

# La resistenza al fuoco DELL'ACCIAIO INOSSIDABILE

128

## Studio agli elementi finiti e prove sperimentali

LE POTENZIALITÀ DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI, NELL'IMPIEGO IN APPLICAZIONI DOVE LA RESISTENZA AL FUOCO È UN FATTORE PREDOMINANTE, SONO STATE VERIFICATE EFFETTUANDO PROVE *AD HOC* E PARAGONANDO LE LORO PRESTAZIONI CON QUELLE DEI NORMALI ACCIAI AL CARBONIO

a cura del  
CENTRO INOX

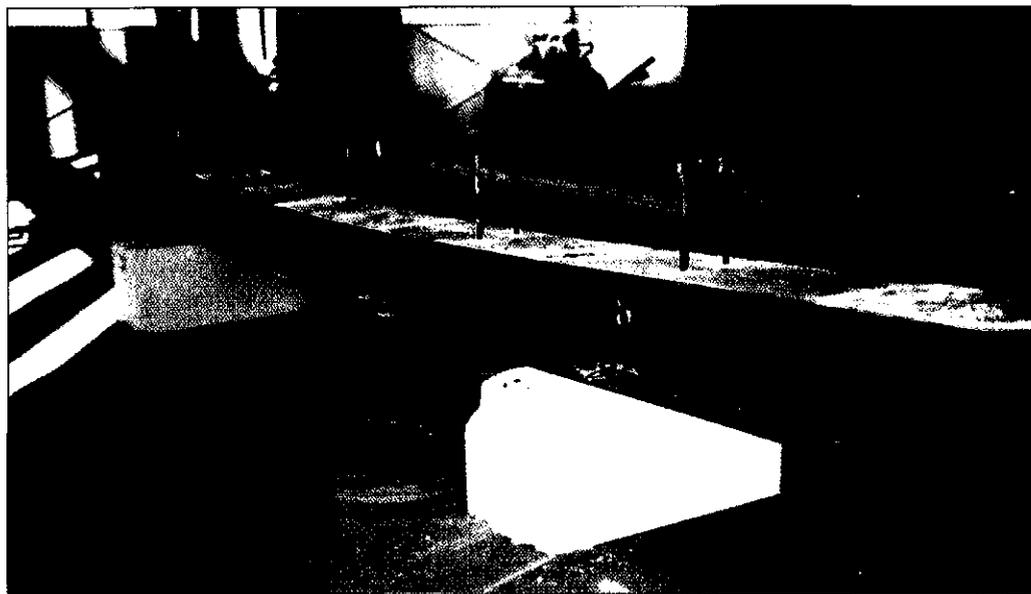
### INTRODUZIONE

Quando si parla di acciaio inossidabile, nella generalità dei casi viene subito alla mente la sua caratteristica peculiare, vale a dire la resistenza alla corrosione.

Tuttavia la potenzialità di questo materiale,

specie per le sue applicazioni future in molti settori, quali l'edilizia, le infrastrutture, i trasporti ecc. sta nel considerarlo non solo un materiale che resiste agli ambienti corrosivi, ma che riesce anche a estrinsecare altre proprietà fisico-meccaniche, quali, ad esempio, la sua straordinaria capacità di assorbire energia che lo candida a essere una valida alternativa per la realizzazione di parti strutturali di auto o per costruzioni antisismiche. Tra queste peculiarità, ma che certamente ha grande importanza è la resistenza al fuoco. Tutti conoscono, infatti, il ruolo che riveste una struttura edile, sia civile che industriale, in caso di carico di incendio. Negli edifici e nei locali pubblici molto affollati, dove è necessario prevedere

Uno dei campioni dopo il test di resistenza al fuoco.



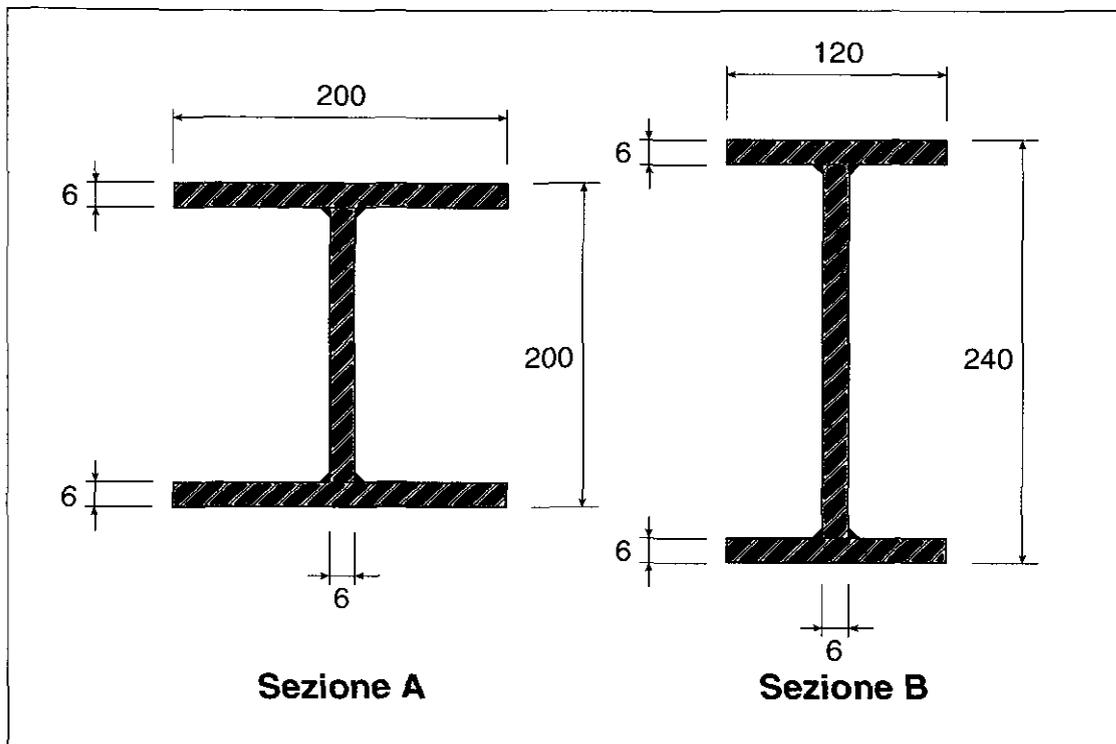


Fig. 1 Le geometrie di sezioni studiate (misure in mm).

un tempo sufficiente per evacuare le persone e organizzare efficacemente la lotta alle fiamme, l'acciaio inossidabile può essere una valida alternativa ai materiali tradizionali. Nelle costruzioni "classiche", l'acciaio al carbonio presenta una resistenza al fuoco piuttosto modesta cui si ovvia con rivestimenti di materiali coibenti (vernici intumescenti).

Per garantire l'incolumità delle persone, infatti, è sufficiente poco tempo di resistenza in più, che si traduce in tempi di evacua-

zione più prolungati, prima che la struttura arrivi al completo collasso.

