

**STRUTTURE RETICOLARI IN ACCIAIO INOSSIDABILE:
SIMULAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DI RESISTENZA AL FUOCO**

**STAINLESS STEEL RETICULAR STRUCTURES:
FIRE RESISTANCE FINITE ELEMENTS SIMULATION**

M. Barteri ¹, V. Boneschi ², T. Coppola ¹, C. Sciaboni ¹

¹ Centro Sviluppo Materiali, Via di Castel Romano 100/102, 00129 Roma

² Centro Inox, Piazza Velasca 10 – 20122 Milano

SOMMARIO

La direttiva sui prodotti da costruzione pone un forte accento sulla tematica della resistenza al fuoco; la sicurezza delle strutture in caso di incendio passa attraverso la conoscenza delle prestazioni dei diversi materiali alle elevate temperature. Il grosso lavoro che si sta facendo per la stesura degli Eurocodici relativi a tale argomento ne è testimonianza.

In questa memoria si presentano i risultati della simulazione agli elementi finiti del comportamento di una travatura reticolare soggetta al carico termico previsto dalla ISO 834; in particolare si evidenzieranno 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 mostra 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.

ABSTRACT

The construction product directive strongly emphasises the theme of fire resistance; the structure safety in case of fire depends on the knowledge of the various materials behaviour at high temperatures. The big work that has been done for the drawing up of Eurocodes truly proves that statement.

This paper presents the results obtained through the finite elements simulation of a fire loaded structure, in accordance with ISO 834 standard. Particularly, the different behaviours of the same structure, made of the typical Fe 360 construction carbon steel and of two stainless steel grades, EN 1.4301 (AISI 304) and EN 1.4401 (AISI 316), will be compared. The analysis shows that, with the applied load, the critical collapse time for the two stainless steel structures is considerably longer than the construction steel's one: about 15 minutes for the structure made of AISI 304, about 29 minutes for the one made of AISI 316 and about 10 minutes for the one made of Fe 360.

1. Premessa

La possibilità di utilizzare l'acciaio inossidabile in applicazioni di tipo strutturale è stata più volte verificata dal punto di vista esclusivamente tecnico (resistenza meccanica, formabilità, giunzione, etc.).

Nel mondo delle costruzioni civili sempre maggiore interesse suscitano le soluzioni costruttive appartenenti a quella che viene definita "architettura trasparente": vetrate strutturali, strutture reticolari di grande luce, ecc..

In questo ambito l'acciaio inossidabile sta avendo un ruolo sempre più importante per le sue caratteristiche estetiche (il suo aspetto "neutro" ben si sposa con le esigenze di questo tipo di soluzioni), per la sua inalterabilità nel tempo e conseguente eliminazione del problema manutenzione, ma certamente anche per le sue caratteristiche meccaniche che lo rendono a tutti gli effetti un materiale da costruzione.

Legato a quest'ultimo punto è il tema di questa memoria.

Infatti il mantenimento delle caratteristiche meccaniche ad elevata temperatura degli acciai inossidabili austenitici è un parametro da tenere ben presente nel settore delle costruzioni civili, laddove alla capacità di resistenza al fuoco debba essere abbinata una funzione estetica ed architettonica della struttura portante stessa. Si potrà evitare l'uso delle vernici intumescenti o dei rivestimenti isolanti a protezione della struttura stessa.

Proprio le strutture reticolari spaziali utilizzate nelle coperture (aerostazioni, stazioni ferroviarie, impianti sportivi, padiglioni,...) sono un esempio in cui gli elementi portanti stessi sono lasciati deliberatamente in vista come elemento architettonico di primaria importanza.

In questo lavoro verrà presentato il risultato della simulazione agli elementi finiti (eseguita con il codice general purpose MSC-MARC) di una struttura reticolare soggetta ad un carico termico secondo ISO 834.

In particolare si sono confrontati i dati relativi all'impiego di tre differenti tipo di materiali per l'allestimento della struttura:

- acciaio inossidabile EN 1.4301 (AISI 304)
- acciaio inossidabile EN 1.4401 (AISI 316)
- acciaio da costruzione Fe 360.

2. Scopo del lavoro

Lo scopo del lavoro è mettere a confronto l'acciaio Fe 360 con l'AISI 304 e 316, valutando l'influenza delle caratteristiche meccaniche ad elevata temperatura sulla resistenza al fuoco tramite la determinazione del tempo critico di collasso della struttura.

