di studio olandese sul cemento armato precompresso) hanno tuttavia insistito nel precisare i requisiti cui devono rispondere i sistemi di messa in tensione e bloccaggio. Gli ancoraggi non devono danneggiare localmente l'armatura; per ogni dispositivo si deve misurare l'entità dell'assestamento che si verifica all'atto della soppressione della pressione

nel martinetto, come pure l'entità dell'attrito che si sviluppa nell'attraversamento del cono di ancoraggio e nell'interno del martinetto.

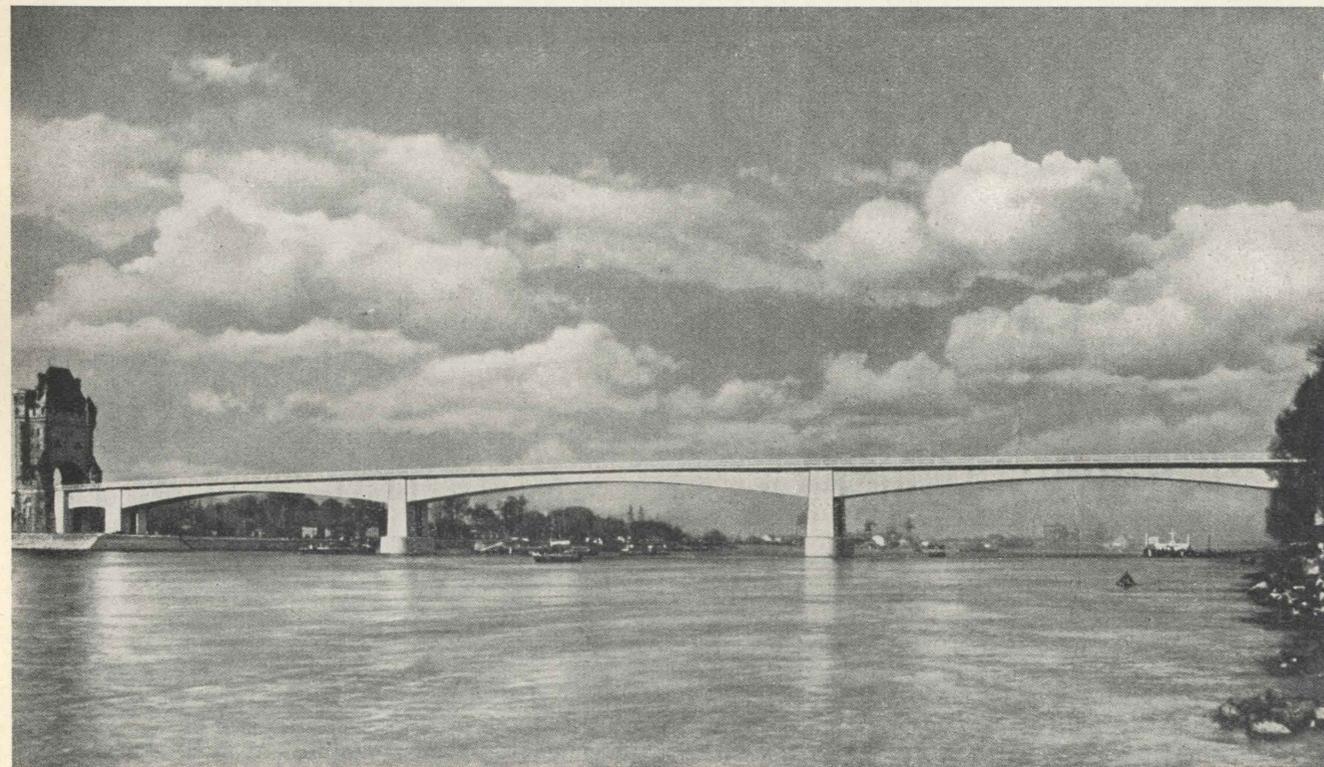
Tema Ib. - In materia di acciai, i punti sui quali si è fissata l'attenzione del Congresso sono stati soprattutto i seguenti: opportunità o meno di fissare un limite massimo della tensione preventiva, studio del rilassamento, problema della fragilità. Sul primo punto si è svolta una vivace discussione fra i rappresentanti della Francia (capeggiati dallo stesso Edouard Freyssinet, inventore del cemento armato precompresso) e gli specialisti di altri Paesi (Paduart e de Strycker - Belgio; Levi - Italia; Bruggeling - Olanda). I primi hanno sostenuto l'opportunità di tendere gli acciai il più possibile, asserendo che un aumento della tensione iniziale si traduce sempre in un incremento dei margini di sicurezza. I secondi hanno sottolineato invece l'opportunità di limitare il tasso di lavoro dell'acciaio per facilitare il controllo delle operazioni di messa in tensione e per mettersi a riparo dai pericoli di corrosione, fragilità sotto sforzo e di rottura per fatica ondulata. Su questo punto si nota d'altronde una netta discordanza fra il regolamento francese, che non contempla nessun limite del tasso di lavoro, e quello di tutti gli altri paesi. Da notare però che il contrasto fra le due tesi è assai più netto in campo teorico che in campo applicativo. Le tensioni adottate in Francia non sono infatti molto diverse da quelle impiegate negli altri Paesi. Questa circostanza, ha spiegato il Freyssinet nel suo discorso di chiusura del Congresso, è dovuta al fatto che la sezione di acciaio è quasi sempre determinata dalla considerazione della sicurezza alla rottura.

In materia di rilassamento, i dati sperimentali disponibili sono ormai abbastanza estesi (vedansi memorie di Canta - Inghilterra; Levi - Italia; de Strycker - Belgio). Sembra quindi lecito affermare che le nozioni acquisite siano tali da fornire indicazioni sufficienti agli effetti pratici. Rimangono invece da proseguire gli studi intesi a precisare ulteriormente l'andamento del fenomeno nel tempo, le relazioni fra rilassamento e proprietà istantanee, ecc.

Meno chiare le conclusioni relative alla fragilità degli acciai duri tesi a tassi elevati. Al Congresso sono stati forniti dati interessanti su alcuni fenomeni di corrosione osservati in vari paesi. Non sembra però che gli specialisti siano tuttora in grado di spiegare tutti i casi di rottura ritardata che si sono verificati. Manca in particolare un metodo di prova atto a caratterizzare l'esistenza nell'acciaio di tensioni interne pericolose; nè vi è d'altra parte unanimità di consensi sui metodi che sono stati proposti per valutare la tendenza alla corrosione. Su questo argomento dunque gli studi dovranno essere proseguiti.

Tema II. - Lo svolgimento di questo tema ha dato modo a numerosi congressisti d'illustrare lo sviluppo raggiunto nel loro paese dalla tecnica della prefabbricazione degli elementi precompressi e dai procedimenti di unione di elementi prefabbricati mediante cavi pretesi. Ne è risultato un quadro imponente, sia per l'estensione delle applicazioni descritte, che per l'interesse dei risultati conseguiti. In genere gli elementi prefabbricati sono del tipo « a fili aderenti » fabbricati su grandi banchi. Fanno eccezione le realizzazioni sovietiche che contem-

Fig. 2 - Il ponte dei Nibelunghi a Worms sul Reno. Costruito a sbalzo a partire dalle pile. Tre luci di 104 - 114 - 101 metri. Funzionamento isostatico sotto il peso proprio, iperstatico per i carichi accidentali (progetto Finsterwalder, sistema Dywidag).



plano macchine speciali mediante le quali l'armatura tesa viene avvolta su degli elementi precedentemente induriti e gli analoghi procedimenti usati per la precompressione di grandi condotte forzate (vedasi l'intervento del prof. Turazza - Italia). La produzione mondiale annua in questo campo si deve ormai esprimere in milioni di metri quadrati di solai ed in milioni di metri lineari di travi, pali, traversine ferroviarie, canalette d'irrigazione, tubi, ecc. Altrettanto vistosi i risultati conseguiti mediante impiego sistematico della precompressione quale mezzo d'opera atto ad assicurare la monoliticità di costruzioni formate dall'unione di elementi staccati. In questo campo l'ingegnosa dei costruttori si è dimostrata inesauribile. Citeremo: il procedimento di precompressione trasversale delle strutture miste (Pelle e Bruggeling - Olanda); le unioni di travi principali e secondarie mediante aste filettate pretese (Magnel e Robin - Belgio); le realizzazioni finlandesi di capriate a tre cerniere con tirante preteso e di hangars per aeroporto costituiti quasi interamente con elementi prefabbricati e precompressi; l'originale impiego di cavi per il rinforzo di alcune parti dell'Arena di Verona (Morandi - Italia); le costruzioni industriali e sportive citate da Bloch (Francia); le applicazioni in campo edile di Baretts (Francia); i procedimenti ingegnosi usati in Olanda per assicurare la continuità delle travi da ponte (Bouvy, Janssonius, Scherpbier); le numerose e svariate applicazioni inglesi e sovietiche. Infine non si può omettere di segnalare l'estensione raggiunta quasi dovunque dall'impiego delle costruzioni miste formate dall'unione di elementi precompressi con elementi non precompressi gettati in opera.

Tema IIIa. - È questo probabilmente l'argomento che ha dato luogo alle discussioni più interessanti, quello peraltro che ha consentito il raggiungimento delle conclusioni di maggior rilievo. È nota l'importanza che ha assunto negli ultimi anni la questione del calcolo a rottura delle costruzioni (limit design). Scopo degli studi in questo campo è di valutare la portanza delle opere tenendo conto dei favorevoli effetti di redistribuzione delle sollecitazioni che si verificano al di là della fase puramente elastica. Il problema interessa tutti i costruttori. Esso assume però particolare importanza nell'ambito del cemento armato precompresso a causa delle particolari difficoltà cui si urta in questo campo il proporzionamento delle strutture iperstatiche. La discussione svoltasi ad Amsterdam è stata in un certo senso il proseguimento di quella che si era avuta, sullo stesso tema, al primo Congresso di Londra. I punti dibattuti erano sostanzialmente i seguenti:

— Entità dei fenomeni di redistribuzione che precedono la fessurazione.

— Grado di adattamento a rottura (e cioè possibilità o meno di conseguire la cosiddetta « eguaglianza dei momenti » prevista dalla teoria delle cerniere plastiche).

Sul primo punto esisteva in apparenza un certo contrasto fra una relazione del compianto prof. Magnel ed una nota presentata al Congresso dall'ing. Macchi del Centro di Torino. Si è constatato in realtà che si trattava, più che altro, di una disparità di giudizio sull'importanza pratica del fenomeno. Nelle due serie di esperienze su cui si fondavano gli interventi citati, condotte ambedue su travi continue, si è constatato che gli adattamenti provocavano un aumento dell'ordine del 10% del valore del momento di fessurazione. Il professor Magnel, confrontando questo aumento a quelli assai più vistosi che taluni sperimentatori avevano creduto di intravedere, lo considerava modesto. Il Macchi faceva tuttavia osservare che un incremento di quest'ordine non può considerarsi trascurabile poichè esso consentirebbe un aumento quasi equivalente del momento flettente ammissibile. La discussione ha consentito peraltro di precisare alcune nozioni fondamentali. In primo luogo è risultata chiara l'opportunità di distinguere bene, nell'interpretazione del fenomeno, fra effetto dell'adattamento « nella sezione » ed effetto dell'adattamento « fra sezioni ». Il relatore Guyon ha inoltre espresso l'opinione, condivisa dalla maggior parte dei convenuti, che invece di parlare di una vera e propria « plasticità in trazione » che preceda la fessurazione visibile, convenga ammettere l'esistenza di una « microfessurazione invisibile » (la quale ultima, tuttavia, avrebbe, agli effetti iperstatici, influenza analoga a quella di deformazioni plastiche effettive). Ci sia peraltro consentito di rilevare che questa opinione era stata da noi espressa nel 1953 a seguito di esperienze condotte su una lastra su appoggio elastico continuo.

Sul secondo punto le tesi in presenza rappresentavano in un certo senso le due scuole fra le quali si dividono ormai da molti anni gli studiosi di equilibri elasto-plastici. Da un lato i fautori della teoria delle cerniere plastiche, dall'altra i partigiani di uno studio della graduale evoluzione del fenomeno di adattamento. A sostegno della teoria delle cerniere plastiche gli inglesi Morice e Lewis presentavano i risultati ottenuti in una serie di ben 28 prove su travi continue a due campate di dimensioni sempre identiche, ma con tracciati del cavo anche molto diversi fra loro: i carichi di rottura ottenuti risultavano infatti quasi costanti, come vuole la teoria suddetta. Al contrario i dati presentati dal Magnel (relativi a quattro travi continue a tre campate) e quelli del Centro di Torino (Levi-Macchi) sembravano dimostrare che in taluni casi non è possibile raggiungere l'egualizzazione; d'onde risulterebbe, appoggiandosi sulla teoria delle cerniere plastiche, il pericolo di sopravvalutare il carico di rottura. Aggiungiamo che Levi e Macchi convalidavano al Congresso il loro punto di vista rilevando, in due successivi interventi, che una parte almeno dei risultati ottenuti in Inghilterra non rientravano, per varie ragioni, nel quadro della teoria delle cerniere plastiche.

Nel confrontare i vari punti di vista il relatore Guyon, in una sintesi molto efficace, ha mostrato che, anche in questo campo, il contrasto fra le av-

verse opinioni si attenua sensibilmente se si considera il problema dal punto di vista pratico. Egli ammette che la cura con la quale sono state eseguite le esperienze di Torino permette di escludere che i risultati ivi ottenuti abbiano carattere accidentale.

Ne deduce quindi che il metodo semplificato delle cerniere plastiche non possa essere accettato senza restrizioni. Il Guyon osserva tuttavia che le nozioni ormai acquisite consentono di fare utili previsioni sui limiti entro i quali tali restrizioni dovranno gio-

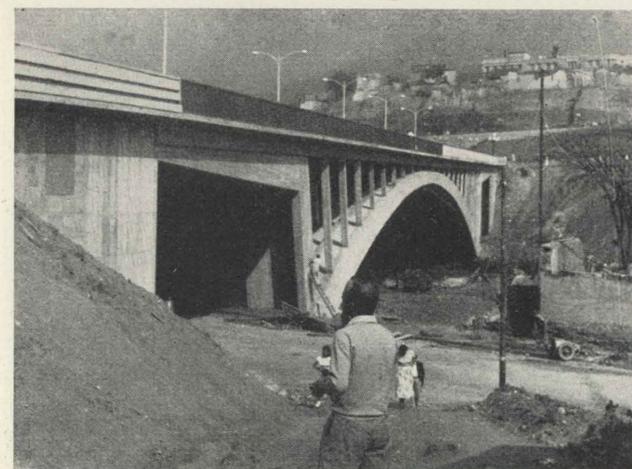
Fig. 3 - Il ponte dei Nibelunghi a Worms in fase di costruzione. Lo sbalzo, corrispondente a mezza campata centrale, misura 57 metri.



care. In particolare è ormai assodato che la « egualizzazione » viene praticamente raggiunta quando l'effetto di redistribuzione necessario per conseguirla è di scarsa entità. Nella sua relazione il Guyon sottolinea peraltro molto giustamente l'importanza che deve assumere in questo campo la considerazione della forma della legge momento-curvatura e l'opportunità di proseguire lo studio sperimentale fino a rottura. In proposito egli ha presentato al Congresso alcuni suoi risultati sperimentali, unitamente ai dati ricavati da un lavoro inglese ancora inedito. Secondo questa documentazione, la curva reale, lungi dal presentare l'andamento a bilatera che si considera nella teoria delle cerniere plastiche, comporterebbe, dopo la prima fase elastica, un tratto incurvato con pendenza gradualmente decrescente. Mancano invece nozioni precise sulla estensione dell'ultimo tratto, pressochè orizzontale, del diagramma. La forma reale della legge risulterebbe così assai vicina a quella « trilineare » da noi assunta nei nostri lavori teorici in argomento. Rimane comunque che le ricerche sperimentali in questo campo dovranno essere proseguite ponendo particolare attenzione allo studio dell'ultima parte della curva.

Ultimo punto sul quale si è soffermata la discussione: la possibilità che nei sistemi complessi l'intervento di deformazioni anelastiche determini la comparsa, al crescere del carico, di vari stadi successivi, caratterizzati ciascuno dall'intervento di un diverso assetto dei vincoli iperstatici. Tale eventualità è stata segnalata dallo stesso Guyon, e dal Lebel in base a risultati ottenuti su lastre piane, dal russo Gwozdev con riferimento a delle esperienze eseguite su telai elastici. Nel segnalare che il fenomeno era stato previsto in sede teorica dal Colonnetti sin dal 1938, in occasione di studi sul comportamento elastoplastico di travi incastrate, noi abbiamo espresso l'opinione che il passaggio da una « definizione elastica » alla successiva sia sempre provocato dall'intervento di distorsioni anelastiche che hanno per effetto di chiamare in causa nuovi vincoli iperstatici. Per evitare imprecisioni di linguaggio, che potrebbero poi tra-

Fig. 4 - Ponte ad arco a Caracas (Venezuela). Comporta una precompressione locale alle imposte (sistema Morandi).



dursi in confusioni d'idee, noi pensiamo quindi che il problema debba sempre essere analizzato con l'ausilio della teoria delle coazioni, facendo una netta distinzione fra effetto delle forze esterne ad effetto delle distorsioni. Sulla possibilità di effettuare tale distinzione il Guyon sembra, a dir vero, esprimere dei dubbi quando afferma che, nel passaggio da una « definizione » all'altra, non sempre le deformazioni anelastiche risultano materialmente percepibili. Noi abbiamo quindi ritenuto utile ricordare che la deformazione totale in un punto di un solido è, generalmente parlando, la somma di due termini: una deformazione elastica, una deformazione anelastica. Può quindi accadere che la deformazione di un tipo mascheri l'altra. Tipico il caso di strutture in regime elastico-viscoso soggette ad una distorsione costante nelle quali, con passare del tempo, le deformazioni viscoso si sostituiscono gradualmente a quelle elastiche, ciò che determina un sostanziale mutamento del regime statico, mentre la deformazione totale rimane invariata (*).

Tema IIIb. - Il calcolo elasto-plastico delle volte sottili conduce necessariamente a considerare queste strutture come delle costruzioni complesse capaci di presentare, al crescere del carico, varie « definizioni » successive. Su questo concetto si fondano praticamente i metodi di calcolo a rottura di Lundgren e Baker che sono analizzati nel nostro rapporto generale. Nel nostro esposto noi abbiamo tuttavia osservato che, a nostro avviso, i procedimenti proposti da questi Autori riposano su delle ipotesi troppo astratte. Ad esempio il metodo di Lundgren fa molto spesso appello al principio secondo il quale la plasticità dovrebbe assicurare in ogni caso l'utilizzazione integrale della capacità resistente dei materiali impiegati; il che non è evidentemente dimostrabile. Secondo il nostro punto di vista quindi, lo studio di questo problema dovrebbe essere ripreso seguendo i concetti enunciati per i sistemi complessi: messa in evidenza delle successive « definizioni » mediante una analisi dell'evoluzione dei fenomeni di adattamento, studio di ciascuna fase attraverso la messa in conto delle distorsioni che la caratterizzano. I congressisti si sono trovati concordi nell'approvare la proposta, contenuta nel rapporto generale, di una suddivisione del lavoro fra i vari laboratori specializzati. Gli studi, condotti su modelli, dovrebbero prefiggersi lo scopo di confrontare i dati sperimentali con le previsioni teoriche derivanti dai concetti sopra esposti.

Per quanto si riferisce ai fenomeni d'instabilità, il Congresso non ha potuto che constatare l'insufficienza delle nozioni disponibili, in particolare per ciò che riguarda l'instabilità in campo elasto-plastico. Nel corso delle sedute gli inglesi Tottenham e Hajnal-Konyi hanno sottolineato l'importanza che assume in questo campo il fluage del calcestruzzo. Il relatore si è associato a questa opinione ed ha riconfermato la proposta, contenuta nel rapporto generale, d'istituire prove su modelli in materie plastiche.

