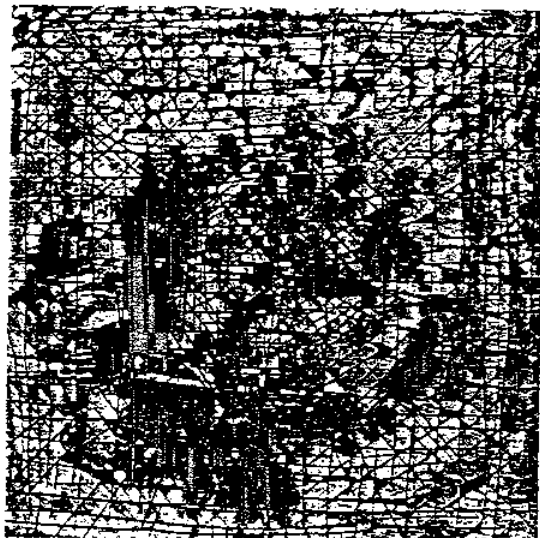


modulo



estratto dalla rivista modulo
n° 12 - dicembre 1978

Tecnologie e materiali per il ripristino di strutture in calcestruzzo armato degradate da incendio

di strutture in calcestruzzo armato degradate da incendio

**Effetto delle alte temperature sulla proprietà dei
calcestruzzi armati
Tecnologie e materiali per il ripristino delle strutture
degradate da incendio**

Michele Valente

Mario Collepardi

Introduzione

Gli interventi di ripristino da eseguire su strutture in calcestruzzo armato degradate da incendio sono funzione dello stato di degradazione raggiunta dalla struttura, e del successivo impegno cui si vorrà chiamare la struttura risanata. Per quel che riguarda lo stato di degradazione, vista la buona capacità di resistenza al fuoco in genere dimostrata dal calcestruzzo armato, esso, salvo casi eccezionali, non è mai talmente grave da rendere impossibile l'intervento riparatore.

Ma anche se gli effetti dell'incendio avessero arrecato danni notevoli, senza per altro condurre a crolli, è dimostrato che è quasi sempre più conveniente, in un conto economico globale, procedere al restauro, piuttosto che alla demolizione ed alla successiva ricostruzione. Lo schema generale che si segue, ogni volta che occorre mettere mano ad un intervento di risanamento statico di strutture in calcestruzzo armato degradate da incendio, può essere così riassunto:

- rilevamento dello stato di degradazione,
- verifiche di stabilità e determinazione dello schema statico di ripristino.
- scelta dei materiali per il restauro,
- tecnologia di intervento
- verifica dell'efficacia dell'intervento

1. Rilevamento dello stato di degradazione

Lo scopo di questa indagine è quello di raccogliere tutti i dati relativi sia al materiale (degradazione del calcestruzzo armato), sia alla struttura (cambiamenti di geometria delle

sezioni rette, presenza di fessurazioni, ampiezza delle deformazioni, formazione di cerniere plastiche, ecc.) necessari per eseguire una verifica, sufficientemente attendibile, dello schema statico che è venuto a crearsi a causa dell'azione delle alte temperature provocate dall'incendio. L'esame va condotto parallelamente sul materiale e sulla struttura perchè alcune delle notizie ricavabili dalla due separate indagini si completano a vicenda, mentre altre sono utili ad una verifica reciproca.

1.1. Rilevamento dello stato di degradazione del materiale

La degradazione che il calcestruzzo armato subisce a causa di un incendio dipende dalla temperatura che esso ha raggiunto nei suoi vari punti, e dal tempo durante il quale queste temperature hanno avuto modo di far sentire la loro azione (1). La conoscenza quindi delle temperature raggiunte a diverse profondità, nelle varie sezioni dell'elemento strutturale, costituisce un dato fondamentale per poter stabilire lo stato di degradazione.

A tal fine possono essere impiegati due metodi. Il primo, sviluppato dai francesi (2) (3) e dai belgi (4), si basa sulla utilizzazione di un modello matematico «a priori», che consente, fatte le necessarie ipotesi, di determinare la temperatura all'interno del calcestruzzo, visto come solido eterogeneo, sottoposto ad un fuoco standard; questo metodo, molto utile per la normativa, risulta essere tuttavia alquanto approssimato. Il secondo, proposto nella presente memoria, si basa invece sulla valutazione sperimentale dello stato del materiale. Questo secondo metodo, eventualmente accompagnato da esame visivo e «tattile», e

Fig. 1
Il calcestruzzo contenente pietrisco calcareo o ghiaia alluvionale per effetto delle alte temperature raggiunte: è il colore rosa-rosso per temperature fra 300 e 600 °C, grigio per temperature fra 600 e 900 °C, marrone per temperature fra 900 e 1200 °C, giallo per temperature superiori a 1200 °C, che appaiono nelle foto nelle diverse colorazioni di grigio.

influenza dell'umidità relativa sul diffrattogramma dell'ettringite (8).

soprattutto da controlli non distruttivi mediante il metodo della auscultazione dinamica (5), sembra essere molto più preciso nella determinazione dello stato di degradazione del materiale e quindi nella scelta del tipo di intervento riparatore.

1.1.1. Esame visivo e «tattile»

Per quel che riguarda l'osservazione visiva, è stato rilevato (6), per calcestruzzi contenenti pietrisco calcareo o ghiaia alluvionale, che la caduta della resistenza dovuta alle alte temperature è accompagnata da cambiamenti di colore del calcestruzzo: questo va dal rosa-rosso per temperature comprese fra 300 e 600 °C, al grigio per temperature fra 600 e 900 °C, al marrone per temperature fra 900 e 1200 °C, ed infine al giallo per temperature superiori ai 1200 °C, fig. 1.

La limitazione di questa valutazione consiste nella difficoltà di estendere i risultati sopra menzionati a tutti i calcestruzzi.

Saggiando poi direttamente con le mani o con un semplice attrezzo la superficie del conglomerato si può determinare lo spessore dello strato di calcestruzzo sfaldato o reso friabile. Se questo riguarda i primi 1 + 2 cm dalla superficie, non si può esprimere alcun giudizio sul livello di temperatura raggiunto all'interno del calcestruzzo perché lo sfaldamento superficiale può essere stato provocato dalle autotensioni causate dal gradiente termico (paragrafo 1.2.).

I dati riportati in letteratura (7) consentono di valutare approssimativamente le tensioni di bordo in funzione della durata dell'incendio. Se invece lo sfaldamento interessa strati più profondi di calcestruzzo, si può desumere che esso sia stato provocato da trasformazioni

avvenute a più di 570 °C se si sono impiegati inerti silicei (1) ed a più di 700 °C se si sono impiegati altri inerti ed in particolare quelli di natura calcarea (1).