3. Materiali

Sono stati scelti tre tipi di materiali differenti al fine di metterne in evidenza il diverso comportamento al fuoco. In particolare sono stati testati i seguenti materiali:

- AISI 304 (EN 1.4301)
- AISI 316 (EN 1.4401)
- Fe 360

Data la consistente variazione nel tempo del carico termico imposto alla struttura, sono state assegnate proprietà meccaniche dei materiali variabili con la temperatura.

In particolare per entrambi gli acciai inox sia il modulo di Young che lo snervamento e la legge d'incrudimento sono stati assegnati come dipendenti dalla temperatura, mentre per l'Fe360 si è considerata una legge d'incrudimento indipendente.

Le proprietà meccaniche dei tre materiali utilizzate nelle simulazioni sono descritte di seguito.

In fig. 1 è riportato l'andamento del modulo di Young in funzione della temperatura. Il coefficiente di Poisson è pari a 0.3. In fig. 2 è riportato l'andamento della tensione di snervamento in funzione della temperatura. Infine, nelle figure 3-5 è riportato l'influenza della temperatura sull'incrudimento per i tre materiali. Le curve per l'AISI 304 e 316 sono derivate da prove sperimentali, mentre i dati per l'Fe360 sono derivate dalla normativa Eurocode 3.

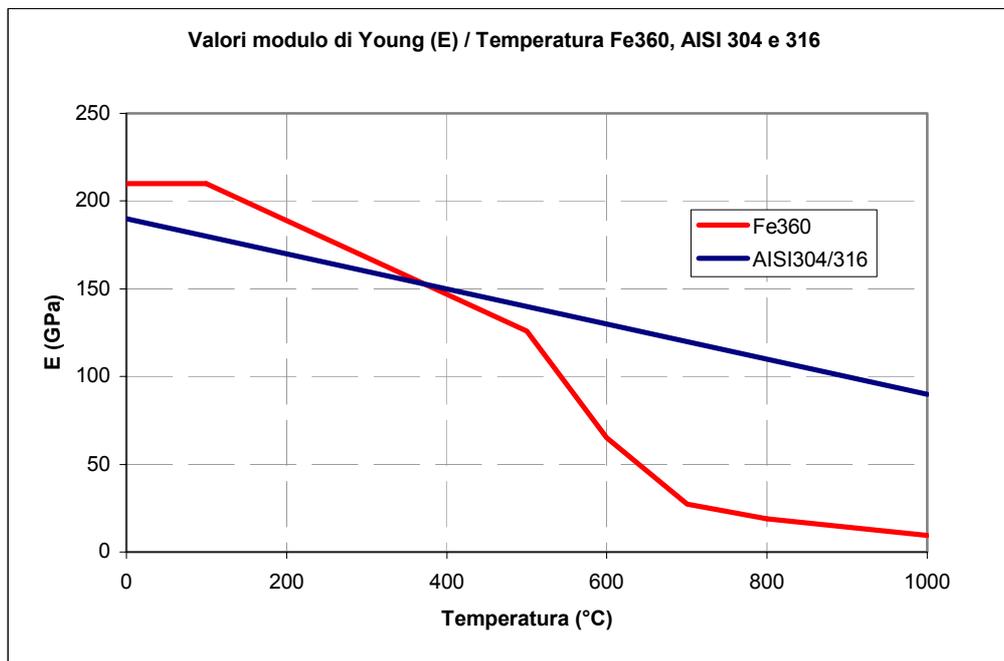


Figura. 1. Modulo di Young (E) in funzione della temperatura.