Senza dimenticare che l'acciaio inossidabile, non necessitando di protezioni da vernici intumescenti, limita, in caso di incendio, la produzione di fumi tossici. L'impiego dell'inox può essere quindi raccomandato in tutte le applicazioni in cui la sicurezza assume prioritaria importanza: zone di evacuazione e di intervento dei soccorsi, sistemi di protezione antifuoco, protezione di cavi elettrici e canalizzazioni ecc.

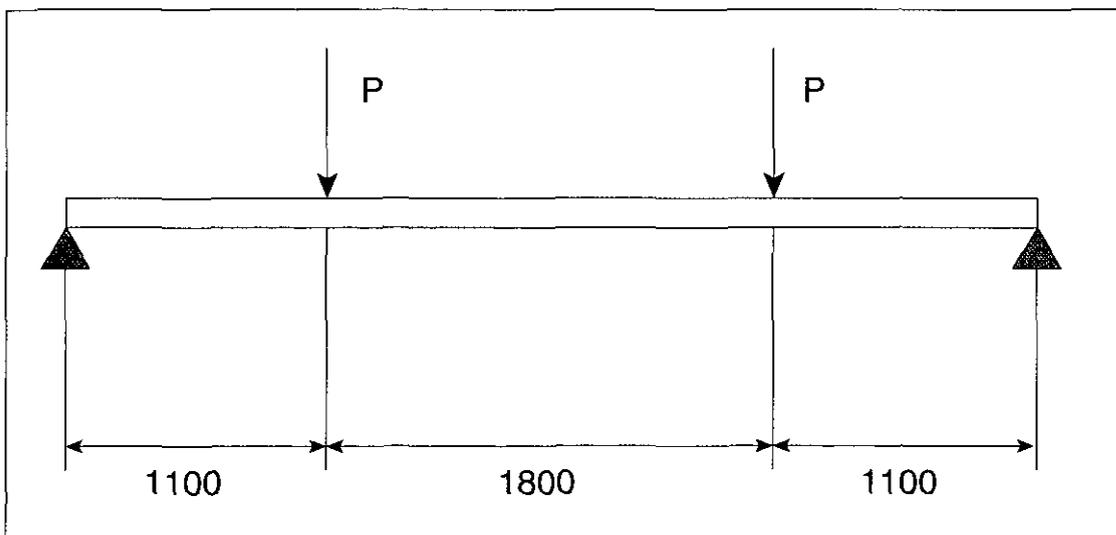


Fig. 2 Schema statico delle travi analizzate (misure in mm).

Fig. 3 Trave tipo A.

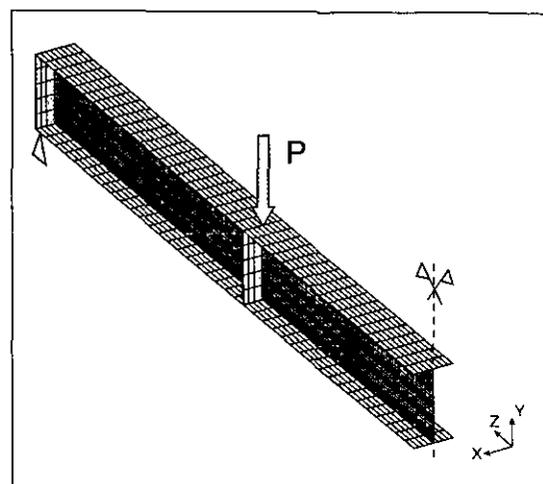
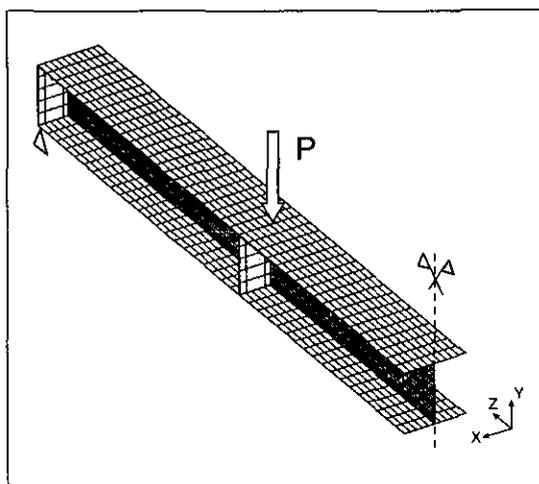


Fig. 4 Trave tipo B.

Inoltre, laddove la resistenza al fuoco è un fattore premiante, le elevate proprietà meccaniche ad alta temperatura, tipiche degli acciai inossidabili austenitici, li rendono candidati all'impiego negli elementi portanti delle strutture (travi, colonne).

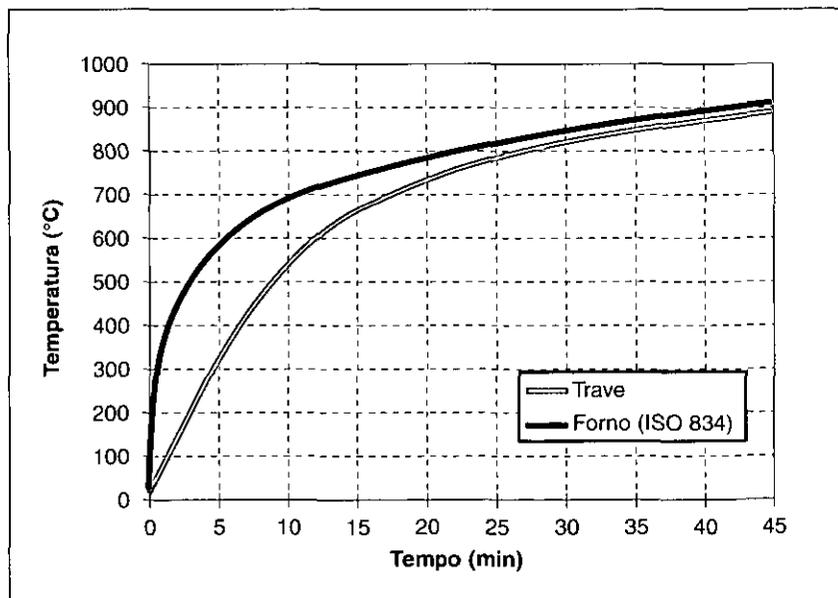
Nella convinzione di queste potenzialità degli acciai inossidabili, sono state "pensate" delle prove *ad hoc* che potessero dare un'idea del comportamento al fuoco, soprattutto paragonandolo con quello di un normale acciaio al carbonio. La ricerca è stata suddivisa in due parti ben distinte. La prima è rivolta allo studio comparato, basato su modellistica ed elementi finiti, relativo al comportamento di due travi, sotto carico, di Fe360 e di EN 1.4301 (AISI 304) esposte a riscaldamento anisotermo.