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

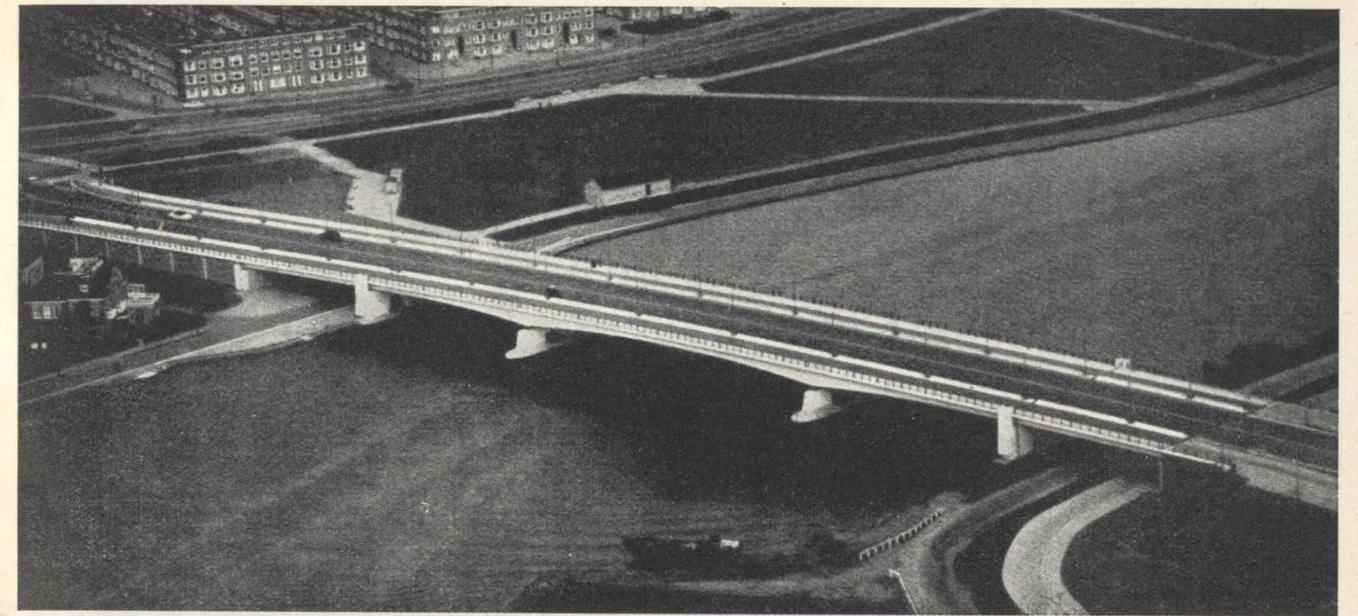


Fig. 5 - Ponte sull'Amstel ad Amsterdam. Travate continue di 34; 56,5; 34 metri (sistema Freyssinet).

Analisi comparativa dei Regolamenti.

La comunicazione preparata dal belga Paduart è stata integrata da uno studio dell'egiziano Nasr (assistente presso l'Università di Monaco).

Sono state esaminate le norme definitive o provvisorie di una decina di paesi. Fra i vari testi si riscontrano differenze anche notevoli, ma il relatore osserva giustamente che le discordanze riguardano più la forma di presentazione che il fondo degli argomenti trattati. I concetti essenziali della regolamentazione sono infatti abbastanza uniformi. (Fra le poche eccezioni abbiamo già segnalato il problema della tensione limite degli acciai). Vi sono invece differenze notevoli nella presentazione, nelle definizioni, infine nei valori numerici dei singoli limiti. Osserva il Paduart che tali variazioni sono in parte giustificate dalle diverse condizioni esistenti nei singoli paesi; a suo avviso però su molti altri punti sarebbe possibile giungere ad una unificazione. Una iniziativa in tal senso del Consiglio della F.I.P. sarebbe certamente proficua. Per quanto riguarda il regolamento italiano, che l'apposita commissione ha redatto poche settimane or sono in forma definitiva, è interessante rilevare che esso contempla dati numerici che sono generalmente vicini alla media di quelli forniti dai regolamenti esteri.

Vantaggi economici del cemento armato precompresso.

Il rapporto del relatore Hill pone in luce la complessità del quesito osservando che un giudizio veramente documentato sull'economia di un progetto deve contemplare un gran numero di elementi quali costo iniziale, spesa di manutenzione, termini di consegna, considerazioni estetiche, ecc. Per quanto si riferisce al costo iniziale, sembra ormai accertato che il c.a. precompresso si trova in posizione di vantaggio per ponti di media luce (da 25 a 75-80 metri), serbatoi di grande capacità, elementi prefab-

bricati di vario tipo (travi per solai, canalette, ecc.). Per le coperture industriali la situazione è più incerta, soprattutto nei Paesi che dispongono di una abbondante produzione siderurgica. Si ha però sempre un vantaggio abbastanza sensibile se si tien conto anche delle spese di manutenzione. Altre interessanti considerazioni, dalle quali scaturiscono ulteriori vantaggi, riguardano i consumi di materie prime d'interesse nazionale, la rapidità di esecuzione delle opere, l'aspetto estetico, la sicurezza nei riguardi delle azioni corrosive e delle temperature anormali, infine le economie che possono derivare da situazioni particolari: impermeabilità naturale dei serbatoi, vantaggi dati dalla precompressione per la risoluzione di problemi statici particolari, eccetera.

Al rapporto di Hill erano peraltro allegati alcuni interessanti prospetti recanti i risultati di alcuni concorsi appalti per ponti svolti in Olanda, Francia e Belgio nei quali si era avuto confronto diretto fra vari materiali (cemento armato, c.a. precompresso, costruzione metallica). Questi dati confermano chiaramente che, per gli impalcati da ponte, il c.a. precompresso è quasi sempre più economico; il ché d'altronde spiega la diffusione raggiunta in questo campo nella maggior parte dei paesi europei.

Vorremmo sperare che gli appunti necessariamente schematici con i quali abbiamo cercato d'illustrare i risultati conseguiti ad Amsterdam possano dare una idea fedele del proficuo lavoro che è stato svolto dai congressisti. Non vorremmo tralasciare peraltro di segnalare l'atmosfera di sincera collaborazione internazionale che ha caratterizzato i lavori del Congresso, il tono sempre elevato delle discussioni che si sono svolte nel campo scientifico e nel campo tecnico, infine la perfetta organizzazione che era stata approntata dall'Associazione Olandese del Cemento Armato Precompresso.

Franco Levi

Influenza dell'iniezione e degli ancoraggi sul comportamento degli elementi in cemento armato precompresso

Il relatore generale, il finlandese B. Kelopuu, esamina separatamente le relazioni sulla funzione dell'iniezione nei confronti della resistenza delle strutture, quelle sui tipi di malta da usarsi ed infine quelle relative agli ancoraggi, traendo le conclusioni riassuntive dalle esperienze e dagli studi svolti nei vari Paesi.

Il relatore generale ha ricevuto le seguenti comunicazioni riportate secondo l'ordine alfabetico degli autori: Barredo (Spagna), Bouvy (Olanda), Dycherhoff e Widmann (Germania), Hill (Gran Bretagna), Magnel (Belgio), Rossetti (Italia), Salminen (Finlandia), Stuvo (Olanda).

Gli argomenti dell'iniezione e degli ancoraggi sono stati trattati in questo rapporto separatamente allo stesso modo con cui sono stati trattati dagli autori stessi.

Iniezioni

Gli scopi principali dell'iniezione negli elementi precompressi dopo l'indurimento del calcestruzzo sono:

a) Proteggere l'acciaio di precompressione dalla corrosione ed accrescere in tal modo la durata dell'opera.

b) Aumentare la resistenza alla rottura creando tra l'acciaio e il calcestruzzo che l'avvolge la miglior aderenza possibile. L'influenza delle fessurazioni causate da un sovraccarico accidentale dipende in gran parte dalla aderenza, che esercita anche un'influenza sulla resistenza alla rottura. Per questo è importante che questa fase dell'esecuzione sia effettuata colla massima cura e la determinazione dei metodi per ottenere i migliori risultati è ancora allo studio.

Protezione dell'acciaio

L'esperienza insegna che fra tutti i materiali destinati alla protezione dell'acciaio il più comodo e il più economico è la malta di cemento, che realizza una buona protezione contro la corrosione e dà luogo a una buona aderenza.

Tutte le comunicazioni su questo argomento dimostrano come un acciaio bene iniettato non vada soggetto a corrosione.

Bouvy afferma che il danno della corrosione dovuto all'acqua contenuta nelle guaine è esagerato perchè in realtà quest'acqua non è a contatto dell'aria. Ammette però che si ha ragione di temere nei casi in cui si producono delle screpolature.

Hill ricorda che il solo caso di corrosione osservato in Gran Bretagna si è prodotto su di un cavo orizzontale di una cisterna verniciata alla nitrocellulosa. In questo caso l'acqua è penetrata per capillarità fino all'acciaio.

Magnel insiste sull'importanza della protezione contro la corrosione per assicurare la durata dell'opera. Pensa che una lunga esperienza sui diversi sistemi di precompressione ha dimostrato che una distanza di 5 mm circa fra ciascun filo è necessaria per facilitare l'iniezione e assicurare l'avviluppamento di ogni filo. Le guaine in materiale impermeabile all'acqua non sono consigliabili

perchè l'acqua in eccesso si trova imprigionata. La Soc. « Le Câble Sandwich » ha fatto delle ricerche sui fili di 50 travi eseguite negli ultimi dieci anni. In soli due casi si è trovata una leggera ossidazione.

Il relatore generale desidera richiamare l'attenzione sulle speciali cure colle quali devono essere iniettati gli acciai trattati termicamente. Un tale acciaio presenta un pericolo di corrosione inter-cristallino ed è più suscettibile di ossidazione dell'acciaio trafilato a freddo. Il regolamento tedesco si è preoccupato di questa questione e nota che il pericolo di corrosione è maggiore per i piccoli fili che per i grossi fili o le barre. Il vantaggio delle barre rispetto ai fili per ciò che concerne la corrosione è egualmente notata da Lee.

Quando il cloruro di calcio o un altro corpo chimico viene usato nel caso delle iniezioni con tempo freddo, si deve prestare molta attenzione al fatto che una concentrazione elevata di questi coadiuvanti può presentare un pericolo supplementare di corrosione.

Nei paesi a clima freddo il pericolo di corrosione è maggiore che nei paesi caldi a causa delle fessure causate dal gelo dell'acqua contenuta. Queste fessure lasciano entrare l'aria e l'acqua può allargarle per il gelo e disgelo successivo.

Creazione dell'aderenza.

Al primo congresso della F.I.P. tenuto a Londra nel 1953 il prof. Magnel, nel suo rapporto generale intitolato « Il calcolo delle travi e lastre isostatiche in calcestruzzo precompresso basato sul carico di rottura » ha insistito sul fattore dell'aderenza. Nelle comunicazioni relative a questo rapporto Abeles e Bruggeling hanno dato delle formule del momento di rottura che comprendono un coefficiente che dipende dalla aderenza.

L'importanza dell'aderenza è stata dimostrata da numerosi esperimenti descritti da diversi autori: Rossetti, Magnel, Leonhardt e Baur, Ostfeld e Jonson, e Giehrach e Sättele. La prova di rottura della passerella del Festival di Londra ha dimostrato l'importanza di una buona iniezione.

Bouvy rende conto delle prove eseguite su travi curve fatte di elementi prefabbricati e riuniti per precompressione con un cavo di 12 fili di 5 mm di diametro. Una settimana dopo l'iniezione il cono d'ancoraggio era stato tolto senza che si notasse alcun slittamento dei fili. Sono stati fatti in seguito degli esperimenti di trazione per determinare la lunghezza del cavo necessario per assicurare un'aderenza completa. Queste prove hanno dimostrato che questa lunghezza è inferiore al metro, ma lo strappo s'è prodotto per una lunghezza di 76 cm.

Hill descrive i diversi modi in cui possono fessurarsi gli elementi ad aderenza o senza aderenza e li confronta col comportamento del cemento armato comune. È citata una serie di prove effettuate all'Università di Leeds. L'efficacia dell'iniezione è stata determinata da prove fatte su travi debolmente armate precomprese con un cavo di 12 fili di 5 mm servendosi, come criterio di giudizio, della tensione teorica di fili al momento della rottura. Il rapporto delle tensioni ha variato del 70% per travi senza aderenza fino circa al 100% per travi a fili aderenti. Per le travi a cavi iniettati il rapporto varia da 80% a 95% secondo lo stato della superficie delle guaine.

Prove analoghe, sono state fatte su travi precomprese a mezzo di tondini di 22,2 mm di diametro in guaine di lamierino di 31,7 mm di diametro. Il rapporto delle tensioni per le barre senza aderenza era del 70%. Era del 75-80% per barre iniettate collocate in una guaina d'acciaio ondulato od in un foro lasciato nel calcestruzzo. Il rapporto per una trave equivalente a fili aderenti è stato dell'85%.

Si deve notare che ci fu ben poca differenza nel carico di rottura di travi iniettate con due miscele differenti, l'una composta di cemento puro con un rapporto acqua-cemento = 0,475 e l'altra composta di sabbia e di cemento nella proporzione di 2 a 1 con un rapporto acqua-cemento = 0,55.

Rossetti riferisce su una serie di prove a rottura per flessione effettuata su dieci travi allestite presso il Centro Studi nelle Coazioni del C.N.R. presso il Politecnico di Torino.

Le dieci travi presentavano caratteristiche diverse, per metterle in luce l'effetto nel momento di rottura: a cavo interno ed esterno; monolitiche ed a conci; a cavo iniettato e non. I risultati confermano che la mancanza di iniezione dà luogo ad una diminuzione del momento di rottura di circa 10%.

I risultati delle prove alla rottura di travi precomprese con diversi sistemi (Freyssinets, Magnel-Blaton, Gifford-Udall-CCL, Lee-Mac Call) sono brevemente descritti. Tutte queste prove hanno dato risultati soddisfacenti e si deve segnalare che le barre di 28,6 mm hanno presentato una buona aderenza. Su una larghezza di 90 cm lo sforzo di aderenza è stato di trentadue tonnellate.

Proprietà della malta fresca.

Per rispondere in modo soddisfacente alle prescrizioni sopra indicate, la malta fresca deve presentare certe particolari qualità. Le due più importanti sono:

1) Fluidità. Una buona fluidità è necessaria per una iniezione efficace.

2) Assenza di segregazione onde evitare la formazione di acqua imprigionata nella guaina. Queste due esigenze dipendono dai seguenti fattori del miscuglio:

- 1) il rapporto acqua-cemento;
- 2) la miscelazione;
- 3) la natura del cemento;
- 4) gli additivi;
- 5) la malta colloidale.

In Germania ed in Svezia si determina la fluidità misurando la velocità di colata della miscela da un recipiente standard. In Olanda la fluidità è determinata nello stesso modo della lavorabilità.

La prova di segregazione è fatta con un cilindro di vetro che si riempie di miscela e si sigilla. La quantità d'acqua che si libera alla superficie della miscela dopo un determinato tempo serve a misurare la segregabilità.

Fluidità della miscela.

Bouvy indica che dopo una prova l'aggiunta di un agente dispersivo può rendere una miscela meno fluida, ciò che è in contraddizione con altre prove.

Hill menziona che i plastificanti ed altri aggiuntivi sono stati impiegati per aumentare la fluidità.

La « Stuvo » ha provato parecchie miscele per malta, allo scopo di determinare la loro fluidità. Si è impiegato il cemento Portland ordinario e il cemento Portland ad alta resistenza iniziale. La composizione era di 7 volumi di cemento per 2 di krass con un rapporto di acqua-cemento di 0,398-0,572. Altre prove sono state fatte con o senza aggiuntivi (Plastiment, Injectal). Lo spargimento di malta sulla tavola non variava che leggermente e l'influenza degli additivi fu messa in evidenza dalla diminuzione del rapporto acqua-cemento necessario per ottenere la fluidità equivalente.

Segregazione.

Bouvy indica la possibilità di ottenere con l'aiuto di agenti dispersivi delle malte senza segregazione. L'assenza di segregazione di acqua è la più importante proprietà di una malta per iniezioni. Prove su cementi alluminosi hanno fatto comparire una notevole segregazione. Egli insiste sui vantaggi dell'iniezione a mezzo di pastina colloidale che diminuisce il rischio della segregazione.

La « Stuvo » ha fatto delle prove di segregazione con le miscele sopra menzionate. Gli additivi hanno avuto l'effetto di diminuire la segregazione.

Composizione della miscela.

Bouvy raccomanda una miscela di 4 parti di cemento, 1 krass e 2,4 di acqua (in volume) col l'aggiunta di un agente dispersivo.

Hill raccomanda una pasta di cemento puro per i procedimenti Lee-Mac Call e Gifford-Udall-CCL e una pasta di cemento con sabbia per i procedimenti Freyssinet e Magnel-Blaton con un rapporto acqua-cemento di 0,45 per il 1° gruppo e 0,55-0,62 per il secondo. Il cemento Portland ordinario e una sabbia finissima sono preferibili.

Magnel raccomanda una malta pressapoco della stessa composizione con un rapporto acqua-cemento di 0,50-0,55.

La « Stuvo » ha provato delle miscele con due qualità di cemento, ma le differenze di proprietà delle malte fresche sono state leggere.

L'aggregato più usato in Olanda è il krass perchè dà una miscela fluida e stabile. Il rapporto acqua-cemento è di 0,45-0,65. Sono stati utilizzati degli agenti dispersivi.

Proprietà della malta indurita.

Le proprietà desiderate sono:

- 1) ritiro minimo;
- 2) buona aderenza.

Queste proprietà devono essere egualmente considerate nel corso della composizione della miscela. L'esigenza di una buona fluidità non corrisponde alle precedenti esigenze.

Hill indica un ritiro possibile di 5×10^{-4} a 28 giorni per una miscela a egual volume di cemento e di sabbia. Con un tale ritiro è probabile la fessurazione della malta. La « Stuvo » afferma con prove di ritiro che la malta cemento-krass senza additivi dà i migliori risultati. Utilizzando degli aggiuntivi (Plastiment e Injectal) è stato possibile diminuire il rapporto acqua-cemento ed aumentare la resistenza alla compressione.

Influenza di temperature anormali.

Alte temperature. Hill comunica le prove fatte alla Fire Research Station, a Elstree colle quali si è constatato che la malta rimaneva intatta.

Basse temperature. Bouvy cita delle prove su malta contenente dell'alcool metilico come anti-congelante in proporzione di 1/5 del volume. La resistenza della malta alla rottura è stata soddisfacente.

La malta fresca è assai più resistente al gelo quando viene usato un agente dispersivo.

Hill ricorda l'utilizzazione di malta preparata ad aria occlusa quando è probabile il gelo.

Sallinen parla della costruzione di un hangar all'aeroporto di Seutula presso Helsinki, una grande opera nella quale le guaine di 51 m di lunghezza sono state iniettate d'inverno e descrive i metodi usati. Era stata utilizzata una camicia mobile avvolgente le travi e percorsa da una corrente di aria calda.

La « Stuvo » nota l'utilizzazione dell'alcool come anticongelante. La comunicazione contiene dei dati sull'abbassamento del punto di congelazione in funzione della proporzione d'alcool nell'acqua. È esaminata la velocità di presa della malta a temperature variate. L'alcool ritarda la presa e diminuisce la resistenza della pastina. Per contro aumenta la resistenza al gelo.

Metodi di iniezioni e problemi di cantiere.

