

METODOLOGIA PER LA RICOSTRUZIONE DELLA STORIA TERMICA DELLA STRUTTURA A SEGUITO DI UN EVENTO INCENDIARIO

*Prof. Ing. EDOARDO PROVERBIO
Università di Messina*

*Dott. ing. VINCENZO VENTURI
Sidercem S.r.l.*

SOMMARIO

I calcestruzzi ordinari confezionati con cementi Portland se esposti a flussi termici come quelli derivanti da un incendio, subiscono radicali trasformazioni delle proprietà microstrutturali e meccaniche. Per ricostruire la storia termica di una struttura soggetta ad incendio si possono seguire come indicatori di temperatura, le trasformazioni termochimiche degli aggregati e del legante. L'impalcato di un viadotto ferroviario ubicato nella Sicilia Orientale, realizzato in calcestruzzo armato precompresso, è rimasto coinvolto in un incendio durato circa quattro ore. Le fiamme si sono sviluppate in prossimità delle pile, coinvolgendo principalmente l'intradosso di alcune travi e parte dell'anima vicino alle testate delle stesse. L'impalcato era costituito da sette travi a doppia T in cls precompresso a cavi post-tesi. Su alcune carote prelevate da zone della struttura danneggiate dalle fiamme sono state eseguite caratterizzazioni microstrutturali e meccaniche mediante analisi ai raggi X, porosimetrie ad intrusione di mercurio, determinazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni e prove di rottura a compressione. Altre carote prelevate da zone integre sono state sottoposte a trattamenti termici. Sulle carote prelevate da zone gravemente danneggiate dalle fiamme sono state rilevate lesioni interne probabilmente causate dagli stati tensionali indotti da elevati gradienti di temperatura. Le indagini suddette hanno avuto lo scopo di fornire i dati sperimentali per la validazione di un modello termo-meccanico agli elementi finiti, sviluppato secondo le linee guida della normativa ISO 834.

INTRODUZIONE

E' ben noto in letteratura [1, 2, 3] che le proprietà microstrutturali e meccaniche del calcestruzzo (cls) armato sono pesantemente influenzate dall'azione delle elevate temperature.

I danni si rilevano anche sull'acciaio che costituisce l'armatura, anche se il danno maggiore, a parità di temperatura, lo subisce il calcestruzzo. Le elevate temperature, infatti, inducono profonde trasformazioni microstrutturali e sono queste che, macroscopicamente, generano il decadimento delle proprietà meccaniche e prestazionali del calcestruzzo e dell'acciaio.

Una metodologia classica adottata per stimare il danno arrecato da un incendio, si basa sull'osservazione diretta delle diverse gradazioni di colore raggiunte, in calcestruzzi contenenti inerti silicei e calcarei, dopo l'esposizione alle alte temperature: se la massima temperatura raggiunta in superficie è compresa tra 300°C (573 K) e 600 °C (873 K), la colorazione è rosa, grigia scura tra 600°C (873 K) e 900°C (1173 K), marrone tra 900°C (1173 K) e 1200°C (1473 K) e infine gialla oltre i 1200°C (1473 K). Purtroppo questo metodo è approssimativo e quindi inapplicabile qualora siano necessarie informazioni dettagliate.

L'ammaloramento del calcestruzzo armato dipende dalle temperature raggiunte durante l'incendio nelle differenti sezioni dell'elemento strutturale e dal tempo di esposizione a queste temperature; per questo una loro precisa determinazione è molto importante per valutare l'effettivo danno strutturale. I diversi tipi di calcestruzzo rispondono in maniera differente alle alte temperature e la risposta dipende oltre che dagli inerti, anche dalla pasta cementizia impiegata, da eventuali additivi aggiunti e dal rapporto acqua/cemento. Risalire alle radici del problema, capire le cause, e i fattori che lo influenzano, consente, tra l'altro, lo sviluppo di un settore del tutto nuovo nella progettazione di nuovi calcestruzzi in grado di resistere anche alle alte temperature. Il tutto è finalizzato anche ad ottenere maggiore affidabilità delle strutture. La protezione dal cosiddetto *structural fire* negli ultimi 25 anni è stata del tutto ignorata e soltanto un evento catastrofico come il collasso del World Trade Center, nel Settembre del 2001, ha rinnovato un forte interesse nei confronti di questo settore della ricerca. In alcuni paesi, tra i quali la Nuova Zelanda, esiste una

legislazione specifica circa l'affidabilità delle strutture in caso d'incendio. Pertanto, capire quali sono le cause che inducono il cedimento strutturale di un'opera in calcestruzzo è di fondamentale importanza anche al fine di sviluppare una scala dei tempi entro cui inserire un eventuale piano d'evacuazione della struttura.

I calcestruzzi esposti ad incendio vanno incontro ad un duplice problema di natura sia estetica sia strutturale. Spesso si raggiungono temperature critiche che provocano un violento e istantaneo sgretolamento della superficie esterna (e quindi più calda) del calcestruzzo; tale fenomeno viene indicato in letteratura con il nome di *spalling*. Lo *spalling* rappresenta un serio problema per le strutture realizzate in calcestruzzo armato poiché esso causa l'esposizione diretta delle armature alla fiamma. Per i calcestruzzi confezionati con cementi Portland ordinari, lo *spalling* per lo più si osserva durante i primi 20 minuti dell'incendio.

Esso è provocato da diverse cause: dalla pressione dell'acqua "libera", ovvero non reagita per formare composti idrati, dalla pressione dell'acqua di bulk (vaporizzata con l'aumentare della temperatura e intrappolata nelle porosità chiuse del cls) e da una transizione di fase displasiva del quarzo. La transizione da *low-quartz* a *high-quartz*, infatti, produce espansione volumica degli aggregati e la formazione di cricche. Lo *spalling* si presenta ancora più pericoloso per i calcestruzzi precompressi, nei quali principalmente si concentra negli spigoli e nelle zone curve degli elementi strutturali [2].

Per portare a termine un'indagine di questo tipo sono necessarie alcune informazioni circa:

- luogo dell'incendio;
- durata dell'incendio;
- modo in cui l'incendio si è estinto (naturale o forzato);
- tipologie di materiali impiegati per la realizzazione della struttura, tipo di costruzione, la storia e infine l'uso cui è destinata la struttura.

