

ANALISI DEL COMPORTAMENTO DI VERNICI INTUMESCENTI UTILIZZATE COME PROTEZIONE PASSIVA DI STRUTTURE METALLICHE NEI CONFRONTI DEL RISCHIO INCENDIO

D. AQUARO

Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari - Università di Pisa

U. BONESSIO - L. MAZZIOTTI

Centro Studi ed Esperienze - Ministero degli Interni - Roma

SOMMARIO

Il presente articolo riguarda l'utilizzo delle vernici intumescenti quale protezione termica di strutture portanti in acciaio nell'ipotesi che si verifichi un incendio. Le vernici, per il notevole incremento di volume prodotto dalle elevate temperature, isolano termicamente la struttura, impedendo il raggiungimento di temperature critiche. L'effetto delle vernici è limitato ad un intervallo di temperature (e quindi ad un periodo di tempo dopo l'innesco dell'incendio) in quanto al di sopra di 600°C si hanno delle trasformazioni chimiche che comportano un aumento della loro conduttività.

Nel presente lavoro, dopo una sintesi dello stato dell'arte relativo al comportamento delle vernici intumescenti e l'illustrazione di alcuni risultati di prove termiche su colonne in acciaio (travi a doppio T) rivestite con vernici intumescenti, è illustrato un modello, messo a punto con il codice di calcolo Marc [1], per la determinazione della distribuzione di temperatura su una struttura metallica (sezione di una trave a doppio T) protetta da vernici e sottoposta ad un flusso termico riconducibile ad un incendio.

Nel modello sono state ipotizzate le leggi di variazione della temperatura dei fumi causati dall'incendio (curva campione) e la variazione della conducibilità della schiuma (in cui si trasforma la vernice) con la temperatura. I dati della conduttività della vernice sono stati desunti dalla letteratura per un particolare tipo di vernice [4].

Il modello di calcolo, anche se descrive macroscopicamente il comportamento della vernice, ha permesso di individuare preliminarmente i parametri fondamentali che occorre determinare con prove sperimentali ad hoc necessari per valutare, con calcoli termo-meccanici, l'efficienza di tale protezione per le strutture in acciaio.

1. - INTRODUZIONE

Nell'ambito di una convenzione stipulata fra l'Università di Pisa e il Centro Studi ed Esperienze dei Vigili del Fuoco, è stato intrapreso un programma di ricerca volto all'analisi del comportamento delle vernici intumescenti, utilizzate per la protezione di strutture in acciaio nei confronti del rischio incendio.

Infatti, i normali acciai da costruzioni presentano una sensibile diminuzione delle loro caratteristiche meccaniche alle temperature che si sviluppano in un incendio, potendo non risultare più idonei a sopportare i carichi di progetto.

Pertanto per limitare il brusco decadimento della capacità portante delle strutture metalliche, in caso di incendio, si applicano su tali strutture speciali rivestimenti protettivi.

La norma UNI 9503 [11] illustra delle metodologie di calcolo per la determinazione della resistenza delle strutture (esposte ad un incendio), espressa come periodo di tempo in minuti durante il quale è garantito il non raggiungimento della temperatura critica di collasso della struttura. La procedura è applicabile a strutture non protette e a quelle protette da isolanti passivi quali fibre minerali, lastre di silicati, gesso, etc. o isolanti a base di calcestruzzo o laterizi.

Per i rivestimenti costituiti da 'vernici intumescenti' aventi uno spessore d_i ed una conducibilità λ_i che varia nel corso dell'esposizione al fuoco, la norma citata permette di utilizzare la procedura illustrata, utilizzando valori di spessore d_i e λ_i ricavati sperimentalmente.

Nel presente lavoro, è illustrato il comportamento delle vernici intumescenti e sono riportati alcuni risultati ottenuti in prove termiche su strutture in acciaio esposte al fuoco, ottenuti in diversi laboratori internazionali (Europa, Giappone, etc.).

I dati ricavati hanno permesso di elaborare un modello di calcolo con il Marc [1], per determinare la distribuzione di temperatura su una struttura in acciaio (sezione di una trave a doppio T) protetta da vernici e sottoposta ad un flusso termico riconducibile ad un incendio.

2. NATURA E COMPORTAMENTO DELLE VERNICI INTUMESCENTI

Le vernici intumescenti costituiscono una vasta classe di composti che include sia le vernici usate per proteggere strutture metalliche sia quelle utilizzate come protezione di ogni altro tipo di materiale come legno, plastica, etc. Ovviamente la composizione del prodotto intumescente varia a seconda del tipo di substrato da proteggere, tuttavia tutti i prodotti hanno delle caratteristiche in comune; tra queste quella peculiare, che ne caratterizza il comportamento, è la caratteristica di aumentare sensibilmente il volume se esposte all'azione del calore. In tal modo si viene a formare uno strato spugnoso, coibente, ossia una sorta di barriera ai fumi caldi di combustione. La funzione delle vernici è quella di isolare il supporto sottostante per un certo tempo, impedendo che l'aumento di temperatura della struttura sia tale da determinare deformazioni permanenti o addirittura il collasso della struttura.

Il calore determina sullo strato di prodotto intumescente applicato, la formazione di una schiuma (char) il cui spessore è proporzionale alla quantità di prodotto applicato e le cui caratteristiche di isolamento dipendono quasi esclusivamente dalla formulazione chimica del prodotto verniciante.

Un costituente principale di una classe di vernici è il polifosfato di ammonio [3] che per effetto termico forma un agente catalizzatore ('catalyst') (acido polifosforico) che reagendo con un composto organico ricco di carbonio, denominato agente carbonifico, dà luogo alla formazione di schiuma, liberando acqua di legame. La formazione del 'char' è determinata sia dai gas liberatisi nella reazione suddetta sia dai gas prodotti dalla decomposizione termica di un terzo componente della vernice, denominato spumogeno (spumific'), che in numerose vernici è la melamina.

Queste reazioni possono portare ad un aumento enorme di spessore dello strato isolante.

È stato dimostrato [6] che la bassa conducibilità delle schiume è attribuibile, anche alla presenza dei gas prodotti dalle reazioni suddette ed intrappolati nella struttura porosa della schiuma stessa. Questi gas intrappolati impediscono che i fumi caldi di combustione raggiungano il supporto metallico attraversando lo strato poroso di schiuma.

Le caratteristiche termiche variano notevolmente con la temperatura [7]:

- tra 280° e 350°C i componenti della vernice danno luogo alle reazioni chimiche descritte che conferiscono allo strato le caratteristiche di intumescenza

- tra i 350° e 430°C cominciano ad innescarsi alcune reazioni che portano alla formazione di nuove specie carboniose, che determinano un'incremento della viscosità dello strato schiumoso con conseguente perdita di alcune importanti proprietà isolanti della schiuma

- a 560° le caratteristiche isolanti dello strato di vernice diminuiscono notevolmente. Infatti le alte temperature raggiunte provocano la formazione di alcuni composti che rendono la struttura complessiva della vernice molto più rigida. Si formano cristalli e si determinano concentrazioni di sforzi intorno a tali cristalli che provocano la formazione e la propagazione di cricche all'interno dello strato isolante intaccando la sua continuità e compromettendone quindi irreversibilmente le caratteristiche protettive.

Uno dei problemi mostrati dai prodotti intumescenti è la loro scarsa stabilità strutturale. Infatti questi prodotti intumescenti non mantengono inalterate le loro proprietà dopo essere stati esposti a lungo a contatto con l'atmosfera e comunque le loro proprietà variano a seconda dell'ambiente a cui sono esposti.