I metodi di iniezioni e l'esperienza di cantiere costituiscono un capitolo importante.

Bouvy raccomanda l'uso di pompe a membrana. Mette in guardia circa le difficoltà presentate dai distanziali.

Hill descrive l'iniezione coll'aiuto di aria compressa, d'un miscelatore per boiaccia colloidale combinato con una pompa ed una pompa ad alimentazione continua a vite. In tutti questi casi è stata usata una malta colloidale. Si insiste perchè

la sorveglianza venga fatta da personale qualificato. Per pulire le guaine si raccomanda l'aggiunta di agenti dispersivi all'acqua. In casi di cavi curvi può essere vantaggioso iniettare dal punto più basso del cavo. Delle prove fatte con delle guaine in materia plastica trasparente mostrano che non ci sono inconvenienti ad usare distanziali e di separatori.

Magnel suggerisce che l'uso di cavi curvi al disopra dei sopporti di travi continue (cavi cappelli) sia vietato. Raccomanda l'uso di distanziali tra i fili.

Sallinen indica che nell'opera sopra citata ogni guaina era stata provvista di un foro di controllo ricavato nel béton. L'iniezione con aria compressa era cominciata ad una pressione di 4 kg/cm^2 che è stata portata in seguito a $8-10 \text{ kg/cm}^2$.

La « Stuvo » segnala che in Olanda la pulizia delle guaine era fatta un tempo con acqua, mentre oggi viene usata esclusivamente aria compressa perchè l'acqua rimane sempre nelle parti basse delle guaine provocando così la segregazione. L'iniezione è abitualmente fatta ad aria compressa ad una pressione di 8 kg/cm^2 e nei casi di cavi più lunghi di 60 m le bombole per iniezioni sotto pressione sono sistemate in serie ed il riempimento è fatto a partire dal centro della guaina. L'iniezione a mezzo di pompe a membrana non è consigliabile a causa delle pulsazioni che possono bloccare i condotti.

Oltre alle comunicazioni qui riportate il relatore generale vorrebbe descrivere gli importanti risultati degli studi fatti su questi argomenti in Germania ed in Svezia.

Walz descrive l'importante lavoro di ricerca compiuto all'Institut Otto Graf a Stuttgart. La fluidità, la segregazione, la resistenza e le altre proprietà sono state determinate su diverse malte. La fluidità aumenta con la quantità di acqua e diminuisce colla finezza della macinazione del cemento ed in caso di aggregati come il calcare fine e la bentonite (un'argilla espansiva), i plastificanti hanno poco effetto sulla fluidità. Per le pastine colloidali il tempo di miscelazione è da 7,5 a 15 minuti. La miscela colloidale con un rapporto acqua-cemento di 0,55 ha dato un leggero aumento di fluidità con un tempo di miscelazione di 7,5 minuti, tranne quando è stata usata la bentonite. Coll'aumento di tempo di miscelazione a 15 minuti non si sono osservati miglioramenti. Il mescolatore deve essere raffreddato perchè la pasta si scalda provocando così una diminuzione di fluidità.

Dal punto di vista della segregazione il rapporto acqua-cemento è di grande importanza. La segregazione è più debole con cementi a fine macinazione. La sostituzione del 17% di cemento con una farina di quarzo non ha influenzato la segregazione mentre il calcare fine, la bentonite e uno dei plastificanti l'hanno considerevolmente ridotta. La miscela colloidale ha dato buoni risultati e dopo 15 minuti di miscelazione non si sono osservate segregazioni (rapporto acqua-cemento = 0,55).

Il ritiro dipende ugualmente dal rapporto ac-

qua-cemento che deve essere mantenuto basso quanto più possibile. L'uso di sabbia riduce il ritiro, ma diminuisce nello stesso tempo la fluidità.

In Svezia nell'Institut du Ciment et du Béton per iniziativa dell'Administration Royale des Routes et de la Navigation, è stata fatta una ricerca sull'iniezione di elementi precompressi. Questi risultati non sono ancora pubblicati e il relatore generale esprime i suoi ringraziamenti per la gentilezza dimostrata verso di lui mettendo a sua disposizione detti risultati. Sono state unicamente sperimentate malte con sabbia. L'uso di krass non pare aver portato migliorie, anzi è possibile il contrario. Il cemento Portland normale ha dimostrato una tendenza alla segregazione che può essere particolarmente evitata usando il cemento ad alta resistenza iniziale. L'aggiunta di un aerante alla pasta di cemento puro non ha che un'influenza trascurabile. L'utilizzazione di aeranti e di agenti dispersivi G.R.D.A. per iniezioni sembra dare buoni risultati col cemento H.R.I. e in equa misura col Portland normale. Questi *coadiuvanti* aumentano la fluidità e diminuiscono il ritiro. Röh-nisch dà un'importante informazione circa il comportamento della malta al gelo, comunicando altresì dei nomogrammi per determinare la resistenza al gelo.

Le prove di resistenza al gelo sono state fatte in tubi di vetro con una malta all'età di 12,36 e 168 ore. È risultato che i campioni più vecchi avevano miglior resistenza al gelo, malgrado che tutte le miscele non abbiano soddisfatto alla prova dei 7 giorni. Questi risultati invitano alla prudenza in caso di iniezioni per tempo freddo perchè una pastina fresca può produrre delle fessure dopo la presa. Si constata che l'uso di krass come aggregato aumenta la quantità d'acqua necessaria ed aumenta così il pericolo del gelo. Per due qualità di cemento alluminoso sono occorse quantità d'acqua assai diverse. L'età dei campioni con cementi alluminosi non ha importanza per la resistenza al gelo. La farina di quarzo associata con un agente aerante è stata provata con successo.

Il cemento H.R.I. e il cemento alluminoso hanno dato prove d'una migliore resistenza al gelo che la malta con Portland comune. Sono citati esempi interessanti di iniezioni di cattiva qualità.

Il relatore generale trae le seguenti conclusioni:

1) Le proprietà più importanti della malta sono: buona fluidità, non segregabilità, minimo ritiro. Poichè le due ultime dipendono in gran parte da un debole rapporto acqua-cemento, operando in tal modo si possono ottenere buone qualità di aderenza e di resistenza.

2) Per le guaine dove la quantità di malta è debole in rapporto alle sezioni dell'acciaio (per es. col procedimento Dywidag e Lee-Mac Call) deve essere usata una pastina senza aggregati. Nel caso di procedimento con guaine più grosse è preferibile una pastina con aggregati.

3) Il rapporto acqua-cemento deve essere assai basso, preferibilmente che non oltrepassi 0,55.

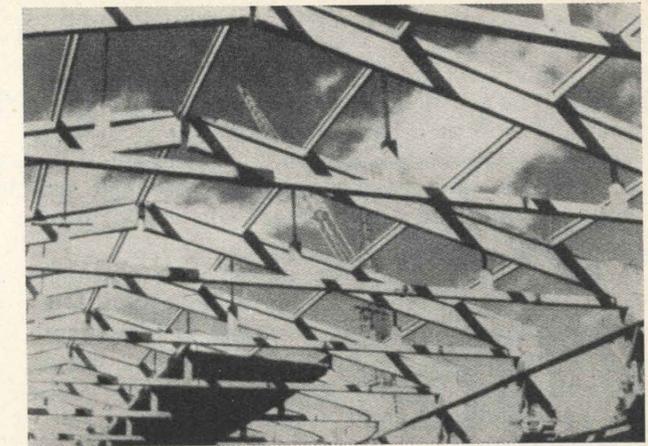


Fig. 6 - Copertura prefabbricata all'Aeroporto di Londra, luce 16 metri (sistema Lee-Mac Call).

Il cemento ad alta resistenza iniziale ha dei vantaggi anche se diminuisce la fluidità.

4) La miscela colloidale è raccomandata. L'aumento di temperatura è dannoso e deve essere evitato.

5) Le opinioni circa i plastificanti e gli aeranti sono variabili. Si dovrebbe utilizzare l'esperienza di iniezione a pressione abituale (in particolare il metodo Prepakt). Attualmente sembra che gli additivi come gli aeranti possano dare buoni risultati. Le prove devono tuttavia essere continuate.

6) Delle speciali precauzioni debbono essere prese per le iniezioni durante l'inverno e le costruzioni debbono essere protette contro il freddo. Il cemento alluminoso può essere usato per la sua presa a bassa temperatura, ma il riscaldamento a 30°C , dopo la presa è dannoso per la tendenza che ha il cemento alluminoso di diminuire di resistenza in queste condizioni.

7) Le guaine devono essere attentamente pulite prima dell'iniezione coll'aiuto di acqua e aria compressa in modo che l'acqua non resti nei condotti e non provochi segregazione.

8) L'iniezione dev'essere effettuata di preferenza con pompe e l'uso di aria compressa deve essere evitato. Le pressioni al disopra di $4-6 \text{ kg/cm}^2$ devono essere usate con precauzione particolarmente in casi di guaine di dimensioni importanti perchè in questi casi la pressione può causare danni alla costruzione. I condotti lunghi devono essere provvisti di aperture di controllo e l'esecuzione dell'iniezione deve essere fatta tenendo conto della forma del cavo. Gli spaziatori e le griglie non presentano ostacoli per l'iniezione e sono necessari per i sistemi che ne raccomandano i loro usi. Le variazioni brusche della sezione dei condotti sono svantaggiose.

Gli ancoraggi.

La questione degli ancoraggi è trattata nelle comunicazioni di Barredo, Dyckerhoff e Widmann, Hill, Rossetti e « Stuvo ».

Barredo descrive i sistemi di precompresso

« Barredo ». Dei gruppi di tre fili sono ancorati al centro d'un disco di acciaio perforato e di chiovette coniche o piramidali. I vantaggi comportano la messa in tensione di ciascun filo con il medesimo sforzo di tensione. Questa tensione è misurata con esattezza per mezzo di un dinamometro e la tensione può essere ripresa. L'ancoraggio presenta un margine di sicurezza in rapporto all'armatura.

Dyckerhoff e Widmann descrive gli ancoraggi a vite sistema Dywidag per barre di 26 mm. Queste barre sono munite alle estremità di filetti laminati a freddo. La diminuzione di sezione dovuta alla filettatura è compensata dall'aumento della resistenza dell'acciaio laminato a freddo. L'ancoraggio è costituito da un dado a collana che si appoggia su di una placca. Gli sforzi di precompressione sono ripartiti sul béton a mezzo di una placca di ancoraggio la cui forma, con due piani di distribuzione, assicura una ripartizione uniforme dello sforzo. Questa trasmissione dello sforzo rende possibile l'uso di placche d'ancoraggio di dimensioni minime ciò che è vantaggioso a causa della mancanza di spazio nelle zone di ancoraggio. Si noti che il peso dell'ancoraggio non è che la metà di quello di un ancoraggio normale con un dado avente la placca d'appoggio quadrata.

Il dado a collare distribuisce lo sforzo in modo eguale a tutti i filetti. Questo differisce dal dado normale che porta lo sforzo soprattutto sul primo filetto: i filetti seguenti non intervengono nel trasferimento della forza che dopo incrudimento del primo filetto.

La messa in posizione del dado a collare assicura il centraggio della barra in rapporto alla guaina: la placca d'ancoraggio comporta il foro per l'iniezione.

Un vantaggio importante è il debole slittamento al momento della precompressione (0,2 mm.).

Hill descrive i sistemi di ancoraggio usati in Gran Bretagna. Coll'ancoraggio Freyssinet la rottura non si produce che in casi di aumento di attrito: altrimenti l'ancoraggio presenta sempre una resistenza pari a quella del filo. L'ancoraggio Lee-Mac Call può raggiungere il 98 % della resistenza alla rottura della barra.

Le placche d'appoggio del sistema Magnel-Blaton esercitano una compressione sul calcestruzzo che non oltrepassa i 250 kg/cm².

Gli ancoraggi Gifford-Udall-CCL esercitano anche sul calcestruzzo una compressione di 250 kg/cm² quando i fili sono tesi all'80 % del loro limite di rottura.

È ricordata la possibilità di usare la precompressione verticale con i blocchi d'estremità in modo da eliminare le sollecitazioni di trazione. L'analisi della distribuzione delle tensioni del Guyon è correntemente usata. Si insiste sui vantaggi degli ancoraggi incorporati nel calcestruzzo.

La concordanza tra le compressioni misurate e le compressioni calcolate è segnalata e pare esista un margine considerevole di resistenza dei blocchi in rapporto alla rottura. La distribuzione di compressione in due o in tre direzioni è verificata.

Le perdite dovute all'attrito negli ancoraggi sono del 2 % per i procedimenti Magnel-Blaton e del 5 % per i procedimenti Freyssinet. La perdita di tensione media dovuta allo slittamento è la medesima nei due sistemi, ossia di tre millimetri circa.

Nei sistemi Lee-Mac Call non c'è slittamento nell'ancoraggio. Si segnalano dei casi di deficienza di ancoraggio dovuto allo slittamento e al carico brusco. I blocchi d'estremità devono presentare una sufficiente resistenza di béton, e l'ancoraggio deve poter sopportare sotto carico statico, almeno il 90 % del carico di rottura dell'armatura.

Il carico dinamico ordinariamente non ha influenza sulle armature aderenti, ma gli ancoraggi senza aderenza devono resistere per se stessi agli effetti dinamici e vibratorii di sufficiente ampiezza e amplificati in modo appropriato. Gli ancoraggi devono comportarsi normalmente a temperatura normale.

Rossetti indica che in ciò che concerne la serie di prove suddette tutti gli ancoraggi si sono comportati in modo soddisfacente (ancoraggi Morandi e Balducci).

La « Stuvo » segnala la differenza tra gli ancoraggi a dado e gli ancoraggi a chiovetta. Negli ancoraggi a chiovetta si pone il problema della perdita di tensione che può essere considerevole. Sono descritte le ricerche sulla perdita di tensione e la sicurezza nel sistema Freyssinet, e Magnel-Blaton. I principali valori di slittamento trovati in questi sistemi sono:

per gli ancoraggi Freyssinet con cono maschio in Portland: 4-5 mm.;

per le placche sandwich con chiovette nuove 6-8 mm.;

per le placche sandwich già usate una volta: 3-5 mm.

Le placche sandwich sono d'origine olandese.

Le prove su placche sandwich d'origine belga hanno dato minore slittamento.

Si insiste sull'importanza delle proprietà dei materiali e sulla finitura delle differenti parti degli ancoraggi. È studiata la deformazione plastica degli ancoraggi Freyssinet in particolare, e si fanno raccomandazioni sui metodi di messa in tensione e di ancoraggio.

Le esigenze relative ai diversi sistemi di ancoraggio comprendono la clausola seguente: lo slittamento non deve oltrepassare il valore degli acciai del 25 %. Non sono ammessi dei cambiamenti bruschi di direzioni negli elementi di ancoraggio o nelle vicinanze di questi. Il margine di sicurezza degli ancoraggi in rapporto alla rottura deve essere almeno di 2.

Il relatore generale non vorrebbe fare commenti personali su questo tema, ma segnala che l'importanza della maggior sicurezza dell'opera dovuta all'aderenza per iniezione è attualmente un dato di fatto riconosciuto sul quale si deve prestare più attenzione che in passato, particolarmente per quanto concerne la sicurezza sotto carichi dinamici.

B. Kelopuu

Esperienze e difficoltà nella produzione e nell'impiego degli acciai per precompresso

Il relatore generale, l'olandese Bruggeling, fa il punto su questo argomento di alto interesse e di viva attualità, desumendo dai contributi dei vari Autori gli essenziali del problema.

Riassunto delle comunicazioni ricevute riguardanti il tema I B

Su questo argomento, da trattarsi nel secondo Congresso della FIP, sono giunte sei comunicazioni.

User and producer difficulties with steel for prestressing, di Brereton (N. 2).

In questo rapporto nazionale inglese l'Autore raccoglie tutte le osservazioni che sono state colà effettuate sugli acciai per precompresso. Il relatore comunica al riguardo che è particolarmente importante stabilire quali caratteristiche convenga richiedere per l'acciaio per precompresso. Egli segnala diversi problemi che meritano di essere presi in considerazione, e cioè:

1) intagli nella superficie aventi lo scopo di migliorare l'ancoraggio del filo;

2) fino a che punto si può ammettere la corrosione sulla superficie del filo;

3) le caratteristiche meccaniche dei fili (resistenza a trazione, limite di rilassamento) e la richiesta di maggior costanza delle caratteristiche dell'acciaio per ogni fornitura. Soprattutto viene richiesta dagli utenti la costanza della resistenza alla fatica.

Noi ringraziamo C. F. Brereton per le sue importanti indicazioni.

Résultats d'une série d'expériences sur aciers pour béton précontraint, di Franco Levi (N. 1).

Noi ringraziamo il prof. Levi per la sua relazione che rappresenta un riassunto delle prove da lui condotte sugli acciai da precompresso. Come conclusione il prof. Levi fa alcune importanti osservazioni, e cioè:

1) che non si può riconoscere attualmente alcuna relazione tra le curve sforzi-deformazioni ed il limite di rilassamento dell'acciaio;

2) che in generale le cadute di tensione nel tempo per una determinata tensione iniziale diminuiscono rapidamente, cosicché con prove relativamente brevi si può avere una visione abbastanza esatta della tendenza dell'acciaio al rilassamento;

3) che per definire le caratteristiche dell'acciaio non sono sufficienti prove per la determinazione dell'allungamento a rottura, prove di piegamento e di torsione, ma sono necessarie anche prove di fatica e di resilienza;

4) che le cause di rottura spontanea dell'acciaio per precompresso non devono sempre essere attribuite alla corrosione sotto carico. Si devono anche prendere in considerazione la resistenza alla fatica e l'esistenza di tensioni interne nel materiale.

Riguardo alla resistenza alla fatica viene osser-

vato che le tensioni nell'acciaio possono essere maggiori di quanto ci si possa aspettare a causa, fra l'altro, di sovratensioni e di lesioni locali. Il prof. Levi insiste molto nell'esaminare con precisione e sistematicità tutti i problemi che riguardano l'acciaio da precompresso. A questo proposito si auspica un ampio scambio di risultati delle ricerche.

Viene comunicato inoltre che in Italia sono in preparazione le prescrizioni per il precompresso e che l'apposito Comitato si è poste le seguenti direttive:

a) prevenire eventuali sorprese dovute all'adozione di carico elevato;

b) raccomandare che vengano impiegati per quanto possibile tipi di acciaio fabbricati secondo sistemi classici.

L'acier pour le béton précontraint, di Millot (N. 2).

Millot osserva che in Francia non vi sono contatti sufficienti fra produttori e consumatori di acciaio da precompresso. Questo fatto fu cagione di ogni sorta di difficoltà nell'impiego dell'acciaio; alcune di tali difficoltà vengono discusse nelle sue memorie.

Sono presi in considerazione alcuni tipi di acciaio ed i loro sistemi di fabbricazione. Per quanto riguarda le rotture spontanee del filo vengono indicate le seguenti cause possibili:

a) screpolature in superficie e nell'interno del filo a causa — fra l'altro — di difetti di materiale o di impiego. Vengono perciò preconizzati esami microscopici e prove di torsione per mettere in evidenza il deterioramento;

b) corrosione sotto sforzo;

c) tensioni interne nel materiale.

Oltre a ciò il Millot cita i punti che secondo la sua opinione devono venir definiti nelle prove di accettazione. Il Millot sostiene la necessità di eseguire prove di accettazione aderenti alle condizioni di impiego.

Some problems concerning high-tensile steel for prestressed concrete from the users' point of view, di Bouvy (N. 3).

Bouvy fa alcune considerazioni sulle richieste dei consumatori di acciaio per precompresso. Egli dedica particolare attenzione al problema del rilassamento, giungendo alla conclusione che, in generale, il rilassamento non dà luogo a cadute di tensioni così forti come si ritiene.