La seconda parte, invece, riguarda le vere e proprie prove sperimentali effettuate presso i laboratori dei Vigili del Fuoco di Roma. Molto interessante è stato constatare la buona sintonia tra i dati ottenuti con lo studio agli elementi finiti e i risultati sperimentali.

## LO STUDIO AGLI ELEMENTI FINITI

Le geometrie di sezione studiate, identificate con A e B, sono riportate in fig. 1. Le due travi, una per ogni sezione, sono sollecitate secondo lo schema di flessione in quattro punti. Sono stati realizzati due modelli (uno per ciascuna geometria), in accordo allo schema statico di fig. 2. Le travi sono state schematizzate con elementi di tipo "shell" a quattro nodi. Per ragioni di simmetria geometrica e di carico è stata schematizzato solo 1/4 di ogni struttura. Sono state applicate le opportune condizioni al contorno sui piani di simmetria e quelle proprie dello schema di trave in flessione su quattro punti. Nelle figg. 3 e 4 sono mostrate le definizioni agli elementi finiti utilizzate per i calcoli e per una migliore comprensione è rappresentata metà trave. All'elemento è stata imposta una variazione progressiva di temperatura, a partire da temperatura ambiente, secondo una rampa caratteristica, in accordo alla normativa ISO CD 834. La stessa norma stabilisce la variazione incrementale di temperatura dell'elemento

Fig. 5 Variazione di temperatura nel tempo imposta al modello.



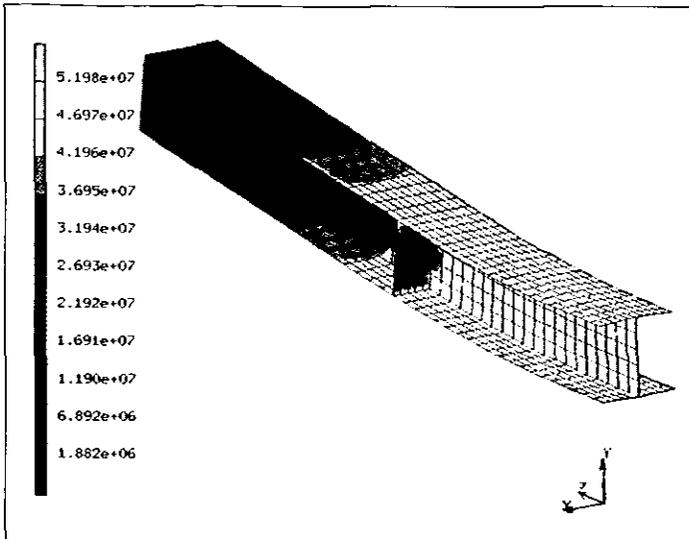


Fig. 6 Trave tipo A - Aisi 304.

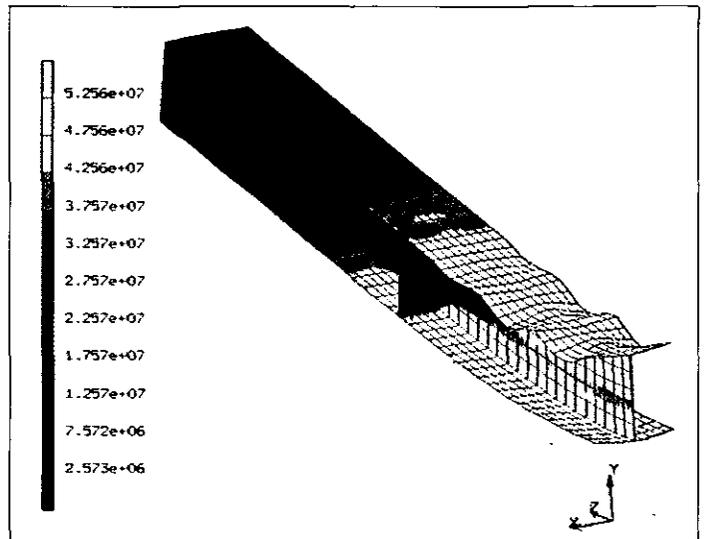


Fig. 7 Trave tipo A - Fe 360.

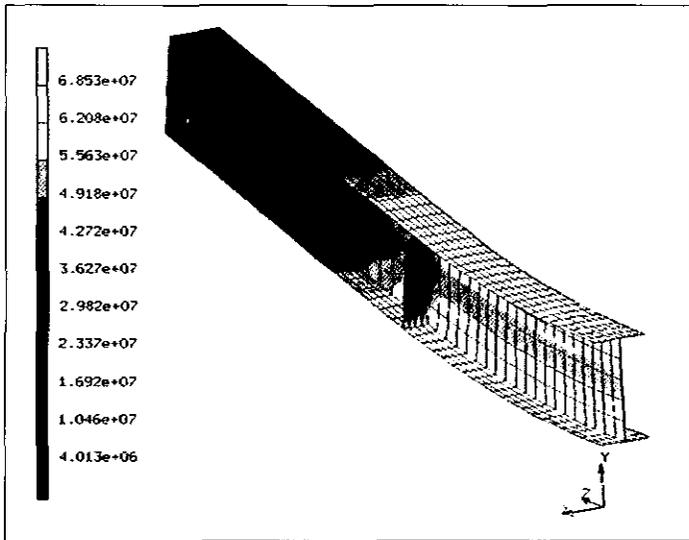


Fig. 8 Trave tipo B - AISI 304.

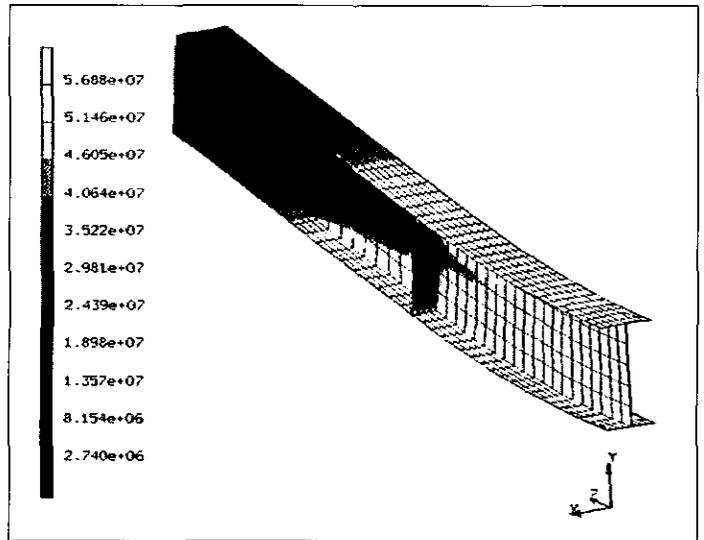


Fig. 9 Trave Tipo B - Fe 360.

in funzione di quella istantanea del forno e della geometria dell'elemento stesso.

Al modello è stata imposta una variazione di temperatura nel tempo, secondo la curva di fig. 5. La curva di salita in temperatura dipende pertanto dall'ambiente, dal tipo di materiale, dal suo fattore di massività (rapporto tra la superficie dell'elemento esposto al fuoco e il suo volume).

