



METODI DI INDAGINE SULLE STRUTTURE

(strutture in ca dopo l'evento incendio)

Sergio Tattoni⁽¹⁾

⁽¹⁾Università degli Studi di Cagliari
Dipartimento di Ingegneria Strutturale
via Marengo 2 – 09123 CAGLIARI – I

Sommario. *Nella valutazione degli effetti dell'evento incendio nelle strutture in c.a, specie se finalizzata ad interventi di recupero statico, l'esecuzione di una corretta campagna di indagine gioca un ruolo di primaria importanza.*

In linea di massima potrebbero essere impiegati i metodi di indagine già ben noti, ma la particolarità del danneggiamento da incendio richiede che detti metodi siano adeguatamente riconsiderati e reinterpretati.

Nella presente relazione, dopo un richiamo agli effetti delle alte temperature sui materiali acciaio e calcestruzzo, si passano in rassegna metodi di indagine classici e si presentano anche metodi innovativi, ancora oggetto di studio e di ricerca, ma che potranno in un futuro essere normalizzati e correntemente impiegati.

Concludono la relazione alcune osservazioni relative a prove di carico statiche e dinamiche su elementi strutturali.

MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE ESTRUCTURAS

(estructuras de hormigón armado después del evento incendio)

Sergio Tattoni⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidad de Cagliari

Departamento de Ingeniería Estructural

Via Marengo 2 – 09123 CAGLIARI – ITALIA

Resumen. *En la evaluación de los efectos del evento incendio en las estructuras de hormigón armado, especialmente cuando la misma esté finalizada a intervenciones de recuperación estática, la realización de una correcta campaña de investigación juega un papel de vital importancia.*

En principio podrían utilizarse los métodos de investigación ya tan bien conocidos, pero la peculiaridad de los desperfectos causados por el incendio requiere que dichos métodos se reconsideren y se reinterpreten.

En este informe, tras recordar los efectos de las altas temperaturas sobre materiales de acero y hormigón, se enumerarán los métodos de investigación clásicos e incluso se presentarán métodos innovadores, que siguen siendo objeto de estudio e investigación, pero que en un futuro podrán normalizarse y utilizarse con regularidad.

Concluyen el informe, algunas observaciones concernientes a pruebas de carga estáticas y dinámicas sobre elementos estructurales.

1. INTRODUZIONE	3
2. EFFETTI DELLE ALTE TEMPERATURE SUI MATERIALI	5
2.1 Calcestruzzo nella condizione di incendio.....	5
2.2 Calcestruzzo dopo la condizione di incendio	6
2.3 Acciaio	7
3. METODI DI INDAGINE SUI MATERIALI ACCIAIO E CALCESTRUZZO	9
3.1 Acciaio	9
3.1.1 Posizione dell'acciaio	9
3.1.2 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio.....	11
3.2 CALCESTRUZZO	12
3.2.1 Metodi di indagine superficiali	13
3.2.2 Colorimetria	15
3.2.3 Prove dirette di rottura	15
3.2.4 Ultrasuoni.....	16
3.2.5 Prove chimiche	17
4. METODI DI INDAGINE SU STRUTTURE	19
4.1 Prove di carico statiche.....	20
4.2 Prove di caratterizzazione dinamica	21
5. BIBLIOGRAFIA	24

1. INTRODUZIONE

Nel quadro della normativa europea si pone particolare enfasi alla la resistenza delle costruzioni nei confronti dell'evento incendio. Le parti 2 degli eurocodici trattano questo aspetto relativamente all'oggetto dello specifico eurocodice (azioni, calcestruzzo armato, acciaio, ecc.) e forniscono elementi di verifica della sicurezza "a caldo", ossia durante l'evento incendio stesso, per il tempo previsto dai requisiti di sicurezza imposti (REI m ove m indica il tempo in minuti). Salvo casi particolari, implicitamente si ammette che l'incendio di progetto comporti danni significativi alla costruzione, tali da dover impostare un progetto di demolizione, recupero o manutenzione straordinaria.



Figura 1. Impianto industriale in ca e cap prefabbricato completamente distrutto da un incendio [foto dell'Autore].



Figura 2. Pilastro ed impalcato in c.a. danneggiato da incendio [foto dell'Autore].

Ma se in alcuni casi (vedi Figura 1) il grado di danno è tale che è manifestamente necessaria ed economicamente conveniente la demolizione e la ricostruzione, in altri (vedi Figura 2) la localizzazione del danno e l'incertezza dell'effettivo grado di danneggiamento richiedono una più attenta disamina.

Il tecnico che interviene dopo un evento eccezionale (come definito dal DM 14.01.2008 "Norma Tecniche per le Costruzioni") usualmente si trova di fronte ad un quadro catastrofico e caotico, e deve prendere decisioni fondamentali anche in tempi brevissimi. È quindi necessario razionalizzare il proprio intervento suddividendolo in fasi successive, come illustrato nel diagramma a blocchi di Figura 3.

Di particolare importanza per la successiva riparazione, demolizione o non intervento, è la conoscenza delle condizioni residue dell'opera, ossia la fase di diagnosi, che deve essere finalizzata alle successive fasi di progetto ed intervento e deve essere specializzata al particolare evento (l'incendio) che le ha rese necessari. Nella Tabella 1 è riportato un elenco di Tecniche Non Di-

struttive (NDT) di indagine, alcune delle quali di impiego corrente e di ben consolidata conoscenza, altre innovative o in fase avanzata di ricerca.

In quanto segue, dopo un breve richiamo agli effetti delle alte temperature su strutture in ca e cap, si passeranno in rassegna i metodi diagnostici attualmente disponibili o ancora in fase di studio, ma promettenti dal punto di vista applicativo, utilizzabili per una corretta conoscenza del grado di danneggiamento della struttura sulla quale si intende intervenire.

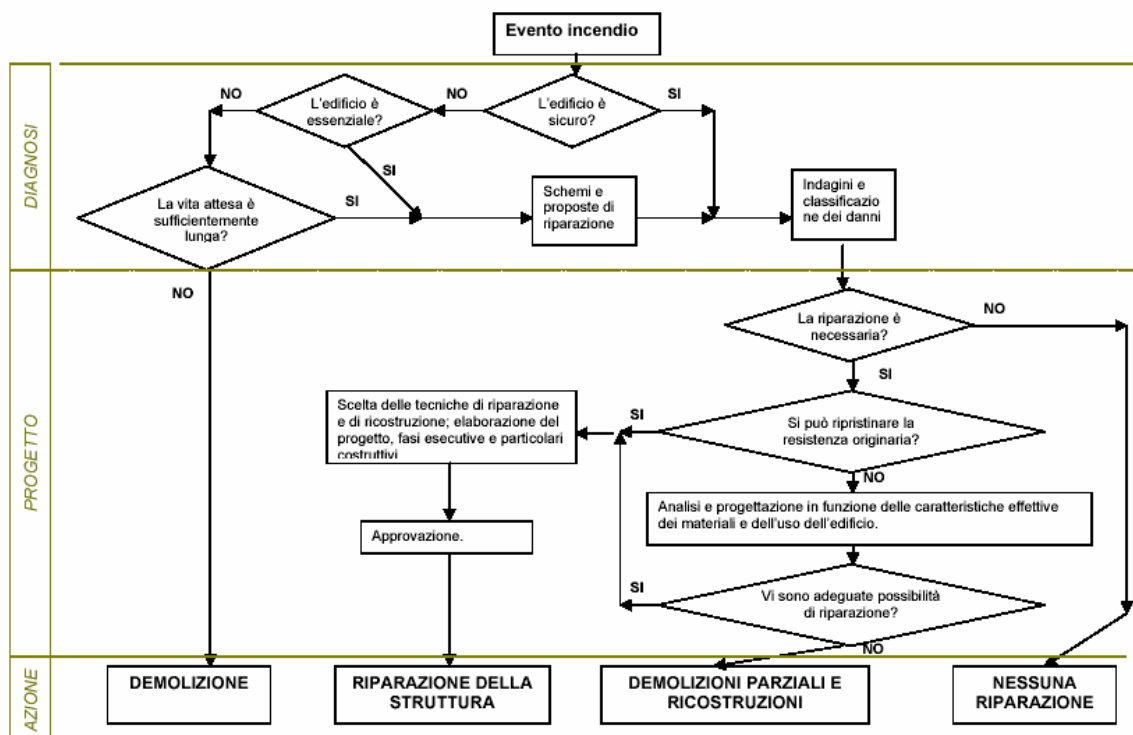


Figura 3. Diagramma di flusso per le attività e decisioni da intraprendere per l'intervento sulle strutture di un fabbricato dopo l'evento incendio.

Tabella 1. Possibili approcci per la verifica mediante metodi non distruttivi di strutture in CA danneggiate da incendio (rielaborata da [20]).

Risposta media sul calcestruzzo di copriferro	Risposta puntuale di piccoli campioni	Speciali tecniche di valutazione
Percussione con martello	Test meccanici su piccola scala (su microcarote o dischi sottili)	Metodo UPV indiretto
Martello di Schmidt (sclerometro)	Analisi termica differenziale (DTA)	Misure di impatto
Pistola di Windsor	Analisi termogravimetrica (TGA)	Tomografia sonora
Pull-out (BRE internal fracture)	Dilatometria (TMA)	Analisi modale di onde di superficie (MASW)
Misura velocità ultrasuoni (UPV)	Termoluminescenza	Immissione onde radar
	Porosimetria	Resistività elettrica
	Analisi di densità delle microfratture	Prove di carico statiche
	Colorimetria	Prove di carico dinamiche
	Analisi petrografica	
	Analisi chimica	

2. EFFETTI DELLE ALTE TEMPERATURE SUI MATERIALI

È opportuno richiamare le principali modificazioni delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei componenti del calcestruzzo armato (conglomerato cementizio ed armature metalliche) sottoposti ad alte temperature al fine di comprendere la peculiarità dei metodi di indagine sulle strutture e formulare correttamente le rispettive interpretazioni.

2.1 Calcestruzzo nella condizione di incendio.

All'aumentare della temperatura, il calcestruzzo subisce una progressiva modificazione dei suoi componenti, con particolare riguardo a quelli idrati (Tabella 2), tanto che è possibile istituire una correlazione fra la riduzione del contenuto d'acqua e la resistenza a compressione del calcestruzzo stesso (Figura 4).