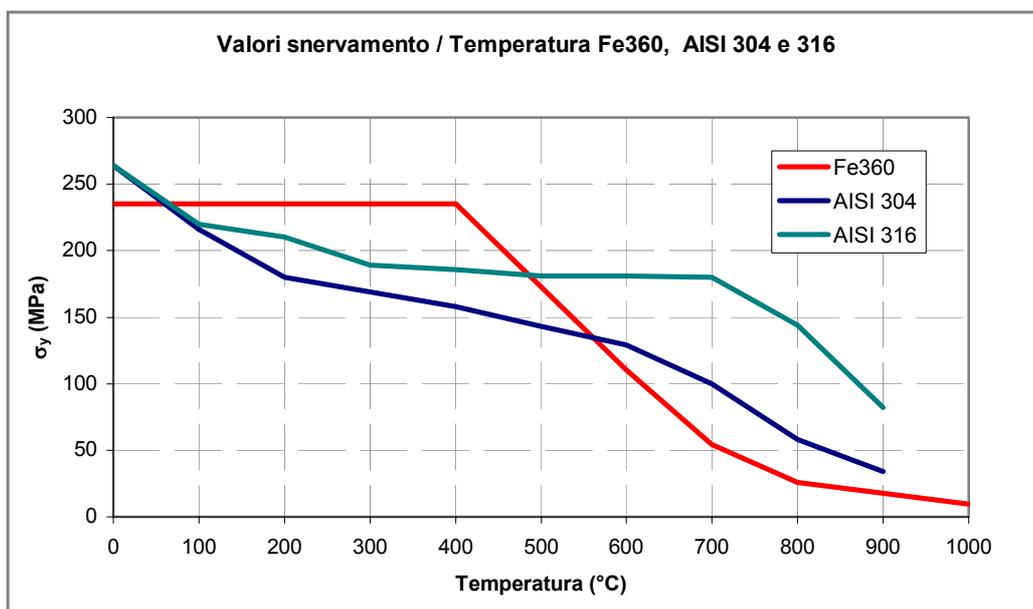


Figura 2. Tensione di snervamento in funzione della temperatura.

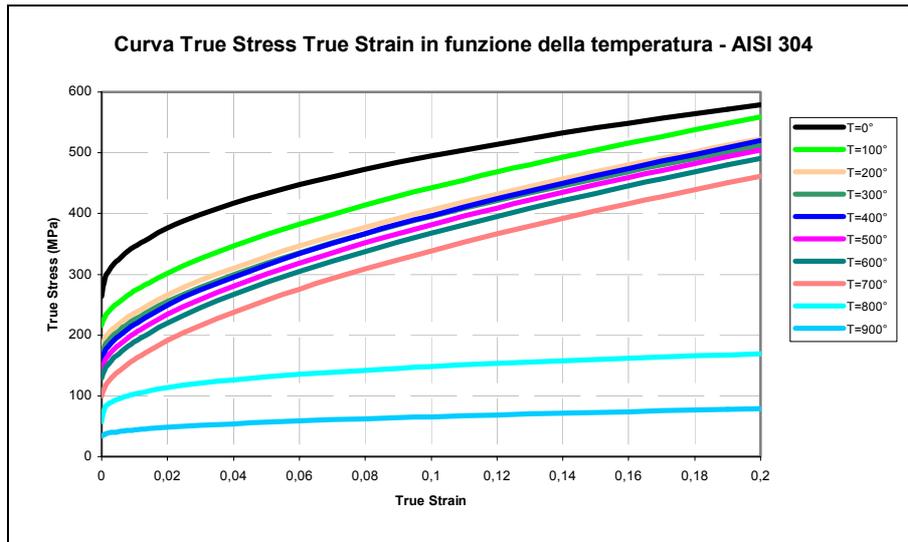


Figura 3. Curva tensione-deformazione in funzione della temperatura per l'AISI 304.

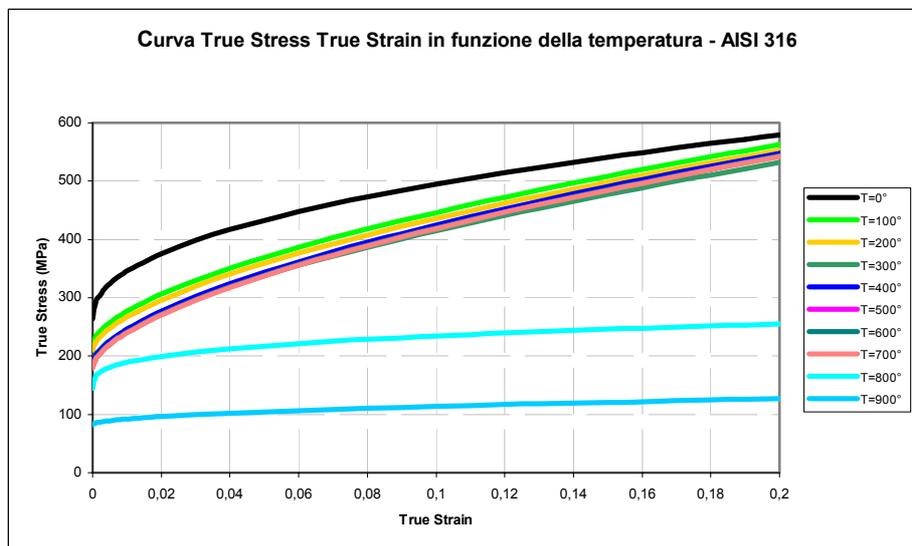


Figura 4. Curva tensione-deformazione in funzione della temperatura per l'AISI 316.

