

LA VALUTAZIONE ANALITICA DELLA RESISTENZA AL FUOCO DI ELEMENTI COSTRUTTIVI IN ACCIAIO: APPLICAZIONI NEL CASO DI INCENDI DA IDROCARBURI E NEL CASO DI RIVESTIMENTI PROTETTIVI A DUE STRATI

Ing. Francesco Boenzi ⁽¹⁾, Ing. Francesco Messa ⁽²⁾, Prof. Ing. Giovanni Mummolo ⁽¹⁾

⁽¹⁾ DIMEG – Politecnico di Bari – Viale Japigia n. 182 – 70126 - Bari

⁽²⁾ I.S.I. S.r.l. - Ingegneria dei Servizi Industriali – Via Schuman, n. 2 – 70126 - Bari
mummolo@poliba.it ; f.messa@isi-ing.it

SOMMARIO

La norma UNI 9503 “Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio”, espone un metodo generale di calcolo per stimare analiticamente, in alternativa al metodo sperimentale, il limite ultimo di capacità portante di elementi singoli di acciaio esposti a incendio normalizzato secondo la curva temperatura/tempo ISO 834 (Underwriters Laboratories UL 263).

Posto che la generalità del metodo ne consente l'estrapolazione, come precisa la stessa norma, a programmi di esposizione termica diversa, in talune applicazioni tipiche dell'industria chimica e petrolchimica, come ad esempio per le strutture portanti in acciaio di serbatoi, sembra più appropriato prendere come riferimento nel calcolo le curve temperatura/tempo di incendio da idrocarburi, quale ad esempio la curva secondo BS 476 (Underwriters Laboratories UL 1709), sostanzialmente identica alla curva temperatura/tempo secondo lo standard del norvegese Petroleum Directorate (N.P.D.).

Rispetto alla curva dell'incendio normalizzato ISO 834 che è relativa alla combustione di sostanze cellulosiche e nella cui banda di tolleranza rientra la stessa curva di riferimento della Circolare MI.S.A. 91/61, le curve di incendio da idrocarburi presentano condizioni più severe a causa di velocità maggiori dell'aumento della temperatura nel tempo e temperature massime superiori. Ciò comporta, come conseguenza, a parità di condizioni al contorno (fattore di massività, temperatura critica, spessore, massa volumica e conducibilità termica dell'isolante) risultati di calcolo con valori inferiori delle resistenze al fuoco degli elementi strutturali.

Nel presente lavoro sono sviluppati alcuni esempi applicativi, adottando diversi profili caratterizzati da differenti dimensioni geometriche e diverse temperature critiche.

Un secondo aspetto di possibile ampliamento applicativo della norma, trattato nel presente lavoro, si riferisce al calcolo della resistenza al fuoco in presenza di rivestimenti protettivi degli elementi costituiti da due strati di isolante di diversa natura e, quindi, caratterizzati da differenti conducibilità termiche. In molti casi industriali, infatti, è richiesto un intervento di potenziamento della protezione passiva da incendio su strutture pre-esistenti, solitamente già rivestite. E' utile in tali casi dimostrare nei calcoli l'equivalenza dello strato di protezione aggiuntiva, realizzato con materiali più innovativi, ad uno spessore aggiuntivo dello stesso materiale pre-esistente.

Le determinazioni sono effettuate su profili aventi diversi rapporti di massività, tenendo conto delle differenti conducibilità termiche per i due materiali di rivestimento.

1. INTRODUZIONE

Nella norma UNI 9503 “Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio”, si espone un metodo generale di calcolo per stimare analiticamente, in alternativa al metodo sperimentale, il limite ultimo di capacità portante di elementi singoli di acciaio esposti a incendio normalizzato secondo la curva temperatura-tempo ISO 834.

La stessa norma prevede l'estrapolazione del metodo, conservandone la generalità, a programmi di esposizione termica diversa. Ciò consente di prendere come riferimento, nel calcolo, differenti curve temperatura-tempo: ad esempio sembra molto più appropriato per le applicazioni tipiche dell'industria chimica e petrolchimica, come ad esempio per le strutture portanti in acciaio di serbatoi, considerare più realisticamente incendi derivanti dalla combustione di idrocarburi. Una curva normalizzata di uso comune che rappresenta questo fenomeno è costituita ad esempio dalla curva secondo BS 476 (“Hydrocarbon curve”). La curva dell'incendio normalizzato ISO 834, sostanzialmente simile alla curva di riferimento della Circolare MI.S.A. 91/61, di fondamentale importanza nelle valutazioni effettuate dai VV.F., deriva da esperienze relative alla combustione di sostanze cellulosiche, in genere presenti in edifici di uso civile, ma appare inappropriata negli ambienti di tipo industriale sopra citati. La curva di incendio da idrocarburi, per contro, confrontata con la prima, impone condizioni di rischio più severe a causa della maggiore velocità dell'aumento della temperatura nel tempo e temperature massime superiori.

La prevedibile conseguenza dei risultati di calcolo è trovare, a parità di condizioni al contorno (fattore di massività, temperatura critica, spessore, massa volumica e conducibilità termica dell'isolante), valori inferiori delle resistenze al fuoco degli elementi. Nel presente lavoro, allo scopo di quantificare detta differenza, sono

sviluppati alcuni esempi applicativi, adottando diversi profili caratterizzati da differenti dimensioni geometriche, diverse temperature critiche e diversi spessori di rivestimento protettivo.

Un secondo aspetto di possibile ampliamento applicativo della norma si riferisce al calcolo della resistenza al fuoco in presenza di rivestimenti protettivi degli elementi costituiti da due strati di isolante di diversa natura e, quindi, caratterizzati da differenti conducibilità termiche. In molti casi industriali, infatti, è richiesto un intervento di potenziamento della protezione passiva da incendio su strutture pre-esistenti, solitamente già rivestite. Dato che la norma in esame prevede l'utilizzo di un unico rivestimento protettivo, è utile dimostrare nei calcoli l'equivalenza dello strato di protezione aggiuntiva, realizzato con materiali più innovativi, ad uno spessore aggiuntivo dello stesso materiale pre-esistente.

2. METODO DI CALCOLO DELLA NORMA

2.1 Equazioni di base

Le ipotesi di base del metodo di calcolo esposto nella norma sono le seguenti:

- che la conduttività termica dell'acciaio sia infinita e di conseguenza la temperatura all'interno dell'elemento sia uniforme;
- che l'acciaio abbia un comportamento perfettamente elasto-plastico;
- che non vi sia dispersione di energia termica attraverso l'elemento.

Nel seguito del lavoro non si entrerà nel merito della seconda ipotesi, di carattere strutturale, in quanto la valutazione della resistenza al fuoco sarà condotta avendo fissato la temperatura critica dell'elemento e senza entrare nel merito della sua configurazione di carico.