1.1.2. Rilievamento della temperatura mediante prelievo ed analisi di campioni

La pasta di cemento è costituita dai prodotti della reazione tra l'acqua ed i costituenti mineralogici del cemento. In particolare, nel caso del cemento pozzolanico e d'aitoforno possono essere presenti altri prodotti ottenuti per combinazione

della calce d'idrolisi rispettivamente con la pozzolana e la loppa d'aitoforno.

Ciascuno dei prodotti d'idratazione, oltre ai costituenti del clinker non ancora completamente idratati, mostra, all'analisi ai raggi X, un diffrattogramma che dipende dalla particolare struttura cristallina del composto, ed in particolare dalla distanza tra i piani reticolati che costituiscono il reticolo cristallino. Pertanto dalla posizione dei picchi che appaiono sul diffrattogramma è possibile individuare i composti presenti nel campione esaminato. Oltre all'analisi ai raggi X, molto

utile soprattutto per una valutazione qualitativa del materiale, è possibile eseguire un'analisi termica differenziale e termo-ponderale, quest'ultima particolarmente idonea per una valutazione quantitativa di alcuni dei principali prodotti di idratazione.

Quando, a seguito di un incendio, i composti idratati del cemento subiscono un riscaldamento essi si trasformano in prodotti contenenti un minor numero di molecole di acqua di cristallizzazione o in prodotti anidri, oppure si decompongono termicamente liberando prodotti gassosi (anidride carbonica, solforica, ecc.). Poiché queste trasformazioni si completano entro determinati intervalli di temperatura, è possibile, attraverso l'analisi ai raggi X o l'analisi termica, stabilire la temperatura raggiunta in corrispondenza del prelievo.

A titolo di esempio, nel seguito sono descritte le trasformazioni che riguardano alcuni composti presenti nella pasta di cemento.

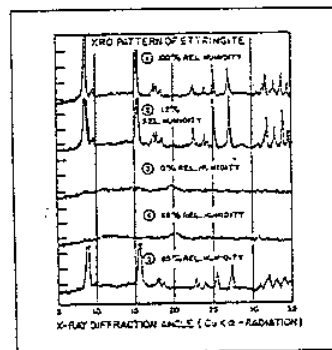
La Fig. 2 mostra il diffrattogramma dell'ettringite, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, a temperatura ambiente ed a 100 °C. Menta ha riportato che l'ettringite si decompone a circa 95 °C, (8) e

pertanto l'assenza dei picchi dell'ettringite, può indicare che la temperatura ha superato il valore di 95 °C. Perché l'assenza di ettringite indichi che si è superato la temperatura 95 °C è necessario analizzare un campione «testimone» di pasta cementizia prelevato in una zona della struttura sicuramente rimasta a temperatura ambiente. Ciò dipende dal fatto che l'ettringite, anche a temperatura ambiente, può non essere presente a causa di una sua lenta trasformazione in monosolfoalluminati di calcio idrato, $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12-18\text{H}_2\text{O}$, il cui diffrattogramma, in tal caso, può essere più significativo di quello dell'ettringite.

Particolarmente interessante può essere la ricerca dell'idrossido di calcio in una pasta cementizia. Poiché l'idrossido, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, si trasforma in ossido, CaO , nell'intervallo di temperatura di 450-500 °C, e poiché alla temperatura di 500 °C inizia una sostanziale caduta della resistenza a compressione del calcestruzzo, ma soprattutto si verifica una notevole degradazione dell'acciaio di armatura (1), l'assenza di idrossido di calcio, e la contemporanea presenza di ossido di calcio indica che nella zona in cui si è prelevato il campione si è raggiunta una situazione molto critica per la stabilità della struttura in calcestruzzo armato. In questo caso, l'assenza di $\text{Ca}(\text{OH})_2$, senza la contemporanea presenza di CaO , non necessariamente dimostra che si è raggiunta la temperatura di 500 °C, in quanto l'idrossido di calcio già prima dell'incendio si sarebbe potuto combinare con l'anidride carbonica dell'aria negli strati più superficiali, o con la pozzolana nel caso di un cemento pozzolanico. Pertanto anche in questo caso si rende necessaria un'analisi di un campione «testimone» prelevato in una zona più protetta e sicuramente non riscaldata.

Un'altra interessante indicazione può essere fornita dalla presenza del carbonato di calcio, CaCO_3 , proveniente dalla carbonatazione dell'idrossido di calcio o dai granuli dell'inerte, qualora si sia impiegato un inerte calcareo. La trasformazione del CaCO_3 in ossido di calcio, con eliminazione di anidride carbonica, inizia molto lentamente già a 700 °C e si completa rapidamente a temperature superiori a 900 °C. In pratica per poter risalire ad una distribuzione della temperatura raggiunta durante l'incendio all'interno di una struttura è consigliabile adottare il seguente procedimento:

- 1) prelevare 0,5-1 grammo di calcestruzzo cercando di isolare porzioni di sola malta, o meglio ancora di pasta cementizia, o di solo inerte grosso al fine di semplificare l'interpretazione dei dati analitici;
- 2) prelevare un campione di pasta cementizia o malta in una zona della struttura sicuramente non riscaldata: la presenza di ettringite o di monosolfoalluminati di calcio idrato, o di silicato di calcio idrato, confermano la validità di questo prelievo «testimone»; analogo prelievo può essere fatto per l'inert grosso;
- 3) prelevare campioni di calcestruzzo, secondo i criteri del punto 1, a diverse profondità della struttura e confrontare i risultati delle analisi con quelli del punto 2. Conoscendo le temperature di decomposizione dei vari composti presenti nel calcestruzzo è possibile risalire alla temperatura in funzione dello spessore di copriferro, o più in generale alla temperatura raggiunta in qualunque zona della struttura. Qualora non sia possibile trarre conclusioni definitive confrontare eventualmente i risultati analitici con quelli del punto 4;



4) riscaldare alcune frazioni del campione «testimone» fino al raggiungimento di un determinato equilibrio termico: in pratica riscaldare 0,5-1 grammo di campione «testimone» per 1-2 ore a 100 °C - 300 °C - 500 °C - 700 °C; eseguire analisi ai raggi X e/o analisi termiche sui campioni «testimoni» termicamente trattati.

1.2. Rilevamento delle modifiche statiche subite dalla struttura

Parallelamente al decadimento delle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale (1), aumentano nella struttura le autotensioni e le deformazioni causate dalle variazioni termiche. Queste si manifestano sia sulle strutture isostatiche che su quelle iperstatiche (9), e ciò è dovuto al fatto che le variazioni termiche non sono lineari nelle sezioni rette, e sono estese all'intera lunghezza degli elementi, con eventuali concentrazioni limitate e qualche tronco dell'elemento stesso.