Oltre a ciò nota che il consumatore è molto interessato alla costanza delle caratteristiche dell'acciaio per ogni fornitura.

Ringraziamo il Bouvy per i dati da lui raccolti circa le rotture spontanee nell'acciaio per precompresso. Egli insiste a questo riguardo sulla protezione del filo contro la corrosione durante il trasporto e raccomanda che il filo bonificato non venga messo in opera in condizioni favorevoli alla corrosione.

Oltre a ciò l'Autore osserva che non si è ancora mai rotto alcun filo nelle opere da lui costruite.

A chiusura della sua comunicazione il Bouvy osserva che è importante per il consumatore che il prezzo dei fili per precompresso venga calcolato in base ai kg di carico ammissibile e non ai kg di peso.

Some creep tests on steels for prestressed concrete, di Canta (N. 4).

Il Canta riporta i risultati ottenuti in prove di fluage condotte a tensioni molto elevate. Il comportamento dell'acciaio sotto tali tensioni può dare un'indicazione circa il comportamento sotto tensioni di valore normale. Le prove si possono considerare interessanti in quanto si sono ottenuti dei risultati inaspettabili. In generale si può ritenere che sotto tensioni molto elevate il normale filo trafilato a freddo si comporta meglio di quello trafilato a freddo e trattato in seguito termicamente. A conclusione della sua comunicazione il Canta deduce che:

a) con filo trafilato a freddo si può stabilire che in coordinate semilogaritmiche il fluage è funzione lineare del tempo;

b) prove di breve durata non permettono alcuna previsione circa il comportamento dell'acciaio sotto carichi di maggior durata.

Sono allegate a questo contributo le prescrizioni provvisorie olandesi di accettazione, dalle quali si possono trarre i seguenti punti principali:

1) l'acciaio viene definito secondo la tensione corrispondente allo 0,05 dell'allungamento permanente, prescrivendo una determinata distanza tra questo limite e la resistenza a trazione;

2) l'acciaio con falle longitudinali appare inadatto per il precompresso. È tuttora difficile stabilire modalità di collaudo adatte ad accertare l'esistenza di tali difetti;

3) lo studio delle modalità di prova degli acciai da precompresso è stato affidato ad un Comitato che rilascia appositi certificati.

Recherche de la valeur optimum de la tension des armatures de précontrainte, di Xercavins (N. 5).

Prove di fatica su travi precomprese con acciaio teso a differenti valori, hanno dimostrato che per quanto riguarda la resistenza a fatica è opportuno scegliere dei valori elevati di tensione nell'acciaio. Così facendo si consegue una maggior resistenza alla fessurazione, si limitano le deformazioni della trave e si diminuisce l'ampiezza di oscillazione delle sollecitazioni nell'acciaio.

Prospetto generale sui tipi di acciaio da precompresso

Viene premesso al commento delle comunicazioni giunte un breve compendio dei diversi sistemi di produzione. In seguito viene data una classificazione degli acciai in rapporto al sistema di fabbricazione. Le più importanti operazioni metallurgiche impiegate nella fabbricazione dei fili da precompresso sono le seguenti:

patentamento, tempra, tempra scalare, stabilizzazione, trafilatura a freddo e laminazione a freddo.

Patentamento.

Consiste nel portare il filo ad una temperatura fra gli 800 e i 900° C e quindi raffreddarlo rapidamente intorno a 500° C. Il filo viene mantenuto per un certo tempo a questa temperatura e quindi raffreddato a temperatura ambiente. Il filo acquista con ciò una struttura cosiddetta sorbitica, che rappresenta una perlite finemente lamellare. La maggiore o minore finezza di questa struttura sorbitica dipende dalla temperatura di trattamento e dalla grossezza del grano dell'acciaio. Il filo patentato si presta particolarmente bene alla trafilatura a freddo.

Trafilatura a freddo.

Riduzione della sezione del filo mediante passaggio attraverso una trafilatura.

L'acciaio assume una struttura fibrosa in direzione longitudinale. Durante la trafilatura la temperatura del filo s'innalza a 100 o 150° C.

Laminazione a freddo.

La laminazione a freddo viene eseguita a mezzo di una serie di cilindri disposti uno dopo l'altro.

La differenza rispetto alla trafilatura consiste nell'assenza di attrito alla superficie del filo durante la lavorazione a freddo.

Tempra.

La tempra consiste in un rapido raffreddamento degli acciai da una temperatura di circa 800 o 900° C alla temperatura ambiente. Con ciò il filo assume una struttura martensitica che sotto il microscopio appare aghiforme. Ne segue un indurimento dell'acciaio.

Il filo temprato non costituisce però un prodotto finale. Esso viene spesso rinvenuto subito dopo la tempra e viene quindi definito filo bonificato.

Si osserva che già con il raffreddamento della vergella d'acciaio durante la laminazione si può ottenere una determinata bonifica.

Tempra scalare.

Per ridurre le tensioni interne generate nell'acciaio a seguito della tempra è possibile raffreddare rapidamente l'acciaio in un primo tempo da 800 o 900° C a 300° C, mantenere per un certo tempo questa temperatura e quindi raffreddare a temperatura ambiente. Anche in questo modo si ottiene un acciaio bonificato.

In generale l'acciaio bonificato non viene sottoposto a lavorazione a freddo.

Stabilizzazione:

dei fili trafilati a freddo - Rinvenimento. Il filo viene mantenuto per un certo tempo — la durata dipende dalle modalità di esecuzione della stabilizzazione — ad una temperatura fra i 200 e i 250° C. Si ammette che con ciò avvengano delle

separazioni di ossigeno e di azoto nel reticolo cristallino le quali tendono ad opporsi agli slittamenti.

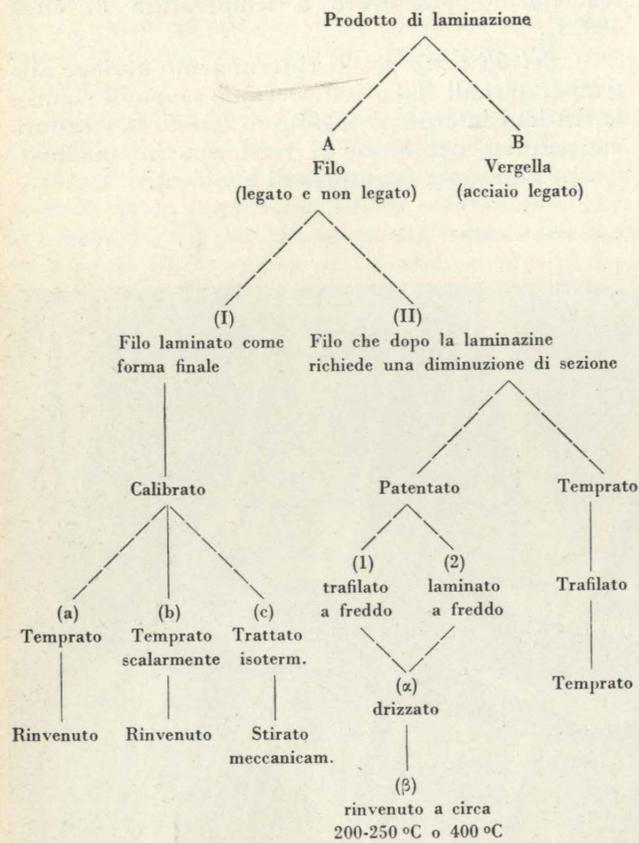
Il trattamento può consistere anche in un riscaldamento più breve a temperatura di circa 400° C.

dei fili temprati. Il rinvenimento avviene alla temperatura di 400 o 500° C con lo scopo di ridurre le tensioni interne. A seguito di questo la struttura martensitica aghiforme si trasforma in una martensite rinvenuta (struttura di bonifica).

Fig. 7 - Stabilimento Rivière-Casalis a Orléans. Ossatura resa solida mediante cavi cappello (sistema Freyssinet).



Con le operazioni metallurgiche brevemente descritte qui sopra vengono fabbricati gli acciai da precompresso elencati nel prospetto che segue:



Bisogna però osservare che per la fabbricazione di un buon prodotto mediante un buon ciclo, oltre alle caratteristiche chimiche del materiale entrano in giuoco fattori di natura diversa. Il prospetto precedente con temperature approssimate serve solo come informazione per i consumatori e di chiarimento di queste notizie generiche.

A Filo,

- (I) Filo laminato (eventualmente calibrato) come forma finale,
 - (a) Temprato e rinvenuto,
 - (b) Temprato scalarmemente e rinvenuto,
 - (c) Trattato isothermicamente ed eventualmente stirato meccanicamente,
- (II) Filo che dopo la laminazione richiede una riduzione di sezione,
 - (1) Filo patentato trafilato,
 - (2) Filo patentato laminato a freddo. Trattamenti diversi di questo tipo,
 - (α) Drizzato,
 - (β) Rinvenuto.

I trattamenti (α) e (β) possono venire combinati, in modo che si presentano le seguenti possibilità: (1, α); (1, α, β); ed eventualmente (1, β).

- (3) Filo temprato che viene trafilato durante la tempra,

B Vergella.

In questo caso si tratta per lo più di materiali legati. Le verghe vengono impiegate allo stato laminato oppure vengono sottoposte ad uno stiramento a freddo.

Considerazioni sulle comunicazioni pervenute

Per poter confrontare i principali punti esposti nelle comunicazioni, verrà esaminato un certo numero di problemi:

- Fluage e rilassamento,
- Fatica,
- Rottura spontanea del filo,
- Richieste dei consumatori,
- Difficoltà nella fabbricazione dell'acciaio da precompresso,
- Prove di accettazione.

Fluage e rilassamento.

Brereton dice che i consumatori richiedono talvolta una bassa caduta di tensione per rilassamento, accontentandosi però dei dati pratici di impiego circa le caratteristiche dell'acciaio quali risultano dal diagramma sforzi-deformazioni.

Levi è dell'avviso che non si potrà mai stabilire una relazione generale fra il diagramma sforzi-deformazioni ed il limite di rilassamento. Vi sarebbe tuttavia qualche possibilità per quanto riguarda certi tipi di acciaio, per i quali già fin d'ora sono state stabilite delle formule.

Si ammette però che, per determinati impieghi sarebbe possibile definire con maggior approssimazione il comportamento dell'acciaio nel tempo.

Come regola semplice viene indicato che le cadute di tensione a 120 ore corrispondono a poco più del 50% della caduta totale, mentre si può ritenere che le cadute a 2 o 3 mesi corrispondano al 60%.

Bouvy considera una particolare differenza tra fluage e rilassamento. Egli osserva che a causa della maggior semplicità sono state fatte prove di fluage assai più che di rilassamento. Al termine della sua comunicazione egli conclude che:

- a) le prove di fluage sarebbero solo un aiuto per dare un'idea del valore della caduta di tensione;
- b) in pratica varrebbe il concetto che l'effettiva caduta di tensione dell'acciaio nelle costruzioni sarebbe minore della somma della caduta di tensione che corrisponde ai valori teorici del ritiro e del fluage del cemento, e della caduta di tensione nell'acciaio ottenuta sperimentalmente.

Da ciò il concetto secondo il quale il rilassamento nell'acciaio non darebbe luogo a perdite di carico così forti come si potrebbe ritenere.

Canta riporta risultati di prove di fluage che in parte sono state eseguite sotto tensioni molto elevate con diversi tipi di filo e precisamente con i tipi II 1 α β; II 1; II 1 α; I b e I a.

Da queste esperienze risulta che ogni tipo di filo ha un suo particolare comportamento riguardo al fluage, che è caratterizzato sia dalla forma della

curva di fluage sia dal rapporto tra la tensione e l'allungamento nel tempo.

Si conclude che col filo (II, 1) si ottiene un rapporto abbastanza significativo tra l'allungamento ed il tempo. Prove di breve durata danno indicazioni insufficienti circa il comportamento di fluage dell'acciaio per una maggiore durata di carico.

Se il filo (II, 1) viene drizzato e quindi trasformato in (II, I, α) aumenta notevolmente il fluage. Secondo questo Autore si devono completare le prove di fluage con prove di rilassamento.

Dal riassunto precedente risulta:

1) che nell'impiego pratico dell'acciaio per precompresso è molto importante che il consumatore conosca perfettamente le caratteristiche di rilassamento dell'acciaio per diverse tensioni iniziali. Si può stabilire che in generale è più importante conoscere l'entità del rilassamento, piuttosto che favorire lo sviluppo di acciai con minor tendenza al rilassamento;

2) che l'andamento del fluage e del rilassamento è diverso per ogni tipo di filo. Dati determinati valori di cadute di tensione è necessario controllare quale tipo di acciaio deve venir impiegato. Non si può determinare un rapporto tra la curva sforzi-deformazioni e l'andamento del rilassamento;

3) per determinate qualità di acciaio, particolarmente per il filo (II, 1) si hanno dati molto completi circa il comportamento di fluage e di rilassamento a lunga durata. I risultati di Canta concordano con ciò anche per quanto riguarda l'aumento di allungamento per fluage a seguito del raddrizzamento del filo trafilato;

4) le ricerche delle caratteristiche dell'acciaio e le prove di accettazione devono tener conto dell'andamento del rilassamento. Ciò può avvenire determinando direttamente la caduta di tensione oppure definendo il rapporto tra il fluage e il rilassamento per una determinata qualità d'acciaio.

Fatica.

Levi è dell'opinione che le prove a fatica sono molto interessanti, ma che la loro realizzazione è molto costosa e che richiedono molto tempo. Queste devono essere prescritte per l'acciaio impiegato se questo viene sottoposto in opera ad una ampiezza di oscillazione di più di 10 kg/mm². Per diverse ragioni la tensione nell'acciaio può essere in alcuni punti superiore al previsto donde una possibilità di riduzione dell'intervallo di resistenza a fatica.

Bouvy stabilisce che l'ampiezza di oscillazione non supera i 5 kg/mm² cosicché, secondo lui, la fatica non costituisce una difficoltà.

Xercavins indica alcuni valori di resistenza a fatica per l'acciaio da lui impiegato. Da questi dati risulta chiaramente che l'aumento della ampiezza di oscillazione influisce notevolmente sulla fatica.

Dai risultati degli esperimenti fatti si deduce che in determinate condizioni di costruzione si possono avere nell'acciaio ampiezze di oscillazione minori di quanto ci si aspettasse per cui la resistenza a fatica della costruzione risulta maggiore di quella che si potrebbe ottenere in base allo studio dell'acciaio.

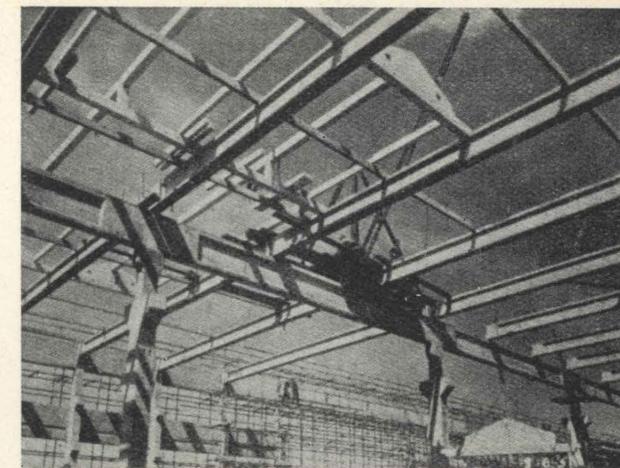


Fig. 8 - Ossatura prefabbricata formata da travi costruite per elementi, luce variabile da 5 a 15 metri (sistema Gifford-Udall-C.C.L.).

Dopo l'esame di queste comunicazioni si può concludere riassumendo che la fatica non ha fino ad oggi dato luogo a difficoltà, dato che le ampiezze di oscillazione in generale sono minime. Tuttavia ci si deve render conto dei valori massimi dell'ampiezza di oscillazione nella pratica per determinati impieghi, per cui si devono scegliere per i casi che si prendono in considerazione il tipo d'acciaio ed il valore di precompressione in modo da garantire una sufficiente resistenza alla fatica della costruzione.

Rotture spontanee.

Brereton menziona rotture nel filo che si possono verificare per falle ed osserva che inoltre si sono scorte talvolta delle rotture nei punti di ancoraggio, dove il filo è esposto alle intemperie.

Levi ritiene che buona parte delle rotture spontanee sia dovuta ad attacco chimico ed elettrochimico dell'acciaio sotto tensione, ma che bisogna tener presente anche altre cause possibili:

1) insufficiente resistenza alla fatica del filo che si trova a tensioni troppo elevate a causa di circostanze particolari;

2) tensioni interne nell'acciaio derivanti da particolari trattamenti di fabbricazione. Si sottolinea che questa potrebbe essere una ragione importante di rottura spontanea, dato che, in una prova di rilassamento un filo si rompe dopo 17 gg. e che tale rottura non potè in alcun modo essere attribuita alla corrosione.

Millot indica alcune cause possibili delle rotture spontanee dei fili:

1) fessure longitudinali nell'interno del filo o sulla superficie;

2) corrosione sotto tensione; quanto più è duro il filo, tanto più è sensibile alla corrosione sotto tensione;

3) tensioni interne nell'acciaio.

Bouvy dà un quadro particolareggiato delle cause di rottura spontanea di fili bonificati: influenza delle intemperie, acque aggressive, composizione del calcestruzzo. Dopo aver citato prove di

corrosione su travi eseguite in Inghilterra, osserva che — per quanto risulta — non si sono mai verificate rotture di fili nelle travi se la protezione contro la corrosione era efficace.

Da varie esperienze si ricava che il filo bonificato è più sensibile alla corrosione sotto tensione del filo trafilato per cui si mette in dubbio il risultato delle esperienze di Bouvy. Presentemente i fabbricanti di filo bonificato stanno conducendo prove per produrre un filo meno sensibile alla corrosione sotto tensione.

I costruttori devono fare in modo che l'acciaio non dia luogo a corrosione durante il trasporto e la messa in opera.

Si può concludere che tutti gli Autori sono dell'opinione che oltre alla corrosione sotto tensione vi possono essere altre cause che danno luogo alla rottura. Sono state citate:

- 1) tensioni troppo forti e insufficiente resistenza alla fatica;
- 2) tensioni interne;
- 3) fessure longitudinali;
- 4) difetti di lavorazione.

Richieste dei consumatori.

Brereton riassume nei seguenti punti le richieste dei consumatori:

- 1) uniformità per ogni fornitura;
- 2) alta resistenza alla trazione;
- 3) fili senza scagliature superficiali che sono dannose per l'ancoraggio ed il bloccaggio;
- 4) possibilità di lasciare arrugginire leggermente l'acciaio per migliorare l'aderenza.

A questo riguardo sono considerate particolarmente importanti le intaccature sulla superficie del filo.

Brereton ha dedicato particolare attenzione alla forma ed alle dimensioni delle intaccature superficiali del filo, dato che a suo avviso molti consumatori hanno avuto difficoltà a questo riguardo.

Bouvy esprime come consumatore le seguenti richieste:

- 1) uniformità di qualità e di caratteristiche per ogni fornitura (curva sforzi-deformazioni, ecc.);
- 2) filo diritto;
- 3) filo privo di scaglie superficiali;
- 4) piccole variazioni di diametro;
- 5) prezzo più basso per kg di precompressione.

Le prescrizioni di accettazione olandesi allegate dal Canta pongono le seguenti condizioni circa la qualità dell'acciaio e cioè:

- 1) filo privo di scaglie;
- 2) superficie del filo praticamente esente da ruggine;

- 3) rulli di avvolgimento molto grossi;
- 4) filo diritto.

I vari Autori concordano nel richiedere che:

- 1) il filo debba essere privo di scaglie;
- 2) il filo debba essere solo leggermente intaccato dalla ruggine;
- 3) che ogni fornitura debba avere una grande uniformità di caratteristiche;
- 4) che il filo esca diritto dalle bobine.