Infatti alcune normative prevedono il controllo periodico delle caratteristiche di tali vernici con procedure di prova standardizzate.

3. METODOLOGIE DI VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO DI STRUTTURE IN ACCIAIO ESPOSTE AL FUOCO

Le normative di vari paesi (Usa, Giappone, Nazioni Europee) utilizzano, per descrivere l'effetto delle caratteristiche geometriche sul comportamento delle strutture di acciaio esposte al fuoco, il parametro S/V (m^{-1}), rappresentante il rapporto fra l'area esposta del profilo ed il volume. Tale parametro è chiamato fattore di massività nelle norme UNI, fattore di sezione (Section factor) nelle norme BS e fattore di profilo (Verhältniswert) nelle norme DIN. Tale parametro è anche dato dal rapporto fra il perimetro e l'area della sezione. Sezioni con un grande perimetro ricevono più calore rispetto a sezioni con un più piccolo perimetro e sezioni di grande area costituiscono pozzi di calore più grandi rispetto a quelle di piccola area. Pertanto delle sezioni piccole e spesse avranno un più lento aumento di temperatura rispetto a sezioni grandi e sottili. Pertanto il rapporto S/V è una misura della velocità con cui la struttura si riscalderebbe nell'esposizione al fuoco. Tanto maggiore è il valore del fattore di massività tanto maggiore sarà lo spessore di protezione richiesto per mantenere la struttura al di sotto della temperatura critica.

La temperatura critica è quel valore di temperatura che determina il raggiungimento dello stato limite della struttura (sottoposta ad un ben determinato livello di tensione).

La resistenza della struttura, dotata di un certo spessore di elemento di protezione, è definita mediante il periodo di tempo in cui essa rimane al di sotto della temperatura critica.

Prove di resistenza al fuoco, effettuate secondo le norme BS [9] hanno mostrato che resistono a 30 minuti all'esposizione al fuoco le seguenti strutture prive di elementi protettivi e ad un livello di sollecitazione corrisponde allo stato limite:

- colonne, esposte su quattro lati con fattore di massività non superiore a 50 m^{-1}
- travi, semplicemente appoggiate ed esposte su tre lati, con fattore di massività non superiore a 110 m^{-1} .

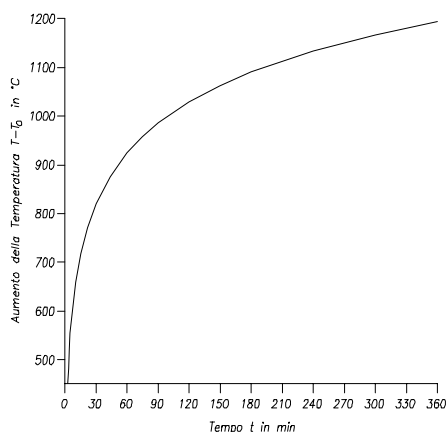


Fig. 1 - Curva campione temperatura-tempo prevista dalla norma UNI 7678 [5] per le prove termiche in forno simulanti le condizioni reali di incendio

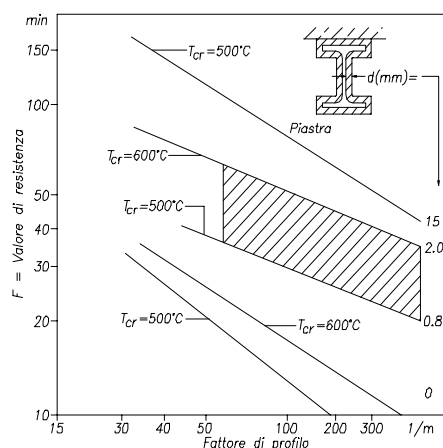


Fig. 2 - Confronto della resistenza al fuoco di elementi strutturali in acciaio senza protezione o protetti da vernici intumescenti o da piastre isolanti

In [9] si afferma che acciai da costruzioni tipo BS 4360 grado 43A provati a pieno carico (secondo BS476 parte 8) non presentano un collasso strutturale fino a che la temperatura non eccede i 550°C .

Nella Fig. 9 sono illustrati, in funzione della temperatura θ , il rapporto fra le tensioni di snervamento $f_{y\theta}/f_y$ a temperatura θ e a temperatura ambiente e quello fra i moduli di elasticità E_θ/E , previsti dalle norme UNI [11] per acciai normali da carpenteria laminati a caldo. Da tale grafico si nota che a temperatura di 550°C la tensione di snervamento ed il modulo di elasticità risultano pari a circa il 40% del valore a temperatura ambiente. Pertanto per tali acciai è giustificata l'affermazione contenuta in [9] solo se fossero utilizzati coefficienti di sicurezza rispetto allo snervamento maggiori di 2.5.

Nella Fig.2 sono illustrati alcuni risultati ottenuti da ricercatori tedeschi [10] in prove effettuate secondo normative emesse dal Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT). Nella fig.2 sono riportati (in scala doppiamente logaritmica) i valori di resistenza in minuti in funzione del fattore di massività, per due temperature critiche ($T_{cr}=500^\circ\text{C}$ e 600°C) ottenuti da [10] su profili a doppio T senza protezione o con vernici isolanti aventi uno spessore del film secco variabile fra 0.8 e 2 mm, o con piastre isolanti di spessore $s=15 \text{ mm}$.

In [10] non sono indicate le caratteristiche termiche delle vernici e della piastra isolante., tuttavia è possibile ricavare alcuni dati comparativi di pratica utilità. Facendo riferimento ad un profilo di fattore di massività 100 m^{-1} (corrispondente all'incirca ad un profilo HEB300) ed una temperatura critica $T_{cr}=500^\circ\text{C}$, dalla Fig.2 si ricavano le seguenti resistenze :

- per profili senza protezione: 12 min
- per profili protetti da 0.8 mm di vernici intumescenti: 30 min
- per profili protetti da piastre di 15 mm : 80 min.

L'area tratteggiata in Fig.2 indica le resistenze che possono essere ottenute, con spessori di vernice variabili fra 0.8 e 2 mm, da profili aventi fattori di massività compresi fra 60 e 300 m^{-1} e temperature critiche variabili fra 500 e 600°C . In particolare per una $T_{cr}=600^\circ\text{C}$ e spessore del film $d=2 \text{ mm}$ si raggiungono resistenze comprese fra 60 min a 35 min al variare del fattore di massività fra 60 e 300 m^{-1} .

La normativa UNI 9503 [11] fornisce risultati identici per quanto riguarda la resistenza di profili in acciaio senza protezione. La Fig. 3, ottenuta elaborando i dati del prospetto VI della UNI 9503, mostra che un profilo con $S/V=100 \text{ m}^{-1}$ raggiunge la temperatura di 500°C in 15 min e quella di 600°C in 17.5 min.

Nella fig.3 è riportata la curva temperatura-tempo di [5] e la curva per un fattore di massività di 200 m^{-1} . Dalla fig.3 si nota che dopo 45 min. la differenza di temperatura fra fumi ed acciaio è di circa 20°C e tale differenza è tanto minore quanto maggiore è il rapporto S/V .

