

LA RESISTENZA AL FUOCO E LE PROPRIETÀ ANTISISMICHE DELL'ACCIAIO INOSSIDABILE

V. Boneschi (Centro Inox, Milano)

Introduzione

Sempre più spesso si possono incontrare applicazioni nel settore dell'edilizia in cui l'acciaio inossidabile è impiegato come materiale strutturale e non solo per la sua resistenza alla corrosione.

Nell'ambito dei materiali da costruzione, al fine di accrescere la sicurezza degli edifici, la resistenza al fuoco e le proprietà antisismiche sono requisiti che rivestono un ruolo sempre più di primo piano.

Nella presente relazione si illustreranno dapprima le caratteristiche che rendono questo materiale un potenziale alleato a supporto di una progettazione sensibile alle problematiche relative all'antisismica; saranno quindi presentate le prestazioni in condizioni di incendio, desunte dai risultati di prove sperimentali di resistenza al fuoco condotte su elementi di acciaio inossidabile.

Inox materiale antisismico: perché?

E' noto che gli acciai inossidabili, in particolare quelli a struttura austenitica, sono caratterizzati da un'elevata deformabilità, in virtù di una notevole capacità di allungarsi prima di arrivare a rottura.

Questo fatto è piuttosto evidente se si osserva la figura 1: il diagramma sforzi deformazioni (σ - ϵ) di un acciaio inox austenitico al cromo nichel (es. EN 1.4301 - AISI 304) denota una capacità di deformazione nettamente superiore a quella di un acciaio inox ferritico (es. EN 1.4016 - AISI 430), che si comporta in maniera simile ai più comuni acciai da costruzione (Fe360, Fe430, Fe510)

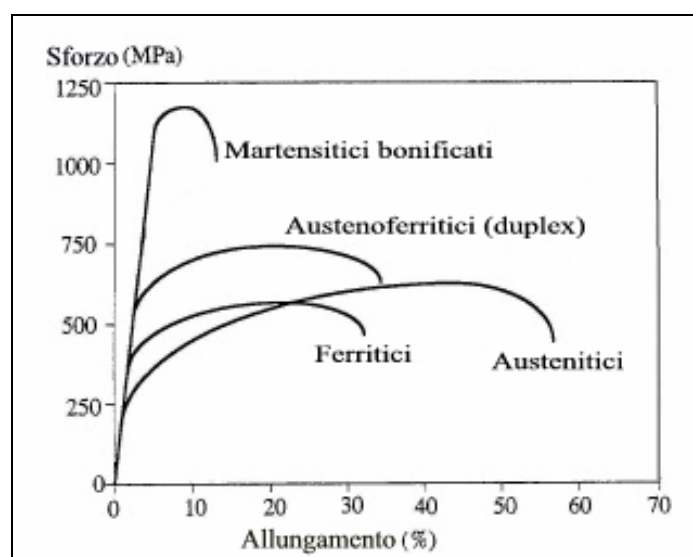


Figura 1: Diagrammi indicativi σ - ϵ per acciai inox.

E' evidente che l'acciaio inossidabile ferritico ha un comportamento tendenzialmente simile a quello dell'acciaio al carbonio, con limitata duttilità e presenza di snervamento discontinuo, viceversa gli acciai austenitici, oltre ad avere una resistenza a rottura più elevata, non presentano snervamento ed hanno una capacità di allungarsi assai superiore. Poiché l'area sottesa dalle curve di figura 1 è una misura dell'energia assorbita prima di arrivare alla rottura del materiale, si capisce l'interesse per un acciaio come il tipo 304.

Per accrescere le proprietà meccaniche di un acciaio inossidabile austenitico non si può ricorrere a trattamenti termici opportuni e in pratica l'unico metodo consiste nell'impartire una deformazione meccanica a freddo.

Ovviamente la capacità di allungamento diminuisce per effetto dell'incrudimento precedentemente subito dal materiale in fase di lavorazione, ma, come si può notare dalle curve di figura 2 e 3, le risorse dell'inox, rispetto a quelle di un acciaio al carbonio, rimangono comunque tali da consentire ancora notevoli deformazioni:

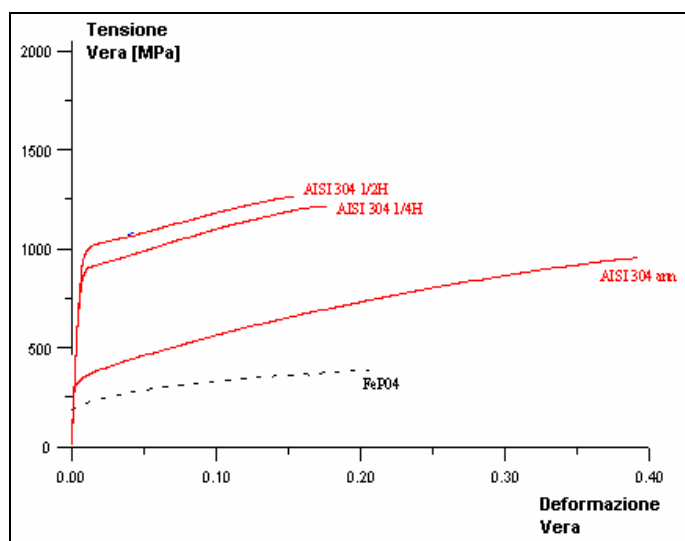


Figura 2: Curve σ - ϵ per l'acciaio inox AISI 304 e per un acciaio al carbonio.

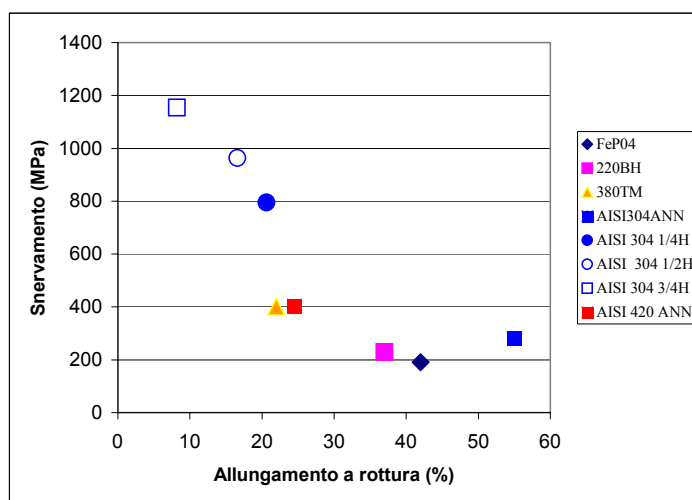


Figura 3: Diagramma snervamento - allungamento a rottura per alcuni acciai inossidabili e acciai al carbonio. Gli acciai incruditi sono indicati con le notazioni della norma ASTM A666 (1/4H, 1/2H, 3/4H).

E' inoltre importante che l'acciaio abbia una buona tenacità, cioè che non avvenga una rottura fragile o un'importante perdita di duttilità nei casi in cui il materiale stesso è sottoposto a deformazioni con elevata velocità.