Il comportamento del materiale schematizzato è di tipo elasto-plastico, con snervamento e incrudimento dipendenti dalla temperatura.

I dati sono stati elaborati a partire dalle curve sperimentali ricavate con le prove di tra-

zione per l'AISI 304 e dalle tabelle dell'Eurocode 3 per l'Fe360.

Il comportamento del materiale è stato valutato in termini di distribuzione delle tensioni al momento del collasso e di variazione della freccia di inflessione nel tempo.

Nelle figg 6÷9 è mostrata la distribuzione delle tensioni all'atto del collasso.

Il criterio adottato (norma BS 476, parti 20 e 21) per determinare l'inizio del cedimento plastico della trave consiste nel valutarne la velocità di deformazione. Il passaggio da regime elastico (struttura ancora in sicurezza) a regime plastico (formazione di cerniere plastiche con conseguente raggiungimento

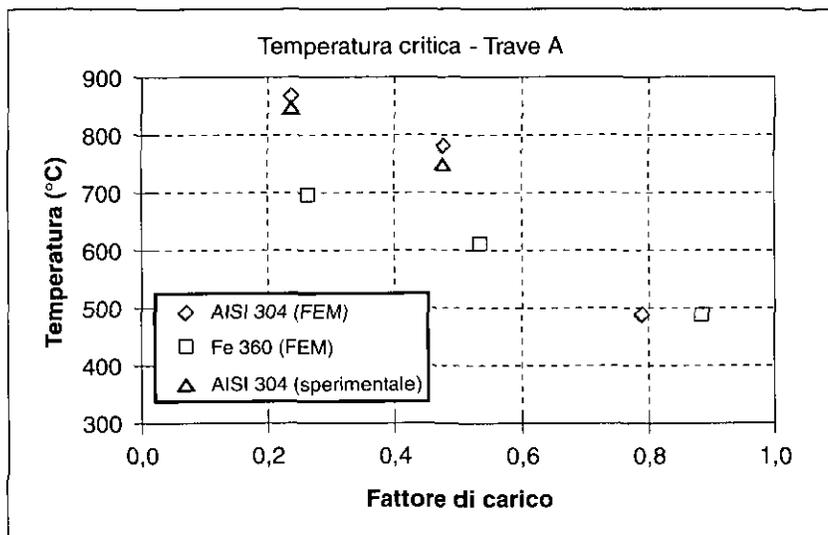


Fig. 10 Rapporto sperimentale Temperatura/Fattore di carico per la trave A.

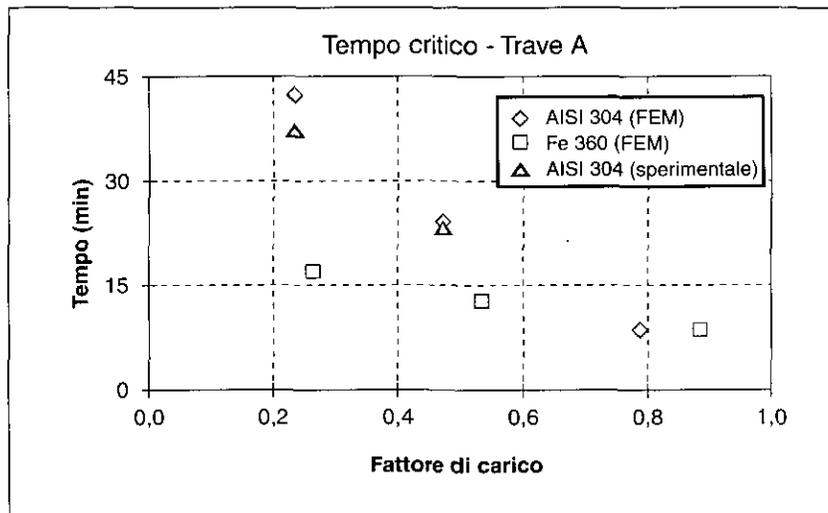


Fig. 11 Rapporto sperimentale Tempo/Fattore di carico per la trave A

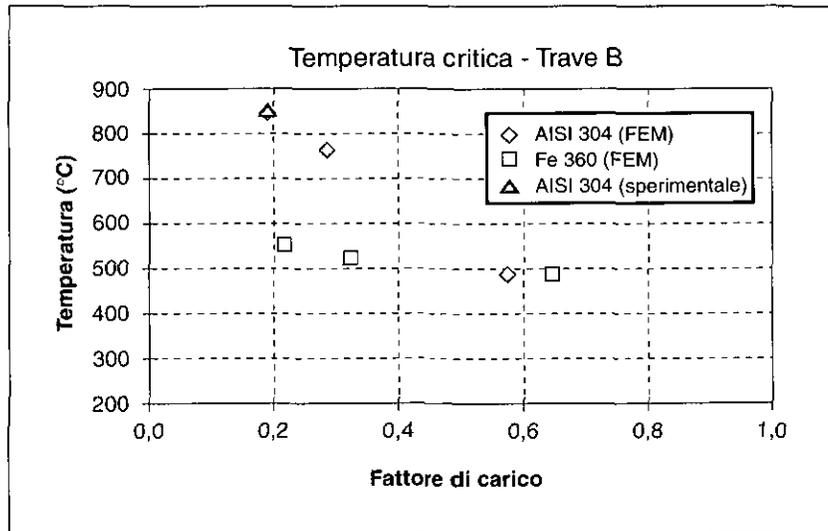


Fig. 12 Rapporto sperimentale Temperatura/Fattore di carico per la trave B.

di instabilità strutturale) viene determinato confrontando la velocità istantanea di deformazione della trave (derivata della freccia rispetto al tempo) con una velocità, detta di deformazione critica.

Nel momento in cui la velocità istantanea di deformazione supera quella critica, la trave non può essere più considerata in grado di sopportare il carico.

L'intervallo di tempo trascorso dall'inizio dell'esposizione, sino al momento critico, individua quindi il cosiddetto "tempo di resistenza al fuoco".

In funzione della curva di salita in temperatura, si determina poi anche la temperatura critica del componente. A parità di geometria e di esposizione, il tempo e la temperatura critica dipendono, naturalmente, oltre che dalla risposta del materiale, anche dall'entità del carico applicato.

Se definiamo "fattore di carico" il rapporto tra il carico applicato e il carico che porta a snervamento la trave a temperatura ambiente, si intuisce come questo parametro possa essere considerato per stabilire la "severità" della sollecitazione applicata. È possibile, pertanto, ricavare, in funzione di questo parametro, l'andamento del tempo e della temperatura critici per i due materiali esaminati (Fe360 e AISI 304).

Sono state perciò eseguite diverse simulazioni per i due tipi di trave (A e B) e per i due materiali, imponendo carichi crescenti. I risultati sono stati poi elaborati in accordo alla procedura BS 476 per individuare temperature e tempi critici.