4. - COMPORTAMENTO DELLE VERNICI INTUMESCENTI ESPOSTE AL FUOCO

Il DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) ha approvato nel 1994 per la prima volta un materiale intumescente capace di conferire una resistenza F90 (ossia una resistenza a 90 min). L'approvazione riguarda l'uso in ambienti interni ed esterni su colonne di profilo aperto con un fattore di emissività $S/V \leq 160 \text{ m}^{-1}$. [4]

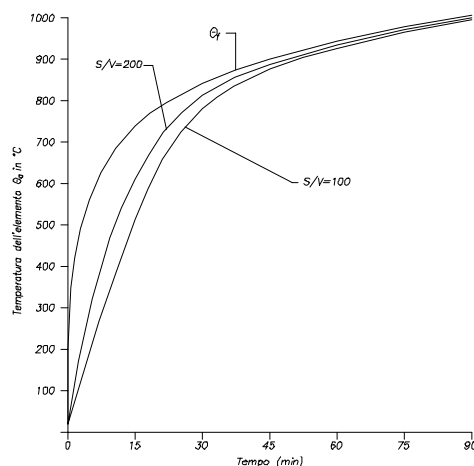


Fig. 3 - Temperatura di profili di acciaio non protetti esposti al fuoco (θ_f , temperatura dei fumi) [11]

Il nome del prodotto è Chartek IV. In [4] è riportata l'andamento della conducibilità del rivestimento in funzione della temperatura (Fig.5). Nella Fig. 4 è illustrato l'aspetto della vernice intumescente (Chartek IV), disposta su un profilo a doppio T, a seguito dell'esposizione al fuoco.



Fig.4 - Aspetto del ChartekIV utilizzato su un profilo a doppio T a seguito di esposizione al fuoco

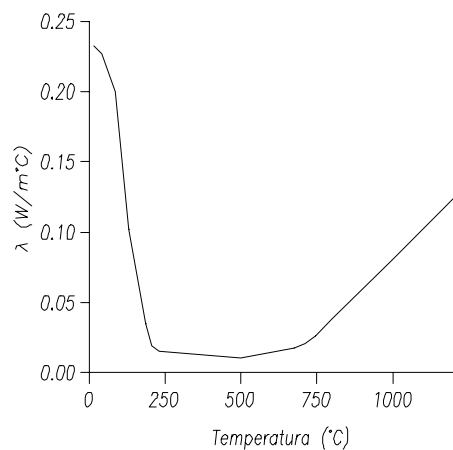


Fig.5 - Conducibilità termica di un rivestimento in ChartekIV in funzione della temperatura

L'andamento della conducibilità termica del Chartek in funzione della temperatura (fig.5) rispecchia i fenomeni che intervengono durante la fase della intumescenza e che sono stati illustrati nel par.2. Dal valore originario di $0.25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (a temperatura ambiente) si ha una brusca diminuzione fino al valore minimo di 0.012 che si raggiunge a circa 250°C . Tale valore minimo rimane praticamente costante fino ad una temperatura di circa 600°C , al di sopra della quale si ha un incremento pressoché lineare di conducibilità che raggiunge il valore di 0.12 a circa 1100°C .

I valori riportati in fig. 5, tratti da [4] sembrano sorprendentemente bassi . Purtroppo non e' stato possibile (per mancanza di dati) confrontare tali valori con quelli di prodotti commerciali che presentano prestazioni simili.

In [9] sono riportate una serie di schede tecniche relative a prodotti intumescenti da utilizzare quale protezione di strutture di acciaio esposte al fuoco. I dati riportati sono stati ricavati dai documenti di approvazione delle competenti Autorita'. Le schede tecniche descrivono le caratteristiche delle vernici e le modalita' di applicazione che permettono di ottenere un corretto spessore di rivestimento che e' collegabile alla resistenza in minuti di un profilo di acciaio di dato fattore di massivita'.

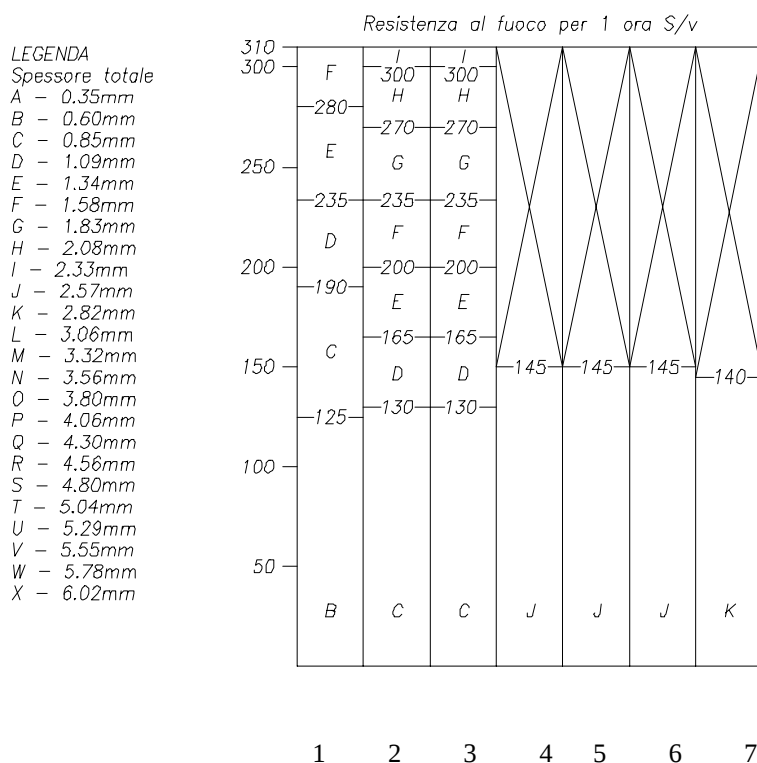


Fig.6 - Diagramma di calcolo per la determinazione dello strato di vernice (Nullifire S605) necessario per ottenere una resistenza al fuoco di 1 h per diversi fattori di massivita' e tipologie strutturali.[9]
 (1=trave a I scaldati su 3 lati; 2=trave a I scaldati su 4 lati; 3=colonne a I; 4=travi scatolari scaldati su 3 lati; 5=travi scatolari scaldati su 4 lati; 6= colonne a profilo scatolare quadrato; 7=colonne a profilo scatolare circolare)

La fig. 6 illustra un diagramma di calcolo (relativo al prodotto Nullifire S605) per determinare, in funzione del fattore di massivita' e della tipologia strutturale, lo spessore del rivestimento (a secco) che garantisce una resistenza al fuoco di 1 h. Gli spessori, indicati nella Fig.6 sono comprensivi di uno spessore di 0.1 mm corrispondente al sottofondo (primamano) e alla vernice di copertura decorativa.

Sono fornite le quantita' di vernice per metro quadro di superficie (g/m²)capaci di determinare a secco un determinato spessore. Approssimativamente 500 g/m² corrispondono a d uno spessore a secco di .25 mm. Spessori di circa 6 mm permettono di ottenere resistenze al fuoco di 2 h da profili ad I aventi fattori di massivita' di 210 ed utilizzati quali colonne o travi.

Non sono riportate nella scheda tecnica ne' le caratteristiche termiche (conducibilita',calore specifico, etc.) ne' la densita' del prodotto nella fase di esposizione al fuoco.

Il comportamento di tale prodotto e' stato analizzato in una prova di resistenza al fuoco secondo la norma giapponese JIS A 1304 [12].

In [12] e' stata analizzata una colonna di profilo H 300x300x10x15 di lunghezza effettiva 3500 mm e lunghezza esposta 3000 mm. Il carico di prova pari a 2100 KN corrisponde al carico di buckling ammissibile a temperatura ambiente (coefficiente di sicurezza 1.63).