Tabella 2. Fasi di alterazione del conglomerato cementizio

Temperatura °C	Trasformazioni chimiche e fisiche	Colorazione	Resistenza
< 95 -100	Emissione di H ₂ O (vapore), a volte anche con modalità esplosiva (steam boiler effect)	Inalterato	Inalterata
135	Decomposizione e disidratazione dell'ettringite $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$		Praticamente inalterata
135 – 350	Disidratazione del gel di silicato idrato $n\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot m\text{H}_2\text{O}$		Modesta riduzione progressiva
450 – 520	Disidratazione dell'idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	Rosa/rosso	Progressiva riduzione con la temperatura
560	Trasformazione del quarzo dalla forma α alla forma β (aggregati silicei)		Ulteriore riduzione e disgregazione dell'aggregato
700 – 900	Decomposizione del carbonato di calcio (aggregati calcarei) $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	Grigio chiaro	Molto ridotta
900 - 1200		Marrone	Praticamente nulla

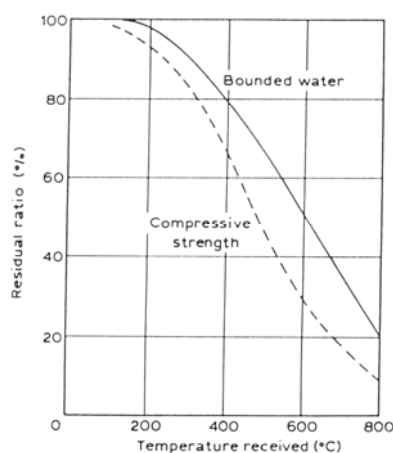


Figura 4. Perdita d'acqua e riduzione della resistenza in funzione della temperatura [1].

Tale riduzione è dovuta alla decomposizione dei principali componenti della pasta cementizia ed alla riduzione di volume della stessa cui consegue, causa il vincolo offerto dagli aggregati, la formazione di microfessure (Figura 5).

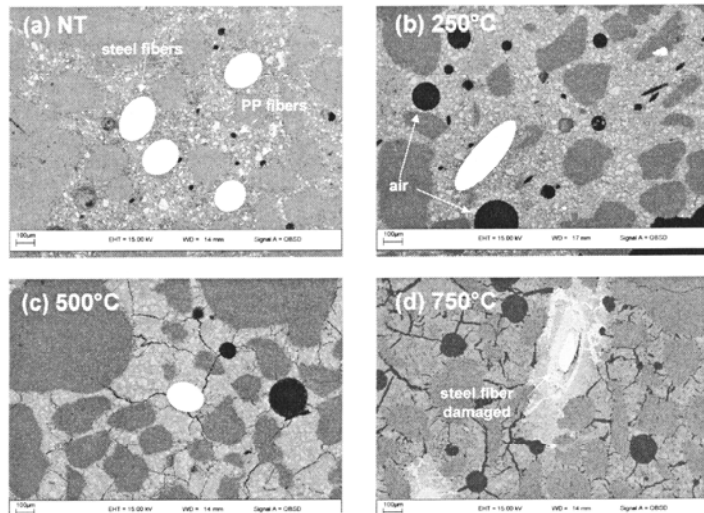


Figura 5. Incremento della microfessurazione della pasta cementizia con l'aumentare della temperatura raggiunta [2].

2.2 Calcestruzzo dopo la condizione di incendio

La decomposizione della pasta cementizia e la formazione di fessure rendono praticamente irreversibile il recupero della resistenza del calcestruzzo dopo il raffreddamento a seguito di esposizione ad alta temperatura. È anzi dimostrata una precisa correlazione fra la densità di microfessure e la resistenza residua del conglomerato cementizio (Figura 6).

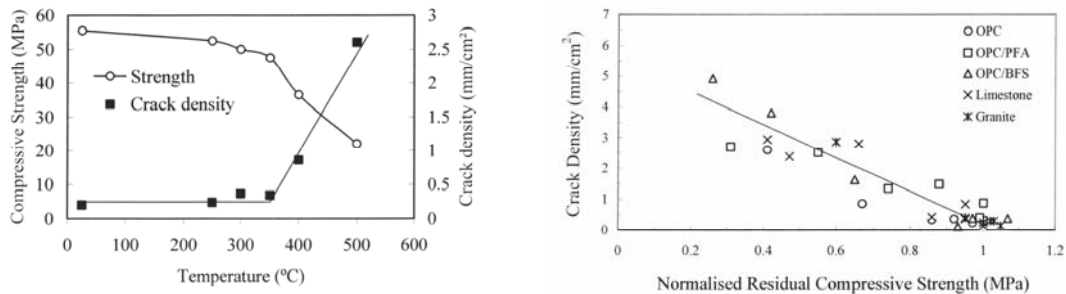


Figura 6. Correlazione fra densità di fessure e resistenza residua del conglomerato cementizio [3].

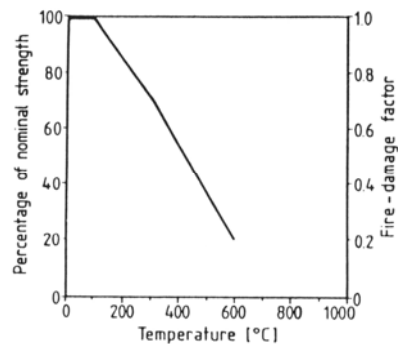


Figura 7. Resistenza residua del conglomerato cementizio dopo esposizione ad alta temperatura e corrispondente fattore di danneggiamento [1].

Tabella 3. Proprietà del calcestruzzo strutturale (cemento Portland, aggregato siliceo) dopo esposizione ad incendio in rapporto ai valori iniziali.

	Temperatura raggiunta °C						
	200	300	400	500	600	800	1000
Resistenza %	80	70	60	40	20	10	0
Modulo elastico %	60	50	40	30	10	5	0

La resistenza a compressione residuale del calcestruzzo dopo l'esposizione ad alta temperatura è illustrata nella Figura 7 e quantificata, unitamente al modulo elastico residuale, nella Tabella 3. È evidente la correlazione fra riduzione di resistenza e riduzione di deformabilità, particolarmente sensibile nelle prime fasi di riscaldamento, associabile alla sensibile riduzione dell'acqua libera e dell'acqua di legame.

Si fa osservare inoltre che la decomposizione dell'idrossido di calce riduce la basicità della pasta cementizia, analogamente a quanto succede per la carbonatazione del calcestruzzo in ambiente atmosferico. La profondità di questa "carbonatazione" è tanto maggiore quanto più severo è l'incendio, come illustrato nella Figura 8.

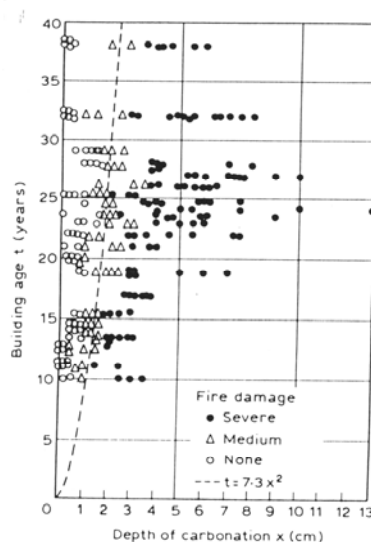


Figura 8. Profondità di carbonatazione dopo un incendio confrontata con la profondità di carbonatazione in atmosfera normale [1].

2.3 Acciaio

L'acciaio è normalmente l'elemento critico di una sezione in c.a. durante l'evento incendio, a causa della significativa riduzione della sua resistenza allo snervamento alle alte temperature (circa $f_{sy} \approx 60\% f_{sy,20}$ a 500 °C, che prende la ben nota denominazione di "temperatura critica"). Durante il riscaldamento, almeno nell'ambito delle temperature normalmente raggiunte (< 600 – 700°C), non avvengono significative trasformazioni chimiche, ragion per cui l'acciaio ordinario, dopo l'evento incendio, normalmente recupera le sue qualità meccaniche iniziali. Fa eccezione l'acciaio armonico, generalmente impiegato nella precompressione, per il quale il riscaldamento provoca la distensione dell'acciaio incrudito a freddo e quindi la perdita irreversibile delle iniziali qualità meccaniche (elevatissima resistenza a rottura per trazione). Nella Figura 9 sono illustrate le proprietà residue dell'acciaio dopo riscaldamento ad alte

temperature: si può notare che, per quanto riguarda la tensione di snervamento, non vi sono riduzioni di resistenza residua fino ad un riscaldamento di 600 °C per l'acciaio normale.

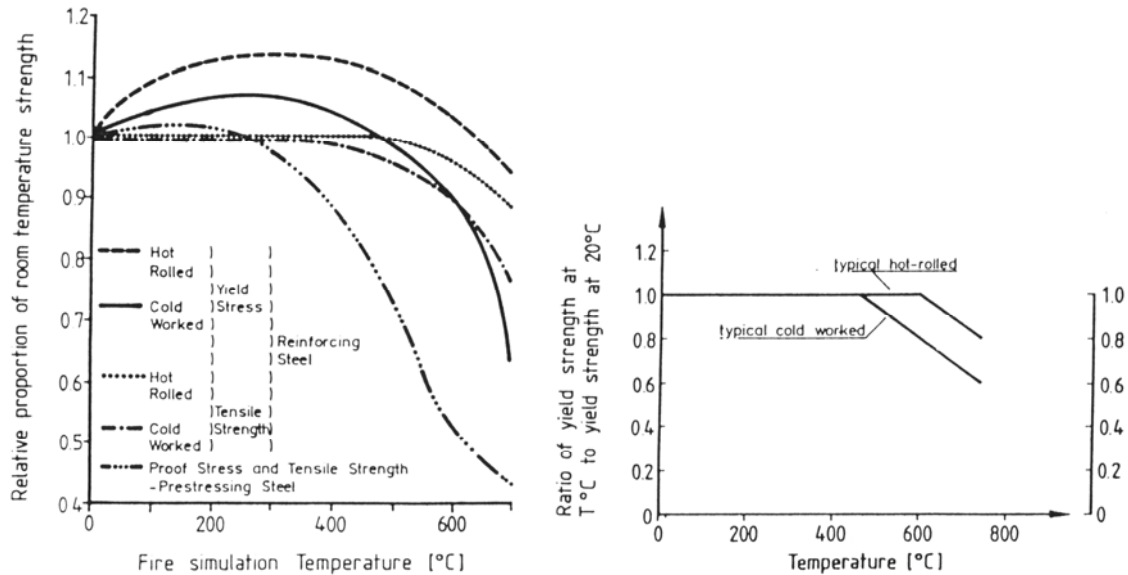
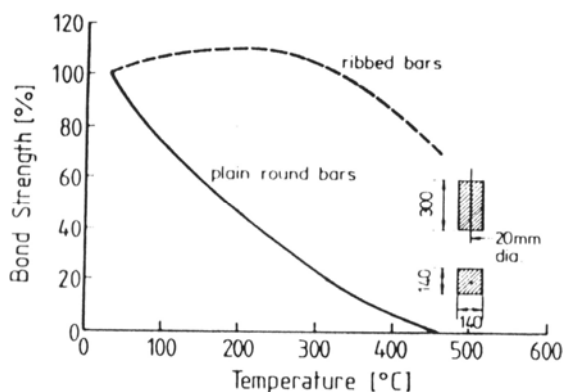


Figura 9. Proprietà dell'acciaio da ca e cap sottoposto a varie temperature e corrispondenti proprietà residue, utilizzabili per il calcolo della resistenza residua delle sezioni [1].