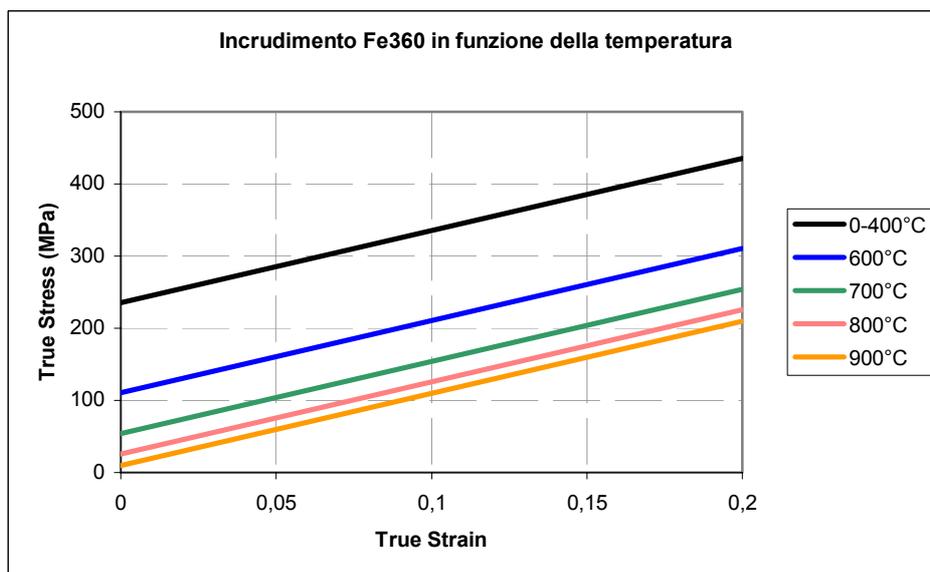


Figura 5. Curva tensione-deformazione in funzione della temperatura per l'Fe360.

4. Struttura

Le strutture reticolari spaziali per coperture sono realizzate con aste tubolari convergenti in nodi (fig. 6). La maglia elementare è tipicamente a piramide con base quadrata, anche se, per strutture più complesse (volte, cupole, etc.), la base può avere lati a differente lunghezza. Per l'analisi successiva si fa riferimento ad un tipico sistema commerciale di assemblaggio.



Figura 6. Esempio di struttura reticolare per copertura.

Le aste sono realizzate in tubo di acciaio e vengono unite tra loro ai vertici del reticolo mediante nodi strutturali di diversa conformazione a seconda della posizione (nodo intermedio, di spigolo o di appoggio). Per lo studio comparativo tra acciai è stato selezionato un tipico modulo avente le seguenti caratteristiche geometriche:

- Luce libera: 10.8 m
- Lato modulo: 1.8 m
- Larghezza struttura: 3.6 m
- Numero moduli: 6x2
- Carico sulla copertura: 900 kg/m²
- Peso proprio: 33.6 kg/m²

Le proprietà geometriche delle aste della struttura reticolare sono state definite come segue:

Tabella 1. Proprietà geometriche delle aste tubolari.

Tipo asta	Diametro esterno (mm)	Spessore tubo (mm)	Area sezione (mm ²)
a48.3x5	48.3	5	680.2
a60.3x5	60.3	5	868.7
a76.1x5	76.1	5	1117
a88.9x6.3	88.9	6.3	1635

In fig. 7 è mostrato lo schema unifilare della struttura, con evidenziate le differenti aste utilizzate per la realizzazione. La struttura è stata vincolata simulando una condizione di semplice appoggio ai quattro angoli della base. Il carico distribuito dovuto alla copertura, con l'aggiunta del peso

proprio, è stato considerato come concentrato ai nodi terminali delle aste (fig. 8), per un valore di 30.25 kN a nodo.