Sono state utilizzate due tipi di vernici intumescenti commercializzati da due diversi fornitori :

- Desowag (prodotto in Germania)
- Nullifire (prodotto in U.K.).

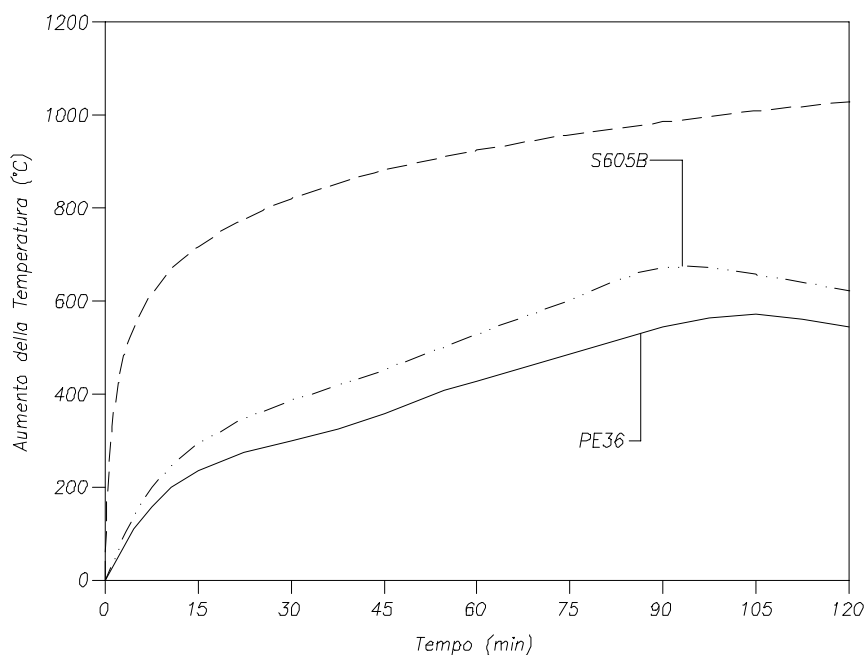


Fig. 7 - Andamento della temperatura del profilo di acciaio H300x300 rivestito di materiale intumescente per uso interno (Desowag-PI36 e S602A-Nullifire) in funzione del tempo.

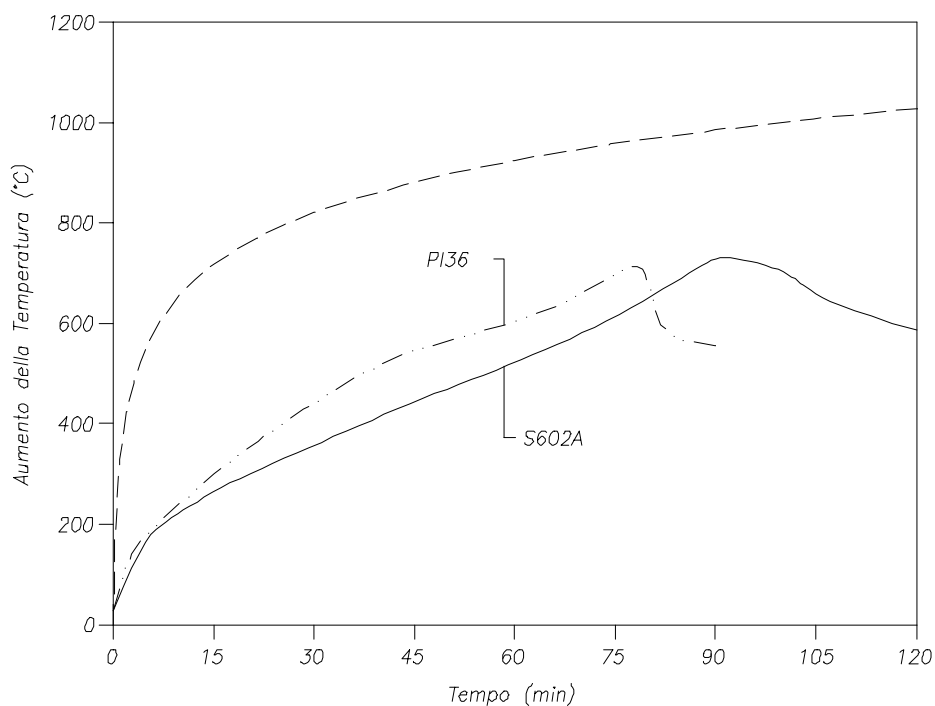


Fig. 8 - Andamento della temperatura del profilo di acciaio H300x300 rivestito di materiale intumescente per uso esterno (Desowag-PE36 e S605B-Nullifire) in funzione del tempo.

Per ciascuno di essi e' stato utilizzato sia un prodotto per uso interno sia uno per uso esterno.

Gli spessori di rivestimento (comprensivi del sottofondo e dello strato protettivo) utilizzati sono stati i seguenti :

- uso interno:

Desowag (PI36): 2.33 mm (corrispondente a 3 mani a 1200 g/m²)

Nullifire (S602A): 1.35 mm (corrispondente a 5 mani a 500 g/m²)

- uso esterno:

Desowag (PE36): 2.09 mm (corrispondente a 3 mani a 1200 g/m²)

Nullifire (S605B): 1.24 mm (corrispondente a 5 mani a 500 g/m²)

In base al diagramma di Fig. 6 la trave con rivestimento di Nullifire dovrebbe avere una resistenza al fuoco superiore ad 1 ora (spessore richiesto 0.85 mm).

Nelle Figg. 7 e 8 sono riportati gli andamenti delle temperature medie dei profili di acciaio rivestiti di vernici intumescenti in funzione del tempo, ottenute nella prova di resistenza al fuoco da [12]. Nelle stesse figure e' riportata la curva campione temperatura-tempo simulante la temperatura di esposizione al fuoco. Tale curva prevista dalle norme giapponesi coincide con quella riportata in Fig.1.

Nelle prove di Fig.7 a t=60min il profilo con vernice PI36 raggiunge la temperatura di 600°C e quello con vernice S602A la temperatura di 514°C. Mentre nella prova illustrata in Fig.8 (sempre all'istante t=60min.)il profilo con vernice PE36 raggiunge la temperatura di 428°C e quello verniciato con S605B la temperatura di 542 °C.

Nelle prove suddette la vernice esposta al fuoco assumeva uno spessore variabile fra 40 e 50 mm.