E' opportuno aggiungere che eventuali interventi di ripristino da eseguire su strutture in calcestruzzo armato degradato da incendio, sono funzione dello stato di degrado raggiunto dalla struttura e del successivo impegno cui si vorrà chiamare la struttura risanata. Per quel che concerne lo stato di degrado, vista la buona capacità di resistenza al fuoco in genere dimostrata dal calcestruzzo, salvo casi eccezionali, non è mai talmente grave da rendere impossibile l'intervento riparatore. Qualora gli effetti dell'incendio arrechino danni notevoli, è dimostrato che è di solito più conveniente, in un conto economico complessivo, procedere al ripristino piuttosto che alla demolizione ed alla successiva ricostruzione.

Lo schema da seguire, ogni qualvolta occorra procedere con un intervento di risanamento di una struttura coinvolta in un evento incendiario, può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- rilevamento dello stato di degrado;
- verifiche di stabilità;
- tecnologie d'intervento.

In genere il rilevamento dello stato di degrado è eseguito su carote prelevate dalla struttura mediante le seguenti indagini sperimentali:

- diffrattometrie a raggi x;
- calcolo della massa volumica del calcestruzzo mediante la pesata idrostatica;
- calcolo della porosità mediante la porosimetria ad intrusione di mercurio;
- calcolo della velocità di propagazione degli ultrasuoni;
- calcolo del modulo elastico secante a compressione;
- determinazione della resistenza a compressione.

Le indagini sperimentali consistono anche nel raccogliere tutti i dati relativi sia al materiale (stato di degrado del calcestruzzo), sia alla struttura (cambiamenti dell'abbassamento massimo dell'impalcato interessato all'evento incendiario in condizioni di carico massimo rispetto alle condizioni di progetto, formazioni di cedimenti plastici e lesioni) necessari per eseguire una verifica, sufficientemente attendibile, dello schema statico che è venuto a crearsi a causa delle elevate

temperature. L'esame è condotto parallelamente sul materiale e sulla struttura; questo perché alcune delle notizie ricavate dalle due indagini separate sono complementari, mentre altre sono indispensabili per una verifica reciproca.

La metodologia sperimentale sviluppata dagli autori è finalizzata a caratterizzare il calcestruzzo alle varie temperature ed a risalire ad un'eventuale correlazione tra proprietà meccaniche (resistenza a compressione e modulo elastico) e proprietà microstrutturali (fasi rilevate mediante diffrattometria a raggi X, porosità e velocità di propagazione degli impulsi ultrasonori).

Per tale scopo è stata ricostruita la storia termica di un viadotto ferroviario in calcestruzzo armato locato in Sicilia Orientale soggetto ad incendio, accoppiata ad un modello numerico rappresentativo della stessa struttura e dello stesso evento incendiario. Per studiare accuratamente lo stato della struttura sono stati sviluppati, un primo esame visivo *in loco* e, in secondo momento, uno studio in laboratorio secondo un programma sperimentale sviluppato dal NIST (*National Institute of Standards and Technology*) [1].

L'analisi visiva *in loco* è consistita anche nel carotare alcuni campioni da zone pesantemente danneggiate dalle fiamme. Sono state prelevate carote di diametro sia di 50 mm sia di 80 mm. Lo studio in laboratorio è stato condotto in due fasi: nella prima fase sono state eseguite delle indagini su campioni non danneggiati dalle fiamme, considerati come riferimento. Nella seconda fase questi campioni sono stati "artificialmente" deteriorati in un forno a muffola con controllo di temperatura, per simulare le trasformazioni termiche irreversibili dei costituenti del calcestruzzo alle diverse temperature. Le indagini eseguite in laboratorio sono state le seguenti: determinazione della resistenza meccanica a compressione del cls, diffrattometrie a raggi X (XRD), porosimetrie ad intrusione di mercurio (MIP) e determinazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni (UPV). Sono stati utilizzati come indicatori di temperatura le trasformazioni chimico-fisiche degli aggregati e del legante.

Dopo aver definito le condizioni della struttura, sono state costruite le basi sperimentali per implementare un modello termo-meccanico in 3D di una trave a doppia T appartenente all'impalcato danneggiato. Lo scopo di questa modellazione agli elementi finiti è stato quello di stimare il campo delle temperature e degli stress termo-meccanici degli elementi più danneggiati e di ricostruire la mappa dei danni rilevata grazie all'esame visivo ed alle indagini effettuate sulle carote.

MATERIALE E METODOLOGIA SPERIMENTALE

La struttura

La struttura oggetto di tale studio è un viadotto della linea ferroviaria della Sicilia Orientale.

Alcune travi del viadotto sono rimaste coinvolte in un incendio, sviluppatosi in corrispondenza delle pile, che ha danneggiato oltre l'intradosso di alcune travi, anche l'anima in prossimità della testata delle travi. Uno schema dell'impalcato in questione è riportato in figura 1.

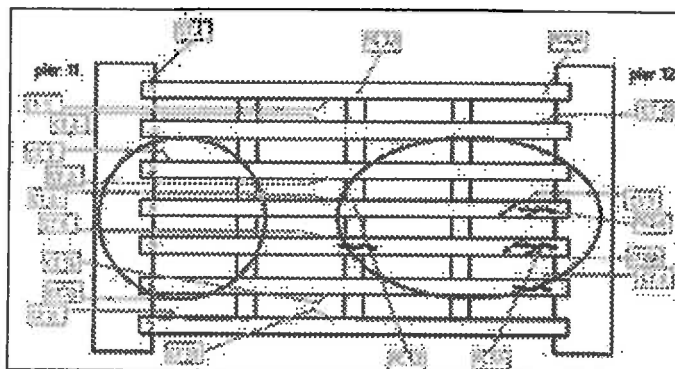


Figura 1. Schema dell'impalcato danneggiato dall'incendio: ubicazione delle carote e delle lesioni.

In questa figura i numeri con riquadro indicano la locazione delle carote. I cerchi tratteggiati indicano approssimativamente le aree soggette all'incendio. Le linee a tratto pieno indicano, come rilevato dai carotaggi, la posizione nella trave di alcune lesioni giacenti su un piano verticale rispetto alla sezione retta della trave e trasversali rispetto all'asse della trave.