Difficoltà nella fabbricazione dell'acciaio.

Breteton tratta i seguenti punti:

il semilavorato deve essere puro e privo di inclusioni. Il trattamento termico deve essere accurato. I treni continui di produzione del filo rendono necessarie saldature che vengono poi eliminate dato che non si è ancora riusciti a realizzare giunture perfette.

Le intaccature sulla superficie del filo costituiscono una difficoltà poichè non è facile mantenerne costante la profondità e quindi evitare differenze di diametro nel filo.

Millot fa presente che i produttori mirano ad ottenere un acciaio omogeneo privo di inclusioni, di difetti di laminazione e ad usare la trafilatura a freddo con la quale non si verificano tensioni interne ed un trattamento termico che non dia luogo a decarburazione superficiale.

Si deve però tener presente che, nonostante tutte le precauzioni, non si possono evitare completamente questi difetti.

Prove di accettazione.

Brereton è dell'idea che oggi giorno una delle maggiori difficoltà sia stabilire quale acciaio sia più adatto per il cemento armato precompresso; come esempio viene posto il quesito se il filo debba essere assolutamente privo di ruggine o messo in opera leggermente intaccato. Si sottolinea però la necessità di stabilire in maniera univoca le prove di accettazione dato che dal confronto dei risultati di due laboratori sono risultate delle discordanze.

Levi, tra l'altro, cita le prove qui sotto riportate:

- 1) determinazione dell'allungamento di rottura;
- 2) prove di piegamento;
- 3) prove di torsione per stabilire se vi sono difetti superficiali nel filo;
- 4) prove di resilienza.

Millot propone le seguenti prove:

- 1) prove di torsione. Esame delle fessure longitudinali;
- 2) ricerca delle inclusioni;
- 3) prove di resilienza e brevi prove di corrosione.

Le prescrizioni olandesi prevedono fra l'altro:

- 1) determinazione dell'allungamento a rottura;

- 2) determinazione del valore 0,05 del limite di allungamento e resistenza alla trazione;

- 3) prove di piegamento;

- 4) prove di torsione. Esame dei difetti longitudinali del filo.

Riassumendo si può dire che è molto importante l'uso di acciaio senza inclusioni dannose, senza difetti longitudinali e così via.

A tal fine sembrano opportune prove di piegamento e di torsione. Si dovrà tendere comunque ad ottenere l'unificazione delle prove di accettazione.

Osservazioni marginali dell'Autore.

In base alle conclusioni che si traggono dall'esame delle comunicazioni precedenti, nonché dai dati che si ricavano dalla bibliografia internazionale si cercherà di dare un'idea generale della situazione odierna della tecnica del precompresso, per quanto concerne l'acciaio.

Dall'esame di quanto è stato scritto circa il modo di condurre le prove di rilassamento, si giunge alla convinzione che bisogna definire due diversi concetti.

In primo luogo le prove di fluage e di rilassamento devono essere condotte con molta precisione. È quindi necessario studiare i fattori di disturbo ed eliminarli. In questo senso sono state fatte diverse prove in Italia, in Belgio, in Inghilterra e nei Paesi Bassi.

Se si osserva il modo con cui è stato stabilita la caduta di tensione con questi sistemi, risulta che i principi su cui si basano i vari procedimenti differiscono molto gli uni dagli altri, ciò che vuole dire che i fattori di perturbazione sono di natura diversa. Bisogna essere molto critici per quanto riguarda i risultati delle diverse prove di rilassamento e ci si chiede se non sia necessario stabilire basi internazionali per addivenire allo scambio dei risultati onde conseguire una unificazione dei procedimenti.

Così per esempio la determinazione del tempo necessario per giungere alla stabilizzazione delle cadute di tensione.

I rappresentanti della seconda tendenza partono dal punto di vista del costruttore e conducono prove di rilassamento e misure della caduta di tensione nel modo più aderente alla realtà pratica. Come esempio si può citare il procedimento che consiste nel fissare un filo di notevole lunghezza con una determinata tensione fra due blocchi di ancoraggio o su telai d'acciaio. Il filo viene inflesso a mezzo di un carico applicato nel mezzo e la freccia viene misurata a intervalli regolari. L'aumento della freccia consente di misurare la perdita di carico. Il procedimento può anche venir usato in cantiere. Si ottengono così risultati vevoli anche in pratica se si usa lo stesso acciaio che è stato sottoposto a prove costose.

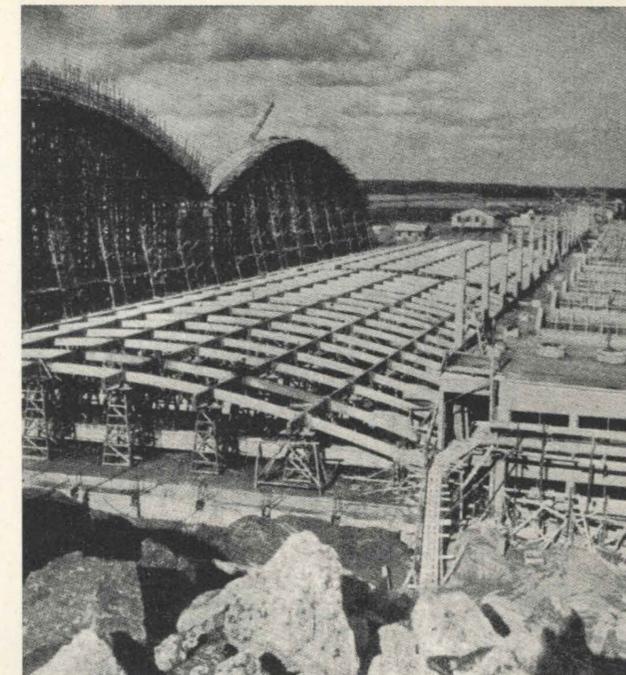


Fig. 9 - Hangar dell'aeroporto di Helsinki.

Bisogna tener presente che i risultati delle prove vengono influenzati dal tipo di costruzione (allo scoperto o al coperto) e dalle modalità di esecuzione.

Si osserva tuttavia che sono necessarie prove di laboratorio molto precise per confrontare il comportamento delle diverse qualità di acciaio e mettere in relazione prove di cantiere e di laboratorio.

Si arriva alla conclusione che si devono continuare e perfezionare gli esperimenti, mentre d'altro canto si devono eseguire delle prove che si basino piuttosto sulla pratica, a completamento delle prove di laboratorio. Dai risultati di laboratorio si può dedurre che determinate qualità di acciaio e cioè diversi fili dei tipi (I) e (II, 1, α , β) per tensioni relativamente basse in rapporto al limite convenzionale allo 0,05, subiscono forti cadute di tensione. Da questo deriva che usando tensioni molto elevate — in rapporto al limite allo 0,05 — bisogna usare molta prudenza. D'altra parte si può stabilire che durante il tiro di quest'acciaio la caduta di tensione determina un certo equilibrio di tensione tra i fili tesi simultaneamente.

Per quanto riguarda il comportamento sotto carichi alterni, le proprietà dell'acciaio devono essere messe in relazione con le condizioni di lavoro della costruzione, non soltanto per ciò che si riferisce al fenomeno di fatica. Ad esempio secondo Zinser ampiezze di oscillazione del carico dell'ordine del 5% influiscono sul fluage nel senso che questo assume il valore che corrisponde alla tensione più elevata.

Nello studio della fatica si deve tener conto del fatto che le condizioni in cantiere differiscono spesso da quelle di laboratorio.

Si possono verificare:

- 1) forti piegamenti del filo dovuti a difetti di costruzione;

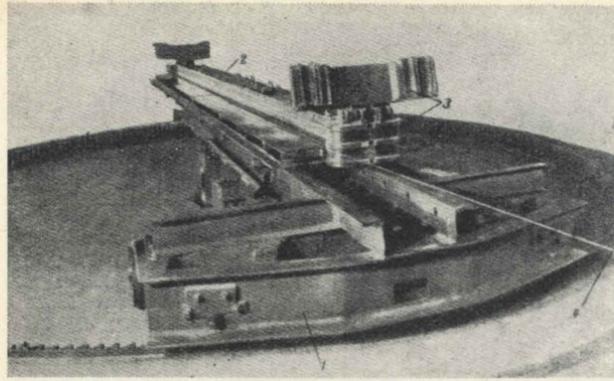


Fig. 10 - Attrezzatura per l'avvolgimento di armature pretese su pannelli prefabbricati (U.R.S.S.).

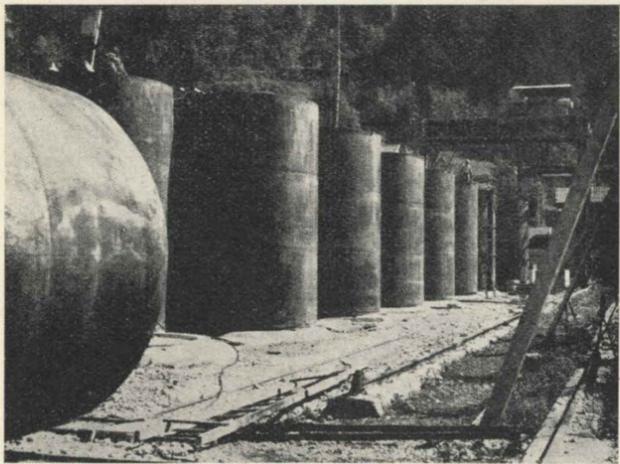
- 2) ancoraggi non in asse col filo per cui si ha una tensione eccentrica;
- 3) fili deteriorati.

Una tensione sicura è quella per la quale, nonostante gli inevitabili inconvenienti, non si hanno difficoltà in cantiere.

Circa le rotture spontanee si sono citati anche fattori che le possono causare in pratica e cioè anche difetti di costruzione come filatura, saldature nocive e tensioni interne. La responsabilità è del fabbricante. Una gran parte delle rotture è probabilmente dovuta a corrosione sotto tensione. Questo è un problema molto difficile e delicato, perché esprimendo un'opinione si corre il pericolo di portare uno svantaggio ad alcuni fabbricanti d'acciaio. Si deve quindi cercare di tenersi in una posizione più che mai esatta. Purtroppo da queste relazioni non si possono trarre conclusioni circa l'importanza pratica della sensibilità alla corrosione sotto tensione dei diversi acciai bonificati nelle varie prove.

Le rotture citate da Bouvy nel filo trafilato non sono dovute a corrosione sotto tensione, ma a difetti di lavorazione, mentre d'altra parte le travi precomprese, da lui citate per il loro buon comportamento dopo lunga immersione nel Mare del Nord, erano armate — per quanto risulta — con filo trafilato.

Fig. 11 - Elementi di condotte forzate precomprese mediante avvolgimento di armatura tesa (sistema S.A.C.A.I.M., Venezia).



È sorprendente che Belche non mette la corrosione sotto tensione in rapporto diretto con l'acciaio bonificato, ma con acciaio al Si-Mn durante la fabbricazione del quale si è prodotta una leggera decarburazione. Questa decarburazione può dare origine a screpolature superficiali e quindi, in determinate condizioni, a corrosione sotto tensione. Non si può sempre concordare con i punti di vista del Bouvy, secondo il quale i costruttori di filo sensibile a corrosione sotto tensione dovrebbero fornire questo filo avvolto su grandi rulli, per cui non si avrebbero corrosioni nel trasporto e nella messa in opera.

È giusto però che, aumentando il ϕ dei rulli si diminuisce la tensione nel filo e quindi il rischio di corrosione sotto tensione. Ci si può chiedere tuttavia se sia raccomandabile questa precauzione per altre ragioni. Infatti, quando vengono portati in un cantiere rulli di filo che presentino rotture per effetto di corrosione, l'attenzione dell'utilizzatore è subito attirata sul fenomeno. Si potrebbe quindi sostenere che è importante fornire l'acciaio sensibile alla corrosione in rulli di piccolo diametro e non protetti.

Nei cantieri accade spesso (p. es. con l'inizio del gelo) che i fili tesi siano esposti per lungo tempo alle intemperie, per cui può intervenire un attacco elettro-chimico.

Dalla comunicazione del Bouvy non si può concludere che non si siano mai constatate rotture di questo genere in cantiere. Diversi sistemi di ancoraggio non lasciano infatti modo di osservare le rotture dopo la messa in tensione.

I produttori di filo bonificato studiano a fondo il problema della corrosione sotto tensione, dato che si rendono conto della responsabilità che spetta anche ai fabbricanti per la sicurezza delle costruzioni.

Fino a quando non si sarà riusciti a riportare a valori normali la tendenza alla corrosione delle diverse qualità di filo bonificato, bisognerà stare molto attenti nell'usare questi fili e non impiegarli in condizioni che favoriscano la corrosione.

Per quanto riguarda l'influenza del trasporto, i consumatori non sono sicuri se debba essere accettato materiale con la superficie attaccata dalla ruggine. Se si tiene presente che una superficie perfettamente liscia, osservata al microscopio, non è certamente così liscia da non poter garantire un'aderenza abbastanza buona nel calcestruzzo, e se d'altra parte si considera che l'acciaio per precompresso è un materiale di alto costo, si giunge alla conclusione che questo acciaio deve essere perfettamente liscio e quindi privo di corrosione.

Se si desidera una buona aderenza fra calcestruzzo e acciaio, si devono usare p. es. superficie profilate. Nell'accettazione di un acciaio con intaccature nella superficie si deve partire dal concetto che le tolleranze di diametro influiscono anche sulla profondità di queste intaccature. Il fabbricante dell'acciaio deve fare in modo da mantenere quanto più costante sia possibile la profondità di queste intaccature. Il consumatore di filo intaccato deve sapere che, in rapporto alle caratteristiche massime otte-

nibili, la lunghezza d'ancoraggio non deve essere troppo piccola per evitare screpolature nelle travi nel punto di ancoraggio.

È però evidente che anche altri fattori devono essere considerati, p. es. la distanza tra i fili. Bisognerà pure definire la questione della profondità e della distanza delle intaccature in relazione alle difficoltà pratiche di esecuzione, cosa anche molto importante per il futuro sviluppo del precompresso.

Non si può rispondere, al momento attuale, in modo chiaro e semplice circa la determinazione esatta del concetto di acciaio per precompresso. Dalle comunicazioni riferite sopra si possono dedurre i seguenti punti per quanto riguarda la qualità e le caratteristiche dei fili ideali:

1) la qualità dell'acciaio deve permettere l'uso di un procedimento di fabbricazione, per cui il prodotto risulti di caratteristiche uniformi. La necessità di uniformità si riferisce:

- a) alla sezione,
- b) alla forma del diagramma sforzi-deformazioni, nel senso che l'allungamento sia praticamente costante sotto la tensione d'impiego,
- c) al limite convenzionale e alla resistenza a trazione, nel senso che si deve scegliere una tensione iniziale adatta,
- d) al comportamento di fluage e di rilassamento;

- 2) i fili devono essere privi di scaglie;
- 3) i fili devono essere privi di ruggine. La tendenza alla corrosione sotto tensione deve essere moderata;
- 4) i fili devono essere privi di screpolature interne e di difetti di superficie;

5) sotto tensioni maggiori delle tensioni d'impiego il materiale si deve comportare plasticamente, cioè l'acciaio deve avere un forte allungamento fra il limite convenzionale e il punto di massimo carico;

6) il materiale deve avere una buona lavorabilità. Deformazioni impreviste nella lavorazione non devono causare rotture durante la messa in tiro;

7) il filo deve essere rettilineo dopo lo svolgimento dal rullo (per travi a cavo).

Per poter stabilire quanto l'acciaio corrisponda alle caratteristiche richieste e per poter esaminare il suo comportamento in determinate condizioni, bisogna sottoporlo ad una serie di prove.

Circa le caratteristiche che deve avere un buon acciaio, sarebbe necessario poterle stabilire su basi internazionali in modo che anche gli esportatori potessero fornire acciai standard, basandosi su norme di accettazione uniformi. In particolare si dovranno stabilire prove atte a rivelare le filature e le screpolature nell'acciaio. Sembra che le prove di piegamento, di torsione e di resilienza non siano sempre adatte a mettere in rilievo i difetti dell'acciaio. Sarà interessante stabilire fino a che

punto abbia giovato la verniciatura del filo effettuata da Belche riguardo alla ricerca dei difetti superficiali. Si dovrebbero prendere in considerazione anche prove di avvolgimento, che danno la possibilità di esaminare una lunghezza maggiore.

Bisogna pure stabilire in quale modo devono essere eseguite le prove di fatica e di piegamento.

Per rendere la produzione quanto più economica sia possibile, è forse consigliabile dare alle diverse qualità di acciaio diverse resistenze alla trazione.

Se si pretende un'alta resistenza alla rottura per trazione, gli scarti che non possono essere utilizzati per precompresso influiscono sul prezzo.

Infine non si può omettere di accennare agli altri materiali, che potranno forse sostituire l'acciaio, ad esempio il vetro. Sarà quindi opportuno seguire attentamente lo sviluppo degli studi in questa direzione.

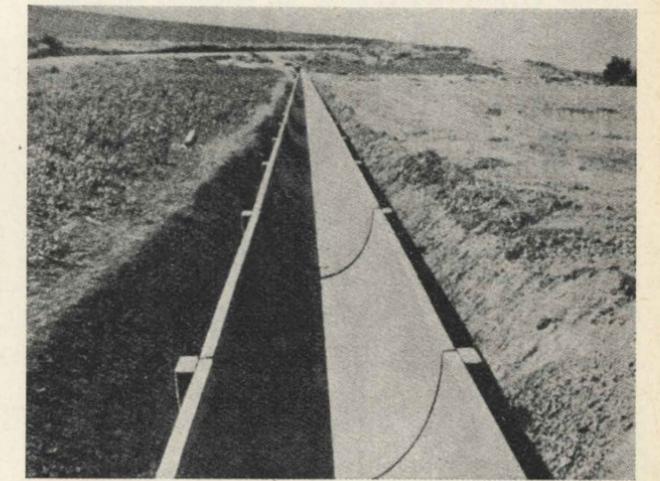


Fig. 12 - Canalette d'irrigazione (sistema S.T.U.P.).

CONCLUSIONE

1) È desiderabile che venga stabilito sul piano internazionale quali caratteristiche debba avere un buon acciaio per precompresso. Queste caratteristiche devono venire raccolte in capitoli di accettazione ben definiti.

2) Per rendere possibile uno scambio dei risultati delle ricerche e dei collaudi, i metodi di prova devono essere stabiliti internazionalmente.

3) Nello studio delle caratteristiche dell'acciaio devono venir prese in considerazione le condizioni nelle quali il materiale viene impiegato in pratica e nelle quali si trova nella costruzione.

4) Per raggiungere il miglior risultato è necessaria una stretta collaborazione fra produttore e consumatore. Il produttore deve essere conscio della sua parte di responsabilità nella sicurezza della costruzione. Egli deve tendere a ottenere l'uniformità del prodotto, che sarà necessario fabbricare con cura e privo di difetti interni e superficiali. Il consumatore dal canto suo deve impiegare l'acciaio in modo da non pregiudicarne le caratteristiche.

A. G. S. Bruggeling

Progressi nella fabbricazione in officina di travi precomprese

L'impiego della precompressione in cantiere per la posa in opera ed il collegamento di elementi prefabbricati

L'inglese New, relatore generale, passa in rassegna, sulla base delle comunicazioni presentate da vari congressisti, i progressi nella prefabbricazione di elementi precompressi, esaminando altresì l'impiego della precompressione come mezzo d'opera per realizzare i collegamenti fra elementi strutturali fabbricati separatamente.

Le comunicazioni su questo argomento sono state ricevute dal Belgio, dalla Germania occidentale, dalla Finlandia, dalla Gran Bretagna e dai Paesi Bassi. Si può constatare che ci sono delle notevoli lacune e sarebbero stati graditi almeno dei brevi riassunti dei lavori eseguiti negli altri Paesi.