A conferma di tutto ciò si ricorda che, sulla base di prove di valutazione (1-2) del comportamento di acciaio inossidabile austenitico per barre a aderenza migliorata AISI 316L, confrontato con il convenzionale Fe B44K in presenza di sollecitazioni alternate e di con elevate velocità di applicazione del carico, quali quelle generate da eventi sismici, è stato possibile arrivare a risultati quali quelli qui di seguito riportati (Figg. 4-8).

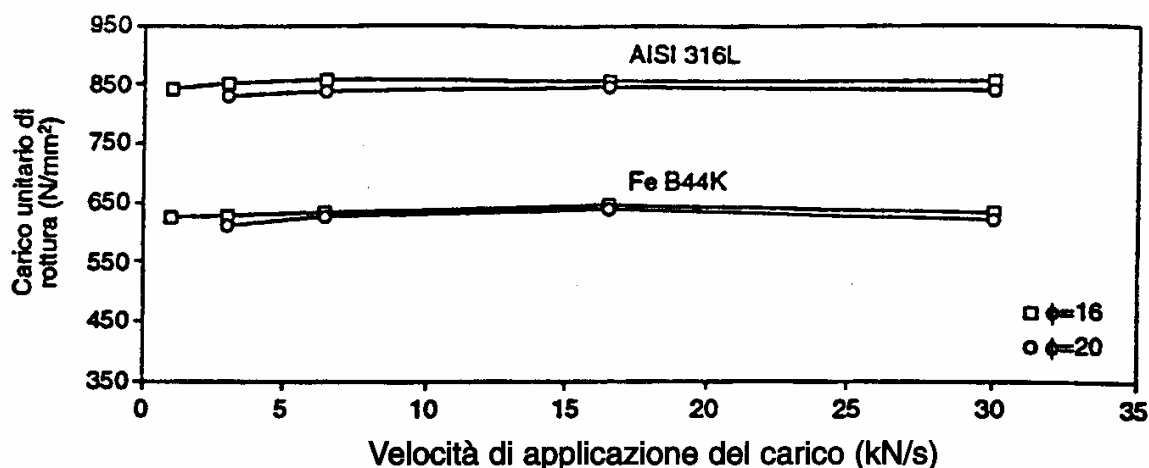


Figura 4: Andamento della resistenza a trazione in funzione della velocità di applicazione del carico in campo elastico.

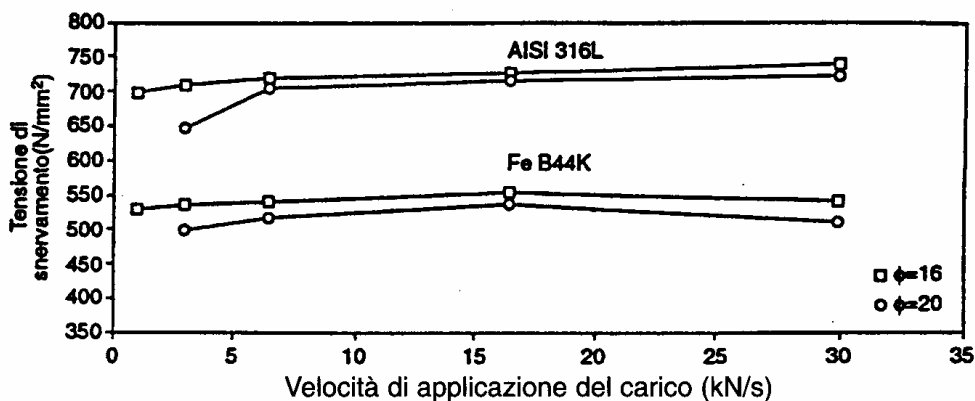


Figura 5: Andamento del carico di snervamento in funzione della velocità di applicazione del carico in campo elastico.

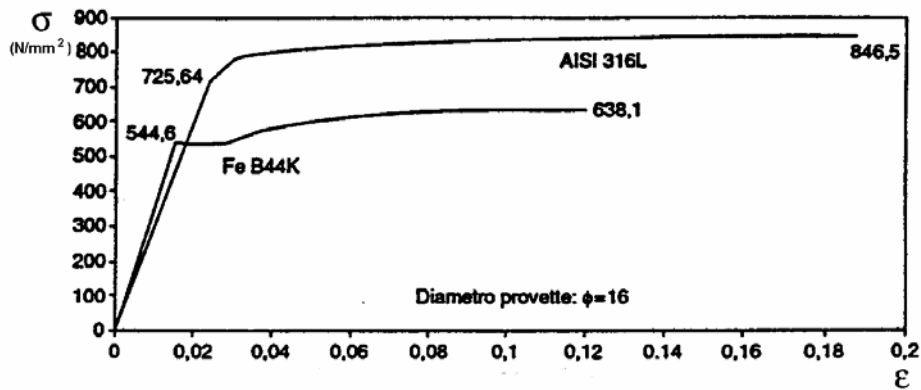


Figura 6: Curve di trazione σ - ϵ . Velocità di applicazione del carico in campo elastico pari a 30 kN/s.

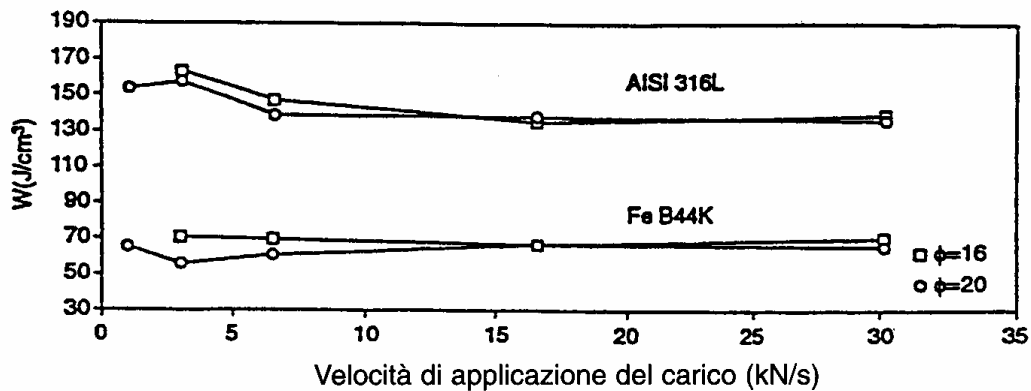


Figura 7: Energia specifica di deformazione prima di raggiungere la strizione al variare della velocità di applicazione del carico di trazione in campo elastico.

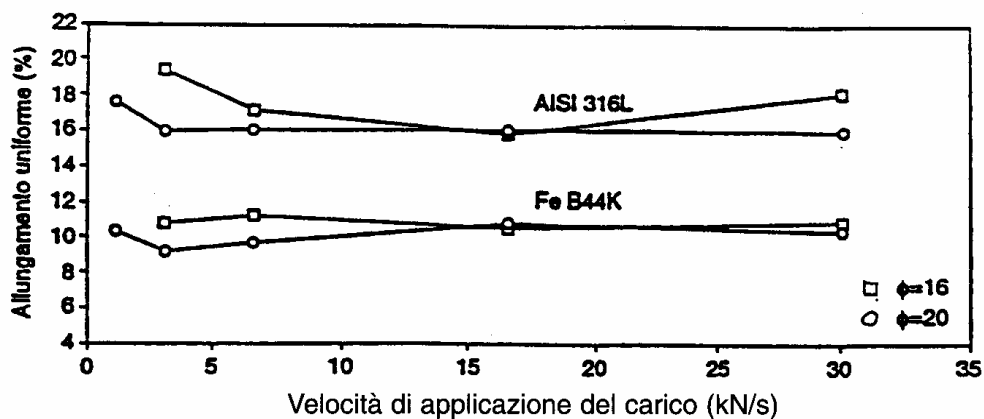


Figura 8: Allungamento uniforme al variare della velocità di applicazione del carico in campo elastico.