Le linee tratteggiate indicano la posizione di cricche giacenti in un piano orizzontale rispetto alla sezione retta della trave e longitudinale all'asse della stessa (figg.2, 3 e 4).

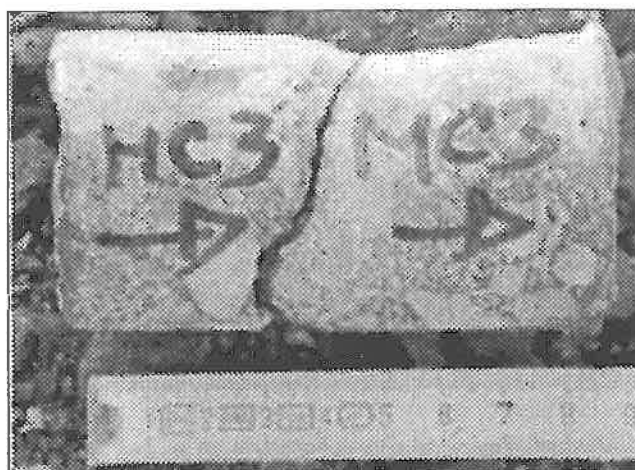


Figura 2. Carota prelevata da una trave esposta alla fiamma.

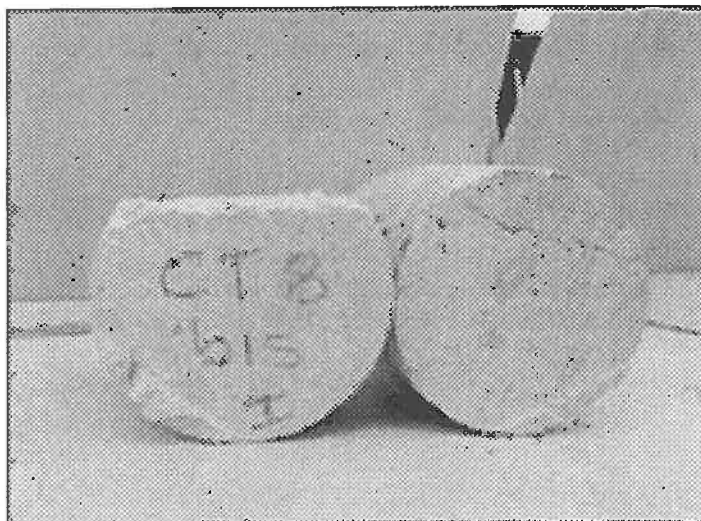


Figura 3. Lesione longitudinale su una carota prelevata dall'anima di una trave.

Le differenze tra le carote mostrate nelle figure 2 e 3 sono le seguenti: la carota in figura 2 è stata prelevata dall'intradosso della trave ed era parallela alla direzione della fiamma; la carota mostrata in figura 3 (e il foro lasciato dal prelievo della stessa, fig. 4) apparteneva all'anima della trave ed era ortogonale alla fiamma (Fig.5). Il danno rilevato si è localizzato principalmente in prossimità della testata delle travi, vicino alle pile.



Figura 4. Lesione longitudinale di una trave sul fondo del foro lasciato dal carotaggio.

Per meglio comprendere l'importanza dell'orientazione della carota rispetto alla fiamma, si osservi la carota riportata in figura 5: si vedono chiaramente le diverse tonalità di colore del calcestruzzo man mano che si sposta lo sguardo lungo l'asse della carota nella direzione indicata dalla freccia. L'incendio è stato spento dopo parecchie ore, durante le quali si sono raggiunti dei valori critici di temperatura che hanno causato lo *spalling*.

L'esame visivo del viadotto ha rilevato un grave deterioramento per *spalling* nell'intradosso e nella zona centrale delle pile (figure 6 e 7 rispettivamente).

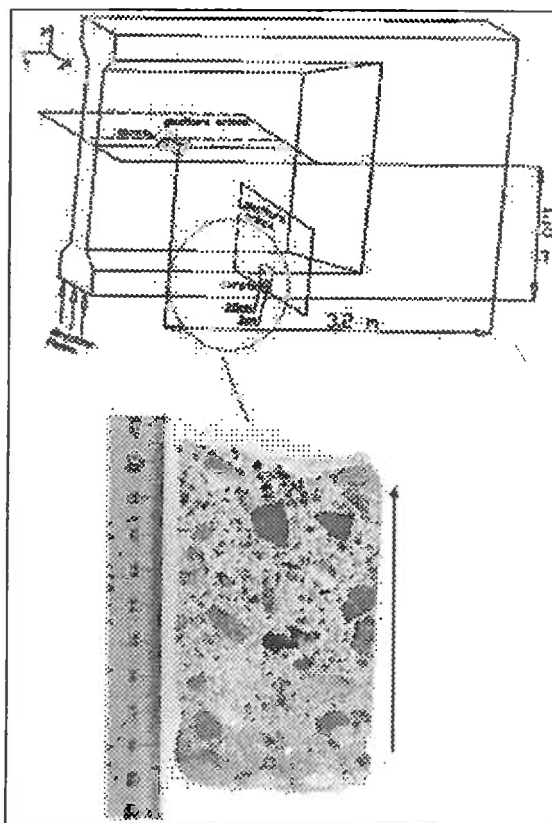


Figura 5. Ubicazione delle carote e dei piani delle lesioni nella trave danneggiata.

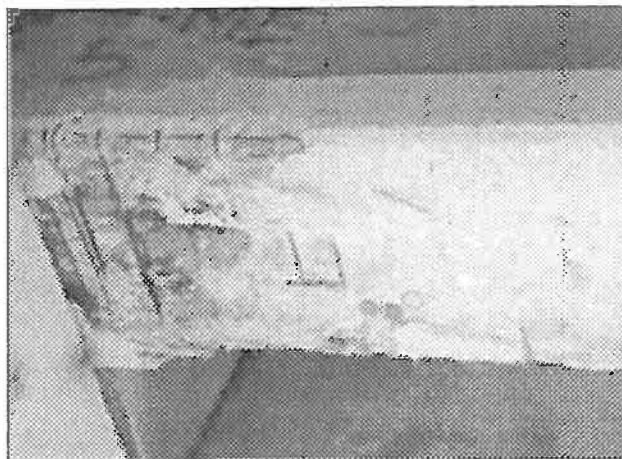


Figura 6. Corner spalling e esposizione diretta delle armature alla fiamma nell'intradosso della trave.