Si ricorda soltanto la definizione della temperatura critica di un elemento come la temperatura alla quale è verificata l'uguaglianza:

$$\chi \frac{P}{P_u} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$$

ove:

χ è un fattore correttivo che consente di tarare il metodo analitico della norma con le risultanze sperimentali ed in genere si può assumere pari a 0,85;

P è il carico sull'elemento conseguente alle azioni di calcolo;

P_u è il valore del carico tale da comportare, a temperatura ordinaria, il raggiungimento dello stato ultimo di collasso;

$f_{y,\theta}$ è il limite convenzionale di snervamento alla temperatura θ ;

f_y è la tensione di snervamento a temperatura ordinaria.

La resistenza all'incendio di un elemento è, come noto, il tempo (in minuti) affinché nell'elemento si raggiunga la temperatura critica in presenza di un incendio.

A livello indicativo, per un acciaio generico per profilati, la temperatura critica assume i valori riportati nella tabella seguente, ripresa dalla norma:

$\chi P/P_u$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
θ_{cr} [°C]	590	540	490	430	360

Inoltre, saranno presi in considerazione soltanto rivestimenti il cui contenuto di umidità sia trascurabile (se così non fosse, l'umidità presente causerebbe un arresto dell'aumento di temperatura dell'elemento protetto, pari al tempo necessario per l'evaporazione e quindi la resistenza al fuoco risulterebbe parimenti incrementata).

Il metodo di calcolo si basa sull'impostazione di un'equazione di bilancio energetico, in un intervallo di tempo sufficientemente piccolo, tra l'energia termica trasmessa per ogni unità di lunghezza (secondo la dimensione longitudinale) all'elemento in acciaio dai fumi di combustione attraverso il rivestimento protettivo e l'incremento di energia interna, ovvero di temperatura, dell'elemento stesso. Nella trasmissione del calore, si prende in considerazione soltanto il fenomeno della conduzione, in quanto esso è preponderante rispetto a convezione e irraggiamento.

Il primo termine dell'equazione di bilancio è quindi pari a:

$$\Delta Q = KS (\theta_f - \theta_a) \Delta t \quad [\text{J/m}] \quad (1)$$

ove:

K [W/(m² °C)] è la trasmittanza termica del rivestimento protettivo, che si assume costante con la temperatura ed è pari a λ_i/d_i , essendo λ_i [W/(m °C)] la conduttività termica del materiale isolante e d_i [m] il suo spessore;

S [m] è la superficie di scambio termico per unità di lunghezza tra l'elemento di acciaio e l'ambiente esterno a temperatura θ_f , attraverso il rivestimento protettivo;

θ_f [°C] è la temperatura dei fumi all'esterno nel generico istante di tempo t [s], il cui valore deriva da una curva normalizzata temperatura-tempo;

θ_a [°C] è la temperatura raggiunta dall'elemento di acciaio nel generico istante di tempo t [s];

Δt [secondi] è l'intervallo di tempo nel quale avviene la trasmissione della quantità di calore ΔQ .

Il secondo termine dell'equazione di bilancio energetico è rappresentato dall'incremento di energia interna, ossia di temperatura, dell'elemento in acciaio, sempre riferito all'unità di lunghezza:

$$\Delta Q = c_a \rho_a V \Delta \theta_a \quad [\text{J/m}] \quad (2)$$

essendo:

$c_a = 520 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)}$ e $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ i valori rispettivamente di calore specifico e densità dell'acciaio, che si assumono costanti con la temperatura;

V [m²] il volume dell'elemento di acciaio per unità di lunghezza;

$\Delta \theta_a$ [°C] l'incremento di temperatura dell'elemento nel corso dell'intervallo di tempo Δt (per il calcolo incrementale, si deve assumere che l'incremento si verifichi alla fine dell'intervallo, cioè all'istante $t + \Delta t$ e così via).

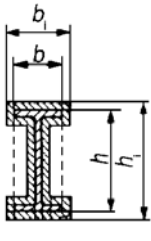
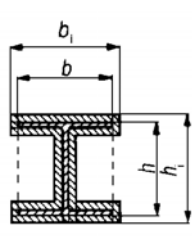
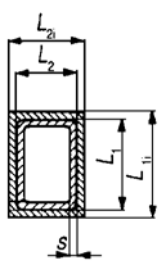
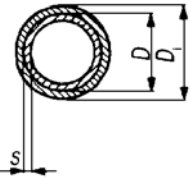
Uguagliando primo e secondo termine per il bilancio energetico, si ricava l'espressione dell'incremento di temperatura che l'elemento in acciaio subisce, ad ogni "step" Δt :

$$\Delta \theta_a = \frac{1}{\rho_a c_a} \cdot \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot \frac{S}{V} \cdot (\theta_f - \theta_a) \cdot \Delta t \quad [^\circ\text{C}] \quad (3)$$

Per la convergenza del metodo di calcolo, la norma suggerisce di utilizzare incrementi temporali Δt minori di $2,5 \cdot 10^4 / (S/V)$ [s].

Al rapporto S/V [m⁻¹] si dà il nome di "rapporto di massività dell'elemento", definito come il rapporto tra la superficie di scambio termico dell'elemento per unità di lunghezza ed il volume per unità di lunghezza, ovverosia il quoziente di perimetro ed area della sezione del profilato. Il perimetro, come si riscontra dalla lettura della norma, è quello di una curva chiusa di controllo per lo scambio termico assunta come la più piccola curva convessa che racchiude la sezione dell'elemento di acciaio, senza considerare la presenza del rivestimento (ovviamente si deve tenere conto solamente della porzione di perimetro esposta all'azione di riscaldamento).

Conseguentemente, tale perimetro coincide, per sezioni di profilati privi di concavità, con il perimetro del profilato stesso, mentre è minore del perimetro del profilato per sezioni non convexe, come le IPE, le HE o le UPN (si veda la Tabella 1 seguente ed il Prospetto VII della norma).

			
Sez. IPE $S/V = 2(h+b)/A$ $A = \text{Area acciaio}$	Sez. HE $S/V = 2(h+b)/A$ $A = \text{Area acciaio}$	Sez. Rettangolare $S/V = (L_1 + L_2) / [s(L_1 + L_2 - 2s)]$	Sez. Circolare $S/V = D / [s(D - s)]$

Tab. 1 – Calcolo del Fattore di massività S/V per alcune sezioni esposte completamente al fuoco (la linea tratteggiata indica la superficie assunta per lo scambio termico).

L'espressione (3) è valida per rivestimenti cosiddetti "leggeri", ovvero per i quali è lecito trascurarne la capacità termica. Quando la massa (più precisamente la capacità termica) dell'isolante applicato cresce oltre un certo valore, il rivestimento è detto "pesante" ed occorre tener conto, in maniera approssimativa, della sua capacità termica aumentando proporzionalmente la capacità termica reale dell'elemento in acciaio.