Per la valutazione della resistenza residua dopo l'evento incendio di elementi strutturali (e per giudicarne quindi della riparabilità), si deve però tenere conto di altri fattori che subiscono significative variazioni durante l'evento incendio.

Ci si riferisce sostanzialmente all'aderenza acciaio-calcestruzzo che, come è ben noto, sta alla base di una delle ipotesi fondamentali del calcolo delle strutture in ca e cap e cioè la perfetta congruenza di deformazione dei due materiali ($\epsilon_c = \epsilon_s$), congruenza che viene compromessa a causa del riscaldamento degli elementi esposti ad incendio. Si può osservare dalla Figura 10 che il decadimento dell'aderenza in funzione della temperatura è superiore al decadimento della resistenza del calcestruzzo, questo probabilmente a causa della progressiva formazione di microfessure che inficiano la resistenza del calcestruzzo stesso nei confronti delle azioni tangenziali. Ciò comporta una ridefinizione della temperatura critica (Figura 11) per quanto riguarda l'aderenza, differente (e minore!) da quella che riguarda la resistenza a compressione del calcestruzzo stesso.



La riduzione della capacità di aderenza acciaio-calcestruzzo inficia soprattutto gli elementi in precompresso a cavi aderenti, per i quali la precompressione si trasmette al conglomerato proprio grazie al meccanismo dell'aderenza.

Figura 10. Aderenza di barre lisce e ad aderenza migliorata, misurata a freddo dopo esposizione ad alta temperatura, in confronto con campioni non riscaldati.

Figura 11. Temperatura critica per il calcestruzzo e temperatura critica per l'aderenza in funzione del grado di utilizzazione [1].

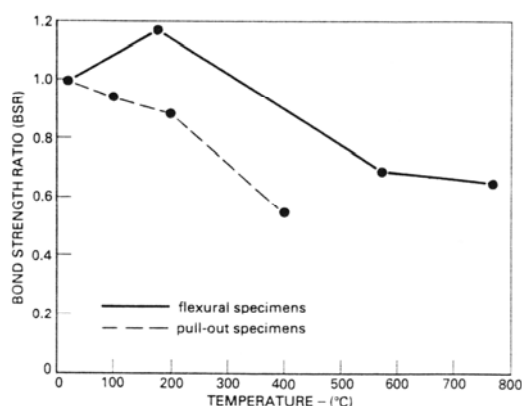
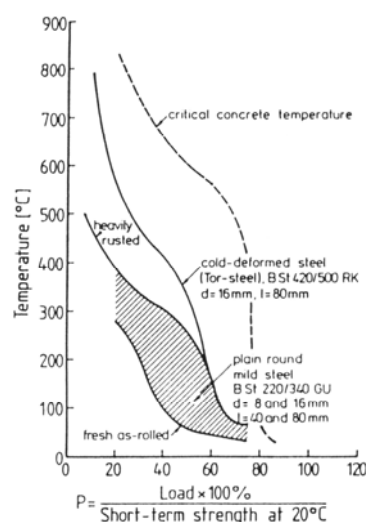


Figura 12. Resistenza di aderenza residua dopo esposizione a varie temperature con differenti modalità di prova.

3. METODI DI INDAGINE SUI MATERIALI ACCIAIO E CALCESTRUZZO

3.1 Acciaio

Come già precedentemente accennato, anche se il comportamento dell'acciaio è determinante nella verifica a caldo, il recupero pressoché integrale delle sue capacità resistenti una volta raffreddato ne riduce la significatività nella determinazione della resistenza residua degli elementi strutturali, almeno per quanto riguarda gli acciai ordinari. Diverso invece il discorso sugli acciai armonici, ove la perdita di precompressione risulta a tutt'oggi di difficile determinazione.

3.1.1 Posizione dell'acciaio

Non sempre sono disponibili i disegni originali dell'opera e comunque può essere necessario controllare l'effettiva posizione e diametro delle armature.

Il metodo più utilizzato per la rilevazione dell'acciaio si basa sulla misura della variazione di un campo magnetico generato da una sonda dovuta alla presenza di armature (pachometro). Le grandezze incognite sono il ricoprimento dell'armatura "a" ed il suo diametro "d" (Figura 13). Sfortunatamente non è possibile conoscere entrambe le grandezze incognite, per cui una di esse deve essere rilevata direttamente mediante piccoli saggi.

Lo strumento è relativamente semplice da utilizzare e nella maggior parte dei casi è possibile ricostruire con adeguata attendibilità la posizione delle armature nelle zone più significative (a parte in presenza di armature poco distanziate o disposte su più strati sovrapposti).

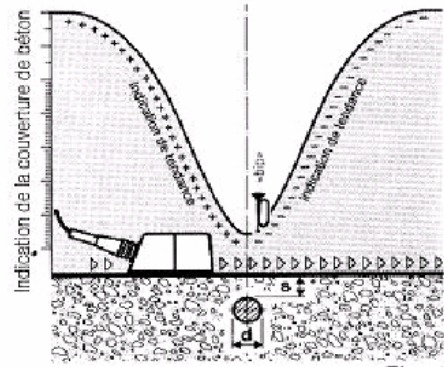


Figura 13. Rilevo armature mediante pachometro.

Particolarmente promettente, anche se ancora in via di perfezionamento, è la tecnica radar [5]. In termini semplici una sonda manuale che incorpora le antenne trasmettenti e riceventi viene fatta scorrere sulla superficie dell'elemento da indagare. Il raggio di radiazioni elettromagnetiche viene riflesso e rifratto alle interfacce fra materiali aventi differenti proprietà dielettriche. Il segnale riflesso viene poi acquisito ed analizzato (Figura 14 e Figura 15).

L'applicazione del metodo, che comunque richiede personale addestrato per l'interpretazione, sembra consentire sempre il rilevamento di barre situate anche in profondità, purché distanziate di 200 mm. Tale distanza può scendere a 100 mm se le barre sono più superficiali, ma la sovrapposizione di più armature può creare effetti di mascheramento che rendono difficoltosa l'interpretazione del rilevamento stesso.

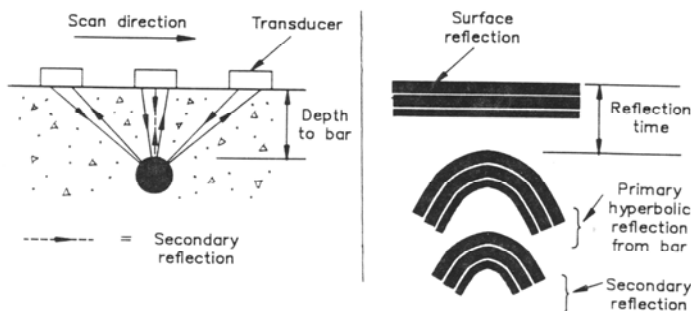


Figura 14. Rappresentazione schematica delle riflessioni iperboliche dovute ad una barra circolare. [5].

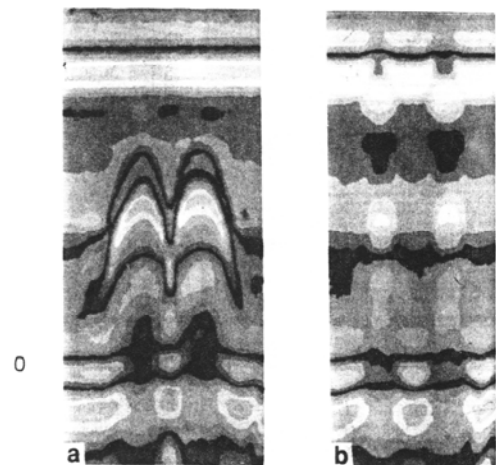
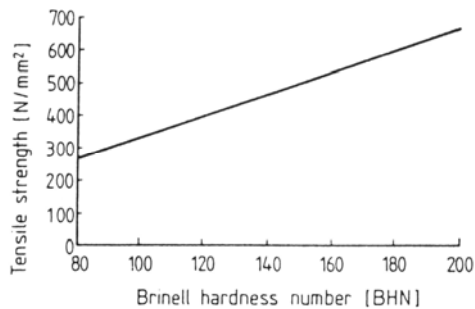


Figura 15. Immagine radar di due barre da 32 mm profonde (155 mm) e superficiali (25 mm) [5].

3.1.2 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio

Per valutare la resistenza residua dell'acciaio ordinario nella maggior parte dei casi è sufficiente prelevare un campione di armatura da una zona staticamente non significativa ed assoggettarlo a prove convenzionali di rottura in laboratorio. Qualora l'armatura sia accessibile (magari anche grazie ad una scarificazione locale) è possibile misurare la durezza dell'acciaio mediante un durimetro portatile e da questa, attraverso note correlazioni (ad esempio quella di Figura 16) risalire alla resistenza a trazione dell'acciaio stesso.



anche grazie ad una scarificazione locale) è possibile misurare la durezza dell'acciaio mediante un durimetro portatile e da questa, attraverso note correlazioni (ad esempio quella di Figura 16) risalire alla resistenza a trazione dell'acciaio stesso.

Figura 16. Relazione approssimata fra la durezza Brinell e la resistenza a trazione di un acciaio dolce.

Più complessa ed a tutt'oggi non risolta è la determinazione della tensione residua nei cavi di precompressione. Nel caso di numerosi cavi agevolmente accessibili è possibile effettuare la misura diretta (Figura 17) isolando il cavo interessato con due tagli e misurando la deformazione conseguente al rilassamento dello stesso. La misura può essere effettuata con trasduttore meccanico o, meglio, con strain-gauges incollati sulla superficie del cavo stesso.