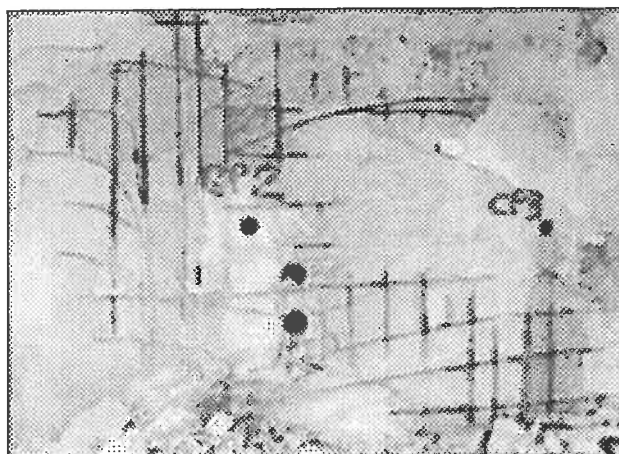


Figura 7. Spalling alla base della pila.

INDAGINI SPERIMENTALI

Nella seconda fase del presente studio, i campioni non esposti alla fiamma sono stati caratterizzati meccanicamente e microstrutturalmente.

Dalle analisi è risultato che si trattava di un calcestruzzo di normali prestazioni meccaniche (resistenza meccanica a compressione cubica *in situ*, $f_{ck,15\text{ cube}}=54,5$ MPa) confezionato con inerti silicei. Le diffrattometrie a raggi X hanno mostrato che le fasi cementizie presenti erano Ca(OH)_2 (Portlandite), CaCO_3 (calcite) and CSH (calcio silicato idrato) gel. Le porosimetrie ad intrusione di mercurio eseguite sugli stessi campioni hanno rilevato una porosità dell'ordine del 18.7%, mentre il valore medio della velocità di propagazione degli ultrasuoni, rilevata secondo quanto prescritto nello standard UNI EN 12504-4:2005 [4], era circa 3848 m/s.

Anche i campioni esposti alla fiamma sono stati sottoposti ad una serie di indagini di laboratorio, al fine di valutare come la proprietà microstrutturali e meccaniche fossero state influenzate dalle elevate temperature. E' stato rilevato un globale decadimento delle proprietà del cls in termini di resistenza a compressione (fig. 8), di porosità e di modulo elastico, ottenuto quest'ultimo attraverso la stima della velocità di propagazione degli ultrasuoni. Le basse velocità sono riferite ai cam-

pioni più danneggiati (fig. 9); una velocità più bassa degli ultrasuoni indica un incremento dei vuoti e una densità più bassa (e quindi più alta porosità) del cls.

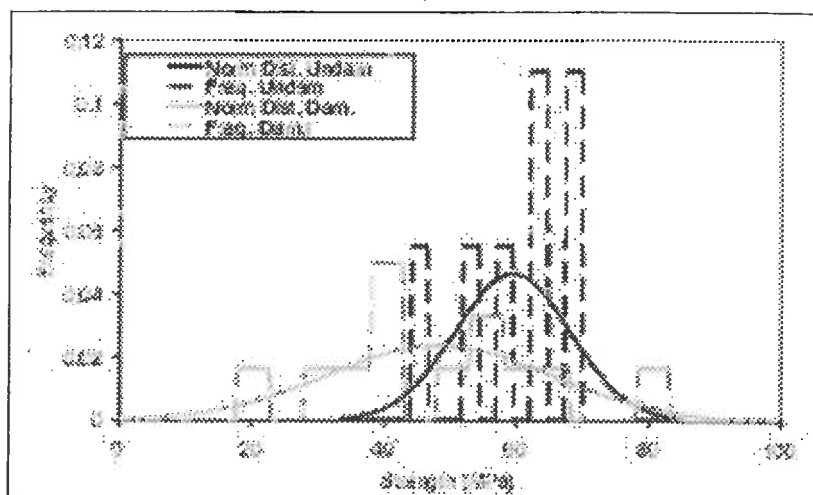


Figura 8. Distribuzione della resistenza a compressione per carote danneggiate e integre.

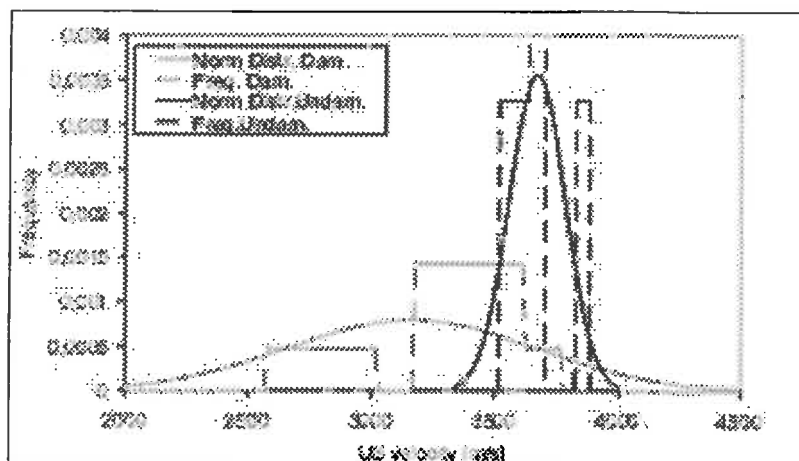


Figura 9. Distribuzione della velocità degli ultrasuoni per carote danneggiate e integre.

Le diffrattometrie a raggi X effettuate su carote prelevate dall'anima, esposte alla fiamma e provenienti da una trave lesionata (scansione a 0 cm, figura 10), hanno rivelato la presenza di calcite e quarzo; il CSH gel non ha subito trasformazioni e la portlandite non è stata rilevata. Se quest'ultima non è stata rilevata, o è diminuita, durante l'incendio, le temperature si sono mantenute oltre il valore di attivazione del processo di deidratazione.