I grafici illustrano chiaramente come l'acciaio inossidabile austenitico presenti migliori valori complessivi per le varie proprietà meccaniche esaminate: maggior tensione di snervamento e di rottura, maggiore assorbimento di energia di deformazione, maggior allungamento

uniforme. Inoltre, è evidente che le più elevate prestazioni dell'acciaio inossidabile si mantengono, ed anzi risultano accresciute, al crescere della velocità di applicazione del carico. In particolare i risultati indicano che, mentre vi è un effetto della velocità di applicazione del carico per i valori più bassi, in generale questo effetto si attenua alquanto per le velocità più elevate

Come detto, è assai importante l'elevata tenacità dell'inox: questo è un elemento basilare per un materiale antisismico, visto che deve essere in grado di dissipare l'energia prodotta dal sisma "trasformandola" in energia di deformazione.

Gli acciai inossidabili austenitici possiedono una tenacità assai elevata anche alle basse temperature, poiché l'austenite non risente del fenomeno della transizione. In qualche modo l'effetto della bassa temperatura e dell'elevata velocità di deformazione sono simili, poiché entrambi i fattori tendono ad innalzare la tensione di snervamento, portandola più vicina alla tensione di rottura, con il conseguente rischio di innescare fratture. Gli acciai inossidabili austenitici che, come si è detto, hanno un'importante differenza tra i valori delle tensioni di rottura e di snervamento, risultano pertanto poco critici per abbassamenti di temperatura e per eventi che implicano l'applicazione di carichi ad elevata velocità. Si può ad esempio osservare in Figura 9 come questi acciai mantengano un buon valore di resilienza anche a temperature molto al di sotto dello zero, senza che ci sia passaggio repentino del comportamento da duttile a fragile.

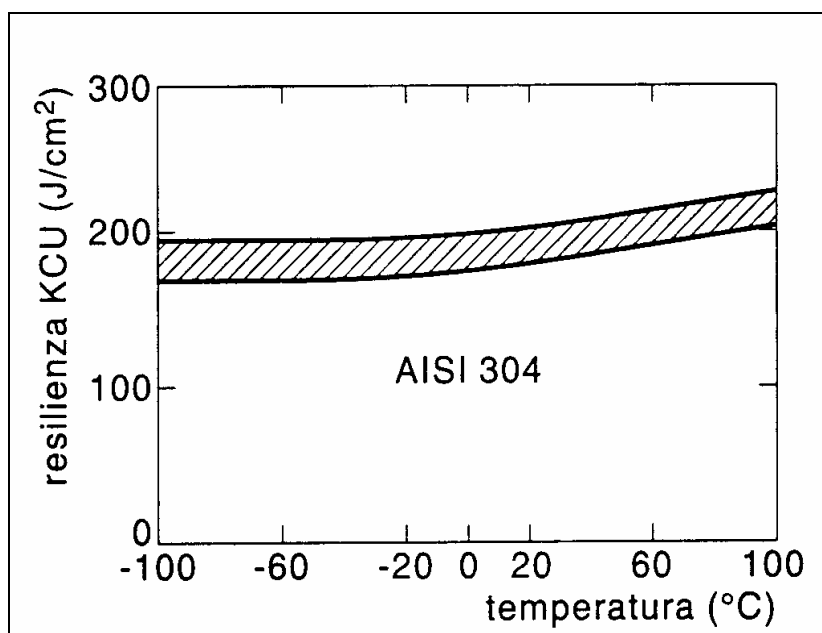


Figura 9: Andamento della resilienza con la temperatura per l'AISI 304 (1.4301).

Negli eventi sismici, uno dei danni più gravi e ricorrenti è costituito dagli incendi che si sviluppano a seguito del sisma; è pertanto necessario che un materiale che debba essere impiegato in zone sismiche abbia anche un'eccellente resistenza al fuoco. L'acciaio inossidabile 1.4301, come sarà illustrato nel seguito, è pienamente in grado di rispondere a questo requisito.

Alcuni esempi applicativi



San Francisco, California

Impiego di AISI 316 (EN 1.4401) per elementi di consolidamento del terreno in una zona collinare di San Francisco. La scelta dell'inox è legata alla sua resistenza alla corrosione e alla maggiore capacità di assorbire le deformazioni in caso di sisma. (Fonte NiDI)



Vacaville, California

Un impianto farmaceutico a Vacaville, California. E' una zona ad alto rischio sismico. Parecchi elementi strutturali, oltre che i serbatoi (AISI 316 – EN 1.4401), sono in acciaio inox AISI 304 (EN 1.4301) poiché la progettazione prevede di poter resistere a forze laterali pari al 30% delle forze peso. (Fonte, NiDI)



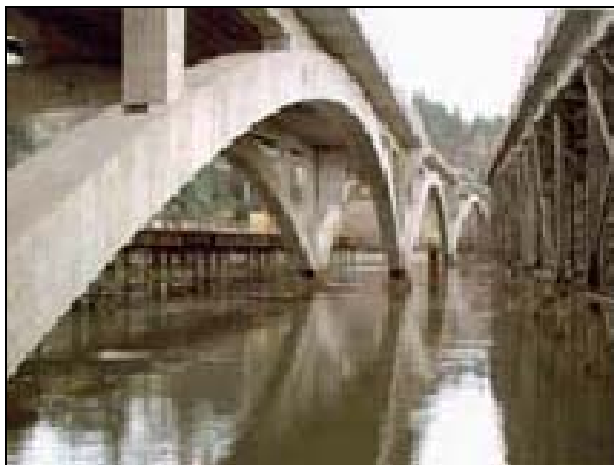
Hanshin, Giappone

62,4 tonnellate di AISI 304 (EN 1.4301) sottoforma di tubi, profili ad H e getti sono stati impiegati per il tempio di Kagamiyama-Hozengokokuji in virtù dell'aspetto estetico e delle elevate proprietà antisismiche. (Fonte NiDI)



Hanshin, Giappone

Vista d'insieme di una batteria di serbatoi per lo stoccaggio dell'acqua potabile. L'uso dell'inossidabile, anche per le strutture di sostegno, permette di "abbinare" igienicità e stabilità in caso di eventi sismici. (Fonte NiDI)



Coos Bay, Oregon

Il Dipartimento dei Trasporti dell'Oregon ha impiegato barre per cemento armato in acciaio inossidabile duplex 2205 (EN 1.4462) per il nuovo Hynes Inlet Slough Bridge. Oltre che per prevenire i problemi di corrosione, l'acciaio inox è stato espressamente scelto per andare incontro alle problematiche imposte dalla sismicità della zona.

La resistenza al fuoco: studio agli elementi finiti e prove sperimentali

Come già accennato, la resistenza al fuoco è un parametro sempre più rilevante nell'ambito delle caratteristiche dei materiali da costruzione.