La perdita di precompressione può essere valutata negli elementi precompressi a cavi aderenti, anche se solo in modo qualitativo, osservandone le testate. Se il cavo è rientrato di alcuni millimetri nella testata è segno che è venuta meno, anche se parzialmente, l'aderenza e quindi è diminuita la forza di precompressione. Alcuni risultati di laboratorio sono riportati nella Figura 18, che permette di apprezzare la differenza di slittamento (rientro) delle armature per travi con armatura ordinari (SS1) e ad alta resistenza (SS2). Ovviamente in casi reali l'entità dello slittamento dipende dalla lunghezza totale del cavo ed è quindi molto variabile da caso a caso; ordinariamente si riscontrano rientri anche di alcuni mm).

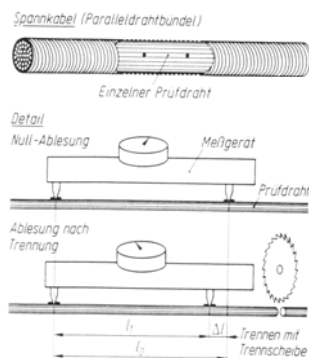


Figura 17. Controllo diretto della precompressione mediante misura del rilassamento [6].

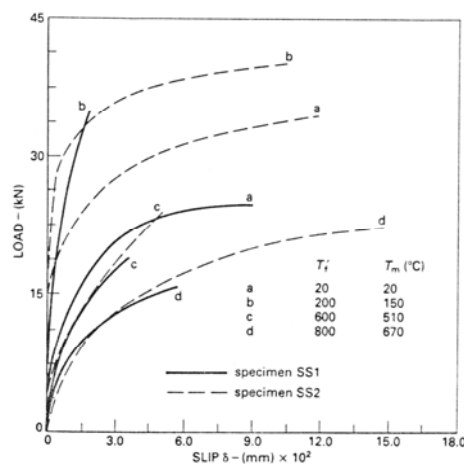


Figura 18. Influenza della temperatura sullo slittamento delle estremità in condizioni post-incendio [7].

3.2 CALCESTRUZZO

Nel precedente capitolo 2.1, si è detto che è il conglomerato cementizio il materiale che subisce per effetto del calore le più significative modificazioni (irreversibili) e riduzione delle caratteristiche di resistenza. Fortunatamente le zone maggiormente riscaldate sono limitate a pochi centimetri all'interno delle superfici direttamente esposte alle fiamme; si vedano ad esempio le mappe termiche della Figura 19, ove si può notare che per un elemento massiccio esposto a 120' di incendio standard l'isoterma dei 500°C si situa all'incirca a 40 mm dalle superfici esposte.

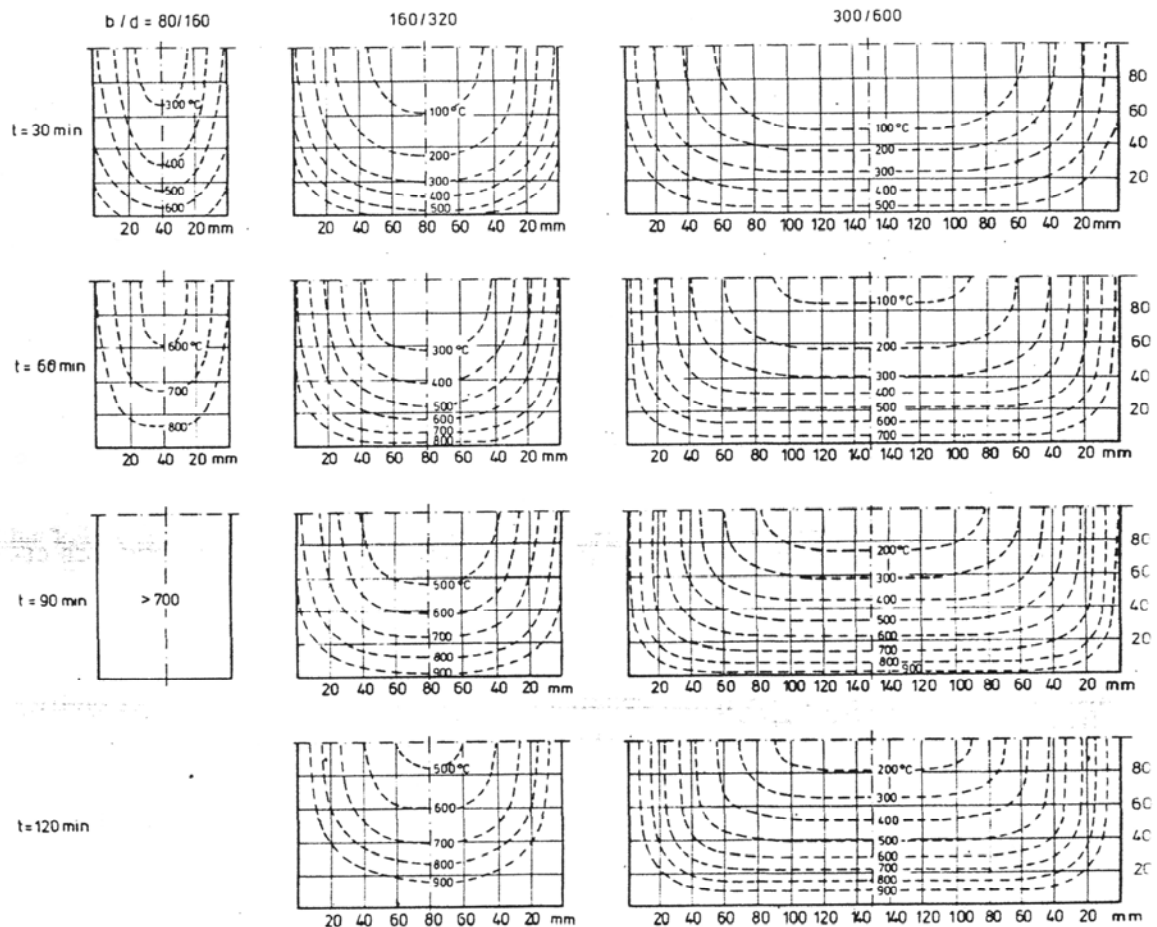


Figura 19. Mappe termiche di una sezione in c.a. (trave) esposta su tre lati ad incendio standard ISO 834.

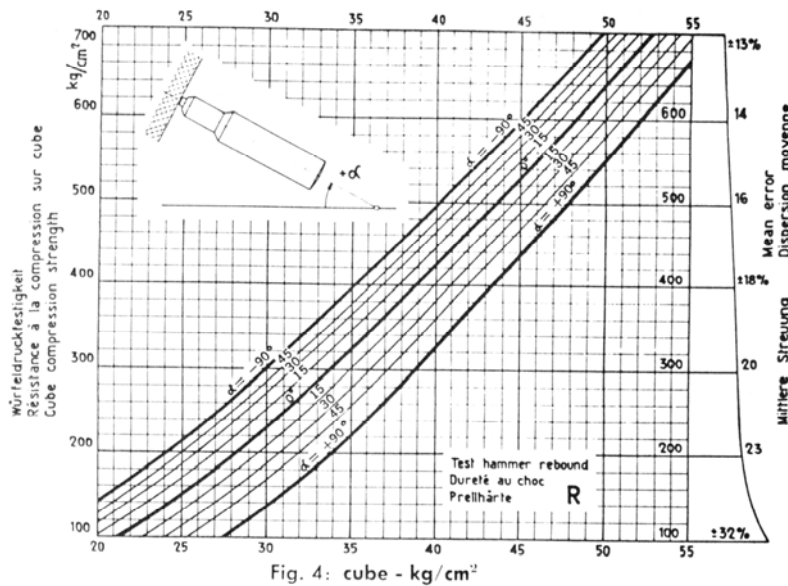
Lo strutturista che deve valutare la sicurezza della costruzione dopo l'evento incendio e progettare l'eventuale intervento di recupero, si trova quindi di fronte alla necessità di:

- valutare la profondità del massimo danneggiamento (o la temperatura raggiunta nei vari strati);
- valutare la resistenza attuale dell'elemento strutturale preso in considerazione.

I metodi di indagine sul calcestruzzo normalmente a sua disposizione sono utilizzabili anche nel caso specifico dell'incendio, ma con le dovute attenzioni.

3.2.1 Metodi di indagine superficiali

In linea di principio tutti i metodi che normalmente vengono adottati (sclerometria, pull-out, pistola di Windsor) possono dare informazioni solo sulle condizioni superficiali del calcestruzzo e, come si è detto, non possono essere estese anche alla parte più interna. È noto del resto che anche nel calcestruzzo in condizioni ordinarie la correlazione fra indice di rimbalzo e resistenza a compressione (si veda ad esempio la Figura 20) perde di affidabilità nel tempo a causa dell'indurimento superficiale del calcestruzzo provocata dalla carbonatazione.



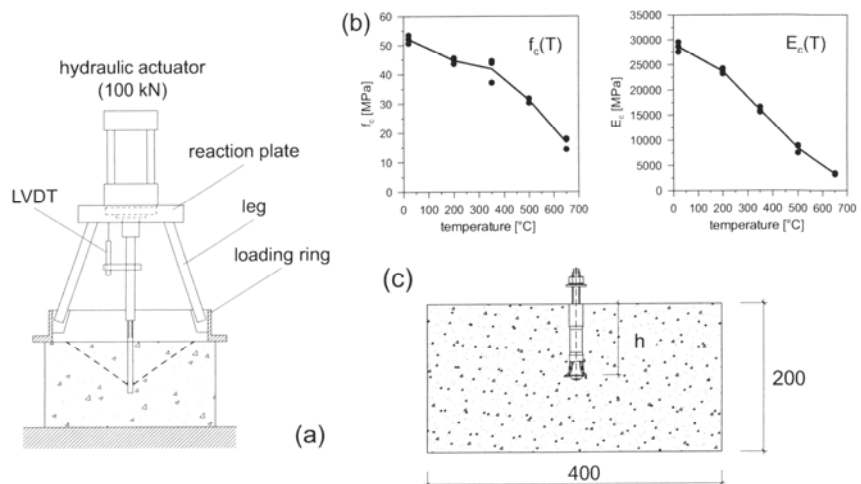
anche nel calcestruzzo in condizioni ordinarie la correlazione fra indice di rimbalzo e resistenza a compressione (si veda ad esempio la Figura 20) perde di affidabilità nel tempo a causa dell'indurimento superficiale del calcestruzzo provocata dalla carbonatazione.