1.2.1. Strutture staticamente determinate

Le autotensioni che si manifestano nelle strutture isostatiche sono equilibrate fra loro nelle varie sezioni ed hanno l'andamento di Fig. 3. In essa (9) vengono mostrate le autotensioni che si generano in una trave semplicemente appoggiata, a sezione rettangolare di altezza h e sottoposta per tutta la sua lunghezza ad una variazione di temperatura ($t_1 \rightarrow t_2$) tra la parte inferiore (t_1) e superiore (t_2 con $t_2 > t_1$). Lungo la sezione retta la variazione di temperatura è supposta parabolica con $th/2 = t_1 - 2/3 (t_1 - t_2)$. Come si vede nel diagramma delle autotensioni l'area intrecciata è nulla ed è di momento nullo. Inoltre, in funzione del valore della temperatura a metà altezza della

trave ($th/2$) si può avere compressione ai bordi e trazione al centro, o viceversa, a secondo che $TH/2$ risulti rispettivamente inferiore o superiore alla media delle temperature t_1 e t_2 . I due casi si verificano rispettivamente durante la fase iniziale dell'incendio e durante il raffreddamento.

Si può pensare di suddividere il diagramma non lineare, per esempio parabolico, della variazione di temperatura in un diagramma lineare (a sua volta composto di un diagramma rettangolare ed un diagramma triangolare) ed uno parabolico, tali che sommati diano il diagramma originario: orbene solo la parte parabolici del diagramma genererà autotensioni, mentre la variazione lineare non provocherà tensioni ma solo deformazioni. Ciò è dovuto al fatto che nel primo caso si hanno delle costrizioni interne nelle sezioni rette, mentre nel secondo caso la deformazione termica è tale che le sezioni rimangono piane e quindi prive di costrizioni interne, poichè viene soddisfatta la congruenza delle deformazioni. Pertanto nelle strutture staticamente determinate l'azione della variazione di temperatura si traduce in:

- manifestazione di elevate autotensioni variabili lungo l'altezza delle sezioni rette, con l'andamento indicato in Fig. 2.
- Rotazioni relative delle sezioni rette, pari a

$$\varphi = \frac{t_1 - t_2}{h} a,$$

dove φ è la rotazione relativa per unità di lunghezza dell'elemento, ed a è il coefficiente di dilatazione termica del materiale.

c) Dilatazioni unitarie pari a $\eta = (t_2 - t_1)a$, in cui t_0 è la temperatura iniziale.

A queste tensioni e deformazioni vanno sommate quelle relative ai carichi esterni, preesistenti

Fig. 3
Autotensioni in una trave semplicemente appoggiata a sezione rettangolare soggetta a variazione termica con legge parabolica, estesa su tutta la lunghezza (9).

all'evento termico. Sicchè le tensioni e le deformazioni risultanti saranno molto maggiori di quelle originarie. Le prime scaricandosi su un materiale sempre meno resistente, provocano la degradazione progressiva, riducendo le sezioni rette degli elementi strutturali, e portando la sezione maggiormente sollecitata in fase plastica, e quindi il sistema alla labilità, Fig. 10. Le seconde causano la degradazione degli appoggi, e, nei casi limite, la perdita di contatto fra i vari elementi, con crollo per mancanza di vincolo.

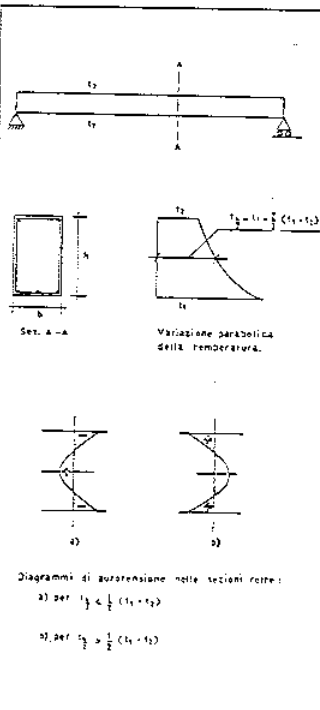
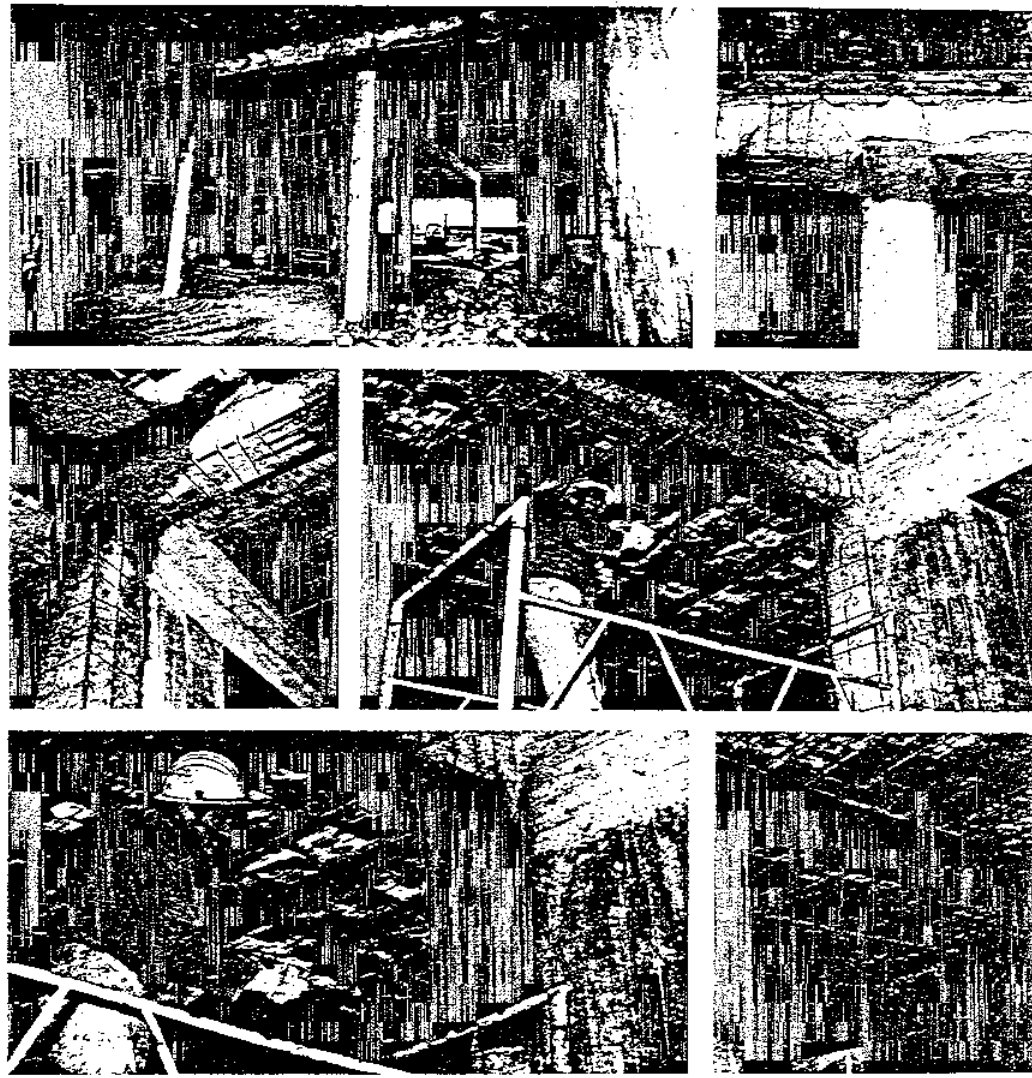


Fig. 5
Particolari della degradazione.