In questo senso, esperienze condotte in vari laboratori europei (3-6) hanno messo in evidenza le ottime qualità dell'acciaio inossidabile.

In Italia CSM di Roma e Acciai Speciali Terni hanno condotto una ricerca dalla quale sono emersi risultati molto interessanti.

Il programma di tale ricerca è stato suddiviso in due parti fondamentali: la prima è consistita in una modellazione agli elementi finiti, mentre la seconda ha visto l'esecuzione di prove sperimentali su travi in acciaio inox presso i laboratori dei Vigili del Fuoco di Roma.

Come si avrà modo di descrivere di seguito, le due fasi hanno fatto registrare risultati in ottimo accordo tra loro e che hanno consentito di delineare l'ottimo comportamento dell'acciaio inossidabile in termini di resistenza al fuoco.

Lo studio agli elementi finiti

Le geometrie di sezione studiate, identificate con A e B, sono riportate in figura 10.

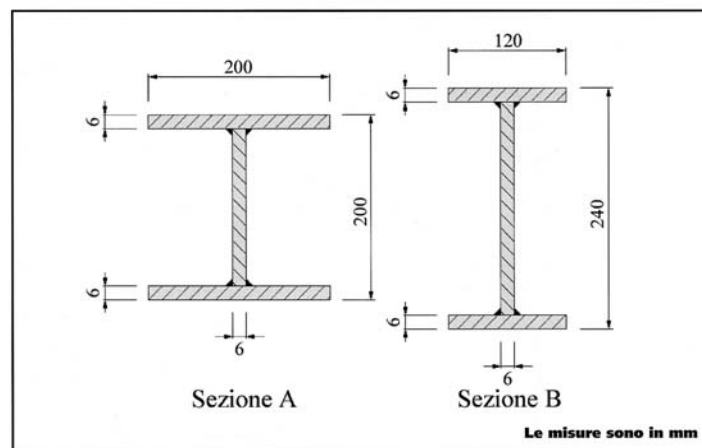


Figura 10: Sezioni delle travi testate.

Le travi sono state sollecitate secondo lo schema di flessione in quattro punti. Sono stati realizzati due modelli (uno per ciascuna geometria) in accordo allo schema statico riportato in figura 11.

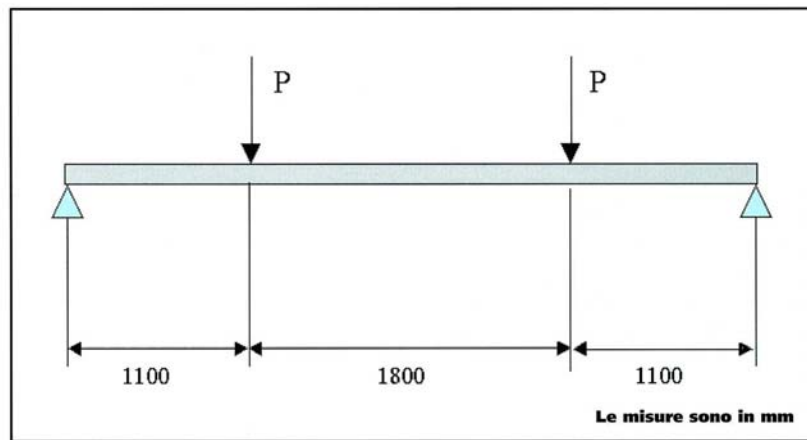


Figura 11: Schema statico.

Le travi sono state schematizzate con elementi di tipo “shell” a quattro nodi. Per ragioni di simmetria geometrica e di carico è stato schematizzato solo 1/4 di ogni struttura. Sono state applicate le opportune condizioni al contorno sui piani di simmetria. Nelle figure 12 e 13 sono mostrate le definizioni agli elementi finiti utilizzate per i calcoli, rispettivamente sulle due tipologie di trave e, nelle figure stesse, per una migliore comprensione, è rappresentata metà trave.

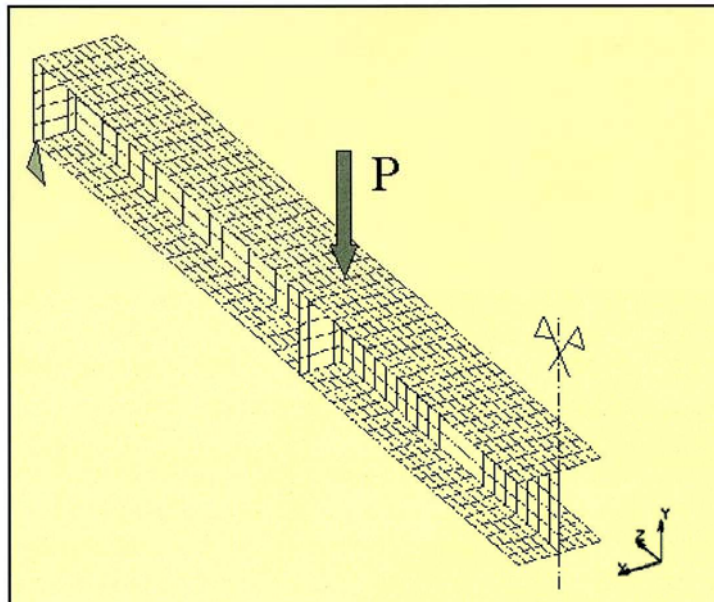


Figura 12: trave tipo A.

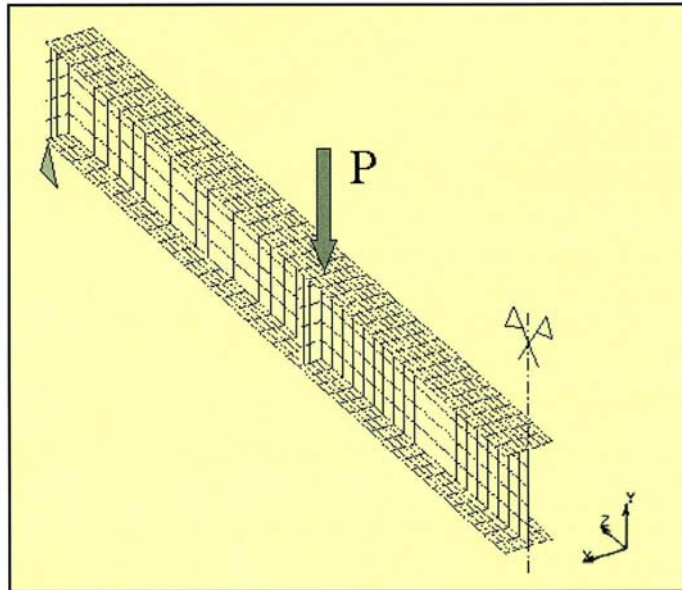


Figura 13: Trave tipo B.

All'elemento è stata applicata 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 in funzione della temperatura istantanea del forno e della geometria dell'elemento stesso. Al modello è stata imposta una variazione di temperatura nel tempo, secondo la curva di figura 14.