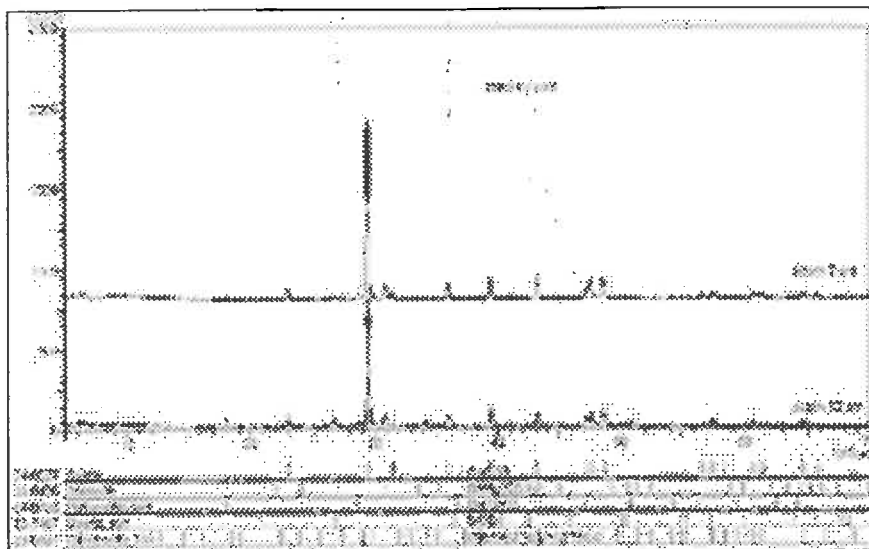


Figura 10. Analisi ai raggi X della trave lesionata alle diverse profondità.

Una volta individuate le trasformazioni avvenute, è stato necessario risalire alle temperature che hanno determinato tali trasformazioni. Per questo motivo è stata sviluppata una metodologia sperimentale in condizioni stazionarie: porzioni di carote non danneggiate dalla fiamma sono state trattate termicamente in un forno a muffola, senza l'applicazione di un carico esterno, alle temperature di 673, 773, 853, 923, 1023, 1123 and 1273 K, alla velocità di riscaldamento di 5 K/min. Dopo aver raggiunto il valore impostato di temperatura il trattamento ha previsto la permanenza a tale temperatura per circa 3 ore. Il test è stato effettuato al fine di simulare gli effetti

di un incendio reale. Dopo il trattamento termico, ogni campione è stato sottoposto ad analisi diffrattometriche ed a porosimetrie. Le principali trasformazioni rilevate sono state quelle della calcite e portlandite, iniziate rispettivamente a 923 K e a 673 K come riportato nel grafico ottenuto dalle analisi a raggi X (fig.11). Con le analisi a raggi X si sono potute stimare temperature solo sopra 673 K, poiché tra 293 e 673 K, non avvengono trasformazioni termo-chimiche importanti, eccetto la vaporizzazione dell'acqua d'umidità.

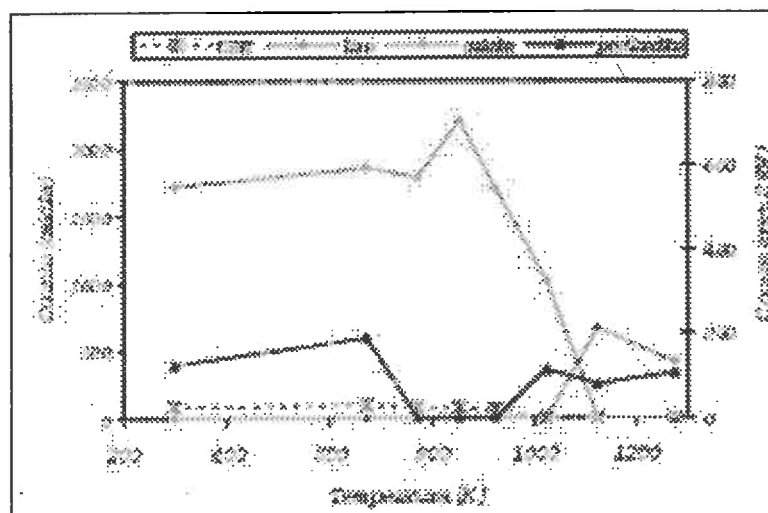


Figura 11. Curva counts vs. temperatura per i campioni trattati termicamente.

Le porosimetrie hanno consentito di confermare la ricostruzione del campo di temperature ottenuto dalle analisi a raggi X (fig. 12). La perdita dell'acqua libera ha causato, da 393 K a circa 673 K, il primo incremento di porosità (da 18.7% a circa 28%); da 673 K a 853 K, la porosità è aumentata probabilmente per la deidratazione della portlandite, che a sua volta ha provocato la formazione di micro-fessure e vuoti, come già direttamente rilevato sui campioni. Lo *Spalling* è stato anche osservato nei campioni trattati a circa 853 K. A 1023 K la deidratazione delle fasi CSH si è completata e la porosità ha raggiunto il valore di 36%. L'apparente riduzione di porosità rilevata a 1273 K è dovuta ad un vero e proprio processo di sinterizzazione della pasta cementizia.

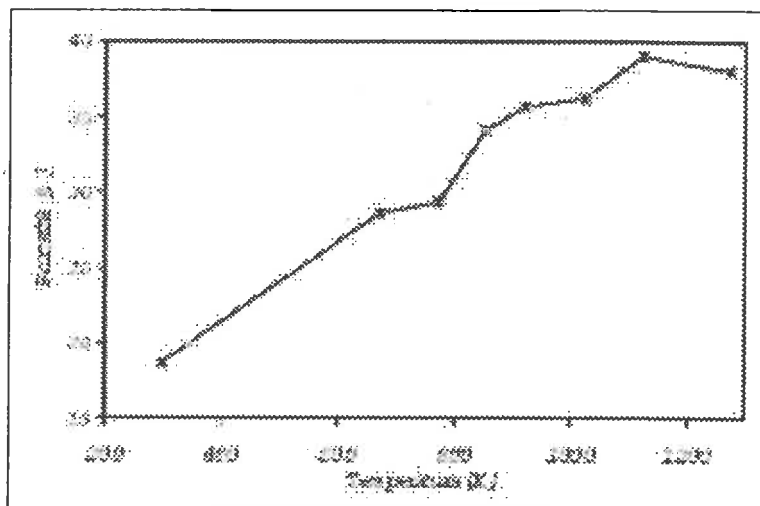


Figura 12. Porosità vs. temperatura.