Fig. 6
Preparazione del supporto mediante asportazione del calcestruzzo degradato, pulizia dei ferri e bagnatura.

Fig. 8
Applicazione a spruzzo dell'Emaco su travi in calcestruzzo armato preparate come da foto n. 7, n. 8 e n. 9.

Fig. 9
Risultato dell'intervento.



Labilizzazione di una trave isostatica sotto l'azione del fuoco. Si notino in a) e b) le degradazioni dell'estradosso dovute anche alle autotensioni.

Fig. 11
Degradazione di struttura isostatica sottoposta a incendio.

In Fig. 11 è riportato un esempio di degradazione di sistema isostatico composto da pilastri incastrati alla base sopportanti travi in semplice appoggio. Si noti come le deformazioni relative fra i due elementi provocano concentrazione di tensione nelle zone di appoggio, e spostamento della risultante dei carichi verticali rispetto al baricentro delle sezioni rette correnti dei pilastri. Occorre infine tener presente che le autotensioni e le deformazioni termiche restano in certa misura, anche ad evento concluso. Quindi, partendo dalle deformazioni residue delle travi appoggiate, prendendo per esempio le più inflesse, e depurandole dalla parte di inflessione dovuta ai carichi ed alla minore rigidità del materiale, si può risalire approssimativamente alle variazioni di temperatura che hanno provocato tali inflessioni, e si può così verificare quanto per via diretta è stato rilevato al paragrafo 1.1.1.

1.2.2. Strutture a vincoli sovrabbondanti

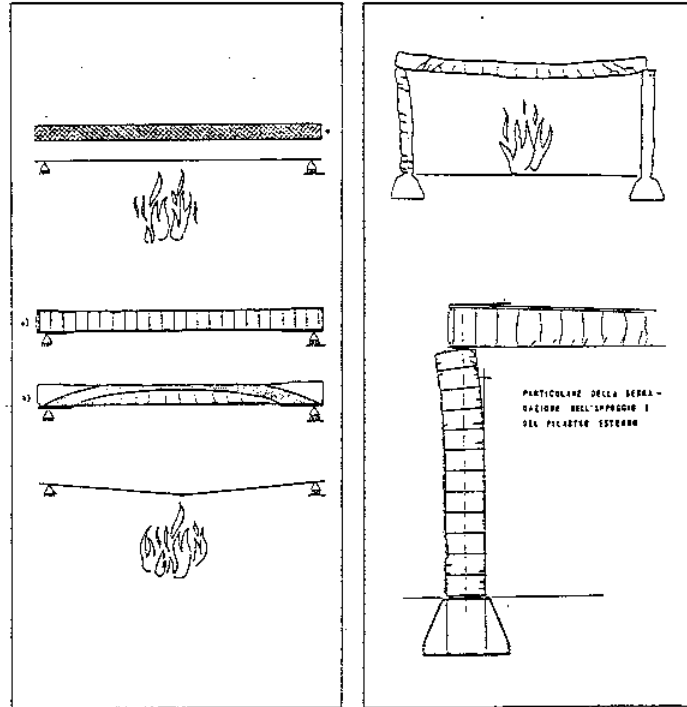
Nelle strutture iperstatiche, oltre alle autotensioni che si manifesterebbero anche in assenza di vincolo, si generano delle autotensioni causate dall'impedimento esercitato dai vincoli sovrabbondanti sulle variazioni dimensionali dovute all'effetto termico. Le autotensioni che si generano in questo modo in una sezione, non costituiscono un sistema equilibrato in sé, ma fanno invece equilibrio alle reazioni dei vincoli. In una trave continua, per esempio ogni campata, se fosse isolata, sotto l'effetto della temperatura si deformerebbe in modo tale che due sezioni rette distanti l'unità di

lunghezza ruoterebbero di un angolo $K = \frac{t_1 - t_2}{h} \alpha$. Un momento applicato alle due estremità della trave provocherebbe una rotazione unitaria $K = \frac{M}{EI}$ dove E è il modulo d'elasticità normale del materiale ed I il momento di inerzia rispetto all'asse baricentrico della sezione. Se si applicassero alle due estremità della trave due coppie di momento

$$M = EI \frac{t_1 - t_2}{h} \alpha$$

questa qualunque sottoposta all'azione della temperatura, non presenterebbe alcuna rotazione sull'appoggio e ciò consentirebbe il rispetto della continuità della trave sull'appoggio. Ma sul primo e sull'ultimo appoggio, non possono esistere dei momenti, cosicché è necessario sovrapporre su di essi alle due coppie precedenti, altre due coppie del momento.

$$M = EI \frac{t_1 - t_2}{h} \alpha$$



e di verso contrario alle precedenti; nella realtà fisica questo corrisponde alla definizione dei «focali» (7). Nella Fig. 12 è schematizzato quanto detto per una trave su 3 appoggi. Il momento termico sull'appoggio

$$(M_1 = \frac{3}{2} EI \frac{t_1 - t_2}{h} \alpha$$

può raggiungere valori ben maggiori di quelli che le sezioni possono sopportare per i carichi normalmente previsti, e pertanto sull'appoggio interviene un

adattamento plastico del materiale che ha per effetto la liberazione totale o parziale di questi sforzi interni, con loro trasferimento ad altre sezioni, Fig. 13. Questo momento iperstatico si sviluppa molto rapidamente, e raggiunge il valore massimo già nella prima mezz'ora di incendio. Quindi l'adattamento del sistema dovrà essere necessariamente pressoché immediato. Inoltre le rotazioni sull'appoggio che liberano i momenti iperstatici di temperatura sono di ordine notevolmente superiore a quelle che liberano i momenti iperstatici dei carichi

applicati. Quindi volendo utilizzare per il calcolo di verifica a rottura le regole di formazione delle cerniere plastiche, occorre anche introdurre rispetto al metodo seguito a freddo per i carichi applicati, delle condizioni complementari di rotazione massima delle cerniere (7). Si può infatti temere la rottura delle cerniere plastiche prima che gli sforzi interni siano arrivati ai valori limite nello schema staticamente determinato, considerato. Ovviamente i limiti di rotazione massima dipendono dall'evoluzione delle caratteristiche di deformazione ultima del calcestruzzo con la temperatura. Nel caso quindi delle strutture iperstatiche il rilevamento delle modifiche subite dalla struttura va fatto osservando la degradazione delle sezioni rette, e l'ampiezza delle deformazioni, con particolare attenzione all'esame dei vincoli sovrabbondanti che certo saranno stati impegnati come riserva di resistenza al momento di maggiore necessità. In tal caso l'esame attento delle deformazioni plastiche verificatesi in tali zone può consentire di dare un giudizio sul grado di sicurezza che la nuova configurazione statica presenta. Al completamento di tale giudizio servono ovviamente anche sia la conoscenza delle caratteristiche fisico-meccaniche residue del materiale, sia il livello di carico che la struttura sta sopportando, o le si vorrà far sopportare.