L'acciaio esaminato in [12] e' un acciaio ad elevata resistenza ad alta temperatura (la tensione di snervamento a 600°C e' 2/3 di quella a temperatura ambiente), pertanto la rottura e' avvenuta, per i diversi provini, ai seguenti istanti:

- profilo con vernice PI36: t=79 min (T=683°C)
- profilo con vernice PE36: t=94 min (T=546°C)
- profilo con vernice S602A: t=77 min (T=609°C)
- profilo con vernice S605B: t=84 min (T=637°C)

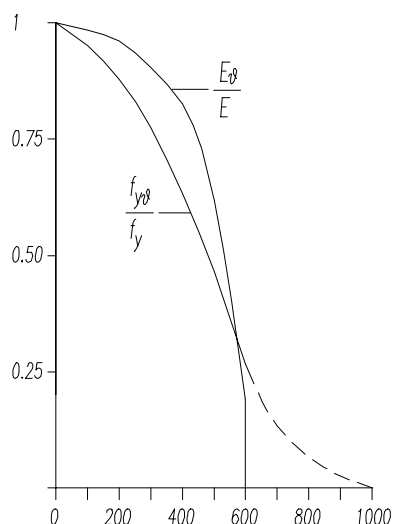


Fig. 9 - Variazione della tensione di snervamento e del modulo di elasticita' di acciai normali per carpenteria laminati a caldo secondo la UNI9503[11]

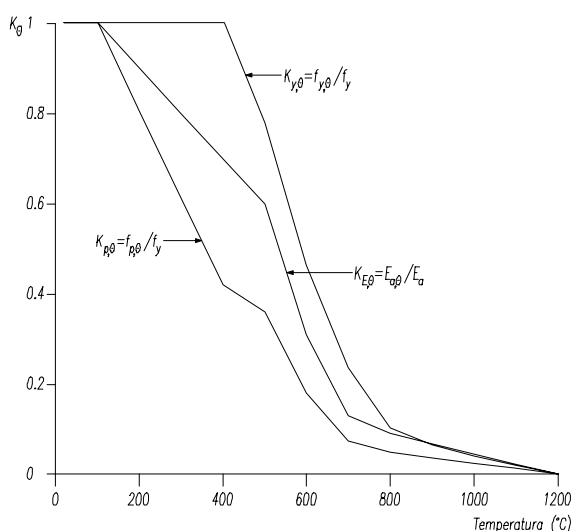


Fig. 10 - Variazione della tensione di snervamento, del limite di proporzionalita' e del modulo di elasticita' di acciai da costruzione secondo ENV 1993-1-2:1995 [13]

La Fig.9 illustra la variazione della tensione di snervamento e del modulo di elasticita' di acciai normali per carpenteria laminati a caldo, prevista dalla norma UNI 9503 [11]. Per questa tipologia di acciai, una struttura sollecitata in modo che il coefficiente di sicurezza (a temperatura ambiente) sulla tensione di snervamento sia pari a 1.5, raggiungerebbe una tensione di snervamento (coefficiente di sicurezza pari a 1) a 380°C. Pertanto i risultati di [12] mostrerebbero che solo il profilo con la vernice PE36 potrebbe avere una resistenza di 60 min. In tutti gli altri casi le resistenze per gli acciai della UNI 9503 sono poco superiori a 30 min. Diversa e' la conclusione se si considera il diagramma di Fig. 10 riportante gli stessi rapporti (oltre al rapporto fra i limiti di proporzionalita') tratti dalla norma ENV 1993-1-2:1995 [13]. In questo caso nelle stesse condizioni si potrebbe raggiungere una temperatura di 537°C e pertanto le prove dimostrerebbero che in tre casi su quattro le vernici hanno una resistenza R60.

5. - SIMULAZIONE DEL TRANSITORIO TERMICO DI UN PROFILO DI ACCIAIO RIVESTITO DI VERNICE INTUMESCENTE ED ESPOSTO AD UN INCENDIO

Per esaminare in modo piu dettagliato il fenomeno dell'incremento di temperatura di un profilo di acciaio ricoperto di una vernice intumescente ed esposto al fuoco e' stato messo a punto un modello di calcolo agli

elementi finiti con il codice FEM MARC [1]. L'analisi svolta ha l'obiettivo di esaminare l'importanza dei vari parametri caratterizzanti la vernice intumescente ai fini della determinazione della temperatura del profilo di acciaio.

I dati relativi alla vernice sono stati in parte desunti dalla letteratura ed in parte ipotizzati considerando la loro composizione. In particolare sono stati assunti i seguenti valori

- densita' : 53 Kg/mc

- calore specifico: 836 J/Kg°C

- conduttivita' : andamento riportato in Fig.5

Per l'acciaio i valori delle caratteristiche sono state desunte da [11] e da [13] e sono i seguenti:

- densita': 7850 Kg/mc

- calore specifico: $c_a = 470 + 0.2 \theta_a + 38.1 \cdot 10^{-5} \theta_a^2$ J/Kg°C

- conduttivita' : $\lambda_a = 54 - 3.33 \cdot 10^{-2} \theta_a$ W/m°C per $20^\circ < \theta_a < 800^\circ\text{C}$

$\lambda_a = 27.3$ W/m°C per $800^\circ < \theta_a < 1200^\circ\text{C}$

La temperatura dei fumi e' stata simulata con la legge illustrata in Fig.1 [5] ed espressa analiticamente dalla relazione :

$$T - T_o = 345 \lg(8t + 1)$$

Essendo T_o (°C) la temperatura iniziale e t il tempo in minuti.

Esaminando la curva campione temperatura-tempo, si deduce che i fumi dell'incendio raggiungono temperature superiori a 250°C in circa 20 sec e quindi il fenomeno della intumescenza, che avviene a tali temperature risulta praticamente istantaneo. Pertanto il modello predisposto ha ipotizzato che la vernice sia nella configurazione intumefatta gia' dall'istante iniziale del transitorio. Si e' ipotizzato che lo spessore di vernice circondante il profilo HEB 300 sia pari a 45 mm.

Nella Fig.11 sono illustrati i modelli presi in esame. I due modelli differiscono solo per il ridotto spessore dell'isolante in corrispondenza delle estremita' delle ali utilizzato nel modello B. Questa diminuzione e' stata effettuata per rendere il modello piu' aderente a quello illustrato nella Fig.4.

Nella Fig.12 e' riportata la distribuzione delle temperature nella vernice e nel profilo a differenti istanti di tempo, ottenuta con il modello A di Fig.11. Nella Fig.14 sono riportati gli andamenti della temperatura sulla superficie (nodo 111) e in mezzzeria (nodo 182) della vernice e al centro del profilo (nodo 1254) e sull'ala inferiore (nodo 1222 al centro e nodo 485 all'estremita').

Da queste figure si nota che si ha un piccolo incremento della temperatura del profilo (dopo 2 h di riscaldamento si raggiunge una temperatura di 140°C). Risultati poco diversi si ottengono con il modello B, che ha uno spessore di 4 mm di vernice in prossimita' delle estremita' delle ali. Le distribuzioni di temperatura sono illustrate nelle Figg. 13 e 15. La temperatura massima dell'acciaio e' 195°C dopo 2 ore di transitorio.

Incrementando di un fattore 10 i valori di conduttivita' della vernice sono stati ottenuti i risultati illustrati nelle Figg.16 e 17 relativi al modello A. Ossia le temperature dell'acciaio sono state pari a 612°C a $t=2h$. Solo con un aumento di un fattore 40 dei valori di Fig.5 e' stato possibile ottenere dei valori di temperatura dell'acciaio paragonabili a quelli ottenute dalle prove effettuate in Giappone [12].

Nella Fig.18 sono illustrati gli andamenti di temperatura in funzione del tempo ottenuti con il modello A e con una conduttivita' minima della vernice pari a 0.48 W/m°C. La figura mostra che a $t=60$ min , le temperature dell'acciaio superano i 600°C .

Questo risultato porta a ritenere che l'effettiva conduttivita' delle vernici intumescenti utilizzate nelle prove illustrate in [12] sia piu' prossima al valore di 0.48 W/m°C che non al valore di 0.012 W/m°C riportato in [4].

6 - CONCLUSIONI

Nel presente lavoro e' stato esaminato il comportamento delle vernici intumescenti, utilizzate come elementi di protezione di strutture di acciaio esposte al fuoco.