Figura 20. Tipiche curve di correlazione fra indice di rimbalzo e resistenza del calcestruzzo [8].

Tuttavia le misure di tipo superficiale, stante la semplicità e velocità esecutiva, possono essere un utilissimo strumento per valutare comparativamente l'entità del danneggiamento ed eseguire una prima mappatura dell'estensione del danno del calcestruzzo, consentendo di individuare le zone nelle quali affinare l'indagine con metodi più attendibili.

Secondo tale intendimento si può anche ricorrere al classico metodo del Pull-Out [9] che è stato recentemente oggetto di studio nel caso di calcestruzzi esposti ad alte temperature (Figura 21 e Figura 22).

Figura 21. Valutazione della resistenza a compressione e del modulo elastico residui mediante prove di pull-out su calcestruzzi riscaldati a varie temperature [10].



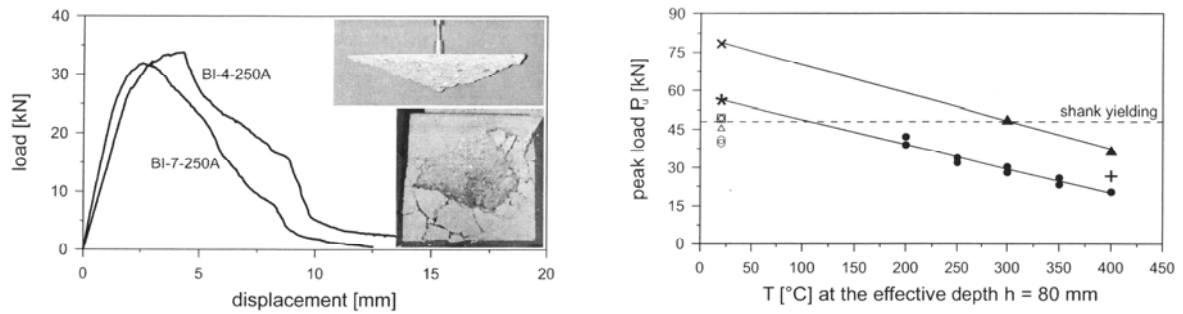


Figura 22. Tipica curva forza spostamento misurata durante una prova di Pull-Out e variazione della forza di picco di estrazione in funzione della temperatura di esposizione del calcestruzzo [10].

È da segnalare infine per la semplicità di applicazione in opera il metodo, ancora in fase sperimentale, basato sulla resistenza del calcestruzzo alla perforazione. Il principio della prova, relativamente semplice, si basa sulla misura alla resistenza di avanzamento di un trapano elettrico strumentato nel corpo del calcestruzzo (Figura 23).

I risultati della ricerca sono incoraggianti e tale metodo potrebbe essere normalizzato ed adottato come strumento di indagine in situ.

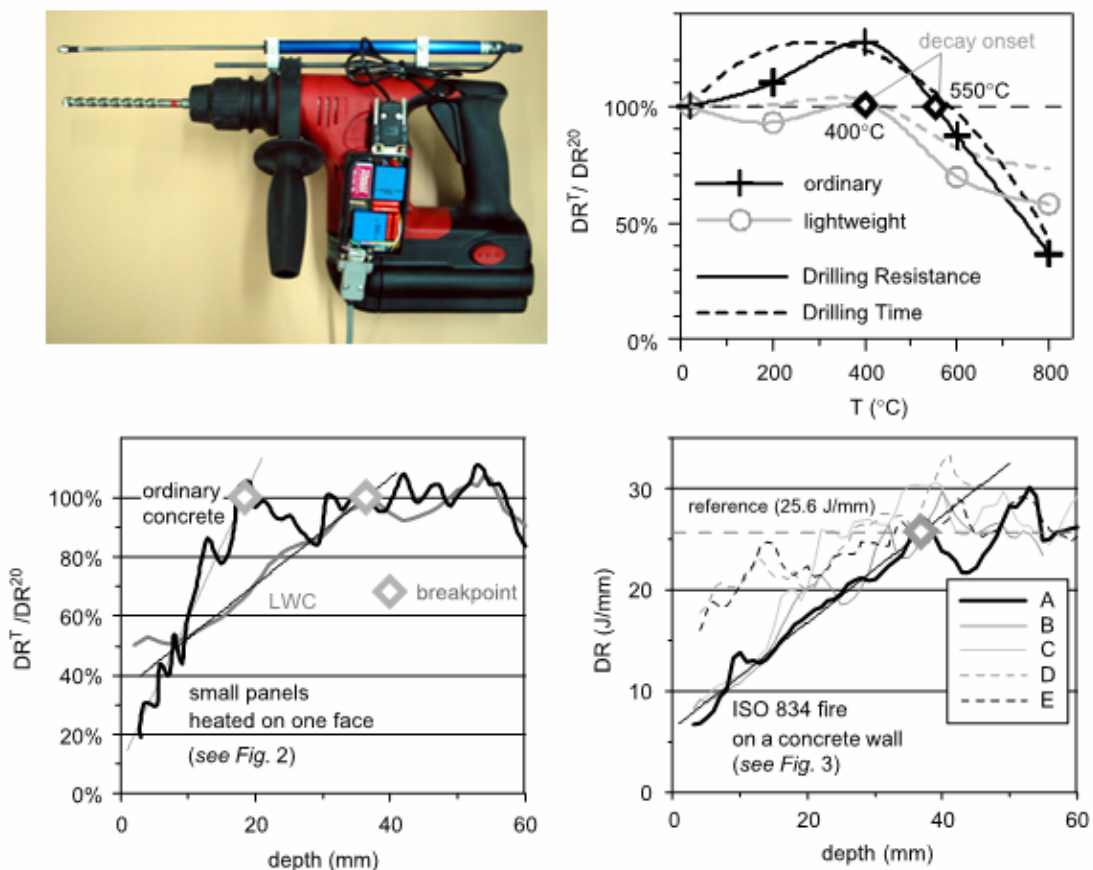


Figura 23. Trapano elettrico dotato di circuiti elettronici per la misura della resistenza all'avanzamento e l'avanzamento stesso e correlazioni fra danneggiamento e resistenza all'avanzamento[12], [20].

3.2.2 Colorimetria

Osservando la **Tabella 2** si nota che in corrispondenza a determinate temperature raggiunte dal calcestruzzo viene annotato anche un cambiamento di colore. Tale fatto, spesso citato nella letteratura anglosassone, sembra riferirsi soprattutto a conglomerati con aggregato calcareo, tuttavia ben difficilmente (almeno stando all'esperienza personale dello scrivente) è possibile osservare sul campo tale fenomeno. Tra le tecniche innovative proposte per determinare la temperatura raggiunta vi è tuttavia da segnalare quella basata sulla colorimetria [11]. Tale tecnica, viene applicata a lenti di calcestruzzo levigate e ricavate da carote estratte dal conglomerato da indagare (quindi prelievo di carota in situ ed esame di laboratorio).

Sembra esservi una chiara correlazione fra il colore, valutato sulla base di apposita scala colorimetrica, e la temperatura raggiunta ed il conseguente danneggiamento (si veda la Figura 24).

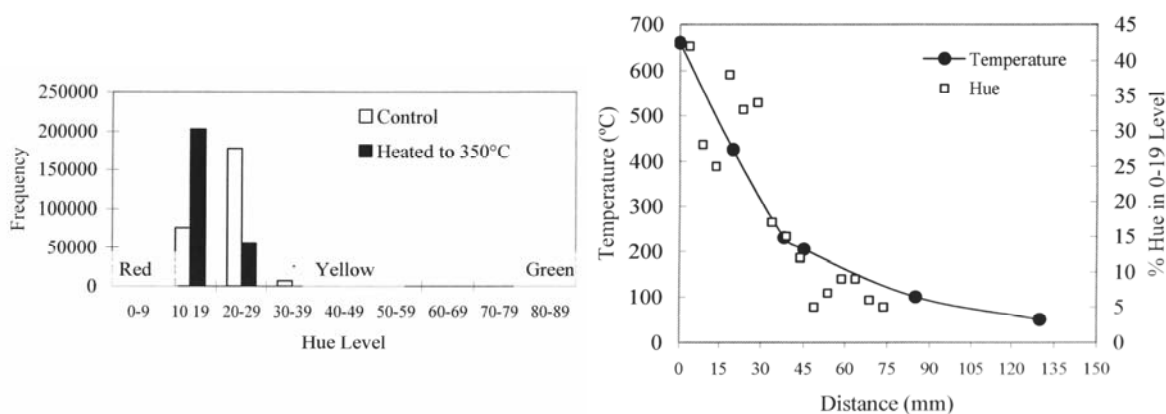


Figura 24. Scala colorimetrica e correlazione con le temperature raggiunte a varie profondità di calcestruzzo esposto ad incendio [3].

3.2.3 Prove dirette di rottura

L'estrazione di carote da sottoporre a prove di laboratorio di rottura è ovviamente limitata dalla opportunità di non ridurre ulteriormente la resistenza di elementi strutturali già variamente danneggiati dall'incendio. Nondimeno tale tipo di prove è necessario qualora si intenda quantificare con esattezza la capacità resistente residua del conglomerato, individuando precise correlazioni fra altre misure (p.e. ultrasuoni) e la resistenza stessa per quel determinato tipo di materiale.

È possibile tuttavia ridurre l'impatto di tale prelievo estraendo microcarote (diametro circa 30 mm, vedi Figura 25) e sottoporrendole poi a prova di compressione diretta. Il metodo può essere adottato con calcestruzzi aventi aggregato di diametro fino a 30 mm e la correlazione fra i risultati ottenuti con tale metodo e le carote tradizionali è lineare e ben definita. Nella Figura 26 è riportata la linea di regressione e la relativa equazione.