Secondo la definizione contenuta nella norma, un rivestimento è considerato "pesante" se la sua capacità termica (per unità di lunghezza) è maggiore della metà di quella dell'elemento di acciaio, cioè se:

$$c_i \rho_i d_i S_i > \frac{1}{2} c_a \rho_a V$$

Un rivestimento è classificato come "leggero" in caso contrario.

A parte il significato dei simboli già introdotti, c_i [J/(kg °C)] e ρ_i [kg/m³] sono rispettivamente calore specifico e densità del materiale isolante ed S_i [m] è la superficie interna del rivestimento, per unità di lunghezza, quindi coincidente con il perimetro della sezione del profilato solo nel caso in cui il rivestimento sia aderente e posto tutt'intorno ad esso. L'espressione del volume del rivestimento per unità di lunghezza calcolato come prodotto tra S_i e d_i è valida naturalmente solo per i casi in cui lo spessore è costante e di ridotta entità rispetto alle dimensioni della sezione; quindi, non è valida nel caso di un profilo, ad esempio ad I, immerso completamente nell'isolante.

Se il rivestimento è “pesante”, per tenere conto della sua capacità termica, è necessario apportare una correzione approssimativa alla formula precedente, incrementando fittiziamente la capacità termica dell'elemento di acciaio della metà della capacità termica del rivestimento.

Dunque, nella formula di bilancio energetico, al valore reale della capacità termica dell'acciaio si deve sostituire il termine:

$$(\rho_a c_a V)^* = \rho_a c_a V + \frac{1}{2} \rho_i c_i d_i S_i = \rho_a c_a V \cdot (1 + \zeta) \quad [\text{J}/(\text{m}^\circ\text{C})] \quad (4)$$

avendo posto $\zeta = \frac{\rho_i c_i d_i}{2 \rho_a c_a} \cdot \frac{S_i}{V}$

Si può definire, per comodità nei calcoli, un “rapporto di pesantezza del rivestimento” come:

$$Rp = 2 \frac{\rho_i c_i d_i}{\rho_a c_a} \cdot \frac{S_i}{V} \quad (5)$$

ed assumendo per il valore di ζ :

$$\begin{cases} \zeta = 0 & \text{per } Rp \leq 1 \\ \zeta = (1/4) Rp & \text{per } Rp > 1 \end{cases} \quad (6)$$

la formula di bilancio termico, nel caso generale, diventa:

$$\Delta \theta_a = \frac{1}{\rho_a c_a} \frac{\lambda_i}{d_i} \frac{1}{1 + \zeta} \cdot \frac{S}{V} \cdot (\theta_f - \theta_a) \Delta t \quad (7)$$

Si deve tenere presente che il rapporto di massività è riferito alla superficie S di scambio termico, che, nel caso generale, può differire dalla superficie S_i interna del rivestimento.

Solo per le sezioni convesse e con l'isolante messo in opera aderente alla sezione, il rapporto S_i/V coincide con il rapporto di massività S/V .

2.2 Curve normalizzate di incendio

Per quanto riguarda la funzione $\theta_f(t)$, si è detto che la norma in esame considera soltanto la curva normalizzata contenuta nello standard ISO 834, relativa alla combustione di sostanze a base di cellulosa. Tale funzione ha la seguente espressione:

$$\theta_f(t) = \theta_0 + 345 \text{ Log } (8t + 1) \quad [^\circ\text{C}]$$

ove θ_0 è la temperatura iniziale, posta nei calcoli pari a 20°C, e t è il tempo espresso in minuti.

La curva temperatura-tempo normalizzata secondo BS 476 per il caso di incendio da idrocarburi (“Hydrocarbon curve”) è rappresentata invece dalla funzione:

$$\theta_f(t) = \theta_0 + 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) \quad [^\circ\text{C}]$$

con t espresso in minuti.

Nella figura 1 sono confrontate le due curve di incendio normalizzate ISO 834 e BS 476; si può notare come negli incendi da idrocarburi si raggiungono temperature notevoli (intorno ai 1000 °C) già nei primi minuti di sviluppo.

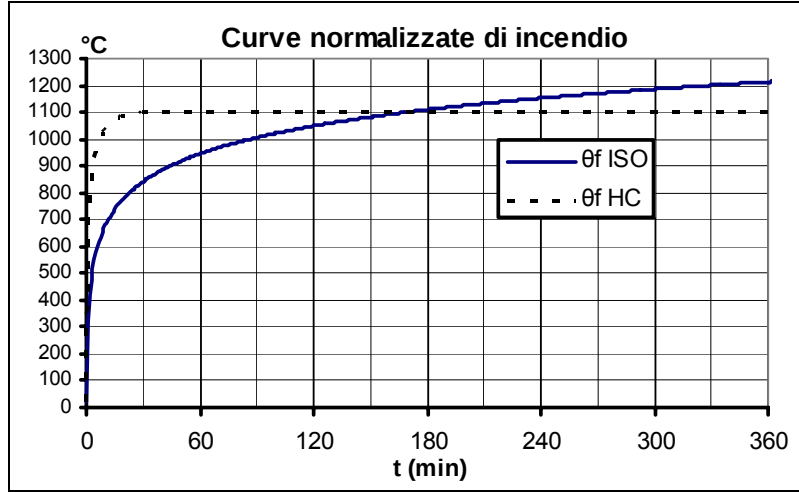


Fig. 1 – Confronto tra le curve di incendio da cellulosa e da idrocarburi.

3. APPLICAZIONE DEL METODO ALLE SEZIONI CIRCOLARI

Allo scopo di applicare il metodo analitico ad elementi di acciaio protetti a sezione circolare, aventi funzione di montanti nel caso industriale più oltre descritto, si è ritenuto opportuno particolarizzare le equazioni generali (1), (4), (5) e (7).

E' noto che per una sezione circolare, con le ipotesi sopra enunciate, la quantità di calore scambiata per unità di lunghezza ΔQ assume la forma:

$$\Delta Q = \frac{2\pi\lambda_i}{\ln \frac{R_i}{R}} (\theta_f - \theta_a) \Delta t = \frac{2\pi\lambda_i}{\ln \left(1 + \frac{d_i}{R}\right)} (\theta_f - \theta_a) \Delta t \quad [\text{J/m}] \quad (1')$$

ove, oltre ai simboli già introdotti, R [m] rappresenta il raggio esterno della sezione di acciaio e R_i [m] il raggio della sezione con il rivestimento protettivo isolante di spessore d_i ($R_i = R + d_i$).

Le espressioni esatte dei volumi di acciaio e di isolante per unità di lunghezza sono date da:

$$\begin{cases} V_a = \pi R^2 - \pi (R - s)^2 = \pi s(2R - s) = \frac{2\pi R}{S/V} \\ V_i = \pi (R + d_i)^2 - \pi R^2 = \pi d_i(2R + d_i) \end{cases} \quad [\text{m}^2]$$

ove s [m] è lo spessore dell'acciaio e S/V [m⁻¹] il rapporto di massività della sezione circolare.