È stata analizzata anche una carota, lunga 75 mm (fig.5), prelevata parallelamente alla direzione della fiamma per capire com'è avvenuta la trasformazione delle fasi idrate e a che profondità si è spinto il danno. Nella porzione direttamente esposta alla fiamma, la calcite ha subito un incremento per la precisione alla profondità di 1 cm e la portlandite non era più presente. L'aumento della calcite è stato provocato dalla carbonatazione dell'ossido di calcio (lime) prodotto dalla decomposizione della portlandite. Alla profondità di 2.5 cm, la temperatura non ha innescato trasformazioni termiche.

Pertanto, attraverso la lettura incrociata delle figure 11 e 13 si è evidenziato che nella superficie direttamente esposta alla fiamma (a circa 1 cm di profondità, nella porzione di intradosso vicina alla pila, fig. 5), è stata stimata una temperatura massima raggiunta compresa tra 673 e 773 K. Nella carota estratta dall'anima della trave n. 5, dal lato della pila 12 (fig.1) e ortogonale alla direzione della fiamma, la temperatura ha superato 673 K ma non 773 K, tenuto conto che la portlandite si è deidratata e che il contenuto dei silicati idrati (CSH gel) non è variato (fig.10, at 0 cm).

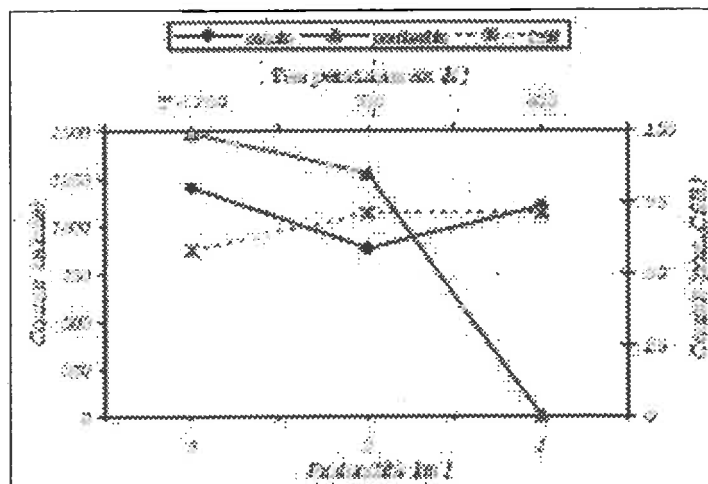


Figura 13. Curva counts vs. profondità di una carota danneggiata dall'incendio.

ANALISI TERMO-MECCANICA

Le indagini sperimentali sono state indispensabili per rilevare l'entità del danno subito dalle travi.

Si può asserire che una delle cause dell'ammaloramento del cls è stata la deidratazione delle fasi cementizie (soprattutto portlandite) che è avvenuta nell'intervallo di temperature rilevate nelle travi lesionate. Mediante le analisi condotte *in situ* si è potuta ricostruire la mappa dei danni riportata in figura 1 e concentrare l'attenzione sugli eventi che hanno causato tali danni.

Pertanto, al fine di ottenere anche per via numerica la correlazione tra temperature raggiunte nelle diverse aree dell'impalcato e la mappa dei danni, è stato sviluppato un modello termomeccanico mediante l'impiego del metodo FEM (modellazione agli elementi finiti); dopodiché è stata anche stimata la percentuale di errore tra modello numerico e indagini sperimentali, al fine di valutare l'effettiva attendibilità dello stesso. Difatti lo scopo del modello suddetto è stato quello di ricostruire il campo delle temperature e delle tensioni-deformazioni (sono stati valutati anche gli spostamenti) provocate dalle elevate temperature.

L'elemento strutturale testato nell'analisi termomeccanica è una trave a doppia T con tre cavi post-tesi, appartenente all'impalcato danneggiato. I cavi hanno un diametro di circa 12 mm (figura 14). Il primo scopo dell'analisi è stato quello di quantificare le temperature negli stessi punti dei test di laboratorio effettuati sulle carote.

Il modello numerico tridimensionale è stato realizzato mediante il software ANSYS®.

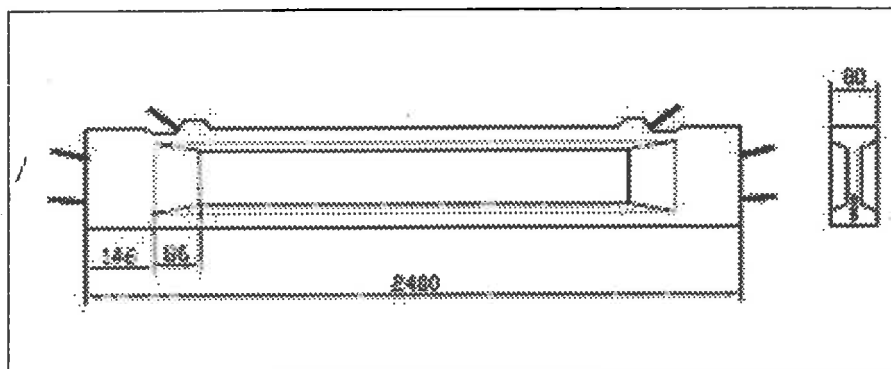


Figura 14. Geometria della trave analizzata.

ANALISI DEI RISULTATI

Attraverso il modello FEM si è stimato, dopo un tempo di 15000 s (4 ore circa), una temperatura massima sull'intradosso della trave, alla profondità di circa 1 cm, di 668 K. La temperatura diminuisce man mano che si procede dalla superficie verso l'interno (figura 15).

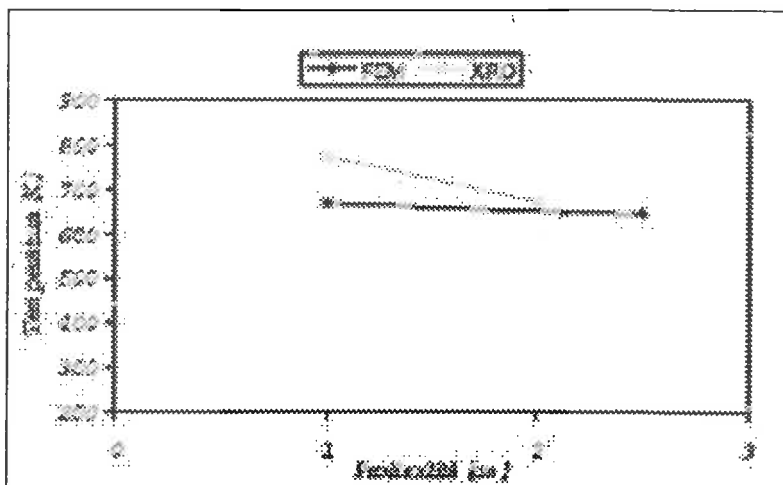


Figura 15. Curva temperatura vs. profondità per l'intradosso della trave lungo l'asse y.