2. Verifiche di stabilità e determinazione dello schema statico che si vorrà ripristinare

Come si è detto, mediante il rilevamento dello stato di degradazione sia del materiale che della struttura, e conoscendo i carichi che la struttura dovrà sopportare, sarà possibile eseguire

Fig. 12
Trave su tre appoggi sottoposta a variazione termica, determinazione del momento iperstatico (7).

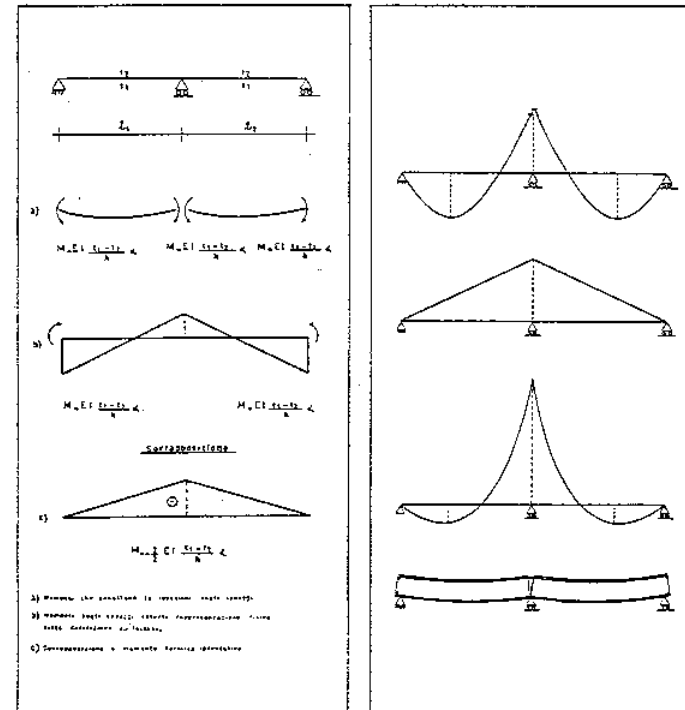


Fig. 14
Ripristino di una struttura isostatica mantenuta tale.

Fig. 15
Ripristino di struttura isostatica con cambiamento dello schema statico.

una verifica di stabilità, anche se approssimata, e quindi decidere come e dove intervenire per ripristinare il grado di sicurezza voluto. Facciamo qualche esempio, con riferimento alla solita distinzione fra strutture isostatiche e strutture iperstatiche.

2.1. Strutture isostatiche

La Fig. 11 mostra la situazione che può essersi verificata a causa dell'incendio. In questo caso la verifica di stabilità è relativamente semplice, e consiste:

a) Per i pilastri, nel valutare di quanto la degradazione che essi hanno subito, sia come minore capacità portante del materiale, sia come diminuzione delle sezioni rette, sia come spostamento dell'eccentricità del carico applicato, ha ridotto l'originale grado di sicurezza. Particolare attenzione sarà posta nella sezione terminale di appoggio della trave sovrastante, che può aver subito pericolose riduzioni.

b) Per le travi appoggiate, oltre a quanto detto al punto a), si controllerà se la concentrazione delle tensioni in una particolare sezione ha provocato la sua incipiente plasticizzazione.

Si potrà quindi decidere se dopo il ripristino la struttura dovrà conservare la sua configurazione isostatica, Fig. 14, ovvero dovrà essere trasformata in iperstatica, Fig. 15.

2.2. Strutture iperstatiche

Per la verifica si veda quanto detto al paragrafo 1), mentre per il restauro potranno essere ristabiliti i vincoli iperstatici precedenti, ovvero potrà essere conservato lo schema staticamente determinato provocato dall'evento termico.

Le Figg. 16, 17 mostrano, per esempio, lo stato di sollecitazione e

di degradazione in un portale rettangolare simmetrico, incastrato alla base e sottoposto ad un aumento uniforme di temperatura, e la Fig. 18 rappresenta il telaio restaurato come incernierato alla base.

3. Materiali per il ripristino

Il successo del ripristino, sia per gli interventi di restauro statico vero e proprio, sia per i più semplici interventi di risarcimento in superficie, dipende fondamentalmente dalla solidarizzazione fra il materiale di

ripristino ed il supporto da restaurare. In altre parole, la adesione fra questi due materiali non deve essere inferiore alla resistenza a trazione del materiale originale.

Allo stato attuale della tecnologia esistono due categorie di materiali che presentano queste proprietà: quelli a base di resine sintetiche (soprattutto resine epossidiche) e quelli definiti come malte reoplastiche cementizie a ritiro compensato.

I primi presentano, con il crescere della temperatura e già sopra i 100 °C (10) dei cambiamenti di natura

chimico-fisica che portano al decadimento delle loro caratteristiche meccaniche. Poiché è buona norma, soprattutto là dove si è già manifestato un incendio non utilizzare materiali le cui proprietà meccaniche dipendono fortemente dalla temperatura, si limiterà la discussione al secondo tipo di materiali.

3.1. Malta reoplastica a ritiro compensato (11)

3.1.1. Caratteristiche dell'impasto fresco

L'impasto viene ottenuto

mescolando in una comune betoniera il prodotto pronto all'uso con acqua.

Alla temperatura di 20 °C il tempo di mescolamento è di circa 5 minuti, ed il rapporto in peso acqua/solido è di 0,16.

L'impasto fresco si presenta estremamente fluido (spandimento 140% con 5 colpi alla tavola a scosse secondo il test ASTM C - 230) e privo di acqua di bleeding (UNI 7122-72). La fluidità consente una facile messa in opera del materiale anche con tecniche particolari (a spruzzo, per iniezione, ecc.), mentre l'assenza del bleeding

impedisce che l'acqua essudata si raccolga tra l'impasto fresco ed il calcestruzzo da ripristinare.

3.1.2. Caratteristiche dell'impasto indurito

a) **Adesione al calcestruzzo vecchio (12).** Tutte le prove di rottura per distacco fra la malta ed il calcestruzzo di base hanno sempre dimostrato che la superficie di rottura non coincide mai con la superficie di adesione fra la malta ed il calcestruzzo, ma risulta sempre spostata all'interno del vecchio calcestruzzo. Quindi l'adesione fra la malta ed il calcestruzzo è maggiore della

resistenza a trazione del conglomerato di supporto: sarà questo appunto il valore che occorrerà mettere in conto nei calcoli di adesione fra la malta ed il supporto in calcestruzzo.

b) **Resistenza meccanica a compressione:** circa 300 Kg/cm² a 1 giorno e circa 900 Kg/cm² a 28 giorni.

c) **Resistenza meccanica a trazione per flessione:** circa 60 Kg/cm² a 1 giorno e oltre 120 Kg/cm² a 28 giorni.