I risultati dell'elaborazione sono riportati nelle figg. 10-13, dove si sono inseriti, oltre ai punti determinati per mezzo del calcolo (FEM), anche i punti rappresentativi delle prove preliminari, in piena scala, eseguite presso il Centro Studi ed Esperienze dei Vigili del Fuoco di Roma sullo stesso tipo di travi.

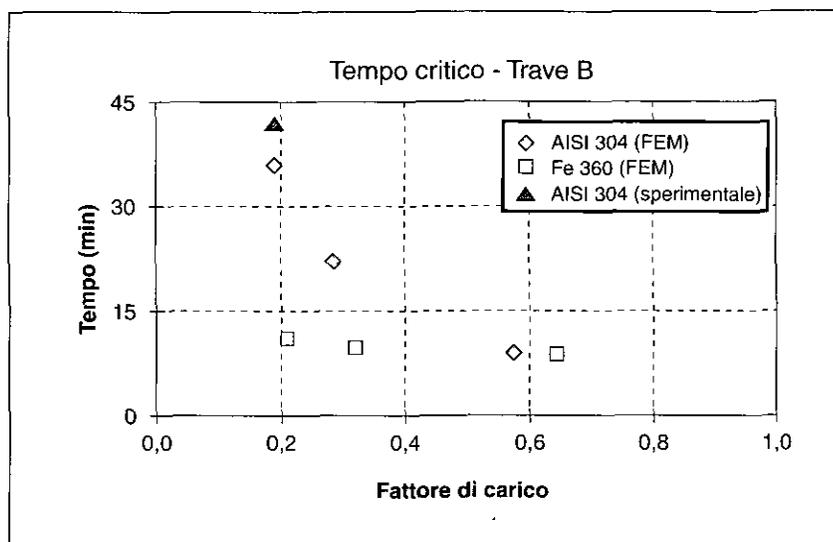
Si può constatare l'ottimo accordo ottenuto tra previsione numerica e sperimentazione. Dai grafici si nota che al crescere del carico, la temperatura critica si abbassa. Infatti, a una più elevata tensione applicata deve far riscontro una corrispondente resistenza a snervamento che si ottiene per temperature



**Dettaglio dei martinetti idraulici per l'applicazione del carico durante la preparazione dei test presso i laboratori dei Vigili del Fuoco di Roma.**

decrementi. Perciò, in corrispondenza di elevati fattori di carico le temperature e i tempi critici per i due materiali, risultano equivalenti; ove sono richieste tensioni di snervamento più elevate, in un intervallo da 100 a 400 °C, i materiali si comportano in modo molto simile.

Invece, per "fattori di carico" inferiori a 0,5 diventa considerevole il "vantaggio" conseguito con l'EN 1.4301 (AISI 304). Infatti, i tempi di resistenza al fuoco passano dai 10\15 minuti dell'Fe 360 a 20-30 minuti dell'EN 1.4301 (AISI 304), in un intervallo di temperature che va da 650 a 800 °C circa,



**Fig. 13 Rapporto sperimentale Tempo/Fattore di carico per la trave B.**

che è considerato quello più critico per le strutture metalliche sottoposte a carico di incendio.

Viene quindi teoricamente quasi raddoppiato il tempo a disposizione per poter intervenire in caso di incendio ed operare, in condizioni di sicurezza, sulla struttura.

Passiamo ora ai risultati ottenuti dalle prove sperimentali presso i laboratori dei Vigili del Fuoco.

## I CAMPIONI

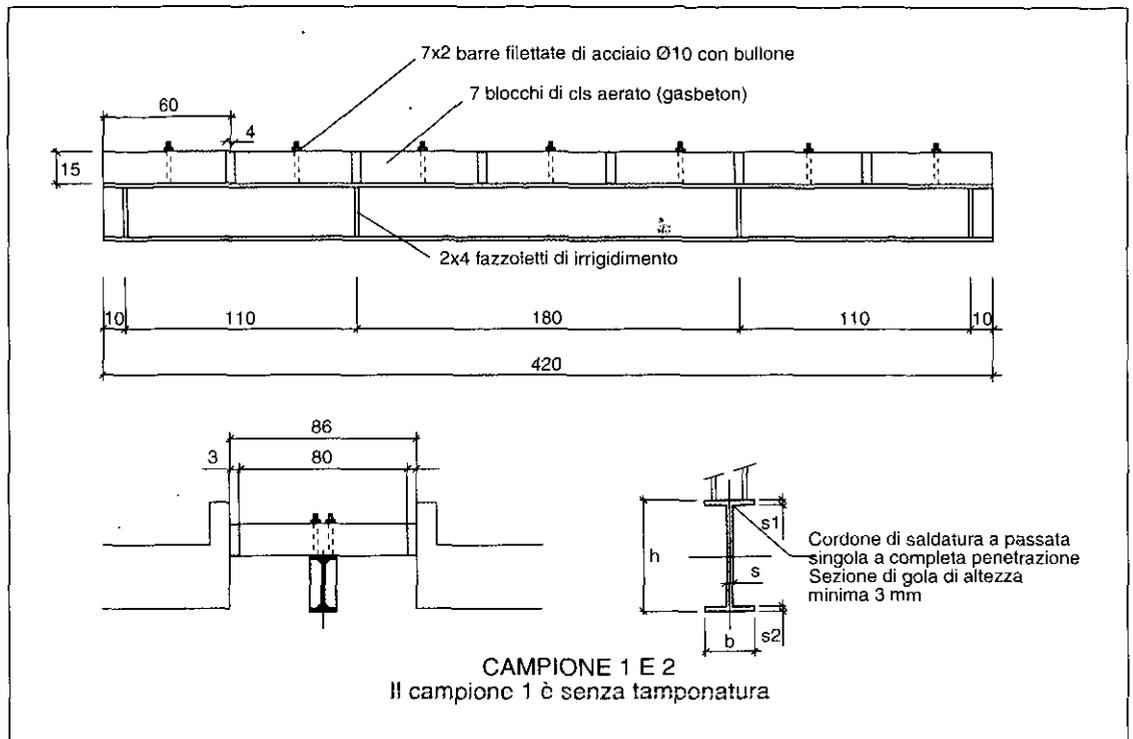
Le travi campione sottoposte alle prove sono state realizzate per saldatura da lamiera in acciaio inossidabile del tipo AISI 304. I valori nominali delle misure di tali campioni sono riportati nella tab. 1, unitamente ai tipi di profilo standardizzato più simili a quelli testati.