L'esame dei risultati di studi sull' utilizzo delle vernici intumescenti effettuati in conformita' alle normative di diversi Paesi (Paesi Europei, Giappone, USA) ha permesso di mettere in evidenza alcune differenze fra le diverse norme e gli aspetti significativi che necessitano di ulteriore approfondimento, ai fini di un utilizzo affidabile di questi elementi di protezione.

Una delle differenze fra le diverse norme riguarda la minima temperatura critica alla quale gli acciai da costruzione possono resistere senza raggiungere la rottura. Per le norme BS e le Euronorme [13] gli acciai da costruzione hanno temperature critiche superiori a 550°C , mentre per le norme UNI [11] tale limite e' inferiore a 400°C . Ovviamente molto diverse sono le resistenze delle strutture protette o non protette a seconda della norma utilizzata.

Travi con fattore di massività di 100 m^{-1} possono resistere, senza protezione termica, 30 min per le prime norme e solo 15 min per le norme UNI. Lo stesso risultato si ritrova nella interpretazione delle prove effettuate su profili ricoperti con vernici intumescenti. Per le BS alcune vernici hanno una resistenza di 60 min mentre per le UNI non potrebbero avere una resistenza superiore ai 40-45 min.

Attualmente esistono un numero notevole di vernici intumescenti che hanno ottenuto da vari Enti la certificazione di resistenza da R30 fino a R120.

Nell'analisi preliminare dello stato dell'arte effettuata sono stati trovati pochi dati relativi alle proprietà termiche e ponderali di tali vernici. Tali dati sono indispensabili per analizzare con metodologie avanzate (codici FEM) il comportamento termo-meccanico di strutture complesse protette da vernici intumescenti ed esposte al fuoco. In particolare sono necessari i valori (funzioni della temperatura):

- della conduttività
- del calore specifico
- della densità
- dell'incremento di spessore

La simulazione termica effettuata ha permesso di evidenziare che alcuni dati reperiti in letteratura non possono essere utilizzati per descrivere il comportamento di tutte le vernici. Infatti valori di conduttività di $0.012 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ trovati per una vernice ha determinato valori delle temperature estremamente basse e non realistiche. L'analisi ha dimostrato che $0.48 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ potrebbe essere un valore di riferimento per la conduttività delle vernici alla luce dei risultati sperimentali descritti in letteratura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] MARC Analysis Research Corporation 'Marc User Manual' - Palo Alto, CA - 1998
- [2] Hering Achim 'Problem with intumescent' - Construction Specifier V48 W9 Sept.1995
- [3] D.Scharf-R.Nalepa et alii 'Studies on Flame Retardant Intumescent char : part I' Fire Safety J. V 19 n 1 1992 p 103-117
- [4] H.M. Bock-M.Berweger 'F90 fire-coating for external use' Stahlbau 65 (1996) Heft 2 - Ernst&Son p41-47
- [5] UNI 7678 - Prove di resistenza al fuoco-
- [6] S. Bourbigot- M.Le Bras et alii' Carbonization mechanisms resulting from intumescence - PartII. Association with an ethylene terpolymer and ammonium polyphosphate-pentaerythritol fire retardant system' Carbon v 33 n 3 1995 p283-294
- [7] S. Bourbigot- M.Le Bras et alii' Carbonization mechanisms resulting from intumescence. Association with the ammonium polyphosphate-pentaerythritol fire retardant system' Carbon v 31 n 8 1993 p1219-1230
- [8] Y. Sakumoto-T. Yamaguchi, et alii 'High Temperature properties of Fire-Resistant Steel for building'- J. of Struct. Engin. V118 n2 Febb. 1992 p 392-407
- [9] ASFPFCM- ASS. of Spec. Fire Prot. Contractor and Manuf. - Steel Const.Inst. 'Fire protection for structural steel in building' 2nd Ed.-revised 1992
- [10] Rohling Annette-Wesche Juergen 'Steel Construction with reactive (intumescent) fire protection Systems' Stahlbau v65 n2 Feb 1996 p85-87
- [11] UNI 9503 - Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio - CNVVF-cci
- [12] Y. Sakumoto-T. Yamaguchi, et alii 'Fire Resistance of Fire-Resistant Steel Columns'- J. of Struct. Engin. V120 n4 Apr 1994 p 1103-1121
- [13] Draft ENV 1993-1-2 'Eurocode 3 : DESIGN OF STEEL STRUCTURES - Part 1.2 : General rules structural fire design' CEN/TC250/SC3

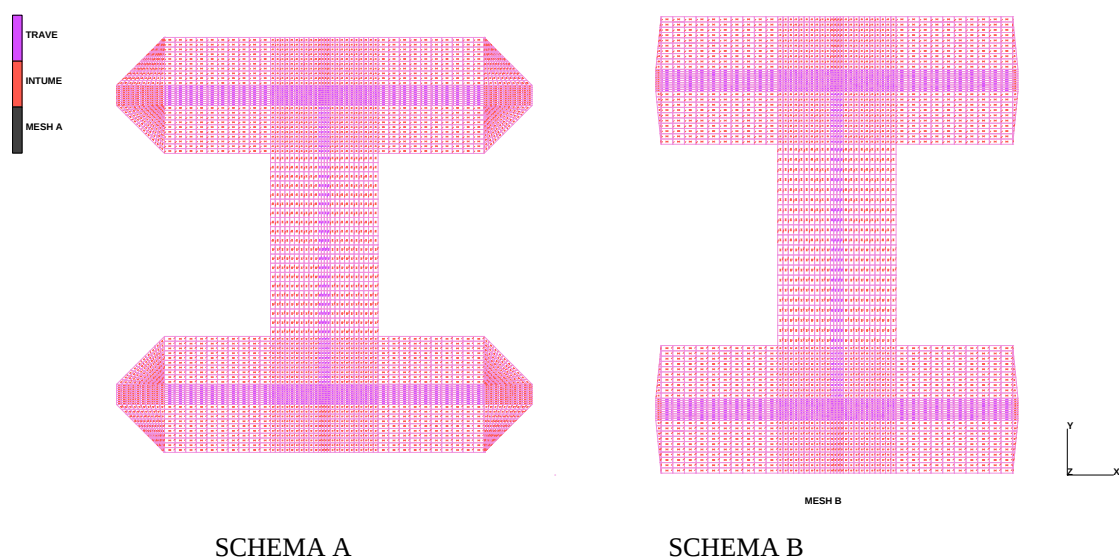


Fig. 11 - Schematizzazioni del profilo a I e della vernice intumescente utilizzate nella simulazione dello scambio termico nelle condizioni di incendio simulate dalla curva campione temperatura-tempo [5]