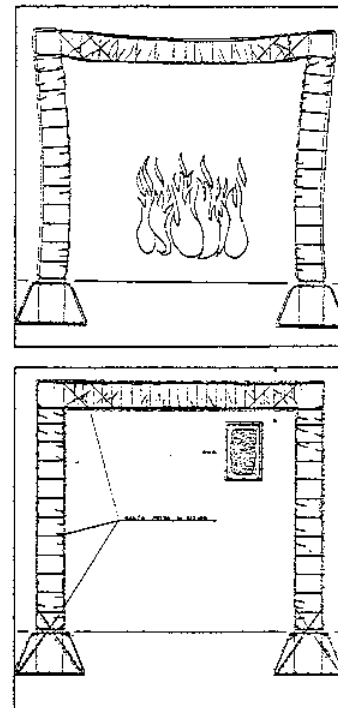
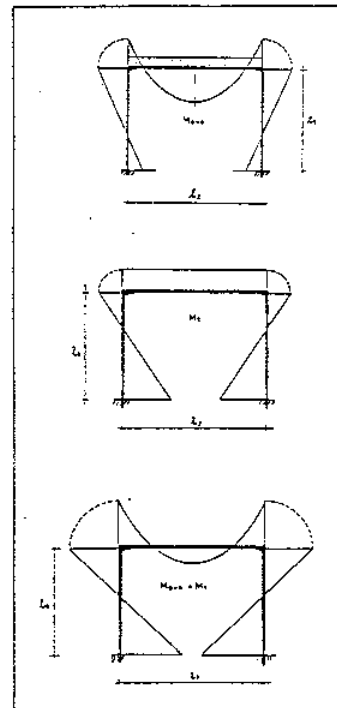
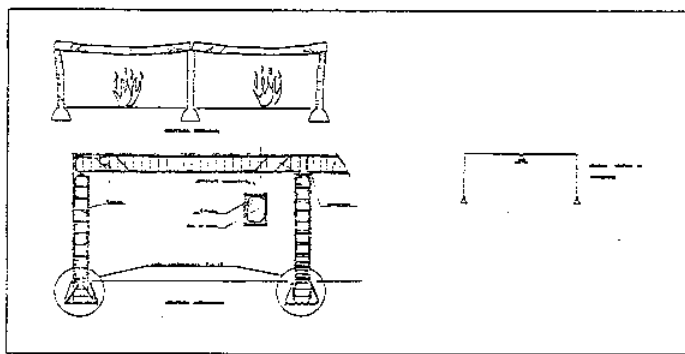
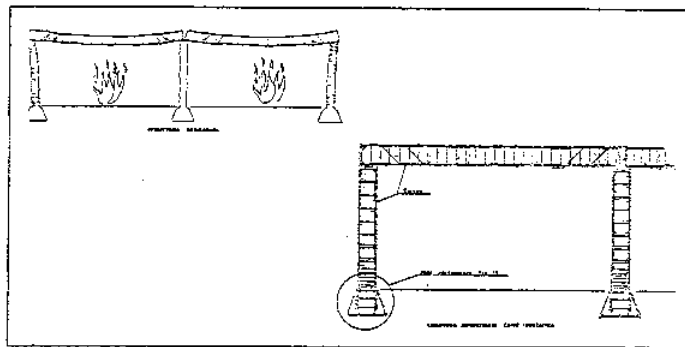
d) **Pull-out:** a 3 giorni 45 Kg/cm² per barra di acciaio liscia e 200 Kg/cm² per barra d'acciaio ad adesione migliorata; i corrispondenti valori a 28 giorni diventano: 80 Kg/cm² ed oltre 330 Kg/cm².

e) **Espansione libera:** 0,3% tra il tempo d'inizio indurimento (7 ore) e 24 ore (13).

f) **Permeabilità:** minore di $1 \cdot 10^{-12}$ cm/sec a 3 giorni.

g) **Resistenza ai cicli di gelo e disgelo:** dopo 300 cicli termici tra -20 °C e +5 °C il modulo elastico dinamico è diminuito meno del 5% (ASTM C-233-73).

h) **Comportamento a caldo:** dopo una stagionatura a temperatura ambiente di 1 giorno, il materiale è stato conservato per altri 6 giorni a 400 °C. Le resistenze meccaniche a



compressione od a flessione, rispetto ai materiali conservati a temperatura ambiente, risultano diminuire di circa il 15% dopo 6 giorni, ed appaiono addirittura più elevate durante i primi due giorni di trattamento a 400 °C. Se il trattamento termico è effettuato a 500 °C non si osserva alcuna degradazione meccanica della malta durante i primi due giorni e si registra una diminuzione del 20% della resistenza meccanica dopo 6 giorni del trattamento.

i) **Comportamento alla fatica:** dopo una stagionatura di 28 giorni il materiale è stato sottoposto a carichi variabili tra 200 Kg/cm² e 500 Kg/cm² di compressione con una frequenza di 500 cicli/min. Dopo oltre due milioni di cicli la prova è stata interrotta ed il materiale non presentava alcuna diminuzione della resistenza meccanica.

l) **Modulo elastico dinamico:** 350.000 Kg/cm² a 7 giorni e 400.000 Kg/cm² a 28 giorni.

m) **Modulo elastico statico:** con carichi pari ad un terzo del carico di rottura: 280.000 Kg/cm² a 7 giorni e 320.000 Kg/cm² a 28 giorni.

n) **Resistenza alle condizioni ambientali:** la malta reoplastica a ritiro compensato non risente né dell'attacco solfatico, né dell'aggressione da parte di olio comune minerale, e resiste ad ambienti acidi fino a pH = 6.

3.2. Materiali complementari

In alcuni casi, come per esempio per il ripristino di un solaio in laterocemento degradato dall'incendio, può essere utile impiegare, con la tecnica che si dirà più oltre, insieme con la malta e nella parte superiore del solaio, uno strato di riporto in betoncino quanto più possibile leggero, ma avente nel contempo una buona resistenza a compressione.

Così facendo non si aggrava la situazione statica, penalizzando i sovraccarichi a favore del peso proprio, e si dispone in zona compressa di un materiale sufficientemente resistente. Questo tipo di betoncino leggero, deve avere come caratteristiche minime, perchè possa espletare le funzioni dette, un peso specifico di 1400 ÷ 1600 Kg/m³ e una resistenza a compressione di 200 ÷ 220 Kg/cm².