In corrispondenza dei punti di applicazione

**TAB. 1 - VALORI NOMINALI DELLE GRANDEZZE CARATTERISTICHE DEI CAMPIONI, DOVE: H = ALTEZZA TRAVE, S = SPESSORE ANIMA, S<sub>1</sub> = SPESSORE ALA SUPERIORE, S<sub>2</sub>: SPESSORE ALA INFERIORE, B = LARGHEZZA ALI, L = LUNGHEZZA TRAVE, P = PESO DELLA TRAVE**

n° campione	Tipo di trave	h [mm]	s [mm]	s <sub>1</sub> [mm]	s <sub>2</sub> [mm]	b [mm]	L [mm]	P [kN]
1	Paragonabile a IPE 240	241	6	6	6	119	4200	0,99
2	Paragonabile a IPE 240	241	6	6	6	119	4200	0,99
3	Paragonabile a HE 200	201	6	6	6	119	4200	1,24
4	Paragonabile a HE 200	199	6	6	6	200	4200	1,24

**Fig. 14** Rappresentazione schematica dei campioni n. 1 e 2 e del relativo sistema di posizionamento per la prova di resistenza al fuoco.



**Fig. 15** Schema rappresentativo del sistema di carico, dei sistemi di rilevamento della curva di incendio, della mappatura termica del campione e dell'inflessione in mezziera nelle prove di resistenza al fuoco.

del carico e degli appoggi sono stati saldati dei fazzoletti trasversali di irrigidimento, mentre sull'estradosso sono state saldate sette coppie di barre filettate per il fissaggio dei blocchi di tamponamento. Nella fig. 14 è visibile una schematizzazione dei campioni n. 1 e 2 testati e della modalità di posizionamento nel forno di prova.

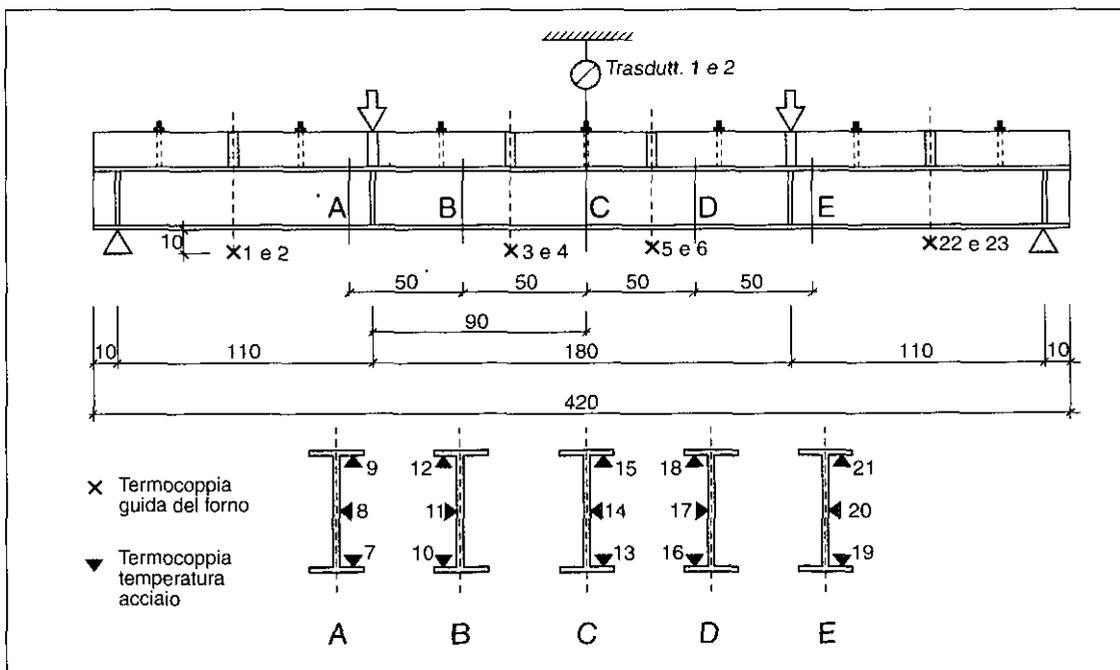
## GENERALITÀ SULLE PROVE CONDOTTE

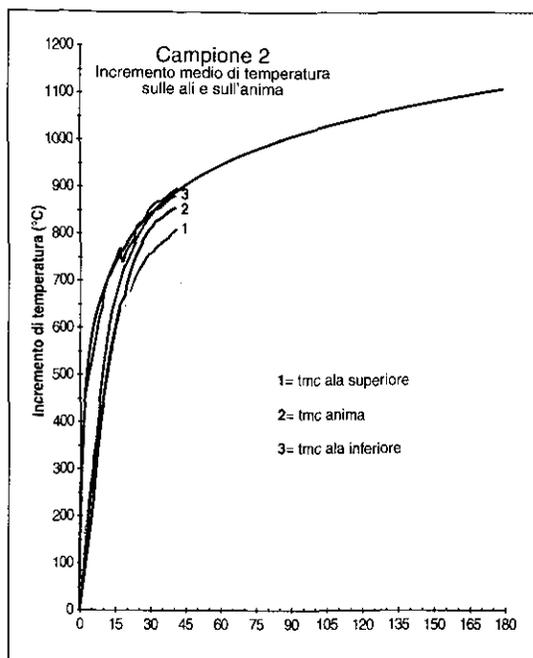
Sono state condotte prove di resistenza meccanica a temperatura ambiente e di resistenza al fuoco con carico applicato su quattro travi campione di acciaio inox AISI 304, secondo la norma UNI 7678 (ISO 834). Sono state inizialmente condotte due prove

di resistenza al fuoco sui campioni n. 2 e 3.

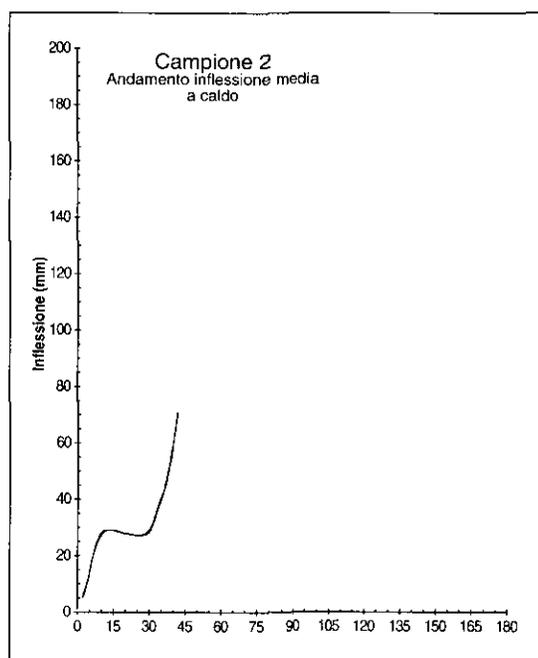
Trattandosi di profili non normalizzati, dato che gli spessori delle ali erano inferiori a quelli previsti da norma, si è deciso di ridurre, nei test di resistenza al fuoco, il carico di prova per scongiurare possibili fenomeni di instabilità.