Nell'anima della trave, alla profondità di 0 cm (ovvero direttamente esposta, fig.16) si è stimata una temperatura pari a 690 K. I risultati concordano con quanto valutato dall'esame visivo e dalle analisi in laboratorio.

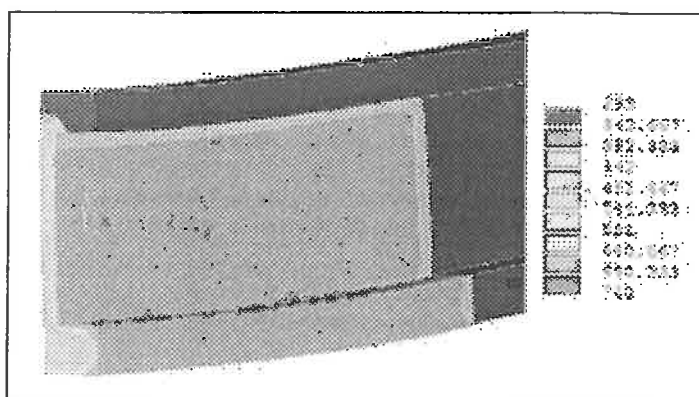


Figura 16. Distribuzione della temperatura [K] dopo 15710 s.

Si è eseguita una stima dell'errore tra i risultati del modello e quelli delle indagini sperimentali nelle diverse sezioni della trave; l'errore calcolato sull'intradosso decresce con la profondità, per l'anima ha valori inferiori (tabella 1). L'errore è stato calcolato con la seguente equazione:

	Valori sperimentali	Valori numerici	Errore %	Ubicazione
T_{MAX} [K]	673-773	668	-13.6	1
	673	644	-4.3	2
	673-773	690	-10.7	3
	673	690	2.5	4
σ_x [MPa]	$>-54.5(f_{ck,la cube})$	-7.3	-	4
$u_y(\ell/2)$ [mm]	<48	30.5	-	5

Tabella 1. Confronto tra risultati sperimentali e numerici; nella tabella è anche riportato l'errore nella valutazione delle temperature.

$$\text{errore \%} = 100 \cdot \frac{T_{FEM} - T_{EXP}}{T_{EXP}} \quad (1)$$

Si può asserire che i valori di temperatura calcolati dal modello numerico sono leggermente sotto-stimati (eccetto che nell'anima, alla profondità di 10 cm, dove il valore è sovrastimato), principalmente nella superficie direttamente esposta alla fiamma. Questo errore è probabilmente dovuto alla geometria semplificata della trave, dal momento che la presenza della soletta non è stata considerata. Nell'analisi l'estradosso della trave si è considerato non sottoposto ai carichi termici. È stata assunta questa condizione di carico perché dall'indagine visiva è stato rilevato che la soletta, non l'estradosso, ha subito gravi danni. La causa sarebbe che sulla parte più alta dell'anima, i gas caldi si sono accumulati generando un locale incremento di temperatura. Il massimo errore stimato applicando la (1) è di circa 14%.

Ne segue, quindi, che il modello agli elementi finiti sviluppato è attendibile, anche se conservativo nella stima della temperatura. Dalla lettura dei risultati del modello numerico, si può asserire che l'innesco delle cricche longitudinali alla trave non è avvenuto per effetto delle tensioni normali; infatti, il massimo valore stimato della tensione normale, nella zona in cui si è rilevata la lesione mediante il carotaggio nell'anima, è al di sotto della resistenza a compressione del cls ($\sigma_x = -7.3$ MPa, fig. 17). È importante aggiungere, tuttavia, che i valori delle tensioni di trazione sono leggermente sovrastimati, probabilmente a causa delle semplificazioni sulla geometria del modello: è stata trascurata la presenza delle staffe e dei ferri d'armatura longitudinali; è, infatti, in corrispondenza dell'intradosso della trave che l'effetto dell'assenza delle armature si fa più sensibile.

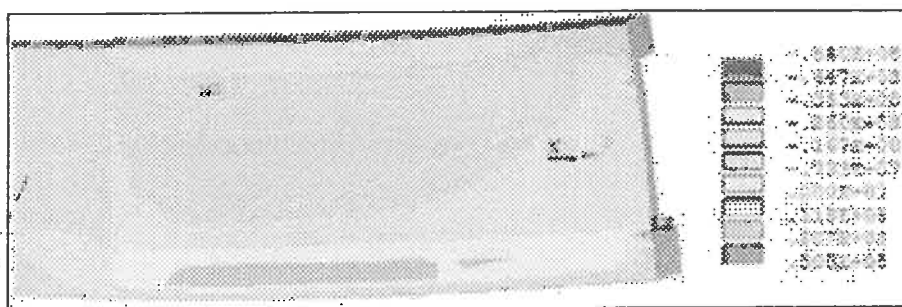


Figura 17. Distribuzione della tensione σ_x [Pa] dopo 15?10s.

La leggera discrepanza tra valori sperimentali e numerici delle tensioni normali potrebbe anche essere attribuita al non perfetto comportamento dell'elemento utilizzato nella simulazione del calcestruzzo (notoriamente eterogeneo), come già rilevato da altri autori con altri programmi di modellazione agli elementi finiti [9, 10].

Le indagini *in-situ* hanno rilevato che nella sezione lesionata dell'anima, il taglio ha raggiunto un valore critico che ha causato l'innesco di fessure. Il taglio stimato dal modello numerico lungo il piano della cricca, nel punto in cui è stato fatto il carotaggio, ha assunto un valore critico ($\tau_{xy}=1.1$ MPa) tale da poter provocare l'innesco di cricche. Pertanto la causa della lesione rilevata nell'anima della trave potrebbe essere la differenza tra il coefficiente di espansione termica lineare del calcestruzzo e dell'acciaio, che avrebbe provocato, all'interfaccia dei due materiali, la formazione di stress di taglio tali da portare a fessurazione il cls.