Fabbricazioni in officina.

Quasi tutte le comunicazioni ricevute si riferiscono al procedimento di fili aderenti su grandi banchi, ed indicano che tale procedimento è largamente utilizzato ed è considerato attualmente come un metodo di costruzione corrente.

La memoria britannica mostra un panorama generale dei lavori eseguiti in Gran Bretagna e passa brevemente in rassegna i diversi tipi di elementi che sono stati messi a punto e fabbricati. In linea generale lo sviluppo ha seguito ovunque lo stesso andamento. Per completare le informazioni contenute nel rapporto britannico riporteremo ora qualche particolare su tre altre officine. I dati sono ricavati da comunicazioni private della A. B. Stränbetong di Stoccolma, della N. V. Nederlandse Spanbeton Maatschappij, di Alphen aan den Rijn e degli Stabilimenti K. M. Simons de Peruwelz.

A. B. Stränbetong.

Lunghezza dei banchi: 30,80 m e 85 m.

Unica dimensione dei fili utilizzati è 2 mm.

La fabbricazione comporta una grande varietà di prodotti; una parte importante è costituita dai pali.

La portata massima delle travi a fili aderenti è di 32 m.

Su due banchi l'indurimento si fa con immersione nell'acqua calda.

Il cemento alluminoso non è utilizzato.

La massima trazione ammessa è di 50 kg/cm²; più elevata di quella che viene ammessa in Inghilterra (35 kg/cm²).

N. V. Nederlandse Spanbeton Maatschappij.

La lunghezza dei banchi è di 107 e 30 m. Sono anche utilizzati dei telai di messa in tensione lunghi 12 m.

I banchi di 107 m riservati alla fabbricazione di pali sono interamente all'aperto. La composizione del calcestruzzo utilizzato è studiata per conseguire una resistenza di 350 kg/cm² a due giorni, senza riscaldamento.

La perdita di produzione normale dovuta alle intemperie è compresa fra il 15% e il 20% ma si considera che sia più economico accettarla che costruire una tettoia sopra il banco.

I banchi di 30 m sono all'interno di un fabbricato e sono attrezzati per il riscaldamento a vapore onde raggiungere normalmente dopo un giorno una resistenza di 350 kg/cm². Le piccole unità fabbricate a mezzo dei telai di 12 m sono ugualmente riscaldate. La varietà dei prodotti è notevole. Il filo normalmente impiegato è di 5 mm con tacche.

Stabilimenti K. ed M. Simon.

I banchi hanno 48 m di lunghezza.

Si impiegano delle trecce di due fili di 2,5 mm e di due fili di 3 mm anziché dei fili con tacche di 5 e 7 mm. La misura della tensione viene fatta direttamente con un peso, eliminando così la necessità di unificare gli allungamenti e la lettura dei manometri.

Una comunicazione olandese (N. 11 di *Herbschleb* e *Komijn*) analizza i vantaggi di tendere soltanto due fili per volta e descrive un martinetto che è stato messo a punto, per permettere la messa in tensione, l'ancoraggio e la distensione automatica.

Un numero crescente di pali fortemente precompressi è impiegato in Svezia ed in Gran Bretagna in lavori di porti e di opere idrauliche in condizioni in cui il c. a. ordinario rischia di essere deteriorato dalle acque aggressive. Il tempo però non ha ancora permesso di avere una sufficiente prova dei loro vantaggi. In Svezia hanno trovato larga applicazione le travi di copertura su appoggi semplici a fili aderenti con una lunghezza massima di 32 m.

Il rapporto N. 8 della Gran Bretagna tratta lo sviluppo delle traversine ferroviarie precomprese per le Ferrovie Britanniche.

Una comunicazione della Francia (N. 12 di Leontieff) si riferisce ad un'applicazione più recente di unità prefabbricate su grandi banchi: gli elementi di canali d'irrigazione poggianti su supporti che li mantengono a piccola distanza dal suolo; è inoltre descritta la tecnica per eseguire i giunti tra canalette.

Una comunicazione del Belgio (N. 2 di Magnel) tratta l'economia della costruzione delle travi partendo da elementi a I prefabbricati in officina, del peso da 750 a 1000 kg con placche di estremità rettangolari e cavi disposti ai lati dell'anima e ne riporta alcuni esempi notevoli. Si pone in evidenza che, in alcune condizioni, travi di 18 metri di luce, non sono più pesanti di travi in acciaio calcolate per gli stessi carichi con limitazioni alla freccia massima. Il rapporto tratta la maniera di assicurare la continuità utilizzando corte aste

filettate annegate nelle teste rettangolari proprio sopra le nervature superiori, anziché l'utilizzazione di cavi-cappello, e indica che, quando in corrispondenza d'un pilastro o di un'altra trave la continuità è ottenuta con questo metodo, si può omettere la mensola perchè il valore della precompressione del giunto può essere sufficientemente grande per resistere allo sforzo di taglio.

In un altro rapporto belga (N. 4 di Robin) questo tipo di costruzione è ugualmente descritto e l'autore insiste sul fatto che la continuità realizzata a mezzo di corte aste filettate ha dei vantaggi considerevoli sui cavi-cappello.

Il rapporto contiene la descrizione e l'applicazione del procedimento ad una grande officina.

Pilastri e pali.

I diversi vantaggi che furono riconosciuti ben presto per i pali e le palancole sono stati ampiamente utilizzati per i pilastri; l'utilizzazione di pilastri indipendenti è stata estesa ai piedritti collegati rigidamente alle travi trasversali in maniera da formare dei portali.

Una comunicazione francese (N. 7 di Jean-Bloch) fornisce particolari su un grande stadio i cui supporti principali comprendono una serie di pilastri e di travi a sbalzo. Lo schema del lavoro consisteva nel montare i pilastri nel foro di fondazione preparato in precedenza, sostenere il braccio della mensola nella sua posizione finale, colare il giunto tra questo braccio e la testa del piedritto e collegare in seguito la mensola al pie-

dritto a mezzo di una precompressione con cavi Freyssinet che attraversavano il giunto. È ugualmente descritta una serie di portali a tre cerniere i cui piedritti e le cui travi di copertura sono unite a mezzo di precompressione sul posto. Il rapporto britannico (N. 8) dà un esempio di portali analoghi precompressi col procedimento Gifford-Udall-CCL e Lee-Mac Call. Sono anche descritti i pilastri indipendenti di 18 m di altezza della White City a Londra (a fili aderenti, fabbricati su grandi banchi e trasportati per strada sul cantiere).

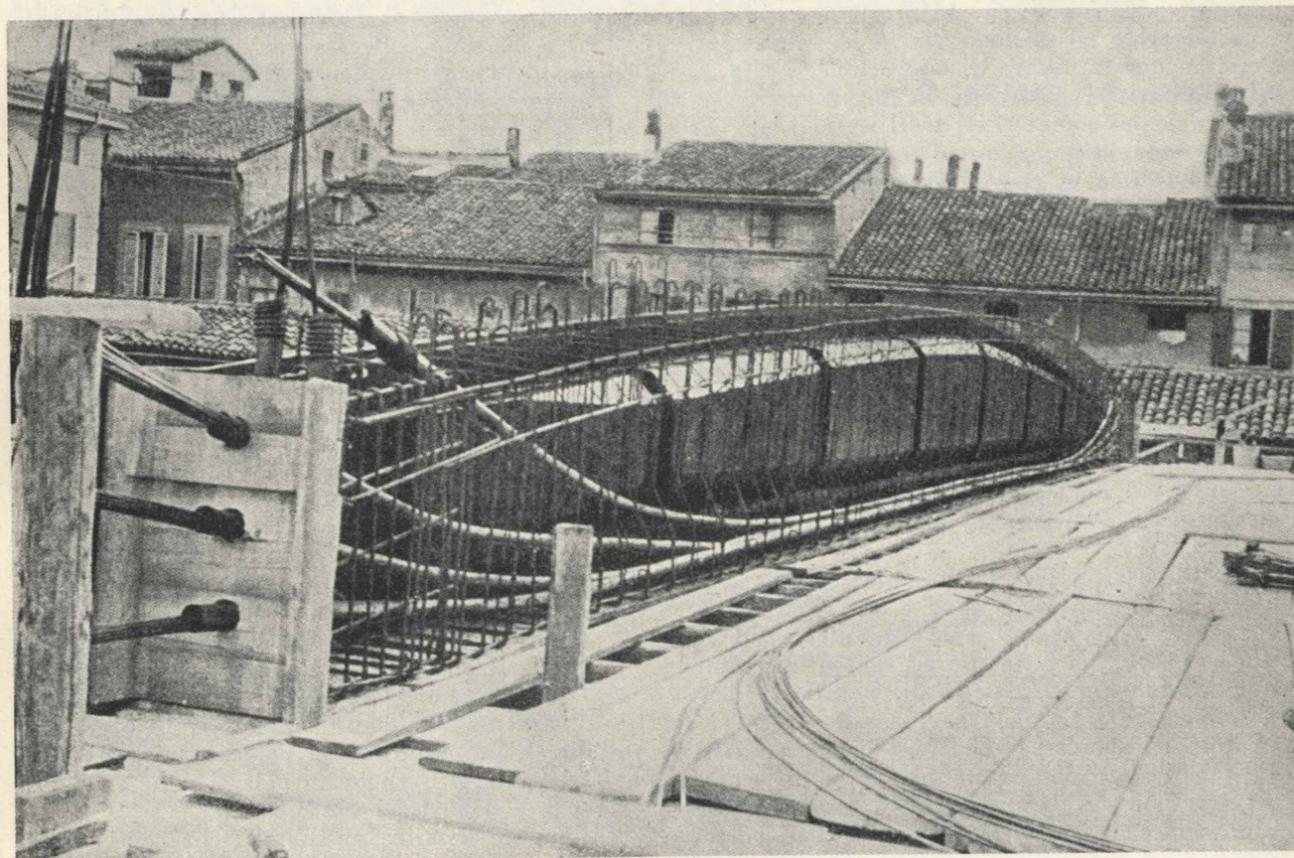
Travi di coperture a grande luce.

L'esecuzione di travi di coperture a grande portata a mezzo di precompressione di una serie di elementi prefabbricati ha già dato dei risultati promettenti e certamente si svilupperà ancora negli anni futuri.

Gli hangars della British European Airways all'aeroporto di Londra sono un esempio ben noto in cui travi di 33 m che pesano ciascuna 26 t (composte di elementi con una sezione a T di 1,80 di altezza, 90 cm di larghezza e 10 cm soli di spessore) sono state precomprese a pie' d'opera e varate a mezzo d'un paranco metallico.

Portate superiori a 48 m sono state realizzate all'aeroporto di Helsinki riunendo degli elementi prefabbricati in maniera da formare dei piani trasversali che erano in seguito collegati da nervature longitudinali con l'aiuto della precompressione. Le travi a traliccio così ottenute venivano

Fig. 13 - Copertura industriale a Bologna (sistema Rinaldi). Particolare dei cavi e delle armature di una trave intermedia.



sollevate a mezzo di una serie di martinetti. Quest'opera è descritta in maniera piuttosto dettagliata in un rapporto finlandese (N. 5 di Törmänen, Kakko e Janhunen) e comprende qualche indicazione particolarmente interessante sui mezzi impiegati per colare i giunti e iniettare i cavi con tempo assai freddo.

Le travi di 30 m e più sono molto vantaggiosamente costruite con unioni di elementi, ma è interessante notare che in Svezia sono state fatte travi fino a 32 m di lunghezza con il procedimento di grandi banchi e trasportati a varie centinaia di chilometri per essere messe in opera.

Costruzioni a traliccio.

Un altro rapporto finlandese (N. 3 di Sandström) dà dei particolari circa due fabbricati industriali le cui coperture sono sopportate da una serie di capriate di cui ciascuna è formata da due puntoni precompressi la cui spinta è sopportata da un tirante formato da una serie di elementi riuniti a mezzo di precompressione mentre il peso proprio del tirante è sopportato da sospensioni attaccate ai puntoni.

Il rapporto britannico (N. 8) dà particolari su una capriata costituita da una serie di elementi rettangolari su un'ossatura ad arco con un tirante precompresso incorporato nello spessore di un tavolato di servizio, e su un elemento a doppia mensola con un supporto a traliccio che è specialmente vantaggioso nella costruzione di scuole.

Costruzioni miste.

Il campo di applicazione delle costruzioni miste in c. a. precompresso associato al c. a. ordinario col quale è collegato in maniera monolitica è considerevole ed esistono già molti interessanti esempi in questo genere di costruzione.

L'applicazione principale in Inghilterra è costituita da solai composti da travi rettangolari che lavorano monoliticamente con una lastra di c. a. ordinario gettata in opera. All'aeroporto di Londra sono stati eseguiti più di 20.000 m² di solai di questo tipo.

Un rapporto olandese (N. 1 di Pelle e Bruggeling) dà alcuni esempi di ponti composti da una serie di travi precomprese prefabbricate con delle traverse ed un ordito gettato in opera e precompresso trasversalmente. Si indica ugualmente che una modifica delle estremità delle travi che consiste nel prolungarle alternativamente in un senso e nell'altro al di sopra degli appoggi e nell'unirle in seguito con dei cavi trasversali, costituisce un procedimento soddisfacente per assicurare la continuità.

Una differenza, piccola ma interessante, nella maniera di fare i giunti tra il c. a. p. ed il calcestruzzo gettato in opera in Inghilterra ed in Olanda consiste nel fatto che gli inglesi utilizzano normalmente delle staffe verticali, mentre gli olandesi impiegano un'armatura a spirale.

I rapporti olandesi considerano che non è normale tener conto dell'effetto del ritiro del calcestruzzo gettato in opera nel calcolo delle strutture miste, mentre in Gran Bretagna se ne tiene conto,

benchè i calcoli siano spesso semplificati ammettendo semplicemente una precompressione supplementare di 14 kg/cm² destinata a combattere l'effetto del ritiro.

Un rapporto della Germania occidentale (N. 6 di Rühle) fornisce un metodo che permette di tener conto del fluage e del ritiro nel calcolo delle costruzioni miste. Si raccomanda che il calcestruzzo gettato in opera sia della stessa qualità di quello delle travi precomprese, il che è molto interessante, perchè esiste una corrente di opinioni che considera che il béton gettato in opera deve contenere il minimo di cemento necessario ad assicurare la resistenza richiesta, al fine di ridurre il più possibile il ritiro.

Un rapporto francese (N. 9 di Baret) dà un esempio di costruzioni miste applicate a fabbricati non industriali.

Costruzioni in generale.

Uno dei rapporti francesi (N. 7 di Jean-Bloch) tratta di costruzioni costituite di elementi collegati a mezzo di precompressione. Sono descritti i seguenti esempi di opere:

Un solaio di fabbricato di officina costituito da una serie di travi principali e secondarie messe in opera e unite al disopra degli appoggi da cavicappello Freyssinet, tutto il solaio essendo in seguito precompresso in due direzioni dopo la colata dei giunti.

Una costruzione all'interno di un fabbricato esistente, composta da una serie di portali i cui piedritti sono composti di blocchi riuniti a mezzo di precompressione e le travi di unione gemelle, separate a mezzo di diaframmi. Le estremità delle travi sono state collegate con precompressione ai piedritti in corrispondenza di ogni solaio a mezzo di cavi che attraversano i diversi elementi formanti questi pilastri e che realizzano così una continuità completa in tutti i giunti.

Il ponte sull'Amstel, è stato un notevole esempio di fabbricazione e di messa in opera rapida.

L'utilizzazione dell'indurimento a vapore per grandi elementi prefabbricati presenta uno speciale interesse. Gli elementi sono stati trasportati in opera per mezzo di una gru galleggiante.

Un esempio interessante di prefabbricazione applicata ad una costruzione di un pontile: le travi, con interasse quattro metri secondo ciascuna delle due direzioni sopportano delle lastre prefabbricate di 8 x 8 m e di 30 cm di spessore, pesanti 48 t ciascuna e precomprese nei due sensi. Tutta la soletta è resa solidale dalla precompressione dopo il getto dei giunti. Una particolarità interessante della fabbricazione consiste nel disarmo delle lastre a mezzo di martinetti piatti Freyssinet.

Un altro rapporto francese (N. 9 di Baret) fornisce alcuni buoni esempi di utilizzazione di cavi per ottenere la continuità.

Una comunicazione olandese (N. 10 di Bouvy) studia, a proposito di un ponte a travate multiple, i vantaggi e gli inconvenienti delle travi isostatiche e delle travi continue.

L'autore descrive un metodo che consiste nel-

l'ottenere la continuità utilizzando una serie di travi prefabbricate le cui estremità si estendono un breve tratto oltre gli appoggi e presentano in tal punto un numero doppio di travi che in mezzeria. Le travi sono collegate a mezzo di precompressione trasversale in corrispondenza degli appoggi con cavi di messa in tensione dopo il getto e l'indurimento dei giunti. L'attrito creato tra le travi con tale precompressione trasversale è più che sufficiente a resistere allo sforzo di taglio generato dai momenti flettenti sotto il carico minimo.

Il rapporto inglese (N. 8) fornisce alcuni particolari su un gran numero di opere composte da elementi prefabbricati ed uniti con precompressione in cantiere. Gli esempi sono dati per i quattro principali procedimenti di precompressione ed è esaminata l'esecuzione dei giunti intermedi. Questo rapporto descrive la costruzione di un cinema, nell'isola di Malta, per il quale l'ingegnere incaricato dell'opera ha dovuto sostenere un ruolo speciale, perchè il proprietario del cinema aveva deciso di essere il suo impresario.

Molti ponti sono descritti ed in particolare il ponte di 33 m a Gunthorpe sul Trent, destinato a sopportare delle condotte d'acqua, che è stato costruito a riva sul prolungamento del suo definitivo piazzamento. È stato varato per mezzo di un traino a rulli e di un pontone galleggiante.

Tra i più interessanti esemplari noi citeremo la passerella Whiteleigh a Plymouth ed il ponte che unisce le isole di Lewis e Great Bernera.

È descritto un procedimento interessante per la costruzione di scuole, conosciuto sotto il nome di Intergrid. Una serie di elementi prefabbricati standard aventi modulo 1 metro è sopportata da piedritti precompressi e collegati finalmente in opera in due direzioni a mezzo di precompressione.

Si segnala un ponte nella Nuova Zelanda le cui travi presentano la particolarità interessante di comportare dei giunti tra i diversi elementi a metà distanza dalle traverse anzichè situarli in corrispondenza di queste come vuole la pratica corrente.

Le passerelle di Hampshire County Council danno un buon esempio di applicazione della precompressione in opere piccole. Il metodo descritto si applica molto bene nei cantieri isolati con un'attrezzatura ridotta.

Conclusione.

Le comunicazioni ricevute dimostrano che coloro i quali assicurano lo sviluppo del c. a. p. danno prova di molta ingegnosità. In particolare nel quadro delle costruzioni composte da elementi prefabbricati riuniti a mezzo di precompressione, è evidente che la collaborazione tra progettista e costruttore è necessaria fin dallo stadio preliminare dello studio.

Grazie a questa collaborazione, lo sviluppo di tale metodo di costruzione semplice ed economico deve eclissare in un prossimo avvenire tutto ciò che è stato fatto in questo campo fino ad oggi.

D. H. New

Distribuzione dei momenti nelle costruzioni iperstatiche precomprese oltre la fase elastica

L'Autore, il francese Y. Guyon, riferisce sull'argomento della redistribuzione delle sollecitazioni in regime plastico nelle strutture iperstatiche. Egli esamina separatamente la fase di fessurazione ed il comportamento a rottura. Particolare rilievo viene dato al problema di stabilire le possibilità o meno di una completa redistribuzione a rottura.