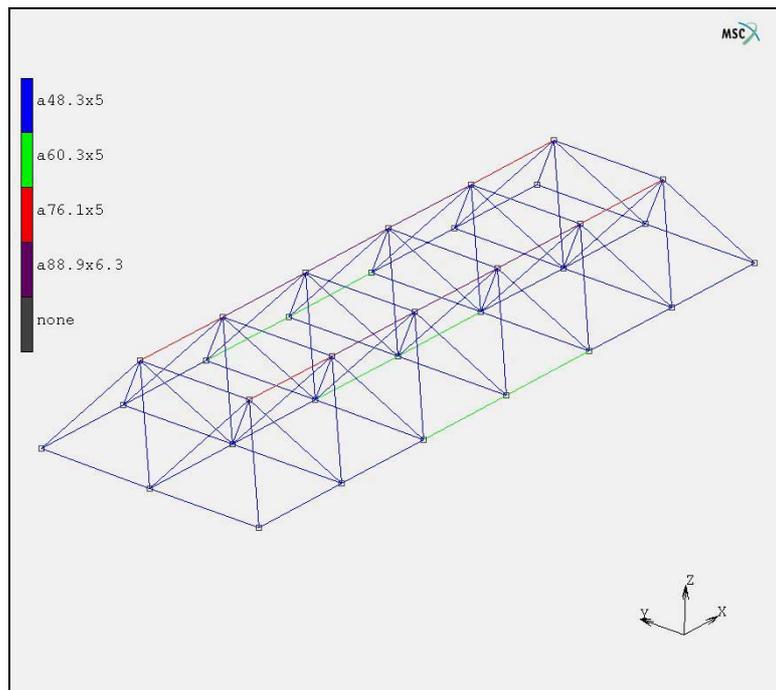


Figura 7. Modello della struttura esaminata e tipo di aste.

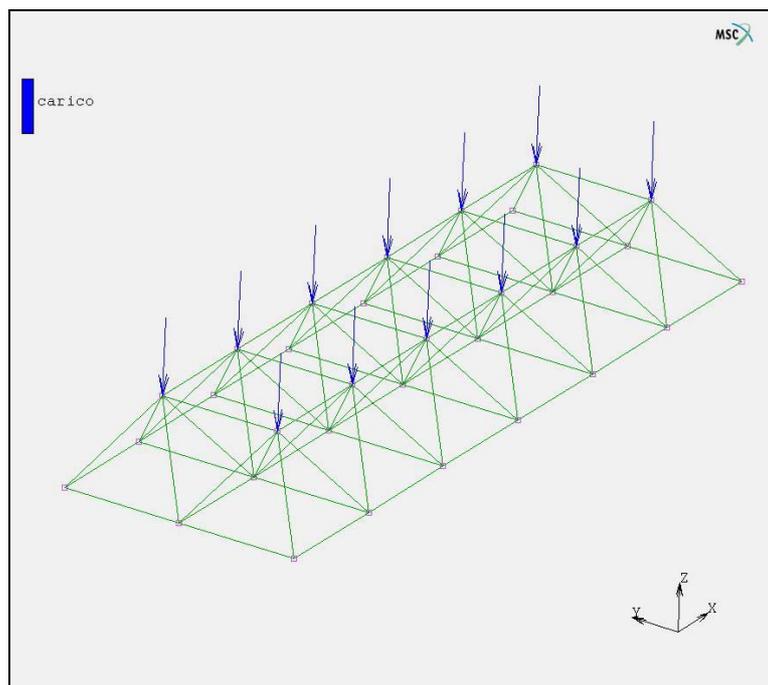


Figura 8. Sistema di carico della struttura.

La sollecitazione termica, e la sua evoluzione nel tempo, è stata applicata in accordo alla normativa ISO 834. La struttura è stata sottoposta ad una variazione uniforme di temperatura secondo la curva di fig. 9.

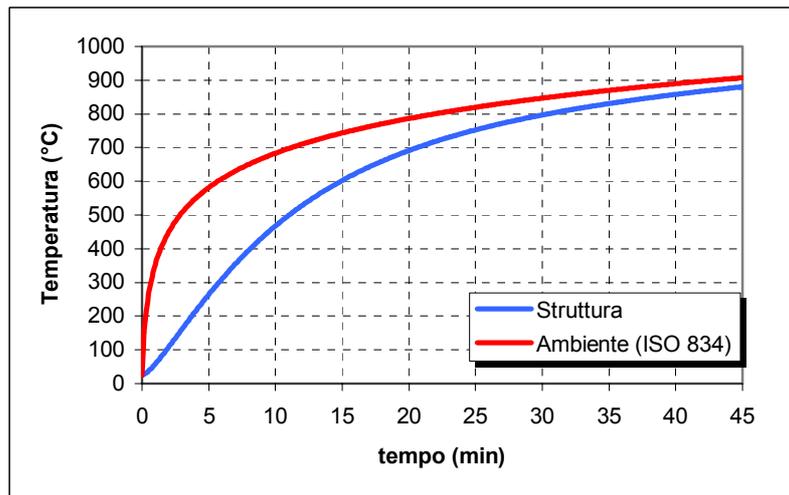


Figura 9. Curva di salita in temperatura degli elementi della struttura.

5. Risultati

Il risultato principale è rappresentato dall'andamento della freccia, in funzione della temperatura e del tempo per i tre materiali, registrata durante l'applicazione del carico termico.