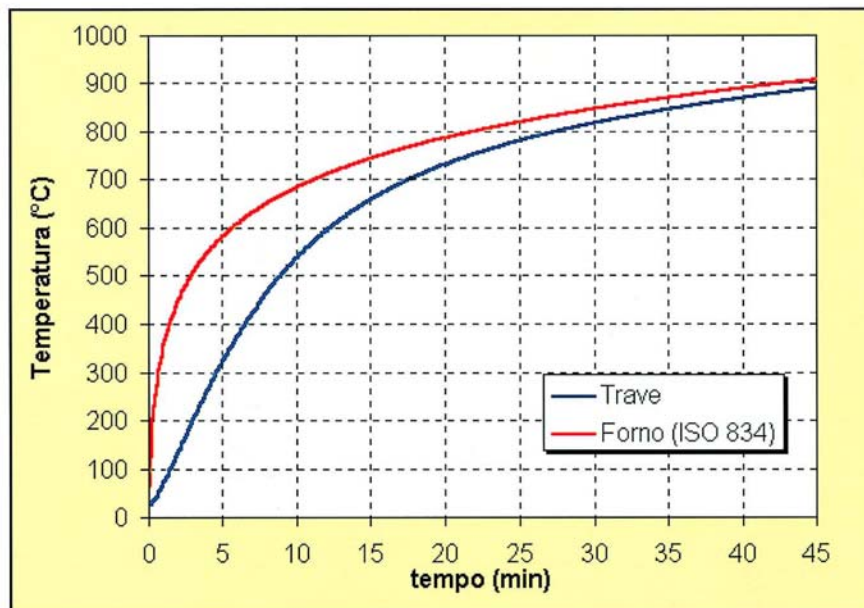


Figura 14: Curva di temperatura imposta.

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 ed il suo volume), dalla trasmissione del calore.

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

I dati sono stati elaborati a partire dalle curve sperimentali ricavate con le prove di trazione per l'AISI 304 e dalle tabelle dell'Eurocode 3 per l'Fe 360.

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 figure da 15 a 18 è mostrata la distribuzione delle tensioni all'atto del collasso.

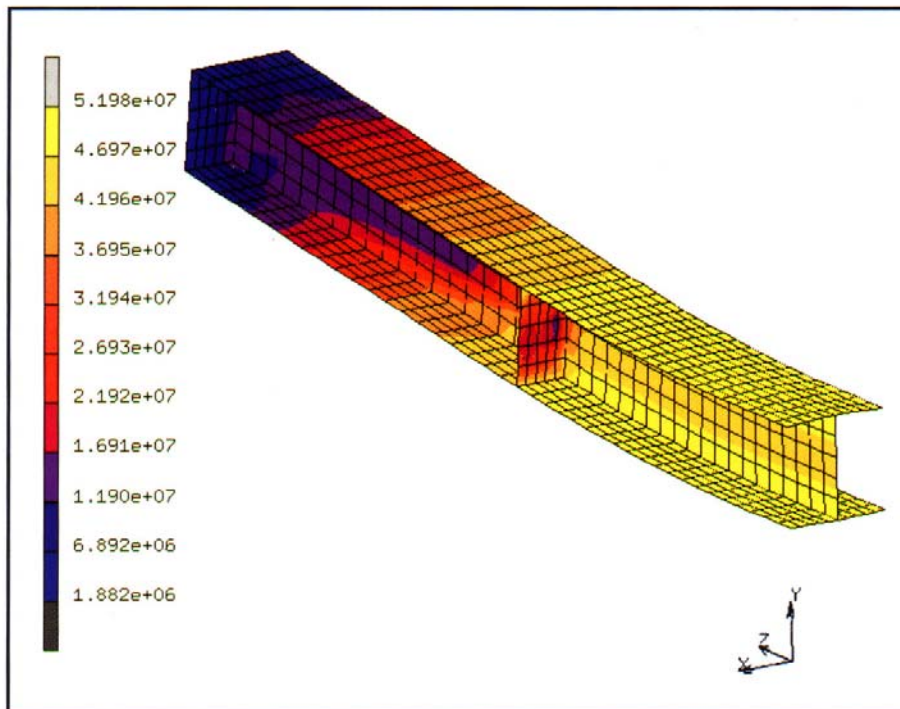


Figura 15: Trave tipo A - AISI 304.

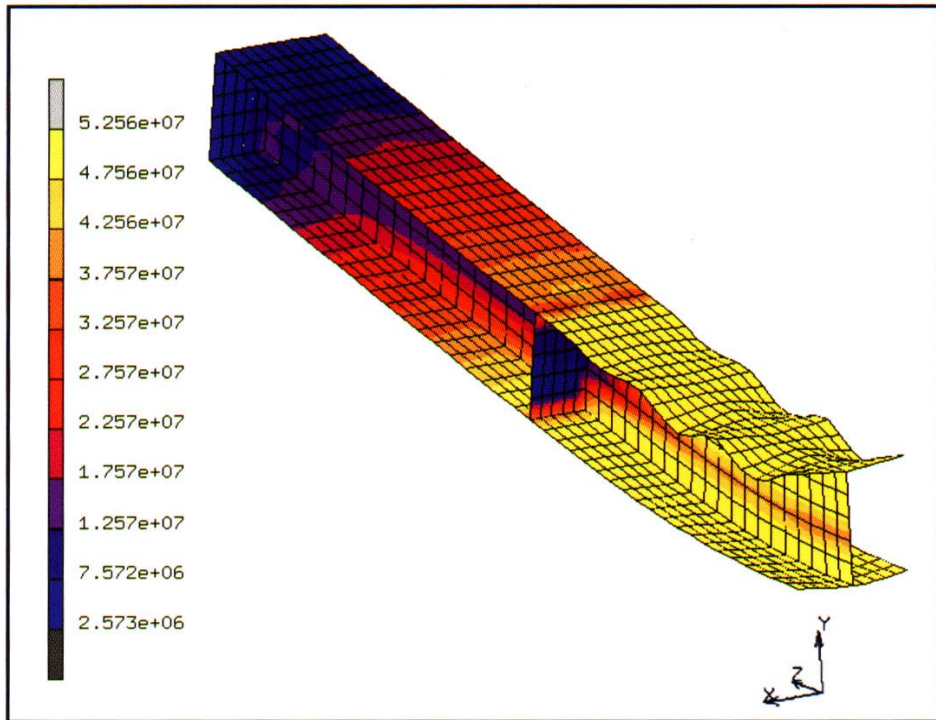


Figura 16: Trave tipo A - Fe 360.