Il tema proposto è stato oggetto delle seguenti comunicazioni:

1) « Distribuzione dei momenti nelle costruzioni iperstatiche al di là del limite elastico » di G. Magnel (Belgio);

2) « Studio sperimentale di travi continue precomprese in campo plastico ed a rottura » di G. Macchi (Italia).

3) « Ricerche svolte in Gran Bretagna sulla redistribuzione dei momenti in travi continue precomprese » di P. B. Morice (Inghilterra);

4) « Determinazione della legge momento-curvatura in una trave rettangolare » di Y. Guyon (Francia).

Il relatore ha ricevuto inoltre le due comunicazioni seguenti, che saranno pubblicate negli Atti e sulle quali gli autori daranno chiarimenti durante il Congresso:

5) « The ultimate strength of two-span continuous prestressed concrete beams » di P. B. Morice e H. E. Lewis (Inghilterra);

6) « Prova d'una lastra precompressa senza fungo » di M. Lebel (Francia).

Tutte queste comunicazioni si riferiscono a risultati sperimentali.

Prove del Professor Magnel.

Il Professor Magnel ricorda le prove fatte su lastre quadrate nel suo laboratorio, secondo le quali il carico di fessurazione è stato accertato a meno del 5 %, pari al carico calcolato elasticamente. Dà notizia inoltre di prove fatte su quattro travi continue a due campate, di cui due erano munite di ferri non tesi agli angoli della sezione. Queste travi sono state provate a fessurazione, a fatica ed a rottura. Le reazioni sono state misurate accuratamente.

Non si è avuta alcuna redistribuzione sensibile prima della fessurazione, sia per le travi munite di ferro dolce complementare che per le altre. Non pare che la redistribuzione prima della rottura sia stata completa, il che è confermato dalla misura

delle reazioni che non hanno raggiunto i valori che avrebbero dovuto avere in tale ipotesi.

In seguito a queste prove, il Professor Magnel afferma l'impossibilità di un adattamento prima della fessurazione e la validità con un'approssimazione sufficiente, ch'egli valuta del 10 %, delle teorie elastiche fino a fessurazione.

Comunicazioni inglesi.

Le comunicazioni del Dr. Morice e del Dr. Morice e M. Lewis danno i risultati di prove eseguite in Inghilterra su travi a due campate per conto della Cement and Concrete Association, dell'Imperial College e dell'Università di Leeds.

Uno degli scopi principali delle prove della Cement and Concrete Association era di verificare che il carico di rottura d'una trave continua non dipende che dalla forma intrinseca del cavo in ogni campata, potendo subire tale tracciato degli spostamenti sugli appoggi intermedi, restando fissi gli ancoraggi di estremità, senza modificare il carico di rottura.

Noi avevamo indicato la probabilità di questa invarianza, (analoga nella fase di rottura alla invarianza del campo elastico quando si spostano i punti di passaggio sugli appoggi) in una conferenza tenuta a Londra nel 1952. Le prove della Cement and Concrete Association hanno verificato un'invarianza intorno al 5 %, malgrado degli spostamenti considerevoli, da una prova all'altra, del punto di passaggio del cavo sugli appoggi.

I risultati, che si riferiscono a 28 travi possono essere considerati fonte di dati statistici.

Tra i più significativi, sono da notare quelli relativi a due travi a cavi parabolici; nell'una le parabole si tagliano sull'appoggio centrale con un punto angoloso; nell'altra si era trasformato l'andamento in una parabola unica facendo ruotare le parabole attorno ai loro ancoraggi terminali, abbassando così il punto di passaggio sull'appoggio intermedio fino ad ottenere il raccordo con tangente orizzontale. Così in questa seconda trave il momento resistente nella sezione sull'appoggio centrale diventava assai piccolo (dell'ordine di 1/16 di quello che presentava la stessa sezione nella prima trave). In assenza di redistribuzione, la trave avrebbe dovuto cedere per insufficienza di resistenza sull'appoggio ed il carico di rottura avrebbe dovuto essere assai basso. È risultato invece, con un'approssimazione del 5 %, lo stesso (3.040 e 3.200 kg), anzi più alto per la seconda trave.

Nella comunicazione del Dr. Morice e di M. Lewis si trovano i dati numerici relativi all'insieme delle 28 prove, ma stimiamo utile riportare quelli che si riferiscono alle due precedenti perchè dimostrano, qualora fosse ancora necessario farlo, l'assurdità che ci sarebbe nell'applicare sezione per sezione, nel caso di costruzioni iperstatiche, le regole di sicurezza valevoli unicamente per le strutture isostatiche.

La tabella 1 riassume i dati e i momenti resistenti calcolati.

La luce di ogni campata è di 2,286 m.

TABELLA I.

	Eccentricità del cavo		Momento resistente calcolato	
	In campata	Sull'appoggio cm	M kg m	M' sull'appoggio centrale (kg m)
Prima trave (cavo concordante)	-0,635	+ 1,27	+ 980	-1,040
Seconda trave (cavo trasformato)	- 3,8	- 5,08	+1,550	- 62

L'errore consisterebbe nell'ammettere che le eccentricità degli sforzi creati dal cavo restino fino a rottura quelle calcolate elasticamente, (cioè le eccentricità del cavo concordante). In questa ipotesi, quando il cavo esercita il suo sforzo di rottura, cioè 26.000 kg, i momenti ch'esso creerebbe sarebbero $-26.000 \times 0,635 = -16.600$ kgcm, cioè -166 kgm in campata e $26.000 \times 1,27 = 33.000$ kgcm, cioè $+330$ kgm sull'appoggio centrale.

I momenti sotto l'effetto d'un carico P, espresso in kg, applicato in mezzeria di ogni campata, assumono d'altra parte il valore, in kgm, di $0,357 P$ in mezzeria e di $-0,428 P$ sull'appoggio.

Si dovrebbe allora avere la rottura per il minimo valore di P tale che:

$-166 + 0,357 P =$ momento resistente M (in mezzeria);

$+ 330 - 0,428 P =$ momento resistente M' (sull'appoggio);

ciò che darebbe:

$P = 3.160$ kg per la prima trave;

$P = 880$ kg per la seconda, cioè 3,6 volte più piccolo che per la prima.

L'esperienza dimostra che il ragionamento sarebbe completamente sbagliato. Il cavo non può infatti raggiungere, nel caso della seconda trave, la sua tensione di rottura sull'appoggio centrale senza che la trave si fessuri largamente con forti curvature. La legge di proporzionalità momento-curvatura non è più valida e l'uguaglianza $330 - 0,428 P = M'$ non ha più significato poichè il primo termine non ha più senso. Tutto ciò che si sa è che il centro di pressione nella sezione di appoggio è in tal caso a metà dell'altezza del calcestruzzo che rimane intatto e che il momento, in questa sezione, tende verso il valore del momento resistente. Ma la tendenza ad aumentare del momento sull'appoggio diminuisce e per conseguenza quella del momento in campata cresce. Se la curvatura di rottura della sezione sull'appoggio può diventare tanto grande che il momento in travata raggiunga a sua volta il suo valore limite M, si dovrà avere:

$$\frac{Pl}{4} - \frac{M'}{2} = M \quad \text{oppure} \quad \frac{Pl}{4} = M + \frac{M'}{2}$$

Ora le formule che forniscono i valori dei momenti resistenti, delle quali l'ultimo Congresso ha provato la validità, insegnano che, per una for-

ma intrinseca del cavo data, la somma $M + \frac{M'}{2}$

è costante qualunque sia la posizione del punto di passaggio sull'appoggio centrale. Se infatti h è l'altezza utile (distanza del cavo dal lembo compresso), F_2 lo sforzo di rottura del cavo, b la larghezza della sezione ed R la resistenza del calcestruzzo a compressione, il momento resistente è uguale a:

$$h F_2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{F_2}{bhR}\right) = F_2 \left(h - \frac{1}{2} \frac{F_2}{bR}\right) = F_2 \left(h - \frac{a}{2}\right)$$

dove a è lo spessore del calcestruzzo necessario per resistere allo sforzo di rottura del cavo; a è costante ed indipendente dall'altezza utile h. Se h ed h' sono le altezze utili in mezzeria e sull'appoggio, $M + \frac{M'}{2}$ è uguale a $F_2 \left(h + \frac{h'}{2} - \frac{3a}{2}\right)$; ora

$h + \frac{h'}{2}$ è costante qualunque sia la trasformazione

che si fa subire al cavo per spostamento del punto di passaggio sull'appoggio intermedio; infatti se si abbassa questo punto di una quantità u, si abbassa il punto di passaggio in mezzeria delle trave di una quantità $\frac{u}{2}$; $\frac{h'}{2}$ diminuisce dunque di

$\frac{u}{2}$, h aumenta di $\frac{u}{2}$, ed $h + \frac{h'}{2}$ conserva lo stesso valore.

Nella comunicazione del Dr. Morice e M. Lewis si ritroverà tutto ciò espresso in maniera un po' differente; ma noi abbiamo giudicato utile insistervi perchè appare che la proprietà d'invarianza del carico di rottura non debba essere, nel-

l'ipotesi della redistribuzione completa, soggetta alle restrizioni da noi considerate nei primi lavori in argomento. Queste si riferivano al caso in cui le trasformazioni del tracciato portassero il cavo, in alcune sezioni, troppo vicino al lembo compresso, diminuendo considerevolmente il rendimento di tali sezioni (cioè il rapporto tra momento resistente effettivo e momento massimo possibile hF_2).

Il Dr. Morice e M. Lewis accennano a tale restrizione nel loro rapporto. In realtà l'esperienza dimostrerebbe che non è il caso di farla, e le formule riportate qui sopra, che tengono conto delle eventuali diminuzioni di rendimento, dovute al piccolo valore raggiunto da h in rapporto allo spessore fisso a, dimostrano il perchè della cosa.

Un'altra constatazione fatta nel corso delle prove è ugualmente di grande interesse; si tratta del confronto tra i carichi di rottura di due travi identiche, a due campate, l'una soggetta a due carichi P simmetrici, applicati in mezzeria di ogni campata, l'altra soggetta a uno solo di questi carichi P. I valori dei carichi di rottura, cioè il valore di ciascuno dei carichi P, è stato sensibilmente lo stesso per le due travi (con approssimazione del 5 %) in armonia ancora con l'ipotesi della redistribuzione completa.

Le prove dell'Università di Leeds si riferiscono a 7 travi di cui due a fili aderenti rettilinei e 5 precomprese mediante cavi curvi. Le reazioni degli appoggi di estremità erano misurate mediante un metodo dovuto a Glanville e Thomas. Le travi a fili aderenti hanno ceduto per sforzo di taglio. Per le travi precomprese mediante cavi, pare che la redistribuzione sia stata completa; i momenti in travata e sull'appoggio, conosciuti mediante la mi-

Fig. 14 - Stazione Transatlantica di Le Havre. Costruzione ad elementi prefabbricati resi solidali in opera (sistema S.T.U.P.).



sura delle reazioni, hanno raggiunto infatti i valori teorici dei momenti resistenti in tali sezioni, con degli scarti dell'ordine massimo del 12 %.

Per quanto si riferisce alle prove fatte all'Imperial College, non si hanno i risultati dettagliati; queste prove, d'altra parte, erano ancora in corso quando è stato scritto il rapporto del Dr. Morice. Gli scopi cercati sono descritti in questo rapporto.

Prove Italiane.

Mentre le prove inglesi sembrano concludere che è valido il calcolo a rottura basato sull'ipotesi di una ridistribuzione completa, le comunicazioni italiane introducono notevoli restrizioni.

L'Ing. Macchi presenta una comunicazione relativa a prove eseguite presso il « Centro di Studio sugli Stati di Coazione » del Politecnico di Torino su tre travi continue a campate ineguali, soggette a un carico unico applicato nella mezzera della campata centrale.

Il Professor Franco Levi fa una presentazione di questa comunicazione, nella quale trae una filosofia dei risultati ed indica un programma di lavoro. Questa presentazione e questi commenti sono di per sé un contributo molto interessante.

La comunicazione di G. Macchi descrive in primo luogo dettagliatamente i dispositivi sperimentali impiegati per la misura delle grandezze necessarie all'interpretazione: carichi, momenti, reazioni, curvature, momenti resistenti (determinati mediante una prova diretta eseguita su un moncone della trave); la comunicazione indica le cause di errori da evitare in prove analoghe e la maniera in cui sono state eliminate nel corso delle prove successive.

La comunicazione presentata non è che la prima tappa d'uno studio più completo annunciato dall'autore e dal Professor Franco Levi; questo studio tenderà a seguire l'evoluzione del comportamento della trave; cioè la maniera in cui la trave passa progressivamente dallo stato elastico allo stato plastico. In conseguenza questa prima parte non contiene che dei risultati relativi alla rottura. Il risultato essenziale e degno di attenzione è che sulle travi provate la ridistribuzione sarebbe stata ben lontana dall'essere completa, essendo stato il carico di rottura osservato notevolmente inferiore a quello corrispondente alla ridistribuzione completa (del 13 % per un rapporto di campate $\frac{1}{2} : 1 : \frac{1}{2}$; del 22 % per un rapporto di campate $\frac{3}{4} : 1 : \frac{3}{4}$). L'autore ricorda d'altronde che

il Professor Magnel aveva ottenuto in un caso analogo (3 campate uguali con un carico concentrato in mezzera della campata centrale) una ridistribuzione molto ridotta prima della rottura.

L'autore conclude che il « rendimento » (rapporto tra il carico di rottura effettivo ed il carico corrispondente all'adattamento completo) dipenderebbe dal rapporto delle riserve di resistenza che posseggono le sezioni critiche (cioè delle cosiddette « cerniere plastiche »). In altri termini, se 1 e 2 sono queste sezioni e se M_{1e} ed M_{2e} sono i momenti

nel periodo elastico e M_{1r} ed M_{2r} i momenti resistenti, le riserve sono $\frac{M_{1r}}{M_{1e}}$ e $\frac{M_{2r}}{M_{2e}}$ e il rendimento sarebbe funzione del rapporto delle riserve delle sezioni 1 e 2.

Nella sua presentazione di queste prove, il Professor Franco Levi conclude che non è possibile « calcolare » correttamente il margine di sicurezza facendo astrazione dall'evoluzione completa delle deformazioni.

Comunicazioni Francesi.

La comunicazione del Sig. Lebel è relativa a prove eseguite su un modello di lastra in calcestruzzo precompresso in due direzioni, sopportate da pilastri senza fungo.

La fessurazione è comparsa sotto carichi molto superiori a quelli previsti dalla teoria elastica e la rottura non si può spiegare che pensando che lungo le linee congiungenti le teste dei pilastri i momenti negativi abbiano raggiunto un valore uniforme, uguale a quello pure uniforme dei momenti positivi lungo una linea mediana.

L'autore ricorda inoltre che risulta, da prove recenti effettuate presso il Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics su travi iperstatiche precomprese, che l'adattamento sarebbe completo prima della rottura.

La nostra comunicazione descrive prove da noi eseguite con la partecipazione della Chambre Syndicale des Constructeurs en Ciment Armé de France su sei travi precomprese a sezione rettangolare, isostatiche, aventi per scopo la determinazione della legge momento-curvatura; tali prove, anche se relative a travi isostatiche, rientrano nel tema proposto, poichè da questa legge dipende il funzionamento di ogni costruzione iperstatica.

Esse hanno mostrato che, nel caso particolare provato, i fenomeni di plasticità prima della fessurazione erano molto ridotti; d'altra parte che la resistenza alla fessurazione pareva nettamente più grande sul bordo compresso dalla precompressione che non sul bordo opposto; infine che le massime curvature, per le quali avviene la rottura, sembravano inferiori a quanto si poteva prevedere. Quest'ultima conclusione tuttavia risulta da una estrapolazione dei diagrammi fino a rottura, perchè le misure — per evitare di deteriorare gli apparecchi — non sono state fatte fino a rottura completa, bensì fino al 96 % in una prova e al 90 % in un'altra; non è impossibile che nella fase ultima precedente la rottura, la curvatura aumenti di più di quanto supponga l'extrapolazione.

Ci si trova dunque, in questo Secondo Congresso, di fronte agli stessi problemi del Primo Congresso; alcuni progressi sono stati fatti nella conoscenza del fenomeno, ma tali progressi hanno fatto sorgere nuovi dubbi sul punto essenziale: e cioè sul modo di valutare la sicurezza alla rottura.

Sarà necessario o togliere questi dubbi o, se questi saranno confermati, trovare i mezzi pratici per valutare le diminuzioni da far subire ai carichi di rottura calcolati con i metodi semplici generalmente ammessi.

Il primo problema è quello della fessurazione. Esso è importante se si considera l'assenza di fessurazione come criterio per definire il campo di utilizzazione.

Il Professor Magnel si basa sulle sue prove di travi e lastre: secondo lui la fessurazione avviene, con una approssimazione del 10%, a seguito di fenomeni puramente elastici e senza alcun adattamento.

Dal canto nostro, uno degli scopi delle prove che abbiamo iniziato, precisamente in seguito a discussioni che avevano avuto luogo in occasione dell'ultimo Congresso, era di studiare, senza idee preconcepite, se si producono dei fenomeni plastici prima della fessurazione. Noi stimiamo d'altronde che le nostre prove danno una risposta più categorica di una prova complessa su un sistema continuo, perchè si riferiscono alla causa dei fenomeni e non agli effetti, che possono essere influenzati da circostanze variabili e persino non essere percepiti nelle circostanze che si sono create; mentre potrebbero esserlo in altre circostanze.

Per il caso particolare che abbiamo studiato, e che corrisponde sensibilmente a dei casi di sezioni e di tracciato di cavo di travi continue che noi avevamo provato in precedenza, la risposta è negativa: i fenomeni plastici prima della fessurazione intervengono assai poco.

Bisogna dunque, a nostro avviso, abbandonare l'ipotesi della plasticità nella spiegazione dei fenomeni di adattamento prima della fessurazione. Ciò non significa che tali fenomeni siano impossibili, poichè alcune prove ne dimostrano l'esistenza, ma le cause sarebbero elastiche.

Per quanto il calcestruzzo non sia un materiale elastico, non è assurdo studiare questi fenomeni facendo l'ipotesi elastica, considerando questa elasticità come un fenomeno statistico. Quando si guarda il problema sotto questo angolo, si arriva alla concezione che gli adattamenti constatati, forse non sono che apparenti, e che la fessura può esistere rimanendo troppo sottile per poter essere percepita (microfessurazione), o ancora che si può avere fessura senza rottura di contatto.

A nostro avviso, e salvo casi particolari in cui entrerebbe in gioco il pericolo di infiltrazioni, tali apparenze equivalgono in pratica a mancanza di fessurazione.

Sembra necessario, perchè si producano tali adattamenti, che la resistenza dell'elemento iperstatico metta in gioco il funzionamento successivo di differenti sistemi portanti; il primo sistema è il sistema elastico nel senso comune, il secondo funziona ancora elasticamente; ma l'elemento ha cambiato definizione. Se questo cambiamento di definizione si accompagna a reazioni interne tali che la fessurazione che doveva prodursi alla fine del primo funzionamento non abbia potuto svilupparsi, il fenomeno di insieme potrà parere plastico.

È probabilmente ciò che avviene nelle lastre continue con travi di bordo che presentano una rigidità sufficiente nel piano della lastra. Il primo sistema portante è la lastra in flessione; il secondo è, in seguito ad una fessurazione senza rottura di con-

tatto o microscopica, un sistema di aste che si crea nell'interno della lastra e che funziona come un arco a una, due o tre cerniere, che prende le travi di bordo come muro di sponda; questo secondo funzionamento non può verificarsi senza la nascita di spinte — che le prove mettono in evidenza — le quali impediscono l'apertura della fessura molto oltre al carico teorico sulla base dei calcoli elastici.