Con le posizioni precedenti, l'espressione (4) diventa:

$$(\rho_a c_a V_a)^* = \rho_a c_a V_a \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\rho_i c_i d_i (2R + d_i)}{\rho_a c_a s (2R - s)} \right] = \rho_a c_a \frac{2\pi R}{S/V} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\rho_i c_i S}{\rho_a c_a V} d_i \left(1 + \frac{d_i}{2R} \right) \right] = \rho_a c_a \frac{2\pi R}{S/V} (1 + \zeta)$$

Si può definire per comodità anche in questo caso un "rapporto di pesantezza", Rp , pari a:

$$Rp = 2 \frac{\rho_i c_i S}{\rho_a c_a V} d_i \left(1 + \frac{d_i}{2R} \right) \quad (5')$$

e da esso, con le equazioni (6), si ottiene il valore di ζ .

Infine, con le opportune sostituzioni, l'espressione (7) si particolarizza nella seguente:

$$\Delta \theta_a = \frac{1}{\rho_a c_a} \frac{1}{1 + \zeta} \cdot \frac{S}{V} \cdot \frac{\lambda_i}{R \cdot \ln \left(1 + \frac{d_i}{R}\right)} (\theta_f - \theta_a) \Delta t \quad [^\circ\text{C}] \quad (7')$$

E' del tutto evidente la somiglianza con l'equazione generale ed inoltre si può verificare numericamente che la sostituzione della funzione logaritmica con d_i/R comporta un errore (in difetto) sul coefficiente del 2° membro contenuto entro il 5% per rapporti d_i/R minori di 0,1 ed entro il 10% per rapporti minori di 0,23; di conseguenza, laddove tale rapporto non fosse di piccola entità, utilizzando la (7) si sottostimerebbe l'incremento di temperatura dell'acciaio ad ogni step temporale.

4. UN CASO INDUSTRIALE

Il caso in esame riguarda la protezione dagli effetti del fuoco di elementi in acciaio a sezione circolare che fungono da montanti di grandi serbatoi sferici contenenti GPL, all'interno di un parco di deposito di tale combustibile. Per essi, è stato necessario elaborare una relazione tecnica riguardante i livelli di resistenza all'incendio raggiunti nella situazione riscontrata, allo scopo di mettere in luce la eventuale necessità di interventi migliorativi. Da un punto di vista operativo, tali interventi sono normalmente attuati sovrapponendo allo strato di materiale isolante pre-esistente uno spessore aggiuntivo, solitamente di materiali tecnologicamente più avanzati.

Come già detto nell'introduzione, in tale ambiente industriale, che presenta un rischio di incendio, oltre che elevato, anche di natura così specifica, sembra molto più opportuno riferirsi alla curva di incendio normalizzata degli idrocarburi, piuttosto che alla curva di incendio della cellulosa.

Allo scopo di quantificare la diminuzione della resistenza al fuoco, applicando il metodo analitico della norma, tra le due condizioni di esposizione termica, a parità di spessore protettivo, si è innanzitutto deciso di prendere come riferimento di studio quattro geometrie prefissate di sezioni circolari a diametro crescente:

- “Sezione 0”: diametro esterno pari a 100 mm e spessore di acciaio di 12 mm (fattore $S/V = 94,697 \text{ m}^{-1}$);
- “Sezione 1”: diametro esterno pari a 495 mm e spessore di acciaio di 12 mm (fattore $S/V = 85,4 \text{ m}^{-1}$);
- “Sezione 2”: diametro esterno pari a 720 mm e spessore di acciaio di 12 mm (fattore $S/V = 84,746 \text{ m}^{-1}$);
- “Sezione 3”: diametro esterno pari a 1000 mm e spessore di acciaio di 12 mm (fattore $S/V = 84,3455 \text{ m}^{-1}$)

Come si osserva, le varie sezioni hanno fattori di massività S/V molto simili.

La Sezione 0 in realtà non esiste nel caso applicativo esaminato, mentre le altre sezioni costituiscono effettivamente la geometria di altrettanti montanti di serbatoi di GPL.

Per tutte le sezioni, ai fini del confronto, è stata assunta la presenza di un rivestimento protettivo di calcestruzzo con aggregati calcarei, le cui caratteristiche fisiche sono le seguenti:

$$\begin{cases} \lambda_i = 1,3 \text{ W/(m } ^\circ\text{C)} \\ c_i = 1200 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)} \\ \rho_i = 2200 \text{ kg/m}^3 \end{cases}$$

I calcoli sono stati effettuati predisponendo un opportuno foglio di calcolo, ove, per l'accuratezza numerica del metodo, è sempre stato assunto un incremento temporale Δt [s] pari ad $1/20$ del valore minimo consigliato $2,5 \cdot 10^4 / (S/V)$.

Nelle figure 2, 3 e 4 seguenti, è rappresentato l'andamento della temperatura dell'elemento di acciaio per ognuna delle sezioni sopra elencate e per le due curve di incendio (ISO 834 e BS 476) quando lo spessore del materiale isolante è pari rispettivamente a 5 cm, 8 cm e 10 cm.

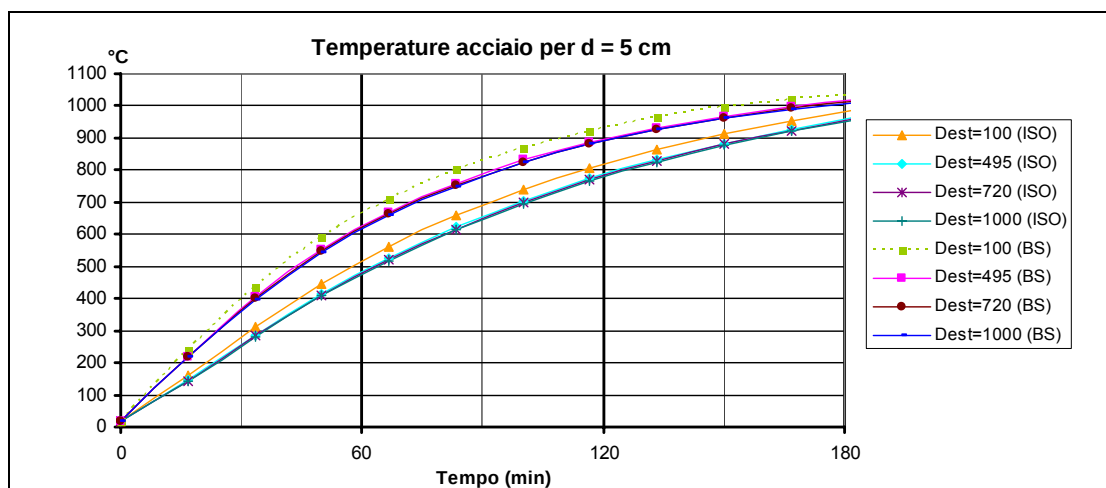


Fig. 2 – Confronto tra le temperature raggiunte dalle sezioni circolari di riferimento con le due curve di incendio normalizzate, con uno spessore protettivo di 5 cm di calcestruzzo isolante.