La freccia è stata calcolata per il nodo posto alla base della struttura in mezzeria (Fig. 10).

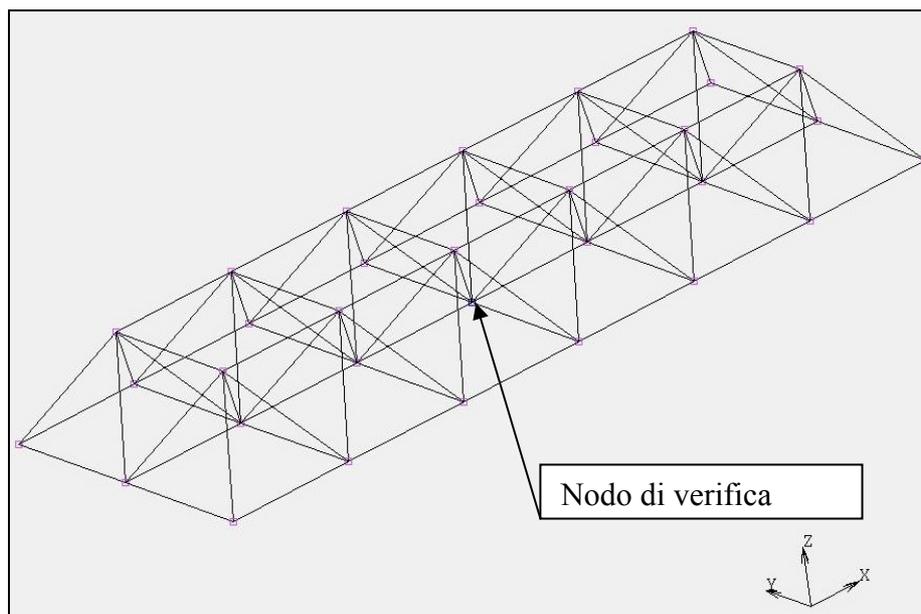


Figura 10. Punto di verifica della deflessione della struttura.

Nella fig. 11 è riportata la deformata della struttura sotto carico termo-meccanico confrontata con la configurazione iniziale. Le aste maggiormente sollecitate sono le quattro aste oblique poste ai quattro angoli della struttura. La tensione di lavoro per queste aste è di 188 MPa, corrispondenti ad un coefficiente di sicurezza di 1.25 riferito allo snervamento dell'Fe360.

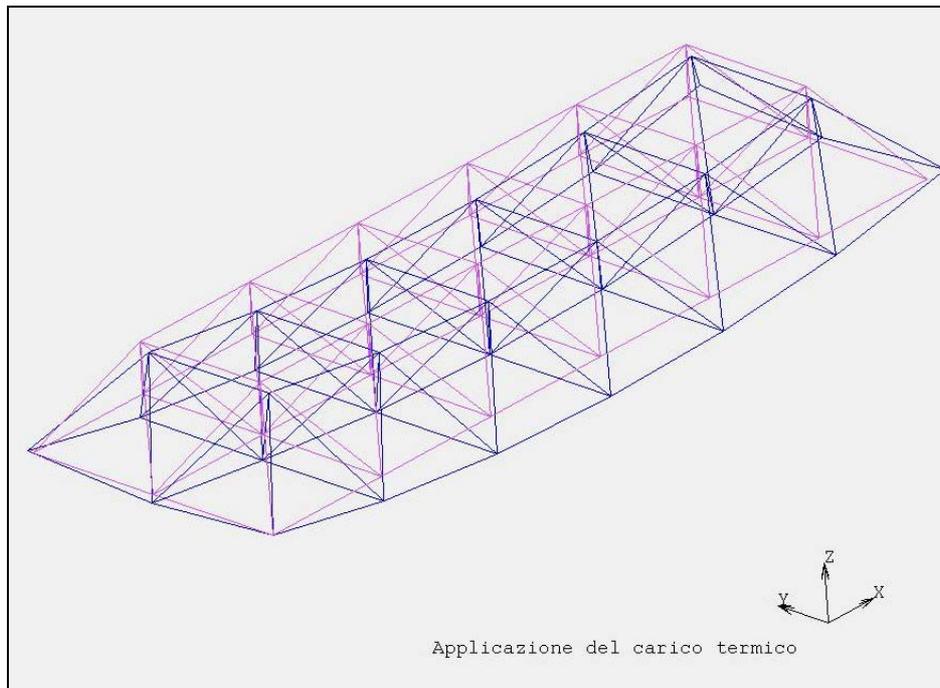


Figura 11. Deformata della struttura.