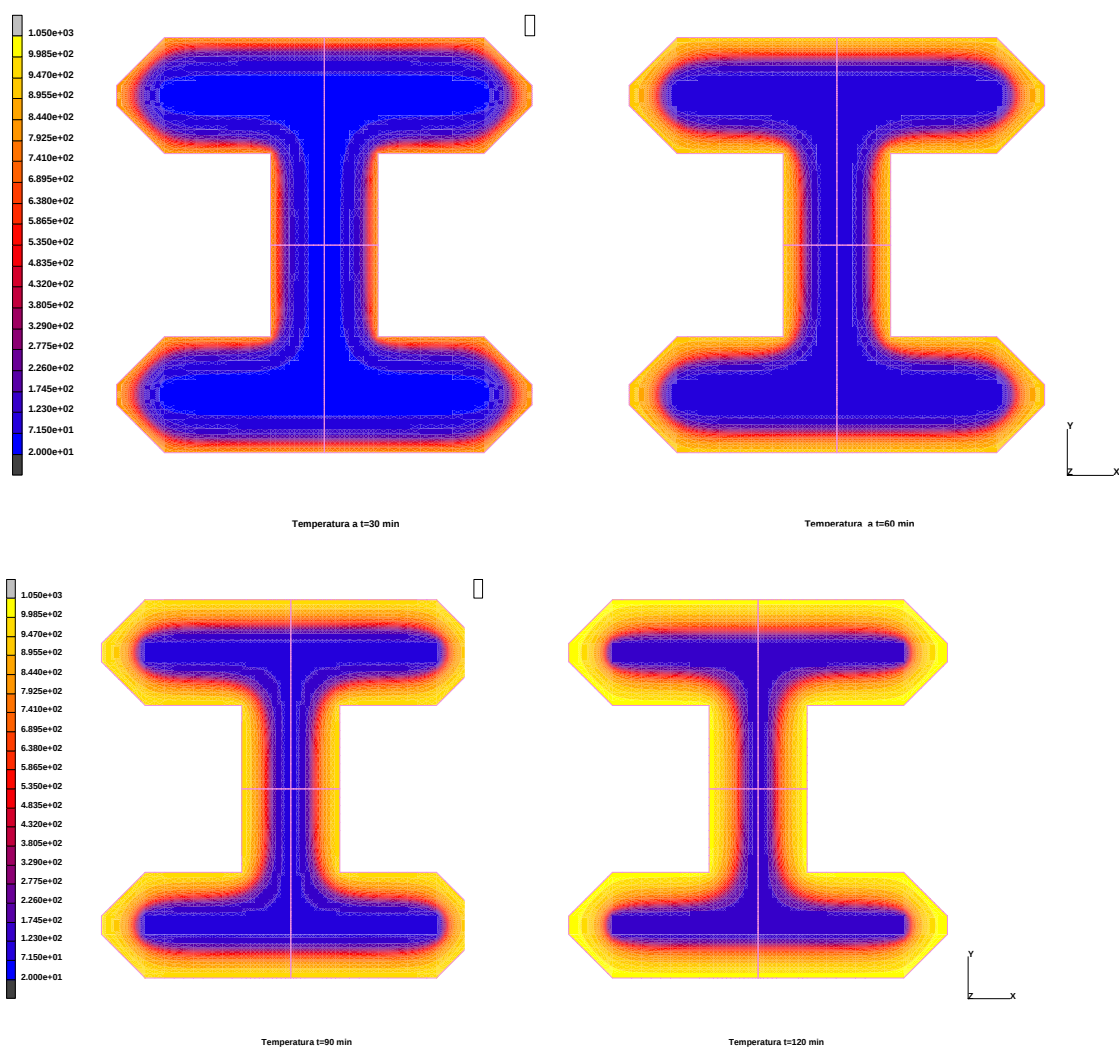


Fig. 12 - Andamento delle temperature a 30, 60, 90 e 120 minuti nella vernice e nel profilo, ottenute considerando lo schema di calcolo A e la conduttività della vernice fornita da [4]

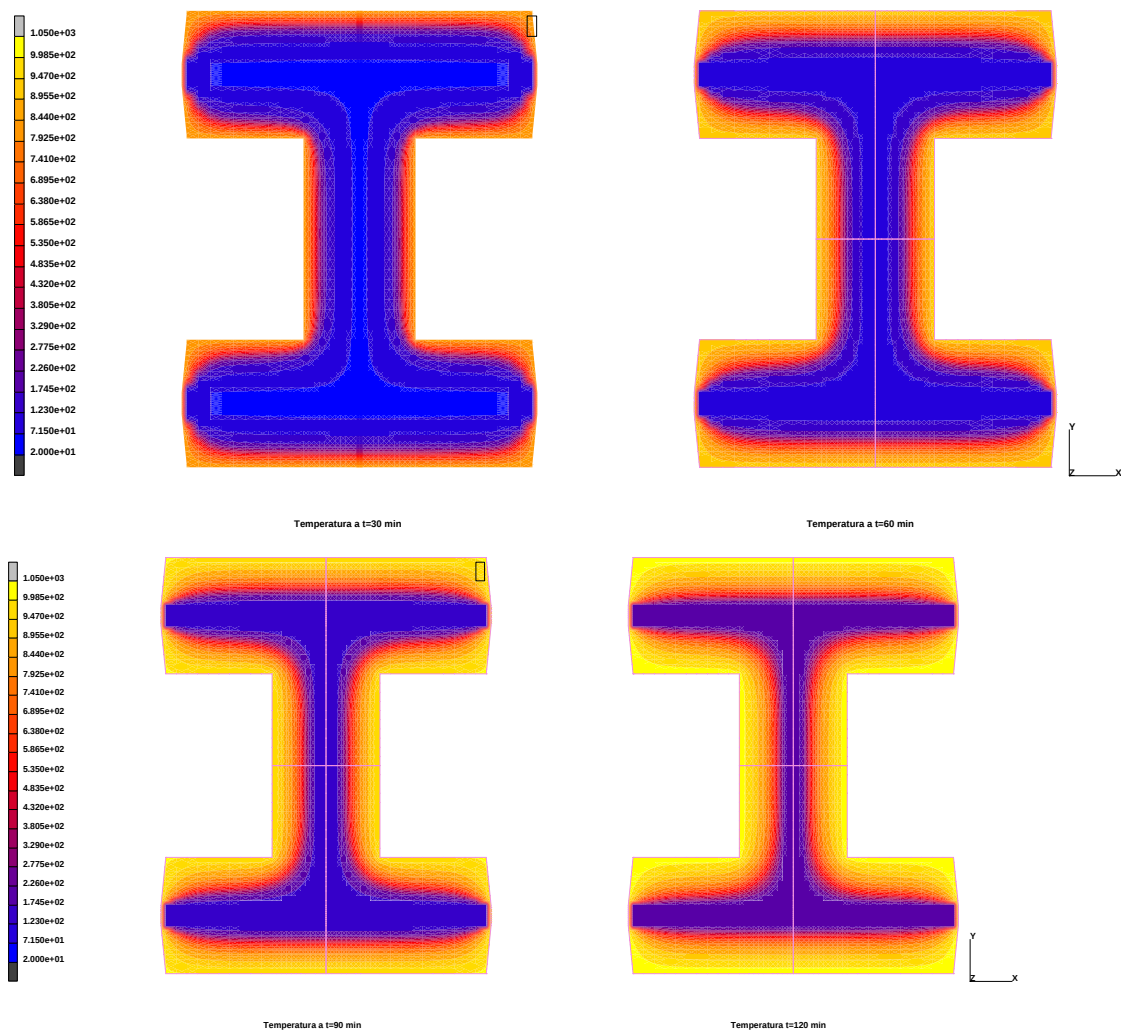


Fig. 13 Andamento delle temperature a 30, 60, 90 e 120 minuti nella vernice e nel profilo, ottenute considerando lo schema di calcolo B e la conduttività della vernice fornita da [4]