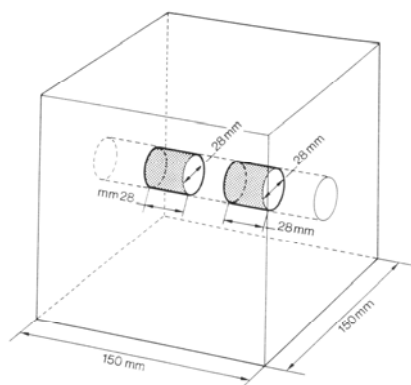
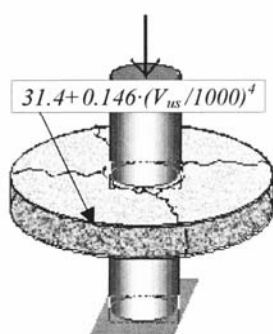
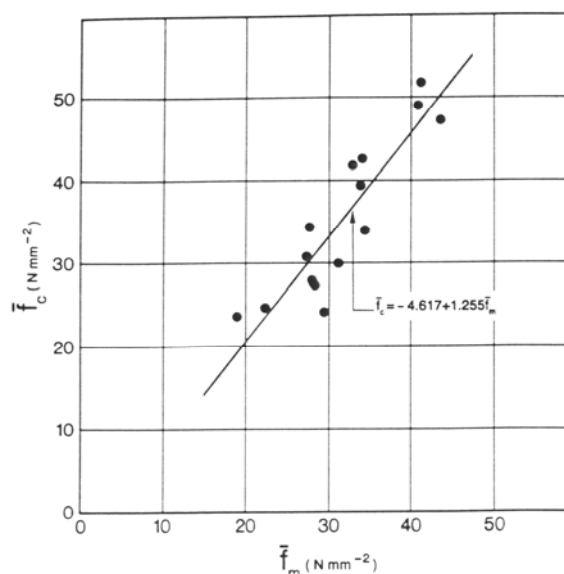


Figura 25. Esempio di prelievo di microcarote [13].

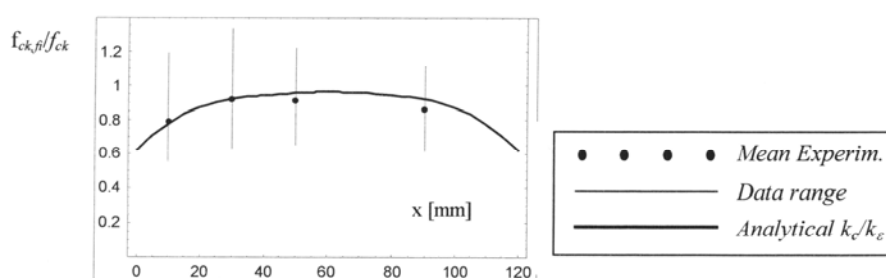
Figura 26. Linea di regressione ed equazione di correlazione fra i risultati ottenuti con microcarote e la resistenza cilindrica convenzionale.



Per valutare direttamente la resistenza del calcestruzzo a diverse profondità è possibile ricavare da una carota di tipo tradizionale diversi dischi (spessore pari a circa 1/4 -1/5 del diametro della carota) da sottoporre a compressione fra due cilindri metallici di piccolo diametro: il cosiddetto “flat-disk punching test” (Figura 27). Con un unico carotaggio si può quindi determinare il profilo del danneggiamento nello spessore dell’elemento costruttivo esaminato (Figura 28).

Figura 27. Flat-disk punching test per la valutazione della resistenza a compressione del calcestruzzo [14].

Figura 28. Profilo del danneggiamento lungo lo spessore dell’anima di una trave in cap esposta ad incendio reale [14].



3.2.4 Ultrasuoni.

La valutazione della resistenza del calcestruzzo mediante la tecnica degli ultrasuoni è ben nota e non ci si intende soffermare su di essa, rimandando alla consolidata ed abbondante letteratura sull’argomento. Si tratta, in estrema sintesi di misurare la velocità di propagazione di onde ultrasoniche emesse e ricevute a distanza costante su superfici contrapposte dell’elemento in calcestruzzo (lettura diretta, vedi Figura 29).

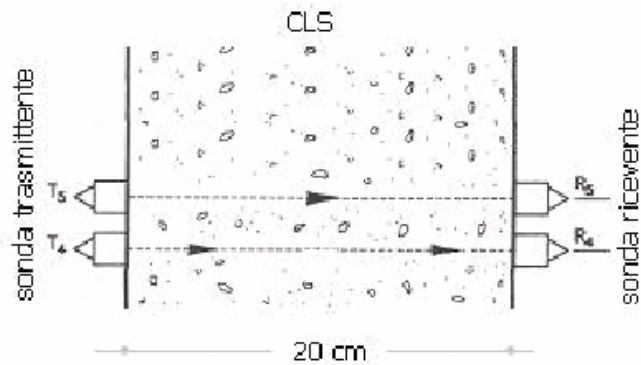


Figura 29. Schema di acquisizione della velocità di propagazione degli ultrasuoni.

La resistenza meccanica ed il modulo elastico vengono calcolati mediante le note formule.

$$R_{cub} = 1,88 \cdot 10^{-22} \cdot V_L^{6,184} ; \quad E = E_d / 1,062 ; \quad E_d = \gamma / g \cdot [V_L^2 \cdot (1 - \nu^2)]$$

Dato che l'esposizione ad alte temperature modifica sia la resistenza a compressione che il modulo elastico residui del calcestruzzo, è possibile correlare tali grandezze alla velocità di propagazione degli ultrasuoni, come mostrato nella Figura 30, tenendo conto anche del contributo delle zone più o meno danneggiate a seconda della distanza dalla superficie esterna (Figura 31).

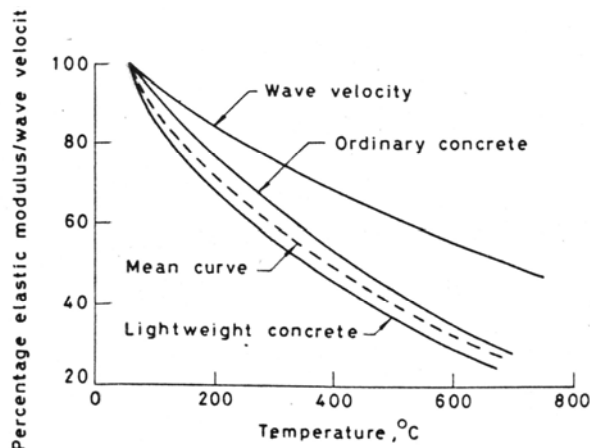
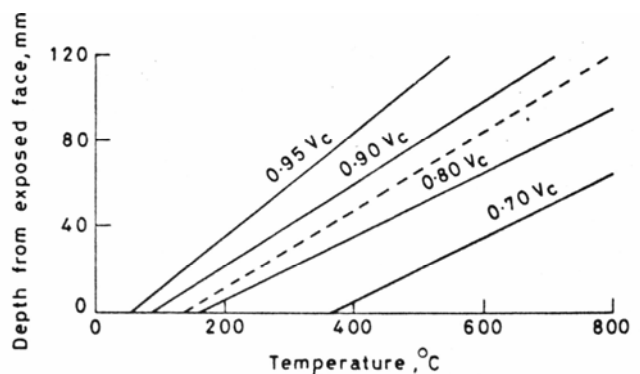


Figura 30. Variazione del modulo elastico e della velocità di propagazione degli ultrasuoni nel calcestruzzo esposto a diverse temperature [15].

Figura 31. Profilo della velocità degli ultrasuoni con l'aumento della temperatura [15].



3.2.5 Prove chimiche

Prima del ripristino della struttura è necessario conoscere l'effettivo grado di **basicità** del calcestruzzo, che, come si è detto, potrebbe essere stato alterato per effetto della temperature rag-

giunte. La prova è molto semplice e consiste nell'impregnare la superficie del calcestruzzo con una soluzione idroalcolica di fenolftaleina all'1%: per $\text{pH} > 9,2$ la superficie vira al rosso più o meno intenso (ambiente basico) diversamente riamane incolore (Figura 32).



Figura 32. Reazione con fenolftaleina: a sinistra calcestruzzo carbonatato, a destra calcestruzzo ancora basico.

Più complessa, si tratta infatti di una prova da eseguire in laboratorio, è l'analisi termogravimetrica abbinata all'analisi termica differenziale di campioni calcestruzzo prelevati in situ (vedi Figura 33).

L'analisi **termogravimetrica (TGA)** consiste nel rilevare le variazioni di peso che subisce un campione all'aumentare della sua temperatura. Essa permette di valutare la stabilità termica, la velocità di reazione, i processi di reazione e, in taluni casi, la composizione del campione. Si sottopone il campione ad un predefinito ciclo termico e si registra l'andamento del suo peso in funzione della temperatura. Operando in atmosfera inerte, sarà possibile rilevare la diminuzione di peso del campione in corrispondenza delle temperature alle quali avvengono determinate reazioni chimiche che, solitamente, prevedono la formazione di composti gassosi.

Se si conosce la temperatura a cui avviene una determinata reazione, in base alla perdita di peso, è possibile risalire al contenuto percentuale del composto che si è trasformato.

In **Tabella 2** sono riportati gli intervalli di temperatura in cui avvengono le trasformazioni tipiche di alcuni costituenti del calcestruzzo. Questi intervalli non dipendono solo dalla natura della trasformazione, ma possono essere influenzati anche dalla quantità di sostanza che si trasforma, dalla velocità di riscaldamento e dalle possibili interferenze determinate da altre sostanze presenti. Tale valore, perciò, non permette sempre una diretta identificazione della sostanza che si decompone, ma va valutato nel quadro generale delle informazioni che si possiedono sul campione analizzato. L'analisi termica quindi deve essere integrata da altre analisi (ad esempio dall'analisi chimica degli elementi presenti). Per l'interpretazione dei risultati dell'analisi TGA possono risultare molto utili le informazioni ottenute attraverso l'analisi DTA. Gli strumenti più moderni permettono di effettuare contemporaneamente queste due analisi.

Con l'**analisi termica differenziale (DTA)** viene misurata, durante il riscaldamento, la differenza di temperatura tra il campione analizzato e una sostanza di riferimento che non subisce trasformazioni nell'intervallo di temperatura considerato. In tal modo sarà possibile valutare i fenomeni endotermici (assorbimento di calore) o esotermici (sviluppo di calore) che accompagnano le trasformazioni che caratterizzano il campione in analisi. Le curve DTA sono utili sia qualitativa-

mente sia quantitativamente; infatti, la posizione e la forma dei picchi possono essere utilizzate per determinare la composizione del campione, mentre l'area sottesa dal picco è proporzionale al calore di reazione e alla quantità di materiale presente. Taluni fenomeni sono prettamente endotermici (fusione, vaporizzazione), altri sempre esotermici (ossidazione), mentre alcuni possono essere eso o endotermici (decomposizione).