Nelle figure 12 e 13 sono riportati i diagrammi della freccia in funzione, rispettivamente, della temperatura e del tempo. Per determinare il tempo critico di resistenza della struttura bisogna confrontare la velocità di inflessione della struttura con la velocità critica di riferimento calcolata con la formula:

$$V_{lim} = L^2 / 9000h \quad [\text{mm/min}] \quad (1)$$

dove L è la luce libera e h l'altezza della struttura (le dimensioni vanno prese in mm). Per la struttura in esame la velocità critica vale 10.2 mm/min. La formula (1), valida a rigore per trave inflessa semplicemente appoggiata, è stata applicata alla struttura, avendo come obiettivo esclusivamente il confronto tra i tre materiali e non il calcolo esatto del tempo critico.

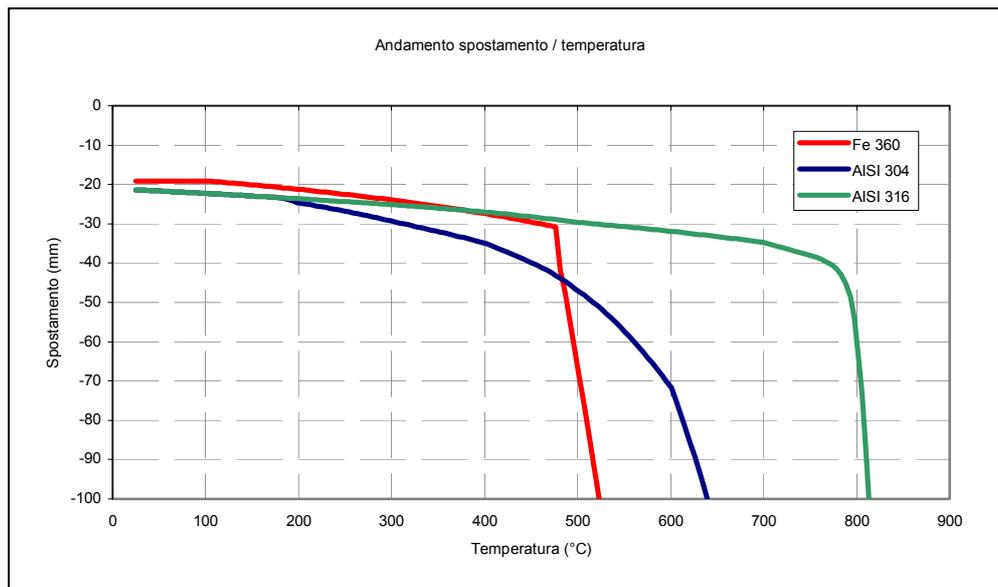


Figura 12. Freccia in funzione della temperatura.

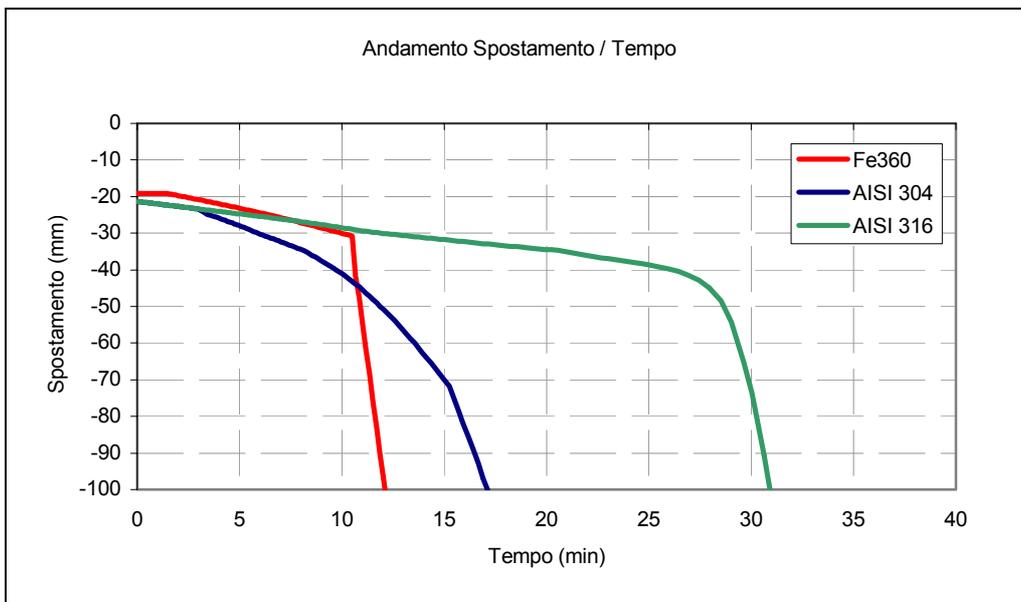


Figura 13. Freccia in funzione del tempo di esposizione al fuoco.