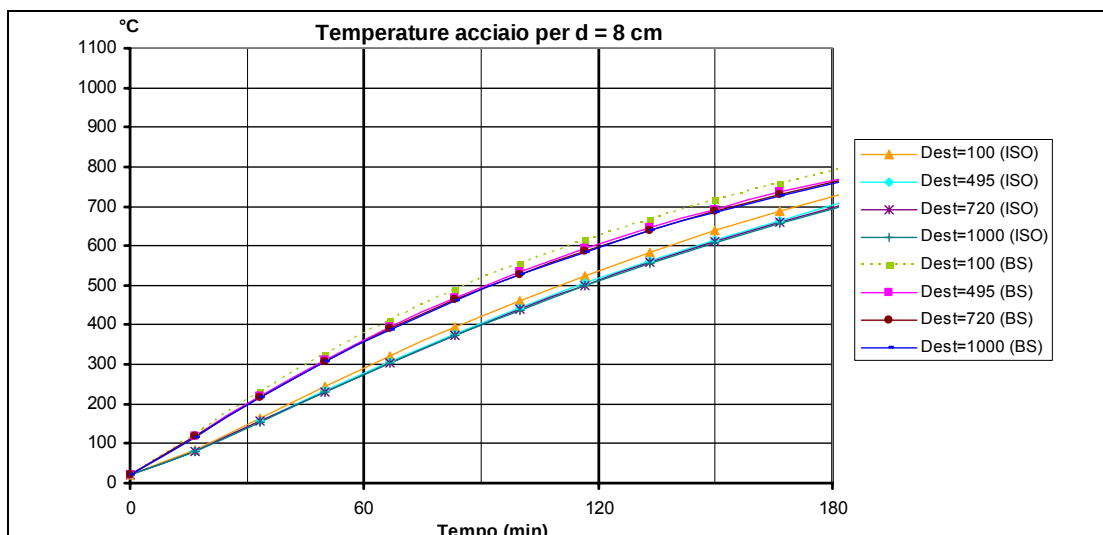


Fig. 3 – Confronto tra le temperature raggiunte dalle sezioni circolari di riferimento con le due curve di incendio normalizzate, con uno spessore protettivo di 8 cm di calcestruzzo isolante.

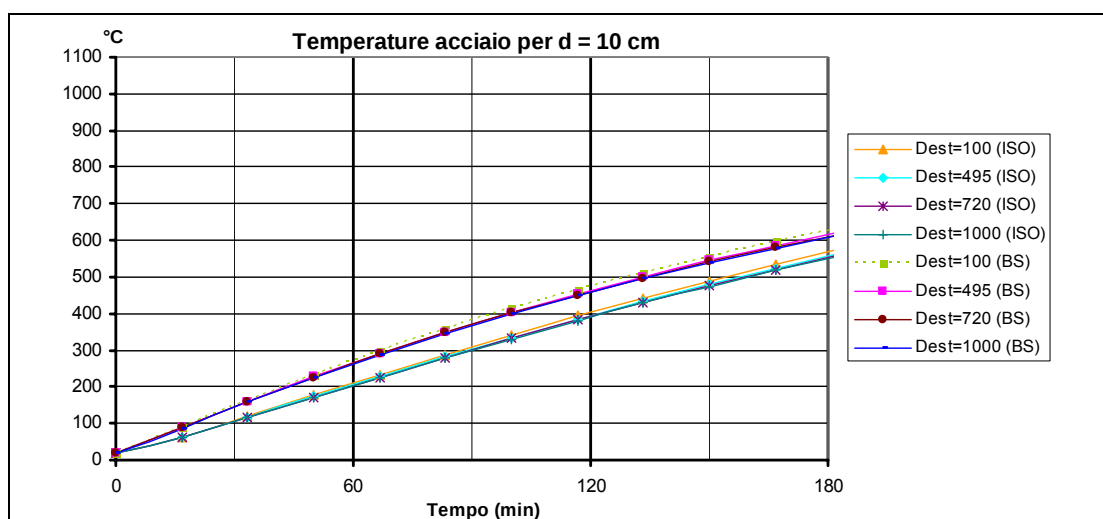


Fig. 4 – Confronto tra le temperature raggiunte dalle sezioni circolari di riferimento con le due curve di incendio normalizzate, con uno spessore protettivo di 10 cm di calcestruzzo isolante.

Si può notare dai risultati ottenuti che la diminuzione della resistenza all'incendio, tra il caso della curva di incendio ISO 834 ed il caso della curva di incendio BS 476, è compresa tra il 20 ed il 35%, alle usuali temperature critiche dell'acciaio. Le differenze più consistenti si hanno per bassi valori dello spessore del rivestimento e per bassi valori della temperatura critica, come si vede dal grafico di fig. 5, ricavato per la Sezione di tipo 2.

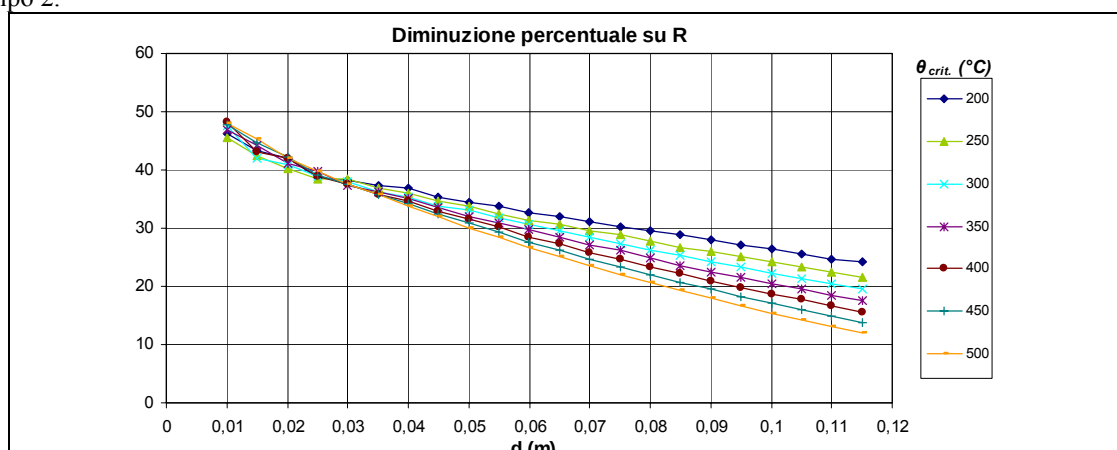


Fig. 5 – Variazione percentuale della resistenza al fuoco della sezione "2" ($D_{est.} = 720$ mm) al variare dello spessore del rivestimento di calcestruzzo e per diversi valori della temperatura critica.