La freccia in mezzzeria stimata dal modello numerico (figura 18) si è mantenuta sotto il massimo valore di 48 mm ($\ell/500$, dove ℓ è la luce della trave, 24 m).

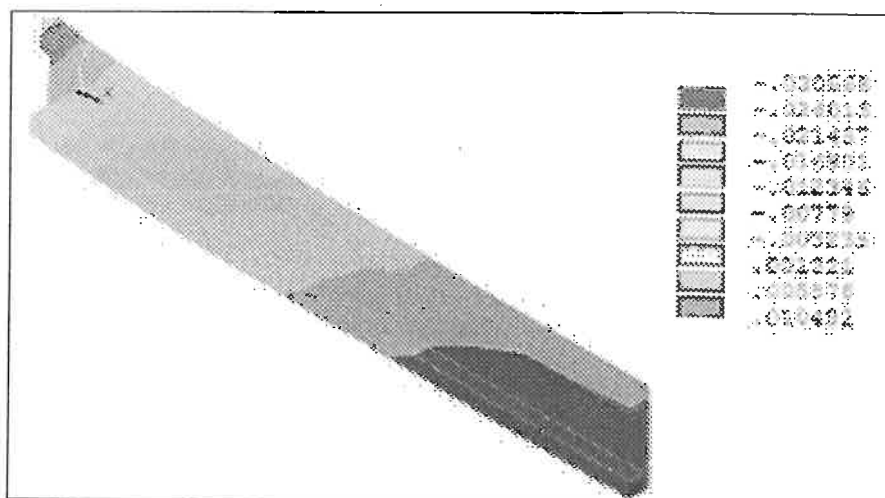


Figura 18. Campo di spostamenti u_y [m] dopo 15710 s.

Asserendo che la freccia massima della trave non ha superato il limite di stabilità, pur non tenendo conto che il valore massimo di $\ell/500$ è riferito all'intero impalcato, ci si è mantenuti a favore della sicurezza, poiché le altre travi hanno un effetto d'irrigidimento della struttura.

Il confronto tra valori numerici e valori sperimentali stimati è riassunto nella tabella 1, dove:

- (1) è la porzione di cls appartenente all'intradosso della trave alla profondità di 1 cm (fig.5)
- (2) è la porzione di cls appartenente all'intradosso della trave alla profondità di 2.5 cm (fig.5);
- (3) è la porzione di cls appartenente all'anima della trave alla profondità di 0 cm (direttamente esposta al fuoco, fig.5);
- (4) è la porzione di cls appartenente all'anima della trave alla profondità di 10 cm (sul piano della cricca, fig.5);
- (5) è la sezione di mezzzeria ($\ell/2$).

CONCLUSIONI

È stata sviluppata una procedura per analizzare il comportamento di una trave in calcestruzzo armato precompresso in caso di incendio. La procedura si è basata su un modello termo-meccanico agli elementi finiti calibrato sperimentalmente. Il modello ha dato la possibilità di stimare la temperatura nelle differenti sezioni, la profondità e l'entità dei danni e può essere molto utile anche quando i risultati sperimentali non sono disponibili.

Il modello, infatti, è stato "validato" mediante dati sperimentali con buoni risultati (massimo errore stimato 14%). La causa della lesione, rilevata nell'anima della trave, potrebbe essere dovuta alla gran differenza tra il coefficiente di espansione termica lineare del calcestruzzo e dell'acciaio, che avrebbe provocato, all'interfaccia dei due materiali, la formazione di stress di taglio tali da portare a fessurazione il cls, come dimostrato dal modello numerico.

Pertanto, il modello numerico implementato è attendibile e potrebbe essere utilizzato come metodologia diagnostica preventiva per testare una struttura in calcestruzzo armato ancora in fase di progetto o per una struttura già esistente se si paventa il rischio d'incendio. Un evento incendiario che provoca danni strutturali è considerato un evento straordinario, il cui valore nominale, che lo quantifica, non è considerato in fase di progettazione; si tiene conto, infatti, delle sole azioni permanenti.

Per tale ragione il modello numerico è molto efficace, perché permette di valutare le azioni termo-meccaniche (temperatura, tensioni, deformazioni e spostamenti) che si sommano alle azioni permanenti, senza eseguire costosi test distruttivi in scala semi-reale.

Bibliografia

- [1] L. T. Phan, J. R. Lawson, F. L. Davis Effects of elevated temperature exposure on heating, characteristic, spalling, and residual properties of high performance concrete, Building and Fire Research Laboratory, National Institute for Standard and Technology, reprinted from Materials and Structures, vol.34, pp.83-91, March 2001.
- [2] K. D. Hertz, Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal, vol. 38, no. 2, pp. 103-116, March 2003.
- [3] P. Cioni, P. Croce, W. Salvatore, Assessing fire damage to r.c. elements, Fire Safety Journal, vol. 36, no. 2, pp. 181-199, March 2001.
- [4] UNI EN 12504-4:2005, Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.
- [5] ANSYS Release 7.0, Manuale dell'utente in versione CD, distribuito in Italia da Engin Soft, Ottobre 2002.
- [6] A. Amico, G. Amico, G. Bellomia, Carico di incendio e resistenza al fuoco delle strutture, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2000.
- [7] L. C. S. Lim, Stability of precast concrete tilt panels in fire, Fire Engineering Report, University of Canterbury, March 2000.
- [8] UNI ENV 1991-2-2:1997, Eurocodice 1 - Basi di calcolo ed azioni sulle strutture - Parte 2-2: Azioni sulle strutture - Azioni sulle strutture esposte al fuoco.
- [9] V. Thevendran, S. Chen, N.E. Shanmugam, J.Y. Richard Liew, Nonlinear analysis of steel concrete composite beams curved in plan, Finite Elements in Analysis and Design vol. 32, pp. 125-139, 1999.
- [10] E. Proverbio, V. Venturi, G. Epasto, La Valutazione del degrado al fuoco di strutture in cemento armato precompresso, Strade & Autostrade, 5-2005, pag. 117 -123.