È stata poi effettuata una prova meccanica a temperatura ambiente sul campione n. 1, utilizzando lo

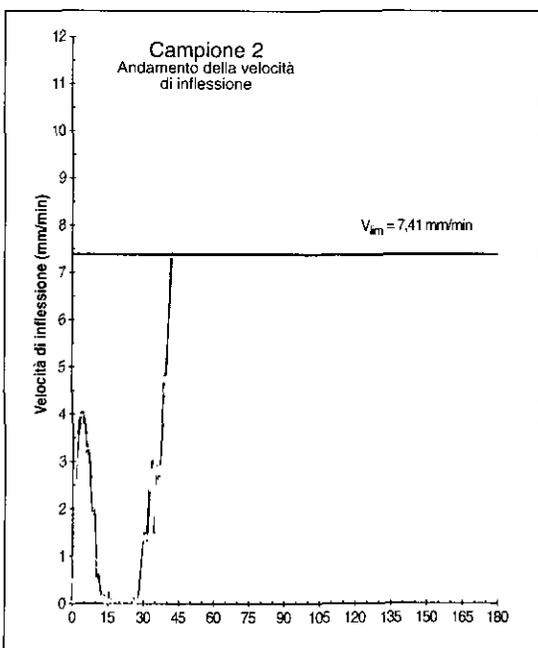




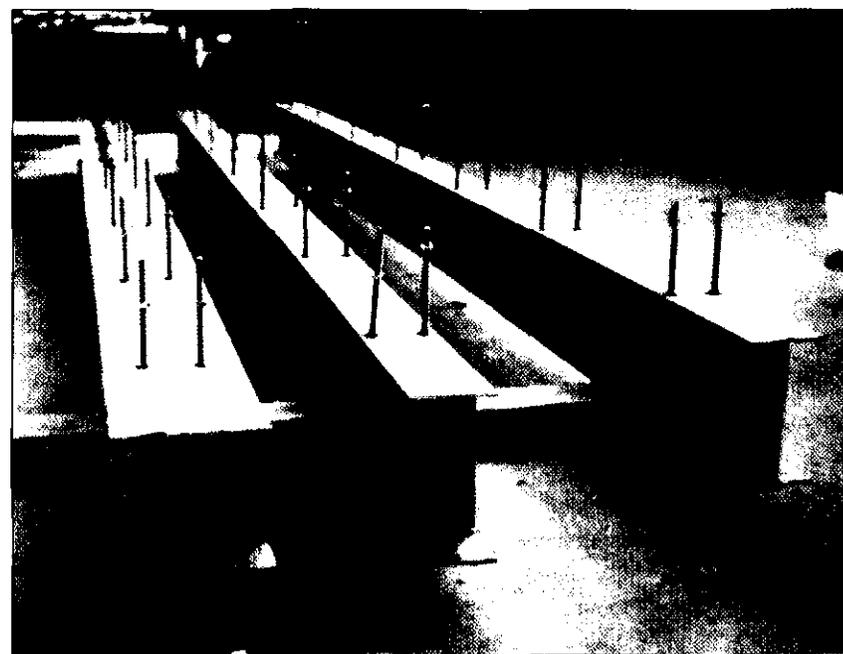
**Fig. 16** Andamento nel tempo della temperatura media del forno e della temperatura media dell'anima e delle ali del campione n. 2.



**Fig. 17** Andamento nel tempo dell'inflessione in mezzzeria per il campione n. 2.



**Fig. 18** Andamento nel tempo della velocità di inflessione in mezzzeria per il campione n. 2.



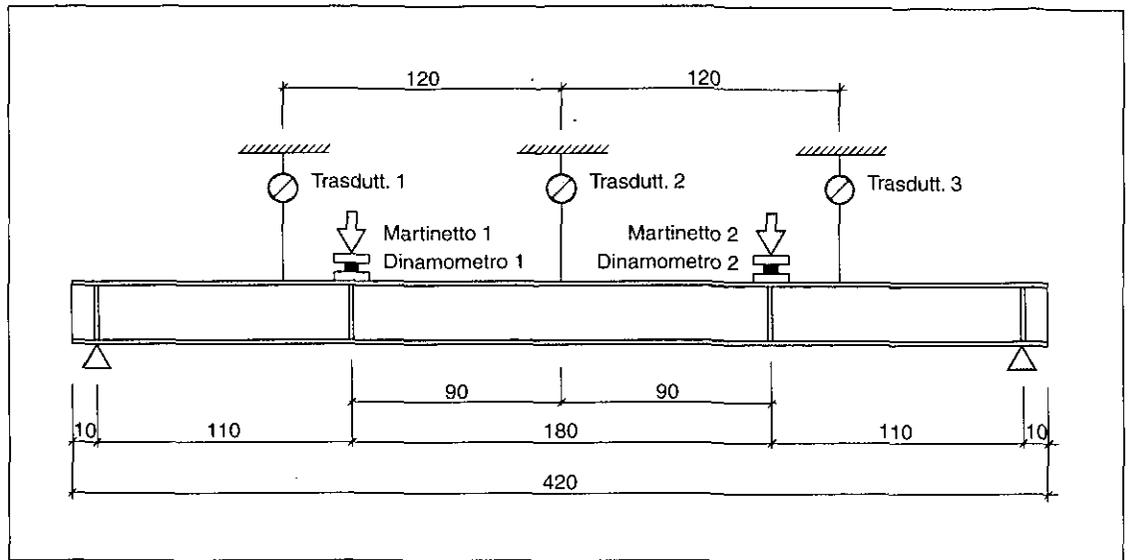
## LE PROVE

Le travi campione testate

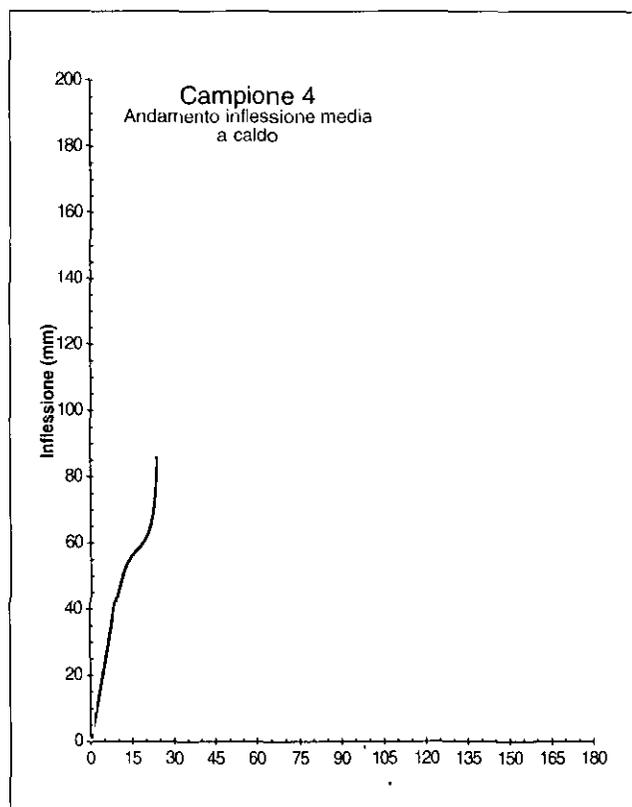
stesso schema statico delle prove precedenti al fine di stabilire un carico limite di comportamento elastico della trave. Le condizioni di carico così individuate sono state utilizzate per l'esecuzione della terza prova in forno sul campione n. 4.