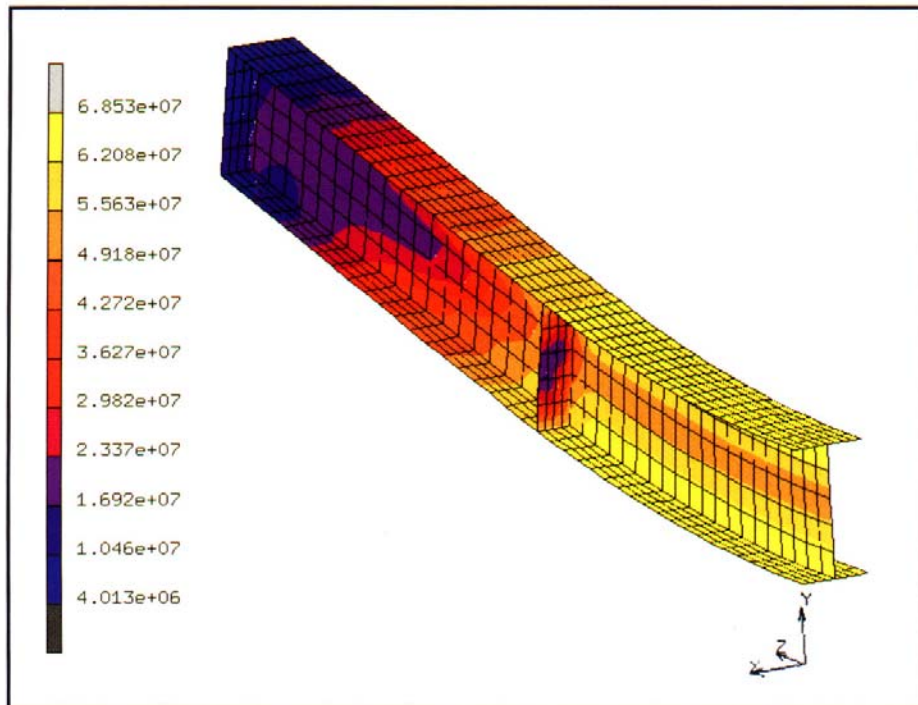


Figura 17: trave tipo B - AISI 304.

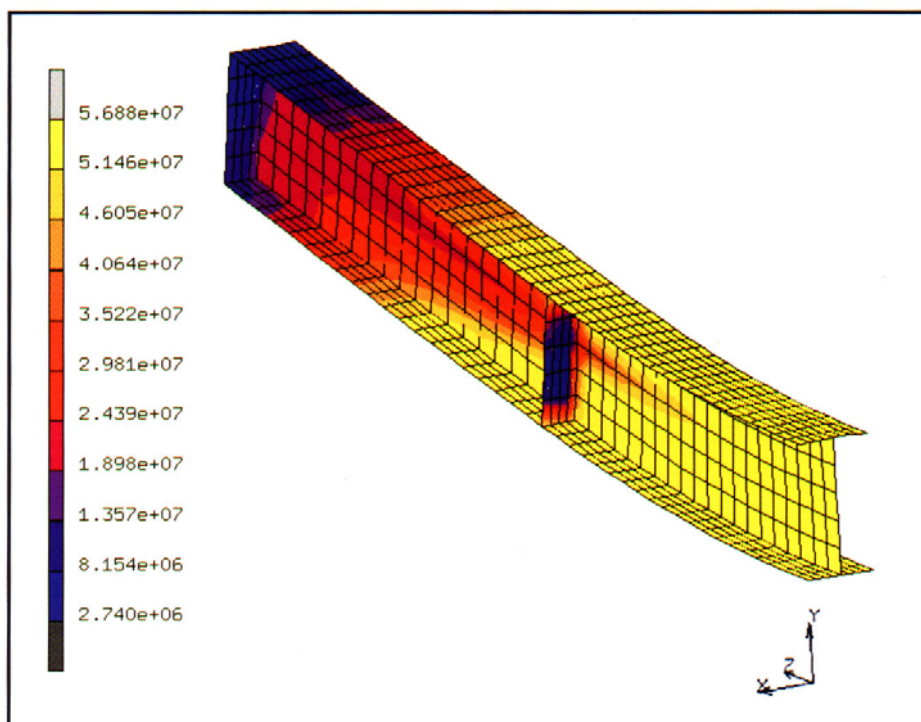


Figura 18: Trave tipo B - Fe 360.

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 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 ed il carico che porta a snervamento la trave a temperatura ambiente; si intuisce come questo parametro possa essere considerato per definire la “severità” della sollecitazione applicata. E’ possibile, pertanto, ricavare in funzione di questo parametro, l’andamento del tempo e della temperatura critici per i due materiali esaminati (Fe 360 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.

Le prove sperimentali

A seguito dello studio agli elementi finiti descritto, si sono condotte prove sperimentali presso i laboratori dei Vigili del Fuoco di Roma.

I campioni

Le travi campione sottoposte alle prove sono state realizzate per saldatura da lamiera di acciaio inossidabile del tipo AISI 304. Le dimensioni nominali sono analoghe a quelle utilizzate per i calcoli agli elementi finiti.

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). Lo scopo della prova a temperatura ambiente era di stabilire il carico limite per il comportamento elastico.

La sollecitazione è stata imposta mediante due martinetti secondo una geometria di flessione su quattro punti, mentre la curva di riscaldamento è stata quella prevista dalla UNI 7678. All'interno del forno sono state applicate otto termocoppie per il controllo della curva di incendio e altre 15 sul campione, per la mappatura termica dello stesso.

In corrispondenza della mezzeria della trave erano presenti due trasduttori per il controllo dell'inflessione e della velocità di inflessione.

Le prove sono state interrotte nel momento in cui la velocità di inflessione ha superato quella limite, calcolata con la formula:

$$V_{\text{lim}} = L^2/(9000 \times h)$$

dove L è la distanza tra gli appoggi, in millimetri, e h è l'altezza di calcolo del campione in prova. Il tempo trascorso tra l'inizio dell'esposizione e il momento di fine prova è il tempo di collasso.

La prova di inflessione a temperatura ambiente, secondo lo schema di figura 19, ha evidenziato che il valore limite del carico tale da non indurre fenomeni d'instabilità, nello schema statico adottato, era di 30 kN per ciascun martinetto.

La tre prove di resistenza al fuoco sono state condotte in maniera del tutto simile alla precedente, con carico ai martinetti rispettivamente di 10, 15 e 30 kN.

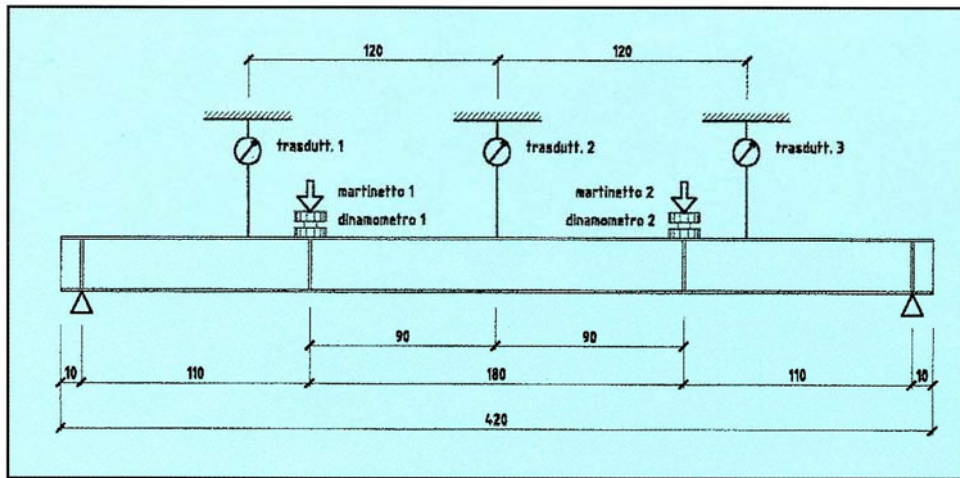


Figura 19: Rappresentazione schematica della prova meccanica a temperatura ambiente.