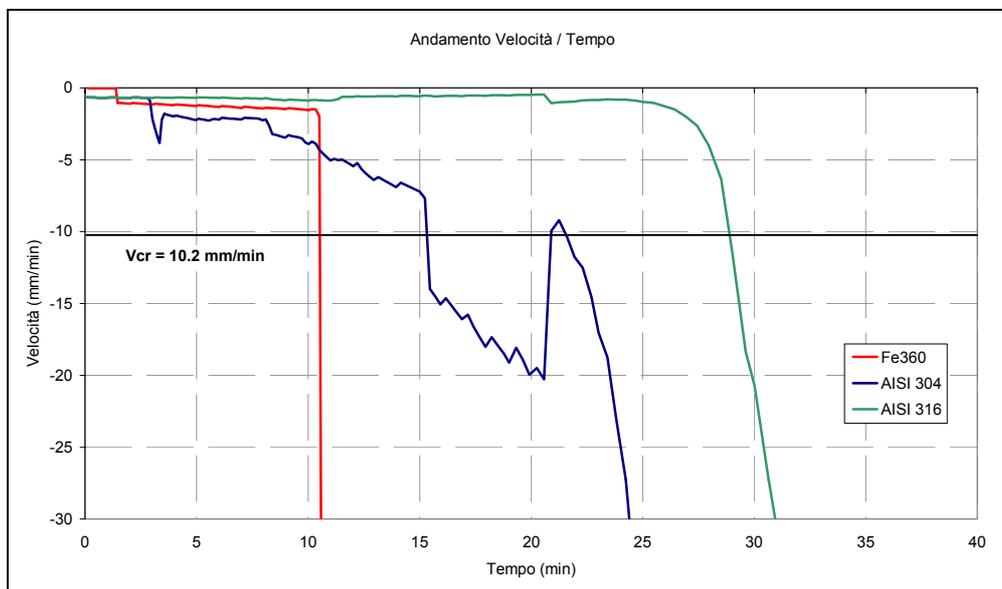


Figura 14. Velocità di inflessione in funzione del tempo di esposizione al fuoco.

Per determinare il tempo critico di resistenza sono state confrontati gli andamenti della velocità di deflessione della struttura in mezzeria in funzione del tempo. In fig. 14 sono riportati tali andamenti assieme alla linea che rappresenta il limite di velocità di deflessione calcolata secondo la formula (1).

I tempi e le corrispondenti temperature critiche sono riassunti nella tabella 2.

Tabella 2. Tempi e temperature critiche per le diverse strutture.

Acciaio	Tempo critico (min)	Temperatura critica (°C)
Fe 360	10:32	478
AISI 304	15:19	603
AISI 316	28:53	796

Si nota che la sostituzione dell'Fe360 con l'AISI 304 porterebbe ad un aumento del tempo critico di resistenza del 45% circa, mentre con l'AISI 316 si otterrebbe un incremento del 175%.

6. Conclusioni

E' stata esaminata l'applicazione di acciai austenitici come materiali strutturali per la realizzazione di strutture reticolari complesse, del tipo di quelle utilizzate per le coperture di grande luce, focalizzando l'attenzione sulla resistenza al fuoco.

E' stato selezionato un tipo di struttura con aste realizzate in tubi di acciaio collegate ai nodi tramite giunti spaziali. Sono stati messi a confronto tre acciai, il convenzionale Fe 360 e due inossidabili austenitici, gli AISI 304 e 316. E' stato realizzato un modello ad elementi finiti di una sottostruttura, sollecitata dal carico statico della copertura e dalla sollecitazione termica derivante dall'esposizione al fuoco, con curva di temperatura imposta agli elementi strutturali in accordo alla normativa ISO 834. L'analisi è stata finalizzata alla determinazione del tempo critico di collasso della struttura.

L'analisi ha mostrato che, per i carichi statici applicati, il tempo critico di collasso della struttura realizzata in Fe 360 è di 10 minuti circa, che diventano 15 per la struttura in acciaio AISI 304 e 28 per quella in AISI 316. Si è dimostrato quindi che l'utilizzo degli acciai inossidabili austenitici consente, rispetto al convenzionale acciaio al carbonio, di raddoppiare o triplicare i tempi di intervento dei VVFF.