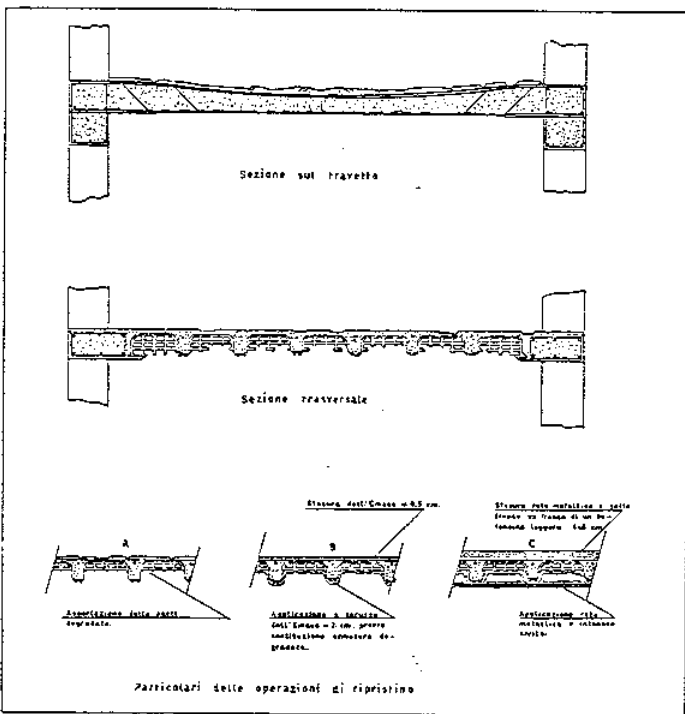
4. Tecnologia di intervento

Assicurata la stabilità della

struttura nel periodo transitorio, l'intervento di restauro consiste nel sostituire la parte di materiale degradato con materiale sano, e nel realizzare le opportune solidarizzazioni fra parti lesionate dello stesso elemento ovvero fra due elementi contigui. Lo schema operativo è descritto nelle righe seguenti:

a) **Rimozione del calcestruzzo deteriorato**

Il calcestruzzo degradato o poco sano deve essere accuratamente rimosso fino a che non ci sia alcun dubbio che la qualità del calcestruzzo restante sia



soddisfacente. Senza questa certezza la riparazione non potrà essere efficace poichè la malta di restauro, riportata su un calcestruzzo degradato tenderà a staccarsi per cedimento di quest'ultimo. I criteri espressi al punto 1 possono essere di valido aiuto nella determinazione della profondità di scarificazione.

La superficie sana dovrà presentarsi quanto più ruvida possibile per consentire la corretta adesione della malta di riporto (11).

b) **Bagnatura del calcestruzzo di supporto**

Una prima saturazione del calcestruzzo ha lo scopo di idratare la calce liberata nel corso dell'incendio.

Questa idratazione, che avviene con aumento di volume (1), se si verificasse dopo che lo strato di malta ha ricoperto il vecchio calcestruzzo potrebbe provocare rigonfiamenti e quindi distacchi.

Dopo circa 24 ore si asporta con una spazzola metallica l'idrossido di calcio che eventualmente si fosse formato, ed anche tutti gli elementi (come inerti e parti di malta, ecc.) non sufficientemente aderenti al calcestruzzo.

Si satura poi nuovamente con acqua il calcestruzzo, per evitare che la malta di riporto subisca una dannosa disidratazione lungo la superficie di contatto.

c) **Acciaio di armatura**

Se necessario (paragrafi 1 e 2) (1) si procede alla sostituzione o all'aggiunta di acciaio d'armatura. Se inoltre l'apporto di malta, per motivi statici o costruttivi eccede i 2 cm di spessore al di fuori dal ferro, è necessario inserire verso il bordo della sezione una rete d'armatura elettrosaldata. Questa genererà nella malta, al momento della sua espansione, uno stato di leggera precompressione, sufficiente a compensare lo stato di trazione che

sarà provocato nel tempo dal ritiro igrometrico (11).

d) **Getto della malta reoplastica a ritiro compensato**

Se il restauro riguarda estese superfici sarà opportuno applicare la malta a «spruzzo». Se invece le superfici sono ridotte ovvero se si deve rigenerare una parte cospicua di sezione od ancora se è necessario operare riporti di intere parti di elemento o saldare più elementi, sarà più indicato il getto entro cassero.

e) **Disarmo e stagionatura**

Il disarmo della struttura può in genere aver luogo a 24 ÷ 48 ore.

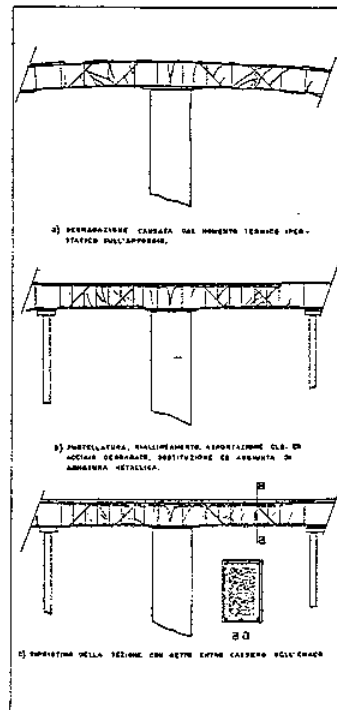


Fig. 21
Ripristino del nodo di un portale.

Durante questo periodo occorrerà evitare che la parte restaurata subisca delle sollecitazioni dinamiche, come per esempio quelle che si trasmettono lungo le travi continue sostegno delle vie di corsa dei carriponte quando quest'ultimo sono in funzione. Le parti esposte all'aria dovranno essere accuratamente tenute umide per almeno 24 ore, e successivamente saranno protette con una pellicola antievaporante.

Dovrà essere posta molta cura a queste operazioni al fine di assicurare sia l'idratazione del materiale, sia il corretto svilupparsi

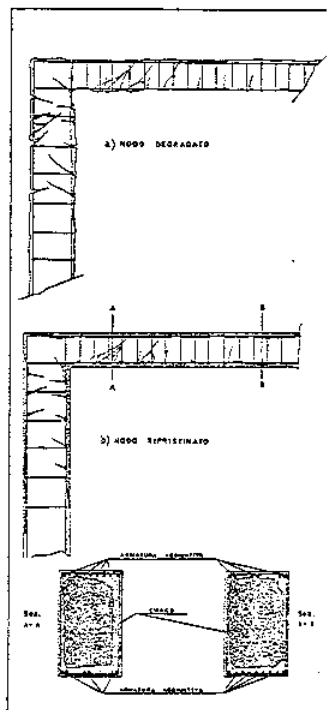


Fig. 22
Effetto delle alte temperature su un solaio in latero-cemento armato.

Fig. 23
Particolari della degradazione.