Risultati

I risultati delle prove sperimentali in piena scala sono riportati nelle da 20 a 23, unitamente ai risultati dell'elaborazione per mezzo del calcolo (FEM). Nelle figure vengono riportate rispettivamente la temperatura critica ed il tempo critico per il collasso per le due diverse tipologie di trave considerate. Il confronto con le prestazioni del tradizionale acciaio al carbonio Fe 360 è effettuato soltanto con i valori calcolati, poiché non erano disponibili dati sperimentali su quest'acciaio.

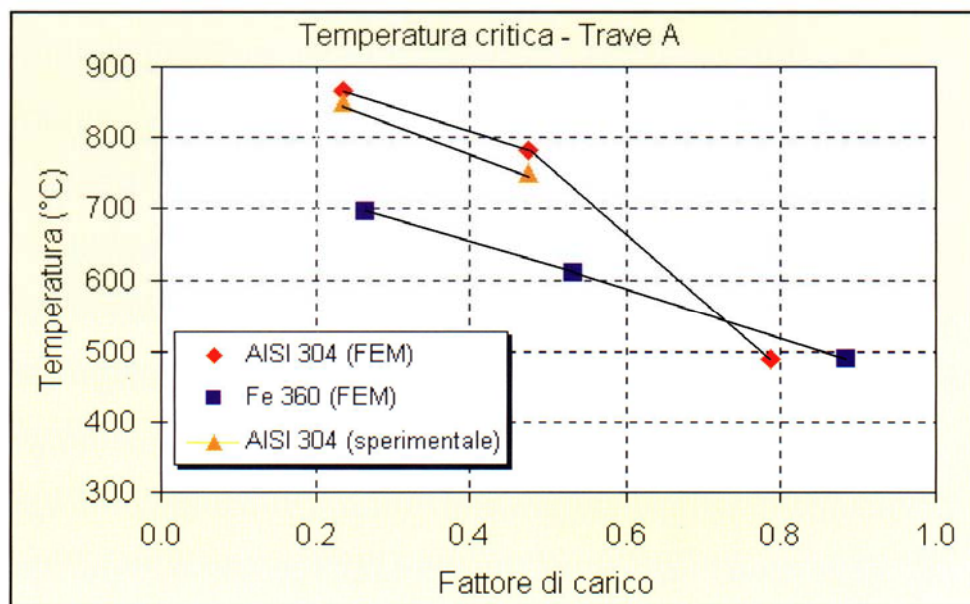


Figura 20: Temperatura critica trave A.

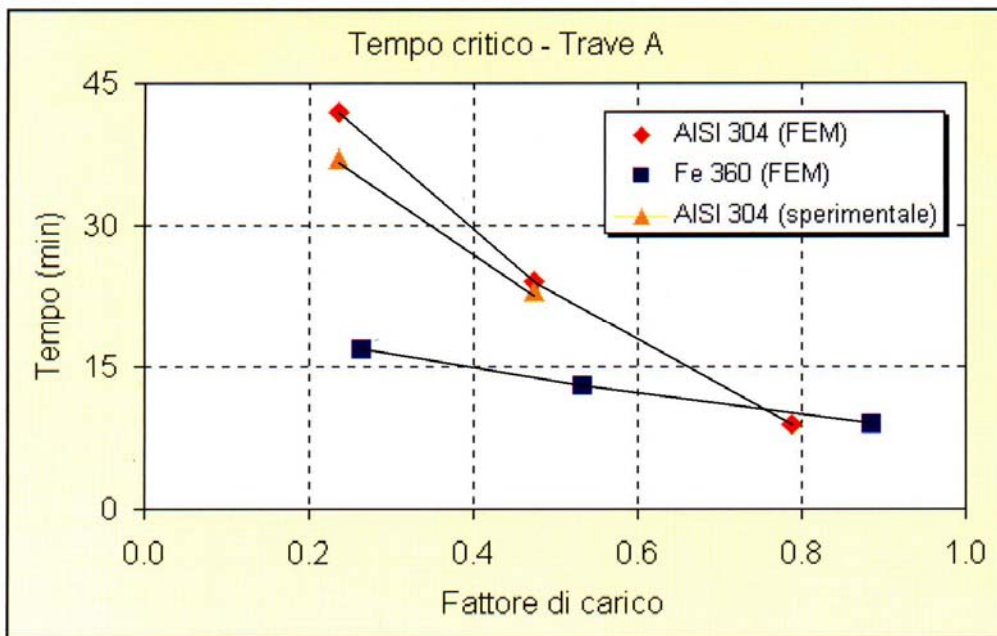


Figura 21: Tempo critico trave A.

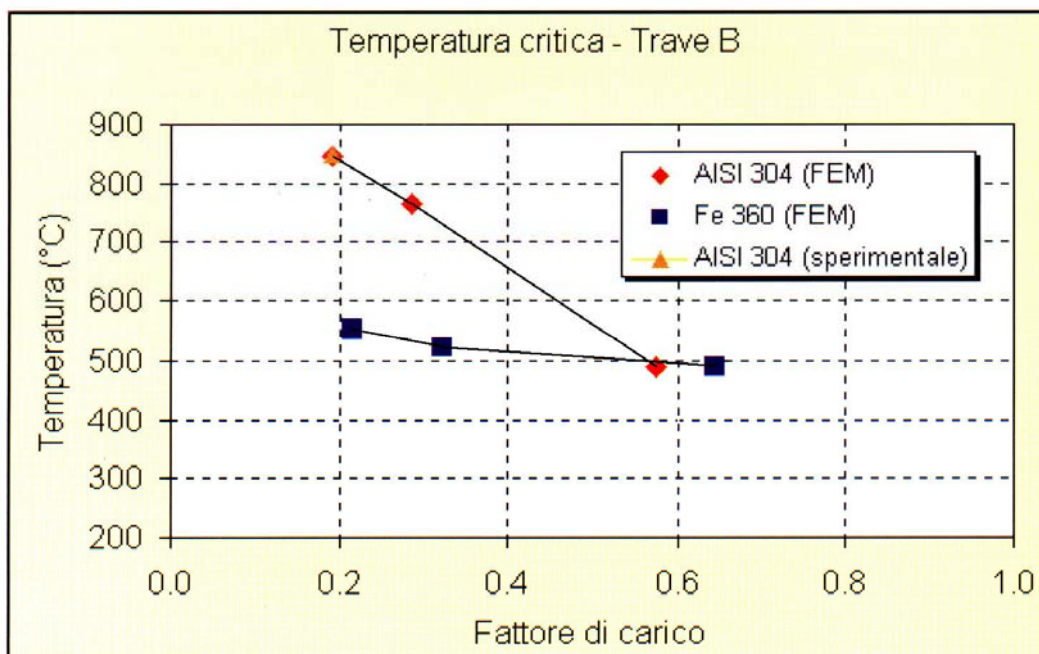


Figura 22: Temperatura critica trave B.