Per motivi redazionali non è certamente possibile riportare i dettagli dei test, ma verranno sinteticamente illustrati gli schemi e i risultati delle prove condotte. Nella fig. 15 è riportato lo schema della prova condotta sul campione n. 2 (schema che verrà riproposto anche per i successivi test di resistenza al fuoco sui campioni n. 3 e 4). Si tenga presente che il carico applicato in

**Fig. 19** Rappresentazione schematica della prova meccanica a temperatura ambiente condotta sul campione n. 1.



**Fig. 20** Andamento nel tempo dell'inflexione in mezzeria per il campione n. 4.



questa prova da ognuno dei martinetti era di 1 kN, mentre la curva di riscaldamento è stata quella prevista dalla UNI 7678. All'interno del forno sono state applicate otto termocoppie (sullo schema sono la 1-2-3-4-5-6-22-23) per il controllo della curva di incendio e altre 15 sul campione, per la mappatura termica dello stesso. In fig. 16 sono riportate le curve di andamento nel tempo della temperatura media del forno e dell'in-

cremento della temperatura media delle ali e dell'anima. Inoltre, in corrispondenza della mezzeria della trave erano presenti due trasduttori per il controllo dell'inflexione e della velocità di inflessione. Proprio di questi due ultimi parametri sono riportate le curve che ne esprimono l'andamento in funzione del tempo (figg. 17 e 18). È chiaramente visibile un intervallo di tempo in cui l'inflexione è pressoché nulla. Le prove sono state interrotte nel momento in cui la velocità di inflessione ha superato quella limite, calcolata con la formula:

$$V_{lim} = L^2 / (9000xh)$$

dove L è la distanza tra gli appoggi, in millimetri, e h è l'altezza di calcolo del campione in prova. Nella prova sulla trave n. 2 la velocità limite era di 7,4 mm/min.

Il tempo trascorso tra l'inizio dell'esposizione e il momento di fine prova è il tempo di collasso riportato nella tabella 2.

La seconda prova di resistenza al fuoco sul campione n. 3, condotta in maniera del tutto simile alla precedente, ma con carico ai martinetti di 15,0 kN, ha permesso di rilevare dati simili in accordo con quelli del campione n. 2, facendo registrare ancora una volta lo stesso "arresto" della deformazione e della velocità di deformazione.

Si è passati quindi al test meccanico di inflessione a temperatura ambiente sul campione n. 1, secondo lo schema di fig. 19.

**TAB. 2 - RIASSUNTO DEI DATI EMERSI DALLE PROVE DI RESISTENZA AL FUOCO CONDOTTE SECONDO UNI 7678.**

n° campione	Tipo di trave	Fattore di sezione [m <sup>2</sup> ]	Tensione massima [N/mm <sup>2</sup> ]	Tempo di collasso [min]	Carico applicato per martinetto [kN]
2	Paragonabile a IPE 240	281,3	62,06	42	10
3	Paragonabile a HE 200	277,9	72,50	38	15
4	Paragonabile a HE 200	277,8	136,20	24	30

Dalla prova è emerso che il valore limite del carico tale da non indurre fenomeni di schema statico adottato, era di 30 kN per ciascun martinetto.

Tale valore del carico è stato quello adottato per l'ultimo test di resistenza al fuoco condotto sul campione n. 4. Nelle figg. 20 e 21 sono riportati risultati di questa prova finale. Ancora una volta si evidenzia un intervallo di tempo entro il quale la deformazione e la relativa velocità hanno subito una diminuzione.

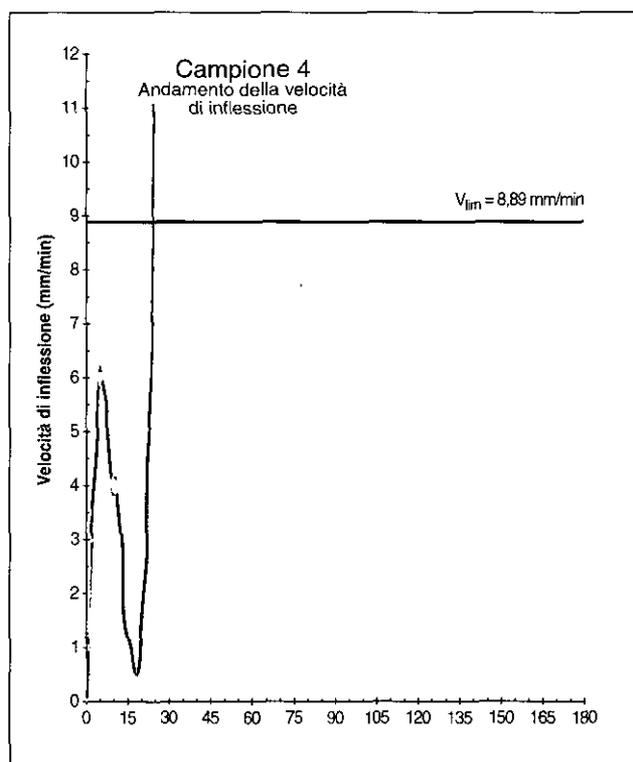
### CONSIDERAZIONI FINALI

Dai test in piena scala condotti, si sono ricavati dati piuttosto interessanti; in particolare sono stati confermati i risultati dello studio agli elementi finiti.

Da un primo confronto è possibile, infatti dedurre quanto segue: nel caso di basse sollecitazioni applicate, equivalenti a fattori di carico inferiori a 0,3 (prova sul campione n. 2), i tempi di collasso al fuoco dell'acciaio AISI 304 ottenuti nei test sperimentali, risultano pari a 42 minuti.

Tale risultato viene pienamente confermato dal modello di calcolo FEM. Inoltre, il tempo critico previsto tramite modello FEM per l'Fe360, risulta significativamente inferiore (11 minuti) rispetto a quello dell'HE 200 in AISI 304 (17 minuti).

Per fattori di carico più elevati, prossimi a 0,5 (come nel caso del test eseguito sul campione n. 3), il tempo di collasso al fuoco si riduce in maniera significativa per la trave HE 200 in acciaio inox AISI 304, scendendo a 24 minuti.



**Fig. 21** Andamento nel tempo della velocità di inflessione in mezz'ora per il campione n. 4.

Dal confronto con i risultati ricavati dall'analisi FEM si nota che il vantaggio si riduce, in quanto lo stesso tipo di trave in Fe 360 mostra tempi critici compresi tra 10 e 14 minuti. Nella tabella 2 sono riassunti alcuni dati salienti delle tre prove di resistenza al fuoco.

*La presente ricerca è stata condotta da Acciai Speciali Terni e da CSM (Centro Sviluppo Materiali).*

Articolo tratto da "Inossidabile"