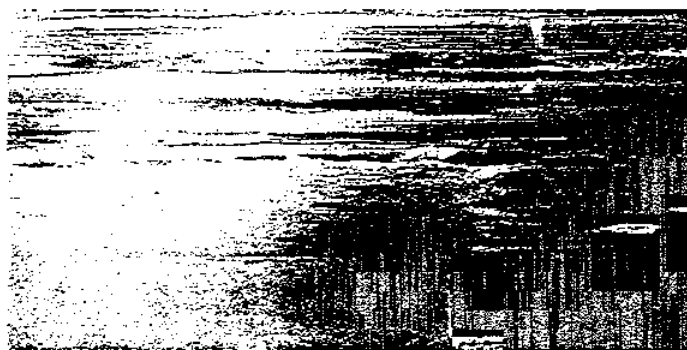
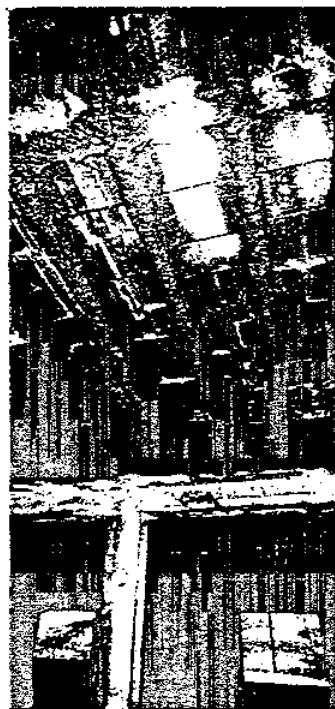
Fig. 24
Ripristino dei travetti con Emaco spruzzato.

Fig. 25
Spruzzatura dell'Emaco su rete metallica preventivamente applicata.

Fig. 26
Particolare dei travetti inglobanti la rete porta intonaco.

Fig. 27
Applicazione della seconda rete porta intonaco e finitura con intonaco civile o Emaco.

Fig. 27
Particolare di solaio degradato e solaio in fase di ripristino.



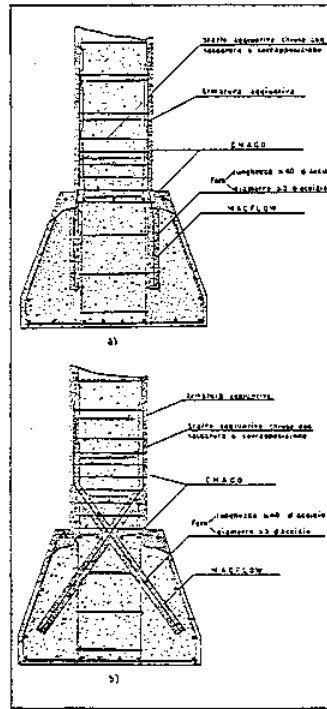
dell'azione espansiva. Nelle Fig. 19, 20, 21 sono riportati alcuni esempi di restauro statico. La Fig. 19 indica la tecnologia di ripristino di un solaio in latero-cemento. Asportate le parti deteriorate e sostituite od aggiunta la necessaria armatura metallica viene applicata previa saturazione del supporto la malta reoplastica a ritiro compensato; sull'intradosso a spruzzo (spessore circa 2 cm), sull'estradosso per collaggio (spessore 0,5 cm, particolare B). Successivamente si stende sulla malta ancora fresca dell'estradosso

uno strato di 4 + 5 cm di betoncino leggero (punto 3.2) eventualmente armato con rete metallica di ripartizione (particolare C). Dopo circa 3 giorni viene finito l'intradosso con intonaco a vista portato dalle consuete reti metalliche opportunamente ancorate, foto 26.

— La fig. 20 mostra il risanamento statico di una trave continua. Viene rappresentato il particolare della degradazione causata dal momento termico iperstatico sull'appoggio (a), l'operazione di puntellatura, riallineamento, ed asportazione del calcestruzzo e dell'acciaio degradato (b), ed infine la sostituzione o l'aggiunta dell'armatura, con il getto entro cassero della malta reoplastica a ritiro compensato (c).

— La fig. 21 schematizza il ripristino di un nodo di portale.

— La Fig. 28 indica il ripristino del collegamento fra pilastro e plinto mediante incastro (a) o mediante cerniera (b).



5. Verifica dell'efficacia dell'intervento

Il tempo minimo consigliato per le prove di carico è di 7 giorni, e le modalità di esecuzione sono le stesse seguite per le prove di collaudo delle normali strutture in calcestruzzo armato. In genere, se tutte le operazioni descritte nella presente memoria sono state accuratamente eseguite, si ottengono eccellenti risultati in termini sia di elasticità della struttura, sia di capacità portante, che normalmente aumenta rispetto alla situazione originaria, sia di durata nel tempo dell'opera ripristinata.

Fig. 28
Ripristino del collegamento tra pilastro e plinto:
a) con incastro
b) con cerniera.

Fig. 28
Particolare di trave ripristinata (in primo piano) e solaio in fase di ripristino.

Bibliografia

- (1) M. Collepardi, M. Valente: *Effetto delle alte temperature sulle proprietà del calcestruzzo armato*. Convegno A.I.P.A.I., Venezia, 5 ottobre 1977.
- (2) C.T.I.C.M.: *Institut technique du batiment et des travaux publics*. Document Technique Unifié, mai 1977, annexe II et octobre 1974 annexe I.
- (3) A. Coin: *Temperatures dans un solide hétérogène au cours d'un incendie*. Annales mai 1976.
- (4) J.C. Dotreppe, M. Hogge: *Modèles mathématiques pour le comportement à l'incendie des structures*. Eyrolles, Parigi 1977: «La sécurité de la construction face à l'incendie».
- (5) RILEM: *La prova su calcestruzzo mediante il metodo dell'auscultazione dinamica*. Annales settembre-ottobre 1973. Raccomandation de la RILEM.
- (6) N.G. Zoldners: *Effect of high temperatures on concretes incorporating different aggregates*, Miner Branch Research Report R. 64 (Department of Mines and Technical Surveys, Ottawa, May 1960).
- (7) A. Coin: *Calcul élastique d'une poutre en Béton dans un champ de température*. Annales, juillet-août 1974.
- (8) P. Mehta e M. Polivka: *Expansive Cements*. The VI International Congress on the chemistry of cement, Moscow, September 1974.
- (9) O. Belluzzi: *Scienza della costruzioni*, Vol. 3 - Zanichelli - Bologna 1967.
- (10) B. Liand: *La tenue thermique des Adhésifs*, Annales mai 1977, p. 80.
- (11) M. Collepardi, M. Corradi, M.S. Guella: *Proprietà degli impasti cementizi per il consolidamento ed il ripristino strutturale di costruzioni ammalorate*. Convegno AICAP, Venezia 6-9 ottobre 1977.
- (12) M.S. Guella, A.Albi Marini, Chiesura, M. Valente: *Sul risanamento statico delle strutture in calcestruzzo armato lesionate o degradate*. Congresso AIMAN, Trieste novembre 1977.
- (13) E.H. Rubin, *Klein Symposium on Expansive Cement Concretes*, ACI Publication SP 38, 341, (1972).