Una immediata valutazione della temperatura raggiunta si basa sulla reazione di disidratazione della pasta cementizia. Mediante l'analisi termogravimetrica è possibile stimare quanta acqua è legata a silicati di calcio o, come nel caso specifico, è possibile stabilire quanta acqua è ancora legata ai silicati di calcio ed in quali intervalli di temperatura questa quantità è carente.

Effettuando l'analisi per campioni prelevati a diverse profondità (p.e. da una stessa carota) è possibile determinare il profilo delle temperature raggiunte dal calcestruzzo durante l'evento incendio.

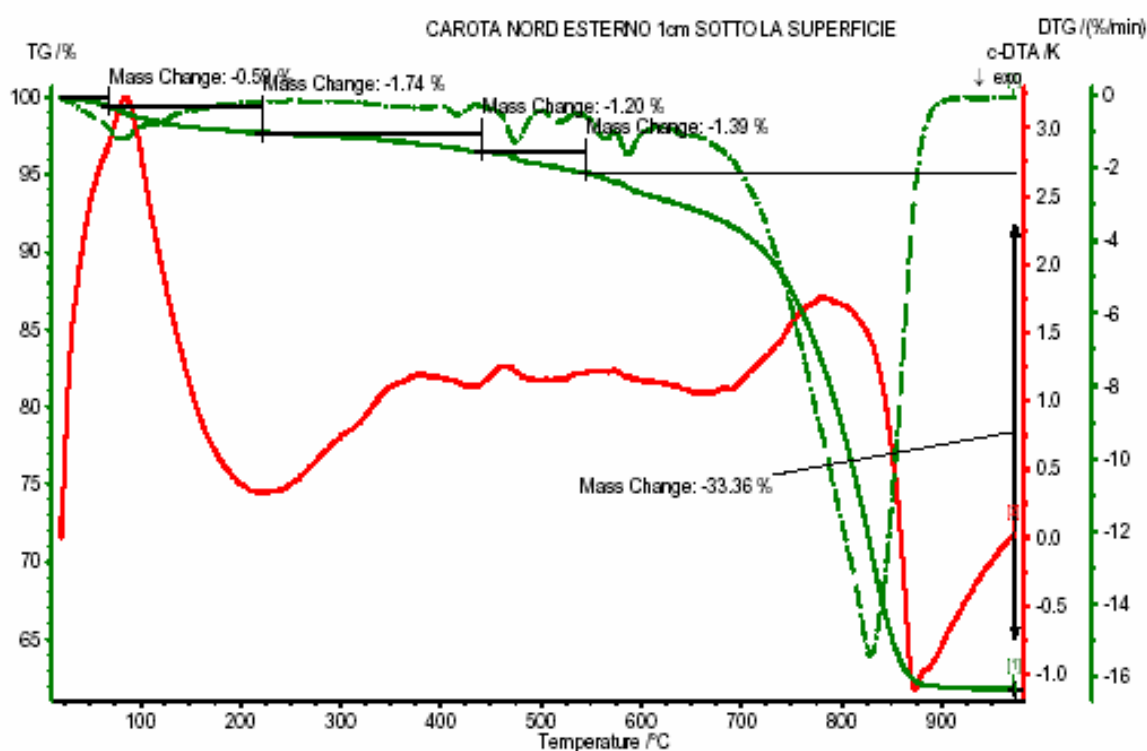


Figura 33. Esempio di analisi termogravimetrica (TGA) e analisi termica differenziale (DTA) [archivio dell'autore].

4. METODI DI INDAGINE SU STRUTTURE

La prova di carico di un elemento costruttivo (trave o solaio) costituisce, se adeguatamente preparata ed interpretata, un importante elemento probante per la stabilità e la funzionalità dello stesso. Nel caso di strutture soggette ad incendio però lo stato di danneggiamento può essere tale da rendere la prova stessa non sicura (Figura 34). Sono pertanto da privilegiare quelle prove che consentono l'immediata cessazione dell'azione di carico in caso di insorgenza di eccessive de-

formazioni o perdita di proporzionalità fra carico e freccia (p.e. con martinetti oleodinamici a pressione o a strappo).

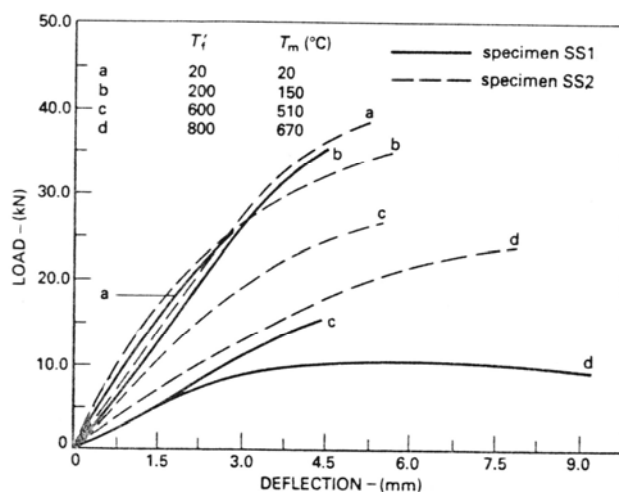
È anche possibile effettuare prove di caratterizzazione dinamica, preferibilmente sotto eccitazione ambientale, ma la loro significatività è di tipo comparativo.



Figura 34, Impalcato con travi a doppia pendenza e tegoli prefabbricati in c.a.p. danneggiato da incendio [archivio dell'Autore].

4.1 Prove di carico statiche

Come precedentemente accennato l'esposizione ad alta temperatura provoca danni irreversibili nel calcestruzzo e nel legame di aderenza acciaio-calcestruzzo che inficiano la resistenza residua dell'elemento dopo il raffreddamento.



Prove di laboratorio (Figura 35) dimostrano chiaramente tale situazione e si può apprezzare che per esposizioni ad alta temperatura la resistenza residua è quasi dimezzata rispetto a quella originaria, così come la deformabilità.

Figura 35. Comportamento forza-freccia residue per travi in c.a. dopo esposizione ad alta temperatura [7]. Il campione SS2 era armato con barre di acciaio armonico.

Le prove di carico possono anche fornire indicazioni sulla precompressione residua di elementi prefabbricati danneggiati da incendio. Con riferimento alla Figura 36, relativa alla determinazione dell'efficienza residua di coppelle in cap di copertura in uno stabilimento metal-meccanico, si può osservare che le coppelle integre (caricate sino a 1.5 volte il massimo carico di progetto) hanno avuto un comportamento elastico-lineare con isteresi quasi nulla e freccia residua trascurabile. Sottoposti allo stesso ciclo di carico, gli elementi danneggiati hanno invece evidenziato un cambiamento di pendenza (riduzione di rigidità) in corrispondenza della formazione delle pri-

me fessure, grande isteresi e significative frecce residue, segno di parziale perdita di precompressione e probabile slittamento delle armature stesse (treccie).



Figura 36. Prova di carico su coppelle precomprese danneggiate da incendio: a sinistra coppella integra a destra coppella danneggiata [foto dell'Autore].

4.2 Prove di caratterizzazione dinamica

Consistono nella analisi del segnale raccolto da un accelerometro o da un geofono applicato a punti significativi dell'elemento strutturale o in regime di vibrazione ambientale o in presenza di una eccitazione, che può essere impulsiva (urto, percussione) o armonica (vibrodina); il segnale viene analizzato mediante la FFT (Fast Fourier Transform) e vengono messe in evidenza la prima frequenza propria di vibrazione (fondamentale) e le successive armoniche.

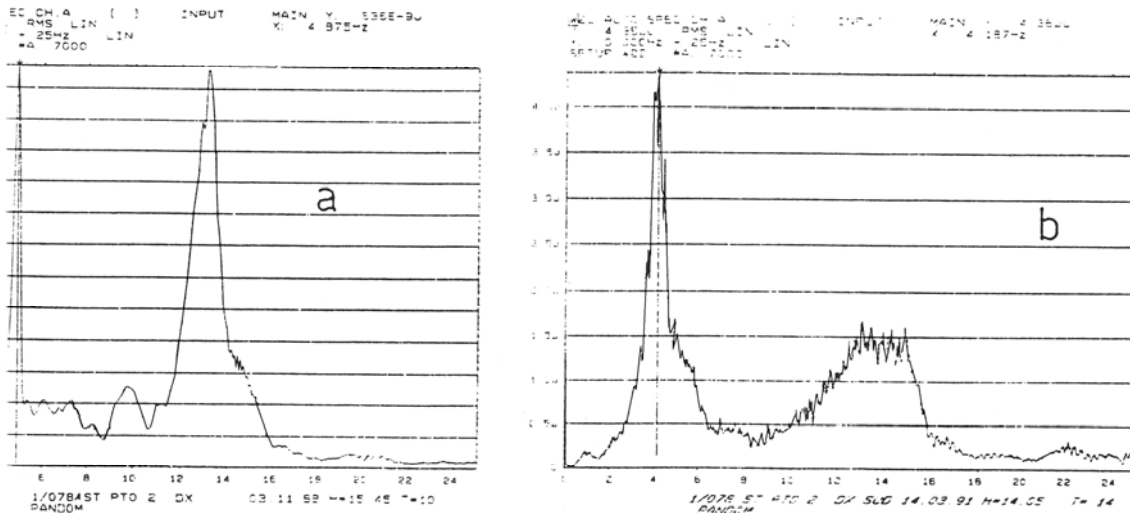


Figura 37. Esempio di analisi dinamica di una struttura (impalcato da ponte) prima del consolidamento a) e dopo il consolidamento b) [archivio dell'Autore].

Poiché la frequenza propria dipende dalla rigidezza dell'elemento strutturale, a parità di altre condizioni, in linea di principio un elemento danneggiato ha un periodo proprio di vibrazione inferiore a quello di un elemento integro (vedi Figura 37 ove ci si riferisce ad un intervento di riparazione).

Nella realtà dei fatti non sempre tale differenza è chiaramente apprezzabile nel corso di una prova, dato che la differenza di sollecitazione cui l'elemento è soggetto (specie in regime di vibrazione ambientale) è talmente modesta che il movimento permane in campo elastico senza che se ne possano evidenziare le difettosità.