Noi abbiamo provato a riprodurre su una delle travi, della nostra prova momento-curvatura, delle condizioni analoghe a quelle delle lastre, appoggiando la trave su un tirante esterno capace di entrare in gioco dopo esaurimento della resistenza elastica della trave. Ed in questa prova abbiamo ottenuto effettivamente due funzionamenti elastici successivi, mentre la fessura non è comparsa che alla fine del secondo. A noi pare che le prove del Sig. Labelle sulle lastre senza fungo vengano in aiuto a questa ipotesi di funzionamenti successivi, ed alle loro conseguenze.

Per di più, sarebbe certamente una perdita di tempo discutere unicamente sui principi: bisogna ricondurre la discussione sul solo piano in cui essa ha un'utilità pratica. Su tale piano il problema si pone nel modo seguente: la sicurezza alla rottura esige, quando si sia fissato il coefficiente di sicurezza, una certa sezione di acciaio.

Tale sezione noi non sappiamo sempre valutarla. Ma in ogni caso il minimo corrisponde al caso di adattamento completo prima della rottura. Se si impone all'acciaio, così determinato, una tensione permanente uguale al massimo ammissibile, i casi sono due: o la sicurezza a fessurazione calcolata elasticamente è sufficiente, e allora la discussione è inutile; o è insufficiente ed è in questo caso soltanto che è necessario prender posizione.

Inversamente se, avendo determinato a mezzo delle teorie elastiche l'acciaio in maniera da ottenere una data sicurezza a fessurazione, la sicurezza alla rottura è assicurata senza sovrabbondanza, la discussione non ha ragione di essere. Essa è utile soltanto se, con questa quantità di acciaio, la sicurezza alla rottura è sovrabbondante.

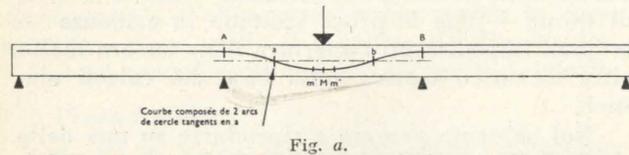
Ora, si constata che nella maggioranza dei casi, se si tratta di travi a definizione semplice, ci si trova nel primo caso, eccetto alcune zone molto ristrette.

Qualunque sia l'opinione che si possa avere, tutto può essere conciliato se si ammettono per le costruzioni iperstatiche di questo genere ed in queste zone ristrette, degli sforzi di tensione dell'ordine di $\frac{1}{12}$ o $\frac{1}{10}$ della resistenza del calcestruzzo

a compressione (si può d'altronde rendere questa regola più rigorosa limitandola al caso di carichi eccezionali — dovendo essere rispettati i limiti usuali a trazione nell'opera scarica) e imponendo d'altra parte che nelle sezioni in cui è applicata ci si procuri in più la sicurezza « cemento armato », ciò che è ottenuto con l'aggiunta di armature non tese.

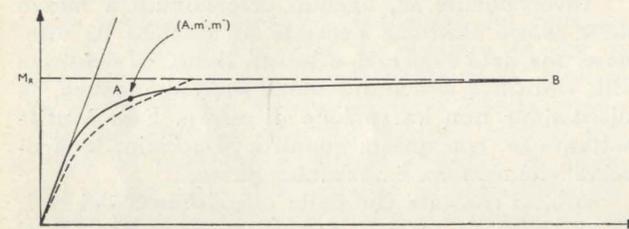
Quest'ultima proposta era già stata emessa durante il Primo Congresso; pare molto moderata

salvo a discutere il valore degli sforzi di trazione ammissibili. Essa deve essere rimessa all'ordine del giorno del Secondo Congresso. D'altronde è già ammessa dal regolamento di alcuni paesi.



In alcune strutture più complesse, suscettibili di assumere parecchie definizioni successive, la sicurezza alla rottura può diventare assurdamente sovrabbondante se si dimensiona valutando la sicurezza alla fessurazione per mezzo di regole convenzionali: leggi elastiche che d'altronde comportano talvolta coefficienti empirici, ipotesi di resistenza nulla a trazione, e supponendo in più che la decompressione della faccia messa in trazione dai carichi porti immediatamente a delle aperture di fessure tali da mettere in pericolo le armature.

Si arriva per contro a un dimensionamento ragionevole prendendo per base, non il primo funzionamento elastico, se è dimostrato che esso corrisponde a una piccola frazione della vita dell'elemento, ma uno degli ulteriori funzionamenti (per esempio quello delle bielle nel caso delle lastre), a condizione che esso possa effettivamente prodursi, ciò che esige uno speciale esame delle condizioni sui bordi o più generalmente delle condizioni ai limiti e che si sia dimostrato sperimentalmente che tale funzionamento non presenti alcun pericolo dal punto di vista della conservazione delle armature. In più è indispensabile un calcolo a rottura.



Se questo punto di vista fosse adottato, in seguito alla discussione che ci sembra necessaria, potrebbero sussistere temporaneamente alcune discordanze sulla natura dei fenomeni o sull'eventualità di una fessurazione eccezionale ma riconosciuta senza pericolo; non ci sarebbero però divergenze sulle disposizioni pratiche e sulle quantità di materiale.

Ciò equivale implicitamente a dimensionare le costruzioni mediante calcoli a rottura ed a verificarle in seguito elasticamente, invece di seguire l'ordine inverso, e ad ammettere delle tolleranze locali sul valore degli sforzi di trazione.

Ma a che punto siamo con le nostre conoscenze circa questi carichi di rottura?

È questo, a nostro avviso il problema più interessante che pongono le comunicazioni ricevute.

Si pensava finora che il metodo delle cerniere plastiche fornisse un'approssimazione sufficiente per il calcolo a rottura delle travi.

Ora risulterebbe dalla comunicazione dell'Ingegnere Macchi e dalla prefazione del Professor Franco Levi, che in certi casi devono essere introdotte delle notevoli restrizioni.

Nelle prove descritte dall'Ing. Macchi i « rendimenti » delle travi — travi a tre campate soggette a un carico unico applicato sulla campata centrale — cioè il rapporto tra il carico di rottura effettivamente osservato e quello che si sarebbe calcolato con il metodo delle cerniere plastiche, hanno variato da 0,87 a 0,78; c'è di più: nel caso della trave C3, il momento sull'appoggio avrebbe appena oltrepassato il valore che avrebbe assunto se le teorie elastiche fossero rimaste valide fino a rottura (11 % in luogo di un aumento del 100 % nel caso di redistribuzione completa). La redistribuzione sarebbe dunque stata assai ridotta.

Questo risultato appare a prima vista in contraddizione con i rapporti del Dr. Morice che constatano un adattamento praticamente completo, con i risultati ottenuti dal Sig. Lebel e da noi stessi, e con i risultati indicati nella comunicazione del Professor Magnel: quest'ultima comunicazione fa apparire, per una delle travi, un adattamento incompleto, ma la differenza con il calcolo teorico calcolato non è che del 10 %; ora si sa che non può essere questione che di un'approssimazione.

Bisogna notare innanzi tutto che, molto spesso, quando si perviene ad un adattamento completo, ci si basa su dei valori calcolati dei momenti resistenti. Ora tali valori non possono essere che approssimati. Fino a quando il « rendimento » nel senso che gli ha assegnato l'Ing. Macchi, non si allontana molto dall'unità, si può essere tentati di attribuire lo scarto ad un errore nella valutazione dei momenti resistenti.

Nel caso delle prove italiane si è determinato sperimentalmente il momento resistente, rompendo uno spezzone di trave rimasto intatto dopo la prova, ciò che diminuisce l'incertezza circa il valore esatto del momento resistente. Tuttavia, questa determinazione non ha potuto essere fatta per la trave C3 ed è stato valutato il momento resistente con delle formule teoriche; i differenti valori teorici, dedotti da varie formule riportate nella comunicazione, presentano degli scarti dell'11 %; ora se si fosse presi il più basso di questi valori, si sarebbe giunti ad un rendimento dell'84 % anziché del 78 %. Noi avremmo tendenza, per ragioni esposte più avanti, a credere che ci sia stata una sottovalutazione del momento resistente della trave C3. Ma ad ogni modo la redistribuzione resta molto distante dalla redistribuzione completa.

Può trattarsi di un caso particolare. In ogni caso il problema è posto.

Per il Professor Franco Levi, la valutazione del coefficiente di sicurezza (o il dimensionamento della costruzione) esige lo studio completo dell'evoluzione delle deformazioni, in tutto il periodo

plastico fino a rottura. Questo studio è teoricamente possibile se si conosce la legge momento-curvatura; ancora bisognerebbe conoscerla in ogni sezione, poichè la legge dipende dalla forma della sezione, dalla posizione e dalla quantità d'acciaio; ci si rende conto con ciò della complessità del problema. Il professor Franco Levi non la nasconde, d'altra parte.

Ci si può domandare d'altronde se è necessario andare tanto avanti; forse sarebbe sufficiente studiare il comportamento, non durante tutta la fase plastica, ma semplicemente in prossimità della rottura, cioè ammettendo che il momento di rottura è stato raggiunto in una sezione, studiare la possibilità o l'impossibilità che sia raggiunto nelle altre sezioni critiche, o ancora calcolare il valore massimo che può assumere il momento in queste sezioni.

Anche così semplificata, la soluzione è ancora molto laboriosa. Ciò non vorrebbe dire che non sia necessario cercarla; noi abbiamo d'altronde indicato la possibilità di alcuni metodi nella nostra comunicazione; ma bisognerebbe senza dubbio provare a ricavare da queste ricerche delle leggi più o meno empiriche di facile applicazione, consistenti per esempio nell'applicare ai carichi di rottura « teorici » certi coefficienti di riduzione, funzione delle condizioni di carico e d'appoggio.

L'Ing. Macchi abbozza questo studio pratico prendendo per parametro un coefficiente che caratterizza la « discordanza »; questo coefficiente sarebbe in pratica il rapporto dei coefficienti di sicurezza che presenterebbero le sezioni in travate e le sezioni sull'appoggio, valutando questi coefficienti di sicurezza con la teoria elastica. Ci domandiamo se questo parametro sia stato ben scelto. Esso non potrebbe essere applicato nel caso di campate in numero superiore a 2 o 3; d'altra parte le prove inglesi sulle travi a cavo parabolico, che noi abbiamo ricordato più sopra, mostrano che il parametro di discordanza può variare senza modificare il carico di rottura.

Non sembra che ci si possa dispensare, per giungere a delle leggi pratiche valide, dal fare precedentemente uno studio generale.

Uno degli scopi delle prove che noi abbiamo fatto per determinare la legge momento-curvatura era precisamente di fornire delle basi per un tale studio. La legge indicata non corrisponde d'altronde che a un caso particolare della sezione e dell'andamento del cavo. Accade tuttavia che esso corrisponda sensibilmente al caso delle sezioni delle travi provate dall'Ing. Macchi, e che una facile trasposizione permetta di applicarla a questo esempio.

Si può d'altronde dedurre, dalle prove stesse dell'Ing. Macchi, con l'aiuto delle misure estensometriche fatte sulla trave CR, isostatica, la legge momento-curvatura corrispondente a queste prove; se si esprimono i momenti in percentuale dei momenti di rottura, presi come unità, la legge così ottenuta è molto vicina a quella che abbiamo ottenuto noi; ma non è conosciuta, secondo la comunicazione, che fino al 75 % della rottura.

Nelle nostre prove noi siamo giunti, come abbiamo detto, al 96% della rottura.

Non è ancora sufficiente, e bisognerà andare oltre, ma ammettendo tale legge, estrapolando fino a rottura come noi avevamo supposto nella nostra comunicazione, e applicando dei metodi del genere di quelli che abbiamo indicato in questa stessa comunicazione, siamo giunti a dei « ren-

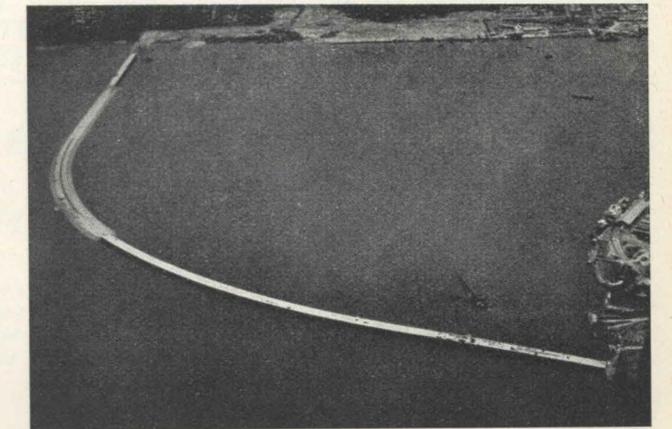


Fig. 15 - Ponte-diga a Douala (Cameroun), di 23 travate di 45 m di luce (sistema Freyssinet).

dimenti » teorici di 0,89 per C1 e 0,86 per C3. I rendimenti effettivamente constatati sono di 0,87 e 0,78 ma come abbiamo detto più sopra, il rendimento reale della trave C3 è forse di 0,84 se il momento resistente è stato sottovalutato per questa trave.

Si giustificerebbero così le restrizioni trovate dall'Ing. Macchi. Non si tratterebbe quindi di risultati accidentali (d'altra parte la cura con cui sono state fatte le prove escludeva tale ipotesi), ma di una limitazione reale e sensibile.

Si conclude con il Professor Franco Levi, che non si può far astrazione delle possibilità di deformazione e dei loro limiti per valutare il coefficiente di sicurezza alla rottura. Ma parrebbe eccessivo passare da un estremo all'altro e perdere ogni fiducia negli ordini di grandezza forniti dai metodi semplificati. Il caso delle travi italiane è forse un caso particolarmente ben scelto per mettere in evidenza le limitazioni dell'adattamento.

Si tratta di travi a 3 campate, nelle quali i cavi sono rettilinei nelle campate laterali ed in cui il cavo della campata centrale ha un andamento composto di due curve AaM ed MbB che sono ciascuna simmetrica rispetto ai punti a o b dell'asse neutro situato a $\frac{1}{4}$ ed a $\frac{3}{4}$ della luce (figura a).

I momenti resistenti in A ed in M sono uguali in valore assoluto. Se si ammette che a rottura i momenti in A ed in M raggiungano questi valori, la curva delle pressioni passerà per a e b presentando ancora una simmetria rispetto a questi punti.

Ne risulta che qualunque sia la legge momento-curvatura, le rotazioni positive e le rotazioni negative lungo la campata sono uguali in valore

assoluto e che, per conseguenza, le rotazioni in A e B sono nulle. Si può dunque avere un adattamento completo solo se le tangenti restano orizzontali sugli appoggi; in altre parole l'adattamento potrà essere completo solo se la trave è incastrata. Ora essa non lo è, e ad ogni valore del momento M sugli appoggi corrispondono delle rotazioni delle sezioni A e B considerate come appartenenti alle campate laterali. Se la legge momento-curvatura fosse rappresentata da un diagramma quale in fi-

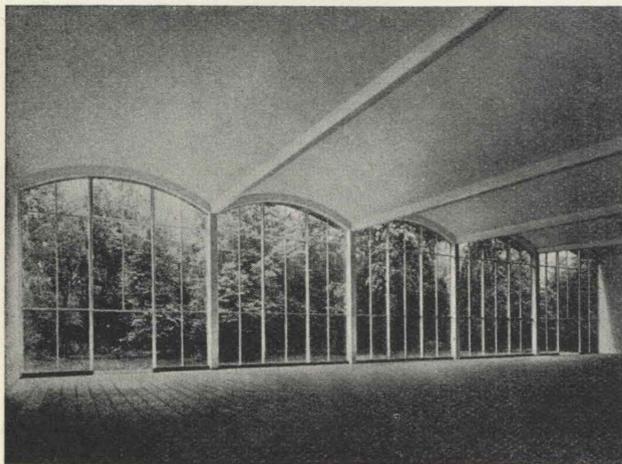


Fig. 16 - Sale di esposizione a Monaco di Baviera (Dyckerhoff e Widman).

gura b), con delle deformazioni plastiche molto grandi in prossimità della rottura, cioè possibilità di variazioni molto forti di curvatura per una variazione assai piccola del momento, e se in conseguenza la curvatura di rottura raggiungesse dei valori assai elevati (e dunque se il raggio di curvatura di rottura potesse essere assai piccolo), questa impossibilità di adattamento completo non si tradurrebbe che in una leggera diminuzione del rendimento poichè le tangenti delle deformate potrebbero essere parallele in A ed in un punto m' molto vicino al centro m della campata, ricordandosi con un arco di raggio assai piccolo $m'm''$.

Il momento in A sarebbe all'incirca uguale al momento in m' , e dunque di valore molto prossimo a quello del momento in M. Oppure, se si preferisce, i punti figurativi potrebbero essere in A e B sul diagramma essendo il valore del momento A molto prossimo a quello del momento B, mentre le curvature sarebbero molto diverse in queste due sezioni; la rotazione in A potrebbe quindi raggiungere un valore compatibile con le condizioni imposte dalle campate laterali senza una considerevole diminuzione del rendimento.

Se in realtà il diagramma momento-curvatura per le sezioni A e M ha l'andamento della curva tratteggiata, la curvatura di rottura è assai meno

grande; il raggio di curvatura dell'arco $m'm''$ è dunque assai maggiore, la lunghezza di quest'arco di raccordo aumenta ed il momento in m' (e correlativamente il momento in A) differisce dal valore massimo in M molto di più di quello che si sarebbe supposto ammettendo il diagramma a tratto pieno. O, se si preferisce, le condizioni di compatibilità impongono un certo valore della curvatura in A e la forma del diagramma è tale che il valore del momento in A è sensibilmente inferiore al valore limite.

Si può quindi prevedere che, nelle condizioni considerate dall'ing. Macchi, più ci si avvicina al perfetto incastro, più il rendimento deve aumentare. In particolare esso deve essere maggiore per delle campate laterali corte che per campate laterali lunghe. L'esperienza conferma questa previsione.

È probabile che la presenza di mensole sugli appoggi aumenterebbe ugualmente il rendimento; ciò pone il problema della miglior scelta delle forme, per risolvere il quale sarebbero necessarie delle prove.

Le circostanze sembrano comunque dover essere in generale meno sfavorevoli di quelle nelle quali sono state provate queste travi. Sarebbe utile assicurarsene con verifiche teoriche, ma i risultati sperimentali sembrano dimostrarlo.

La prima conclusione che si può trarre è che è necessario proseguire le prove sul diagramma momento-curvatura facendo variare i parametri dai quali può dipendere questa legge e proseguendo le misure per carichi quanto più possibile vicini al carico di rottura. La seconda conclusione che ci sembra possa derivare, ma che sarà necessario discutere al Congresso, è che si ottengono, già fin d'ora, degli ordini di grandezza ragionevoli per il calcolo alla rottura delle travi facendo l'ipotesi della ridistribuzione completa. Bisogna rendersi conto del fatto che ciò non è che una approssimazione, ma se gli errori possibili sul coefficiente di sicurezza non sorpassassero il 10 % o anche il 15 %, il metodo è utilizzabile, a condizione di impiegarlo con prudenza, vale a dire tenendo conto dell'errore possibile nel dimensionamento delle sezioni. Infine appare necessario proseguire gli studi teorici per pervenire a metodi più esatti in forma utilizzabile.

Il calcolo delle lastre è un'altra questione e non è stata sollevata alcuna obiezione sui metodi attualmente considerati che restano senza dubbio da precisare.

Non è stata fatta alcuna comunicazione sulla resistenza al taglio al di là della fase elastica. Vi è in quel campo, come è stato detto all'ultimo Congresso, modo di effettuare delle ricerche sperimentali importanti che bisogna augurarsi di vedere intraprendere il più presto possibile.

Y. Guyon