5 ESTENSIONE DEL METODO ANALITICO A RIVESTIMENTI PROTETTIVI COSTITUITI DA DUE STRATI DI MATERIALE DIVERSO

5.1 Caso generale

Come si è detto, si presenta piuttosto frequentemente la necessità di potenziare la protezione antincendio di elementi in acciaio di strutture pre-esistenti, nell'ambito di operazioni di "revamping" di aree critiche di processo. Si tratta allora di valutare la resistenza all'incendio complessivamente raggiunta attraverso la sovrapposizione ad un rivestimento già presente di un rivestimento aggiuntivo in materiale diverso (se si trattasse dello stesso materiale ovviamente non si porrebbe alcun problema di calcolo). E' necessario riscrivere l'equazione del flusso termico considerando due differenti gradienti termici per i due diversi materiali:

$$\begin{cases} \Delta Q = K_1 S_1 (\theta_f - \theta_i) \Delta t \\ \Delta Q = K_2 S_2 (\theta_i - \theta_a) \Delta t \end{cases} \quad [\text{J/m}]$$

ove, oltre ai simboli già noti, K_1 e K_2 e S_1 e S_2 sono rispettivamente le trasmittanze termiche $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})]$ dei due isolanti e le superfici all'unità di lunghezza $[\text{m}]$ rappresentative dello scambio termico per i due rivestimenti isolanti; θ_i $[\text{ } ^\circ\text{C}]$ è la temperatura all'interfaccia tra i due.

Ricavando le differenze delle temperature e sommando membro a membro, si ottiene:

$$(\theta_f - \theta_a) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \left(\frac{1}{K_1 S_1} + \frac{1}{K_2 S_2} \right) = \frac{\Delta Q}{S^* \Delta t} \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right) = \frac{\Delta Q}{K_{eq} S^* \Delta t} \quad [^\circ\text{C}]$$

avendo assunto, in prima approssimazione, un'unica superficie di scambio termico $S^* = S_1 = S_2$ ed un valore K_{eq} pari a:

$$K_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}} = \frac{1}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})] \quad (8)$$

in cui λ_1 e λ_2 $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})]$ sono le conducibilità termiche dei due materiali e d_1 e d_2 $[\text{m}]$ i loro spessori.

L'equazione di bilancio termico è dunque la seguente:

$$(\rho_a c_a V)^* \cdot \Delta \theta_a = K_{eq} S^* (\theta_f - \theta_a) \cdot \Delta t \quad [\text{J/m}]$$

Circa il valore della capacità termica dell'acciaio $(\rho_a c_a V)^*$, eventualmente da incrementare, è necessario considerare la capacità termica complessiva del rivestimento isolante, ossia la somma delle capacità termiche dei singoli rivestimenti.

Quindi, $(\rho_a c_a V)^*$ è pari a

$$c_a \rho_a V + \frac{1}{2} (c_1 \rho_1 d_1 S_{i1} + c_2 \rho_2 d_2 S_{i2}) = \rho_a c_a V \cdot (1 + \zeta_{compl.}) \quad [\text{J}/(\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C})]$$

e la valutazione se considerare il rivestimento complessivamente come "pesante" deve essere effettuata sulla seguente disequazione:

$$c_1 \rho_1 d_1 S_{i1} + c_2 \rho_2 d_2 S_{i2} > \frac{1}{2} c_a \rho_a V$$

A parte l'evidente significato degli altri simboli, S_{i1} e S_{i2} rappresentano le superfici per unità di lunghezza misurate internamente ai due rivestimenti protettivi.

Come fatto in precedenza, introdotto un "rapporto di pesantezza complessivo" $Rp_{compl.}$:

$$Rp_{compl.} = \frac{2}{\rho_a c_a V} \cdot (c_1 \rho_1 d_1 S_{i1} + c_2 \rho_2 d_2 S_{i2}) \cong \frac{2}{\rho_a c_a} \cdot \frac{S}{V} (c_1 \rho_1 d_1 + c_2 \rho_2 d_2) \quad (9)$$

il fattore di correzione complessivo $\zeta_{compl.}$ è anche in tal caso fornito dalle (6).

Per semplicità di calcolo, si può assumere un'unica superficie $S = S_{i1} = S_{i2} = S^*$ pari alla superficie utilizzata come riferimento per il calcolo del fattore di massa.

L'equazione di bilancio termico modificata, nel caso generale, diventa allora:

$$\Delta \theta_a = \frac{1}{\rho_a c_a} \cdot \frac{1}{1 + \zeta_{compl.}} K_{eq} \cdot \frac{S}{V} \cdot (\theta_f - \theta_a) \Delta t \quad [^\circ\text{C}] \quad (10)$$

Può risultare utile, nel caso di rivestimento protettivo con due strati di materiale differente, definire uno spessore equivalente che il materiale del primo strato dovrebbe avere per ottenere esattamente gli stessi coefficienti nell'equazione del bilancio termico (7) e quindi la stessa resistenza al fuoco. Sostanzialmente, si tratta di trovare un valore d_{1eq} tale che risulti soddisfatta l'equazione:

$$K_{eq}' = K_{eq} \cdot \frac{1}{1 + \zeta_{compl.}} = \frac{1}{\left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}\right) (1 + \zeta_{compl.})} = \frac{\lambda_1}{d_{1eq}} \cdot \frac{1}{1 + \zeta_{1eq}}$$

ove, avendo definito il valore dello spessore d_{1p} che discrimina nel considerare il rivestimento equivalente del primo materiale isolante come “leggero” o come “pesante”, come:

$$d_{1p} = \frac{\rho_a c_a}{2\rho_1 c_1} \cdot \frac{V}{S_i} \quad [\text{m}]$$

il valore di ζ_{1eq} è fornito da:

$$\begin{cases} \zeta_{1eq} = 0 & \text{se } d_{1eq} \leq d_{1p} \\ \zeta_{1eq} = \frac{1}{4} \frac{d_{1eq}}{d_{1p}} & \text{se } d_{1eq} > d_{1p} \end{cases}$$

Nel caso in cui ζ_{1eq} fosse nullo il valore di d_{1eq} sarebbe fornito immediatamente da λ_1 / K_{eq}' . Tuttavia ciò non è noto apriori, per cui è necessario ricavare il valore del rapporto precedente e confrontarlo con d_{1p} : se la disequaglianza è verificata ($\zeta_{1eq} = 0$) il valore trovato è effettivamente quello dello spessore equivalente del materiale del primo rivestimento.