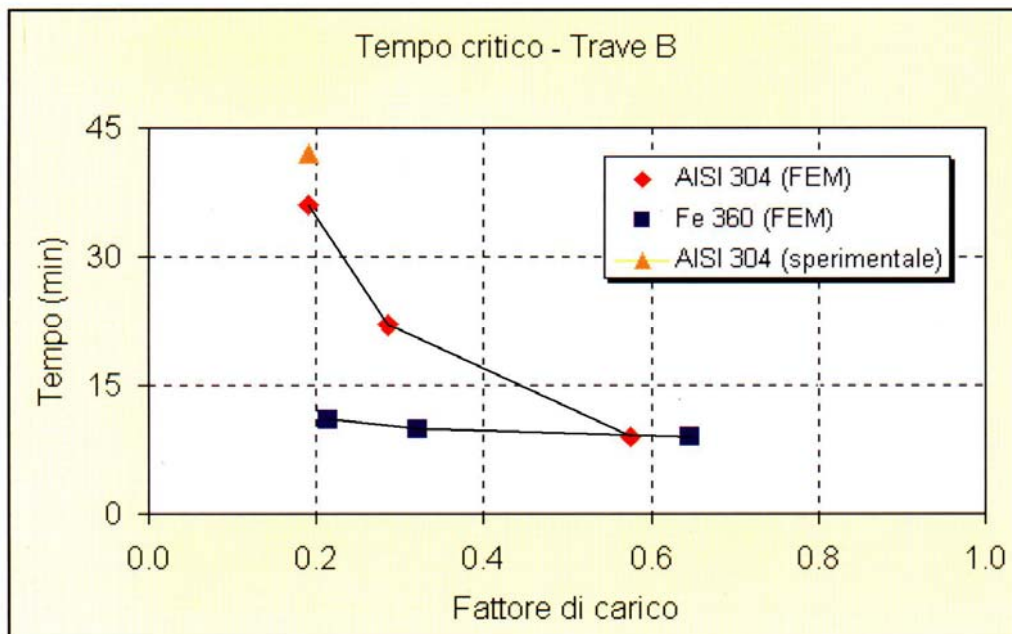


Figura 23: Tempo critico trave B.

In primo luogo, si può constatare l'ottimo accordo ottenuto tra previsione numerica e sperimentazione relativamente all'acciaio 1.4301. Ciò rende legittimo il confronto tra inox e acciaio al carbonio, per il quale, come detto, sono disponibili solo i valori calcolati.

Dai grafici si nota che al crescere del carico, la temperatura critica si abbassa. Infatti, ad una più elevata tensione applicata deve far riscontro una corrispondente resistenza a snervamento che si ottiene per temperature decrescenti. Perciò, in corrispondenza di elevati **“fattori di carico”** le temperature ed i tempi critici per i due materiali, tendono a coincidere; ove sono richieste tensioni di snervamento più elevate, con temperature che non possono superare i 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 arriva fino a 650-800°C circa, che è considerato quello più critico per le strutture metalliche sottoposte a carico di incendio.

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

(Le prove descritte e le elaborazioni dei dati sono state condotte presso il Centro Studi ed Esperienze Antincendi dei VVFF di Roma in collaborazione con il Centro Sviluppo Materiali, grazie al supporto finanziario della società ThyssenKrupp Acciai Speciali Terni)

Altre esperienze

I risultati sopra esposti trovano conferma in altre esperienze condotte in Italia e all'estero. In particolare sempre il Centro Sviluppo dei materiali ha eseguito una simulazione di esposizione a carico termico secondo ISO 834 di una travatura reticolare, al fine di evidenziare i diversi comportamenti della medesima struttura realizzata con il classico acciaio al carbonio da costruzione Fe 360 e con due diversi tipi di acciaio inossidabile: EN 1.4301 (AISI 304) e 1.4401 (AISI 316). L'analisi ha mostrato che, per i carichi applicati, il tempo critico di collasso delle due strutture in acciaio inossidabile è considerevolmente più lungo rispetto a quello del convenzionale acciaio da costruzione: circa 15 minuti per la struttura in AISI 304, 29 minuti circa per quella in AISI 316 e 10 minuti circa per quella in Fe 360.

Anche in Inghilterra (Steel Construction Institute), in Finlandia (VTT) e Spagna (Universitat Politècnica de Catalunya) studi sperimentali hanno evidenziato la grande resistenza al carico di incendio degli acciai inossidabili testati, fornendo ulteriori informazioni utili per i progettisti che si accostino all'uso strutturale di questi materiali.

Le norme

I risultati ottenuti hanno permesso di fornire i dati necessari nelle norme inerenti la progettazione di strutture in acciaio soggette a carico di incendio.

Innanzitutto l'Eurocodice 3 (design of steel structures) nella Parte 1.2 (General rules – Structural fire design) prevede un'appendice dedicata espressamente agli acciai inossidabili.

In Italia la norma UNI 9503 "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio" è stata da poco revisionata. Nella sua nuova veste, pronta per l'inchiesta pubblica dopo essere passata al vaglio della Commissione di Ingegneria Strutturale dell'UNI, prevede espressamente la possibilità di applicazione anche agli acciai inossidabili, secondo le indicazioni contenute in un'apposita appendice.

Conclusioni

Sono state brevemente illustrate le peculiarità che rendono l'inossidabile un potenziale ausilio ad una progettazione che tenga in considerazione le problematiche legate ai fenomeni sismici:

- elevate caratteristiche meccaniche;
- elevata deformabilità prima della rottura;
- capacità di assorbire grosse quantità di energia;
- tenacità anche alle basse temperature.

Dalle esperienze condotte sono emerse le ottime caratteristiche di resistenza al fuoco dell'acciaio inossidabile.

Si può quindi affermare che l'acciaio inossidabile, in certe applicazioni strutturali, può diventare una valida alternativa alla classica soluzione di acciaio al carbonio rivestito con vernice intumescente.

Aspetto importante da sottolineare è che, grazie alla sua naturale resistenza alla corrosione e durabilità, l'inossidabile assicura che queste caratteristiche rimangano inalterate nell'intero arco di vita utile del componente, senza bisogno di interventi di manutenzione. Ciò è tanto più

rilevante se si inquadra la progettazione anche in un'ottica di valutazione dei costi sull'intero ciclo di vita (LCC).

Bibliografia

- 1) M. Barteri, V. Boneschi “Structural stainless steel: anti-seismic and fire-resistant” 9th Nordic Steel Construction Conference, Helsinki, Finland, 18-20 giugno 2001.
- 2) Acciaierie Valbruna, catalogo Reval.
- 3) G. Barba, M. Forin “Armature in acciaio inox: normative e applicazioni”, Convegno “Costruire Inox – Aspetti strutturali, normative, esempi”, Centro Inox, Bologna SAIE '98, 15 ottobre 1998.
- 4) T. Ala-Outinen “Fire resistance of austenitic stainless steel Polarit 725 (EN 1.4301) and Polarit 761 (EN 1.4571)”, VTT Research Notes 1760, Espoo, Finland, 1996.
- 5) T. Oksanen and T. Ala-Outinen “Stainless steel compression members exposed to fire”, VTT Research Notes 1864, Espoo, Finland, 1997.
- 6) B. Zhao, “Material behaviour at elevated temperatures” Final Report to the ECSC, 2000.
- 7) N. Baddoo and L. Gardner “Member behaviour at elevated temperatures” Final Report to the ECSC, 2000.