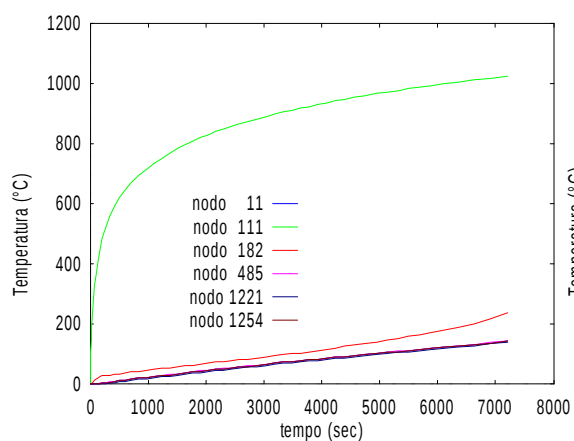


Fig.14 - Andamento della temperatura nella vernice e nel profilo di acciaio ottenuto col il modello A

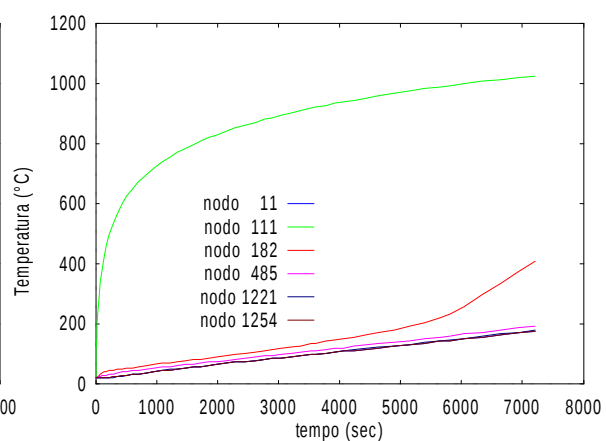


Fig.15 - Andamento della temperatura nella vernice e nel profilo di acciaio ottenuto col il modello B

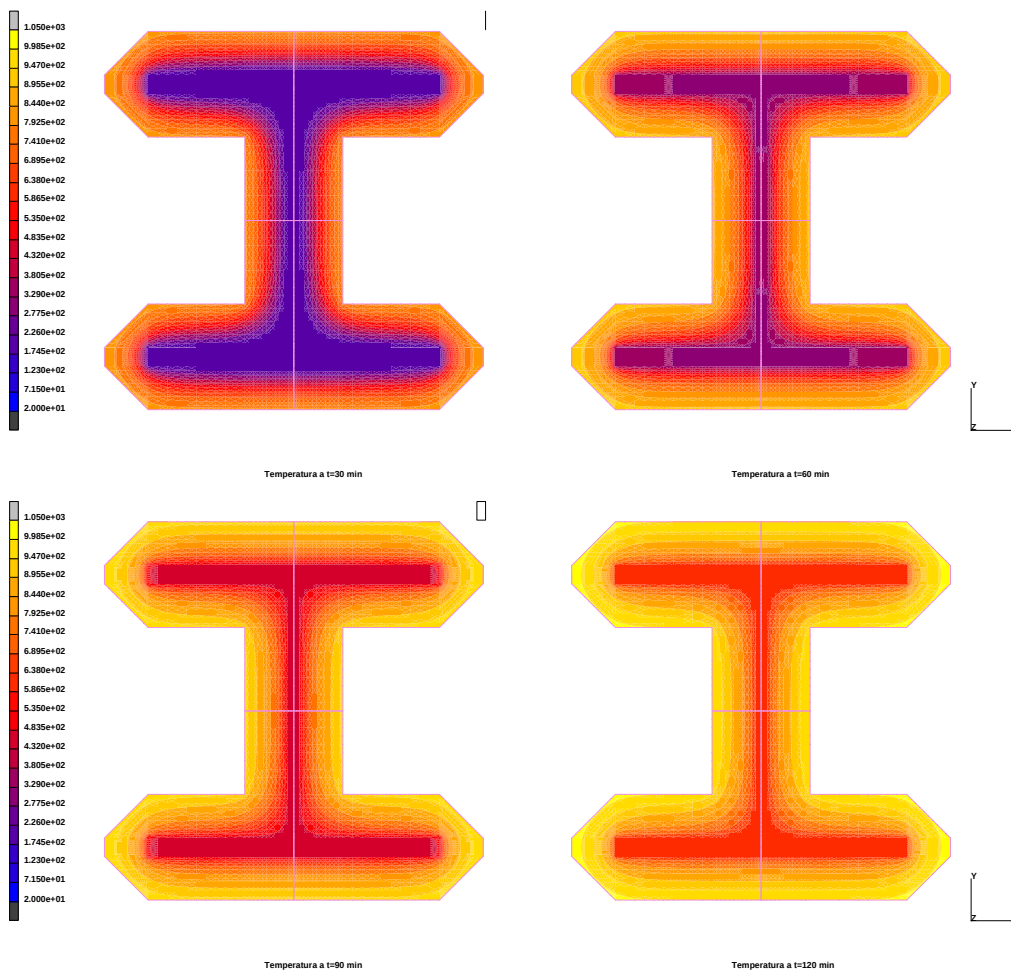


Fig. 16 - Andamento delle temperature a 30, 60, 90 e 120 minuti nella vernice e nel profilo, ottenute considerando lo schema di calcolo A e la conduttività della vernice fornita da [4] aumentata di un fattore 10.

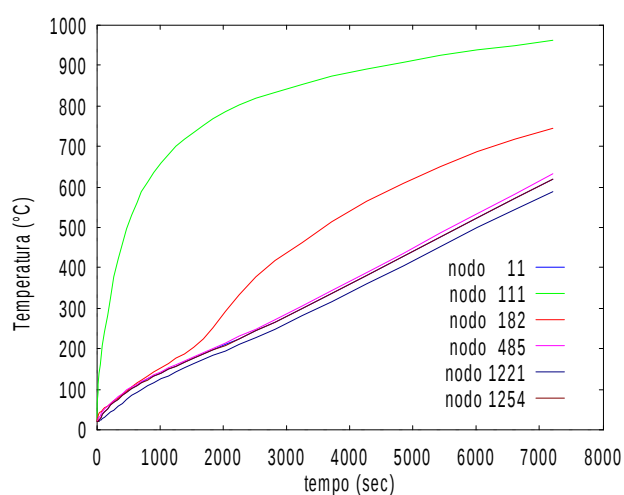


Fig.17 - Andamento della temperatura nella vernice e nel profilo di acciaio ottenuto col il modello A ed una conduttività della vernice 10 volte quella di Fig.5

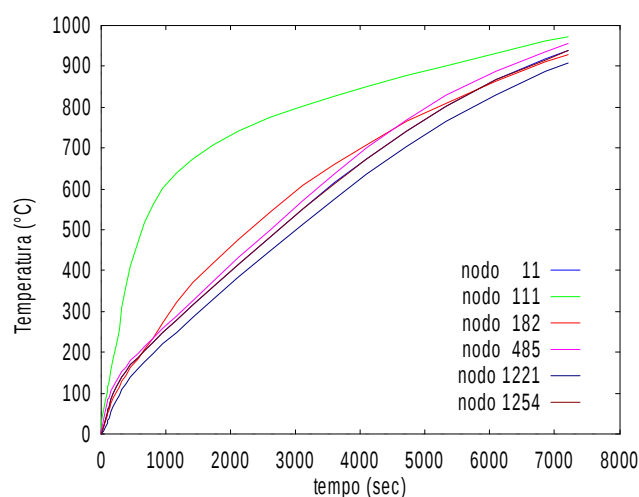


Fig.18 - Andamento della temperatura nella vernice e nel profilo di acciaio ottenuto col il modello B ed una conduttività della vernice 40 volte quella di Fig.5