Se invece la disequaglianza non è verificata, occorre risolvere l'equazione:

$$\frac{K_{eq}'}{\lambda_1} = \frac{1}{d_{1eq}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{d_{1eq}}{4d_{1p}}}$$

ovvero:

$$\frac{1}{4d_{1p}} d_{1eq}^2 + d_{1eq} - \frac{\lambda_1}{K_{eq}'} = 0$$

Si ricava, scartata la soluzione negativa:

$$d_{1eq} = 2 \sqrt{d_{1p}^2 + d_{1p} \cdot \frac{\lambda_1}{K_{eq}'}} - 2d_{1p} \quad [\text{m}]$$

Anche in questo caso è necessario verificare la disequazione, accertandosi cioè che il valore così trovato sia maggiore di d_{1p} . Può accadere che ciò non sia vero ed in questi casi si può giungere alla soluzione solo per via numerica con metodi di approssimazione successiva.

A titolo di esempio, si prende in considerazione il caso in cui, su una generica sezione, ad un primo strato di 5 cm di calcestruzzo con aggregati calcarei si sovrappone uno spessore variabile d_2 di materiale in lastre di perlite o vermiculite. Tale materiale isolante ha le seguenti proprietà fisiche:

$$\begin{cases} \lambda_i = 0,15 \text{ W/(m } ^\circ\text{C)} \\ c_i = 1100 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)} \\ \rho_i = 500 \text{ kg/m}^3 \end{cases}$$

In figura 6 è riportato il valore di d_{1eq} che l'isolante 1 dovrebbe avere per raggiungere la stessa resistenza al fuoco che si ha con la sovrapposizione allo spessore pre-esistente di uno spessore d_2 di materiale 2, per diversi valori del fattore di massività S/V .

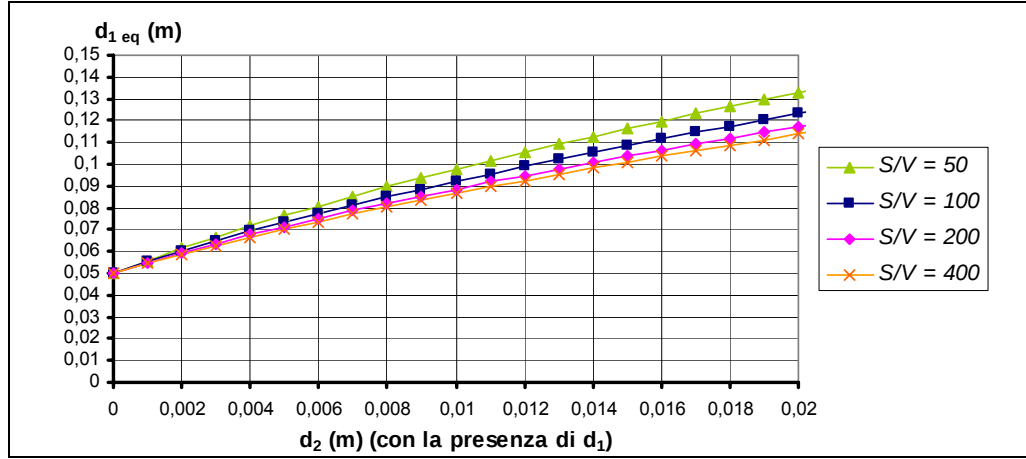


Fig. 6 – Valore dello spessore equivalente del materiale 1 (calcestruzzo con aggregati calcarei) al variare dello spessore aggiuntivo in materiale 2 (lastre in perlite/vermiculite) su 5 cm pre-esistenti di materiale 1, per diversi valori di S/V .

5.2 Caso particolare di sezioni circolari con due strati di materiali isolanti diversi

Il flusso termico in termini infinitesimi attraverso una superficie cilindrica di lunghezza unitaria è dato dalla seguente espressione:

$$\dot{Q} = KS \, d\theta = \frac{\lambda_i(r)}{dr} 2\pi r \, d\theta = 2\pi r \lambda_i(r) \frac{d\theta}{dr} \quad [\text{W/m}]$$

Con r e dr in [m], λ_i in $[\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})]$ e $d\theta$ in $[\text{m}^\circ\text{C}]$.

Detti d_1 e d_2 [m] gli spessori dei materiali isolanti 1 e 2 (con 2 quello più esterno), si può effettuare l'integrazione dell'equazione precedente tra il raggio esterno della sezione di acciaio ed il raggio dell'isolante 2, tenendo presente che $\lambda_i(r) = \lambda_1$ tra R e $(R + d_1)$ e $\lambda_i(r) = \lambda_2$ tra $(R + d_1)$ e $(R + d_1 + d_2)$. Si ottiene:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi(\theta_f - \theta_a)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln\left(1 + \frac{d_1}{R}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(1 + \frac{d_2}{R + d_1}\right)}$$

Il bilancio termico è sempre rappresentato dall'equazione:

$$(\rho_a c_a V_a)^* \cdot \Delta\theta_a = \dot{Q} \cdot \Delta t \quad [\text{J/m}]$$

e poichè i volumi per unità di lunghezza dei materiali isolanti valgono

$$\begin{cases} V_{i1} = \pi d_1 (2R + d_1) \\ V_{i2} = \pi d_2 (2R + 2d_1 + d_2) \end{cases} \quad [\text{m}^2]$$

allora

$$\begin{aligned} (\rho_a c_a V_a)^* &= \rho_a c_a V_a \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\rho_1 c_1}{\rho_a c_a} \frac{V_{i1}}{V_a} + \frac{1}{2} \frac{\rho_2 c_2}{\rho_a c_a} \frac{V_{i2}}{V_a} \right] = \\ &= \rho_a c_a \frac{2\pi R}{S/V} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\rho_1 c_1}{\rho_a c_a} \frac{S}{V} d_1 \left(1 + \frac{d_1}{2R} \right) + \frac{1}{2} \frac{\rho_2 c_2}{\rho_a c_a} \frac{S}{V} d_2 \left(1 + \frac{d_1}{R} + \frac{d_2}{2R} \right) \right] = \rho_a c_a \frac{2\pi R}{S/V} [1 + \zeta_{compl.}] \end{aligned}$$

Quindi, definito un “rapporto di pesantezza complessivo” come:

$$Rp_{compl.} = \frac{2}{\rho_a c_a} \frac{S}{V} \left[\rho_1 c_1 d_1 \left(1 + \frac{d_1}{2R} \right) + \rho_2 c_2 d_2 \left(1 + \frac{d_1}{R} + \frac{d_2}{2R} \right) \right] \quad (9')$$

il fattore $\zeta_{compl.}$ risulta anche in tal caso fornito dalle (6).