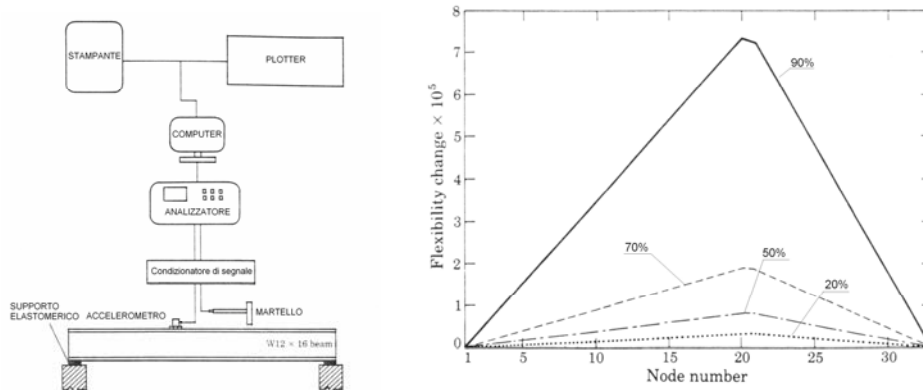


Figura 38. Dispositivo di prova e mappa del cambiamento di flessibilità per il danneggiamento di un elemento di una trave semplicemente appoggiata [21]. Sono riportati diversi valori di riduzione della rigidezza (da 20% a 90%).

Prove di laboratorio (Figura 38) mostrano un apprezzabile cambiamento della deformata solo per elevati valori di riduzione della rigidezza (tra 50% e 90%), quindi con l'elemento trave al limite del collasso, mentre per valori inferiori tale cambiamento è meno evidente.

Analoghi risultati sono stati ottenuti con prove su elementi in conglomerato cementizio pre-intagliati con una fessura all'intradosso (Figura 39). Solo per elevati valori del fattore di intaglio $C/R = a/d$ si apprezza una sensibile riduzione nella frequenza, mentre anche per elevati valori del fattore di intaglio (vedi Figura 41 per $CR = 1/2$) la variazione di forma del primo modo di vibrazione è praticamente impercettibile.

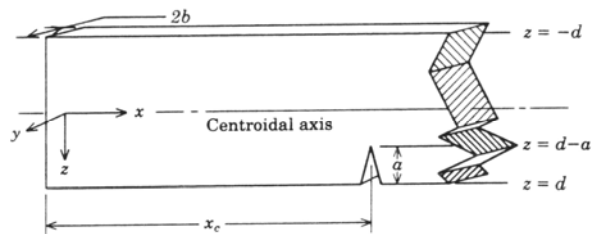


Figura 39. Trave con singola fessura all'intradosso [22].

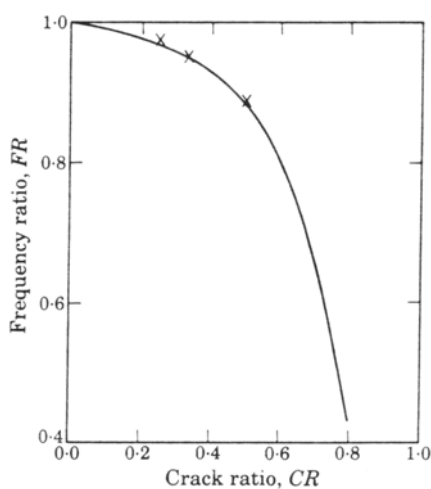


Figura 40. Variazione della frequenza propria di una trave semplicemente appoggiata con diverse profondità di intaglio in mezzera [22].

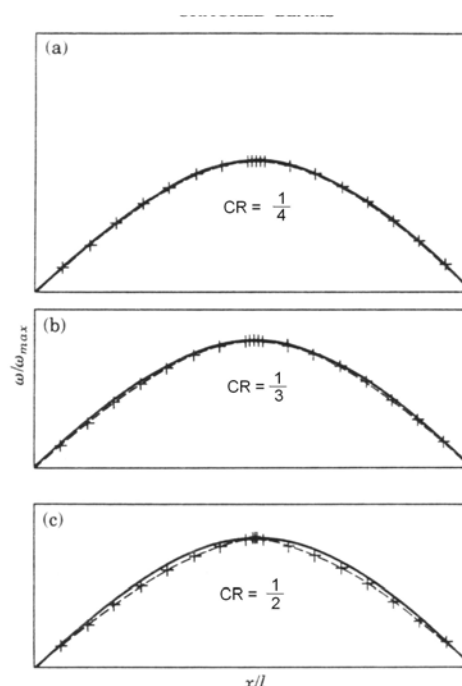
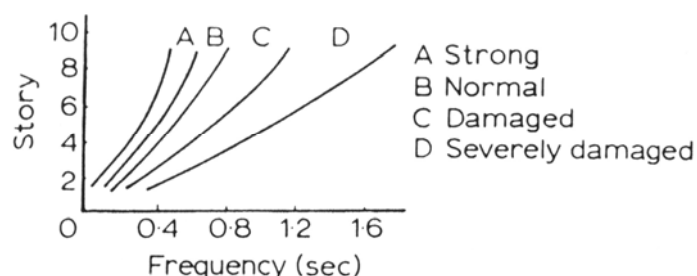


Figura 41. Variazione della frequenza propria di una trave semplicemente appoggiata con diverse profondità di intaglio in mezzeria e deformata relativa al primo modo naturale di vibrazione [22].

Indicazioni significative sulla variazione della frequenza propria di vibrazione di edifici danneggiati in varia misura da incendio sembrano emergere da un vecchio studio del British Research Establishment (Figura 42) per incendi di varia gravità, ove però l'incendio ha interessato l'intero edificio.



per incendi di varia gravità, ove però l'incendio ha interessato l'intero edificio.

Figura 42. Misure di frequenza propria di vibrazione in strutture di edifici multipiano danneggiati da incendio [23].

In generale il metodo della caratterizzazione dinamica fornisce comunque indicazioni utili per istituire un confronto fra elementi simili in una ampia costruzione danneggiata da incendio, consentendo di tracciare, mediante la rilevazione sistematica delle frequenze rilevate mediante percussione strumentata (misura di impedenza meccanica), la mappatura comparativa delle zone danneggiate (p.e. un ampio impalcato con elementi prefabbricati). Tale attività può essere fatta molto velocemente e senza sollecitare eccessivamente le strutture esposte all'azione del fuoco. Successivamente sarà possibile indagare più approfonditamente sugli elementi dubbi con prove di carico specifiche e confrontando i risultati ottenuti a campo con adeguate modellazioni numeriche.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] AAVV, *Repairability of Fire Damaged Structures*, Fire Safety Journal, n° 4, 1990.
- [2] Guerrini G.L., Gambarova P., Rosati G., *Microstructure of High-Strength Concrete subjected to High Temperatures*, Proc. Of the Workshop “Fire Design of Concrete Structures”, Milano, December 2-3 2004.
- [3] Short N., Purkiss J., *Petrographic Analysis of Fire-Damaged Concrete*, Proc. Of the Workshop “Fire Design of Concrete Structures”, Milano, December 2-3 2004-
- [4] Menditto G., Migliacci A. Tattoni S., *Consolidamento degli edifici*, Manuale di Ingegneria Civile, vol.2, Zanichelli/ESAC, Bologna 2001.
- [5] Bungey J.H., Millard S.G., Shaw, M.R., *The Influence of Reinforcing Steel on Radar Surveys of Concrete Structures*, Construction and Building Materials vol.8 n.2, 1994.
- [6] Maissen A., *Brandshäden bei vorgespanntem Beton. Nachweis der Rest-Vorspannungskraft*, Beton und Stahlbetonbau, 89, Heft 5, 1994.
- [7] Khan M.R., Royles R., *Post Heat Exposure Behaviour of Reinforced Concrete Beams*, Magazine of Concrete Research, vol 38 n. 135 June 1986.
- [8] - ,”*The Concrete Test Hammer*”, Concrete Construction Magazine.
- [9] ASTM, *Pull-Out Strength of Hardened Concrete*, ASTM C900.
- [10] Bamonte P., Gambarova P., D’Agostino L., Genoni A., *Preliminary Pull-Out Tests on post-Installed Mechanical Fasteners Embedded in Thermally Damaged Concrete*, Proc. Of the Workshop “Fire Design of Concrete Structures”, Milano, December 2-3 2004.
- [11] Felicetti R., *Digital Camera Colorimetry for the Assessment of Fire Damaged Concrete*, Proc. Of the Workshop “Fire Design of Concrete Structures”, Milano, December 2-3 2004.
- [12] Felicetti R., *The drilling Resistance test for the Assessment of the Thermal Damage in concrete*, Proc. Of the Workshop “Fire Design of Concrete Structures”, Milano, December 2-3 2004.
- [13] Indelicato F., *A Statistical Method for the Assessment of Concrete Strength through Microcores*, Materials and Structures, n. 26, 1993.
- [14] Benedetti A., Mangoni E., *Damage Assessment in Actual Fire Situations by means of Non-Destructive Techniques and Concrete Tests*, Proc. Of the Workshop “Fire Design of Concrete Structures”, Milano, December 2-3 2004.
- [15] Mani K., Lakshmanam N., *Determining the Extent of Damage Due to Fire in Concrete Structures by Ultrasonic Pulse Velocity Measurements*, Indian Concrete Journal, July 1986.
- [16] AA VV, *Présentation de technique de diagnostic de l’état d’un béton soumis à un incendie*, Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, Décembre 2005.
- [17] Klingsh E.W., Frangi A., Fontana M., *Residual Strength of Thermally-Damaged Concrete: Blended Cement versus Ordinary Portland Cement*, Studies and Reserches, Starrylink Ed., Brescia, 2009.
- [18] Leonardi A., Meda A., Rinaldi Z., *Repair of Fire-Damaged members with High-Performance Jacketing*, Studies and Reserches, Starrylink Ed., Brescia, 2009.
- [19] Bertolini L., *Materiali da costruzione - Volume II: Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro*, CittàStudi, 2006).
- [20] Colombo M., Felicetti R., *New NDT Techniques for the Assessment of Fire-Damaged Concrete Structures*, Fire Safety Journal n.42, 2007.
- [21] Pandey A.K., Biswas M., *Damage Detection on Structures Using Changes in Flexibility*, Journal of Sound and Vibration, 1994.
- [22] Shen M.H.H, Pierre C., *Free Vibrations of Beams with a Single-Edge Crack*, Journal of Sound and Vibration, 1994.
- [23] - , *Methods of Investigation and Criteria for Strength Judgement on the Fire-Damaged Buildings of Reinforced Concrete*, BRI Report n. 107, 1950-