L'espressione finale del bilancio termico è la seguente:

$$\Delta\theta_a = \frac{1}{\rho_a c_a} \frac{1}{1 + \zeta_{compl.}} \cdot \frac{S}{V} \cdot \frac{1}{\frac{R}{\lambda_1} \cdot \ln\left(1 + \frac{d_1}{R}\right) + \frac{R}{\lambda_2} \cdot \ln\left(1 + \frac{d_2}{R + d_1}\right)} (\theta_f - \theta_a) \Delta t \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (10')$$

analoga alla (10) ove si sia posto

$$K_{eq} = \frac{1}{\frac{R}{\lambda_1} \ln\left(1 + \frac{d_1}{R}\right) + \frac{R}{\lambda_2} \ln\left(1 + \frac{d_2}{R + d_1}\right)} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})] \quad (8')$$

E' evidente che approssimando $\ln(1+x)$ con x e $(R+d_1)$ con R si ritrova l'espressione (8).

A titolo di esempio applicativo si riportano nelle figure 7 e 8 i grafici delle temperature delle sezioni di acciaio di riferimento quando ad uno spessore pre-esistente di calcestruzzo con aggregati calcarei di 70 mm si sovrappone uno spessore aggiuntivo di 22 mm di un materiale commercialmente conosciuto come Fendolite® ed avente le seguenti caratteristiche da catalogo:

$$\begin{cases} \lambda_i = 0,19 \text{ W}/(\text{m } ^{\circ}\text{C}) \\ c_i = 970 \text{ J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C}) \\ \rho_i = 680 \text{ Kg}/\text{m}^3 \end{cases}$$

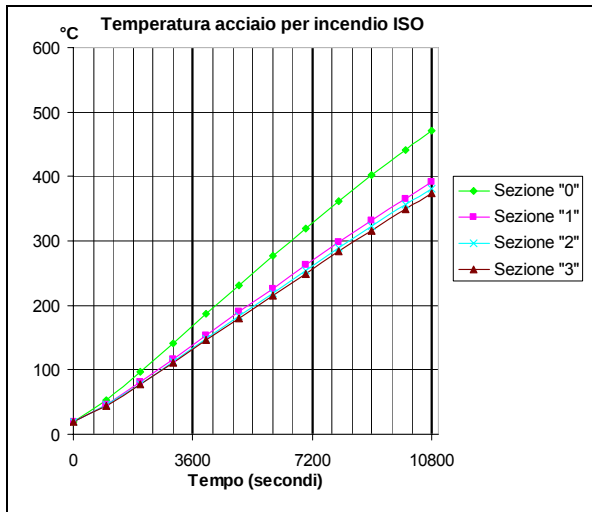


Fig. 7 – Temperature raggiunte dalle sezioni circolari di riferimento protette con due strati di materiali diversi, sottoposte a incendio ISO.

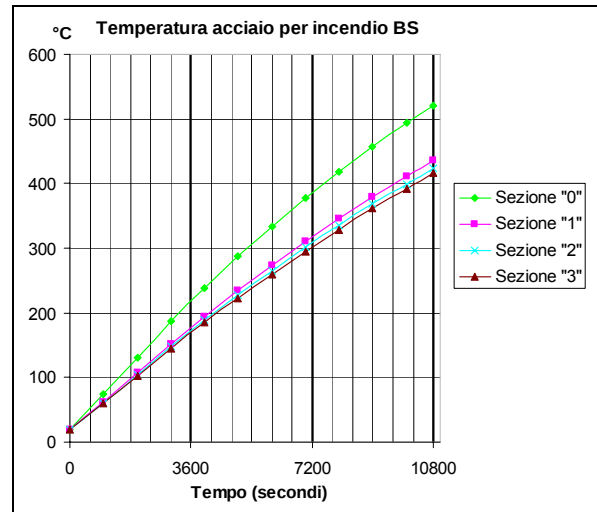


Fig. 8 – Temperature raggiunte dalle sezioni circolari di riferimento protette con due strati di materiali diversi, sottoposte a incendio BS.

6. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato preso in esame il procedimento analitico secondo la norma UNI 9503 per calcolare la resistenza al fuoco di elementi in acciaio protetti da rivestimenti isolanti, al fine di valutare la diminuzione di detta resistenza quando l'esposizione termica segue la curva tipica degli incendi da idrocarburi. Nella norma, infatti, come pure in molte valutazioni contenute in circolari dei VV.F., la curva temperatura-tempo di riferimento è quella dello standard internazionale ISO 834, derivante da esperienze sulla combustione di sostanze cellulosiche; tuttavia, tale curva appare inappropriata in ambienti industriali correlati alla produzione e/o all'immagazzinamento di quantità più o meno ingenti di sostanze idrocarburiche. Si è potuto constatare come, a parità di condizioni, la resistenza al fuoco degli elementi in acciaio protetti e sottoposti a incendio da queste sostanze, fenomeno schematizzato attraverso la curva standard secondo BS 476 ("Hydrocarbon Curve"), subisca una diminuzione generalmente compresa tra il 20 ed il 35% alle usuali temperature critiche dell'acciaio. Infine, è stata proposta una equazione di calcolo modificata, derivata da quella della norma UNI, con opportune ipotesi semplificative, per il caso di rivestimenti protettivi costituiti da due strati di materiale differente ed è stata ricavata l'espressione dello spessore equivalente che il rivestimento costituito da un solo tipo di materiale dovrebbe avere per raggiungere lo stesso livello di protezione antincendio.

L'approccio suggerito consente in modo rapido il calcolo di adeguamento di rivestimenti isolanti di numerosi impianti esistenti per i quali è richiesta la verifica di resistenza al fuoco di strutture metalliche in presenza di condizioni di incendio più severe di quelle adottate inizialmente in fase di progettazione.

L'approccio analitico necessita di verifiche numerico-sperimentali. Prime indagini sul calcolo dell'evoluzione temporale della temperatura in strutture di acciaio rivestite sono state condotte con valutazioni agli elementi finiti che consentono di rilasciare alcune fra le principali ipotesi di calcolo del metodo analitico. Ulteriori ricerche saranno altresì orientate alla valutazione della resistenza al fuoco sia mediante calcolo agli elementi finiti, che consentirà di valutare in modo più accurato di quanto previsto dalla norma l'effetto della capacità termica del rivestimento isolante sulla dinamica del riscaldamento delle strutture metalliche, sia, possibilmente, mediante indagini di laboratorio.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] U. Bonessio, M. Caciolai et alii, *La resistenza al fuoco delle strutture d'acciaio dotate di rivestimenti protettivi*, Progetto di ricerca n. 5 anno 2001 del laboratorio di scienza delle costruzioni, http://www.vigilfuoco.it/sic_prev/studio_ricerca/index_ricerca.asp, (2001).
- [2] CNVVF-CCI, Norma UNI 9503 – *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio*, UNI, (Aprile 1989).
- [3] GEIE Programme GASAFE: *“Etude de la protection au feu par ignifugaion des reservoirs contenant des gaz combustibles liquéfies sous pression”* - Rapport final d'essais, (Dicembre 1993).
- [4] F. Marrazzo, *La prevenzione incendi*, Edizione Biblion , (2003).