

LA RESISTENZA AL FUOCO DELLE COSTRUZIONI DI ACCIAIO

Istituto Superiore Antincendio, Roma
05 novembre 2024

Il contributo della zincatura nella prestazione di resistenza al fuoco delle strutture di acciaio

ORGANIZZATO DA



Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Roma



Fondazione
Ordine degli Ingegneri
Provincia di Roma

IN COLLABORAZIONE CON



Fondazione
Promozione Acciaio



Commissione per la Sicurezza
delle Costruzioni in Acciaio
in caso d'incendio



CON IL PATROCINIO DI



oice

Dott. Ing. Donatella de Silva

**Di.St. - Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
Università di Napoli Federico II (e-mail: donatella.desilva@unina.it)**



STATO DELL'ARTE

 **Test sperimentali nell'ambito del PROGETTO DI RICERCA NAZIONALE IN FASE DI SVILUPPO - Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II & AIZ - ASSOCIAZIONE ITALIANA ZINCATURA**

 **VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DELLA ZINCATURA PER DIVERSE CURVE DI INCENDIO**

 **ESEMPI APPLICATIVI**

La zincatura degli elementi di acciaio

La zincatura:

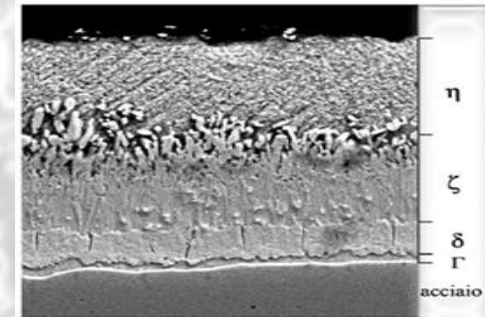
La zincatura è un processo di rivestimento superficiale il cui scopo è la protezione dell'acciaio dalla corrosione utilizzando le proprietà dello zinco.

Zincatura a caldo:

Formazione di un rivestimento protettivo di zinco sulla superficie di componenti di acciaio, ottenuto immergendo l'acciaio nello zinco fuso a circa 450°C.



Il rivestimento così ottenuto si salda alla superficie dell'acciaio creando una lega tra zinco e acciaio



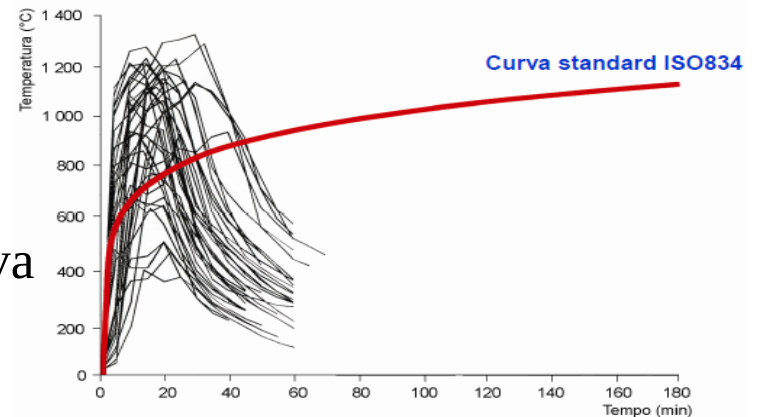
CATEGORIE DI COMPOSIZIONE DELL'ACCIAIO SECONDO L'EN ISO 14713-2

Category A	low silicon content steel ($\text{Si} \leq 0.04\%$)
Category B	non-Sandelin intermediate composition steels ($0.14\% < \text{Si} \leq 0.22\%$)
Category C	Sandelin steel ($0.04\% < \text{Si} \leq 0.14\%$)
Category D	hyper-Sandelin steels ($\text{Si} > 0.22\%$)

Evoluzione della temperatura negli elementi strutturali

ANALISI DEL TRANSITORIO TERMICO

Definizione della curva
temperatura-tempo
dell'incendio



Definizione del flusso
termico

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

LA ZINCATURA PUÒ MIGLIORARE IL
COMPORTAMENTO DEGLI ELEMENTI DI ACCIAIO IN
CASO DI INCENDIO, RIDUCENDO IL LORO
RISCALDAMENTO GRAZIE AD UN MINORE VALORE DI
EMISSIVITÀ DELLA SUPERFICIE ESPOSTA ϵ_m

MINORE È L'EMISSIVITÀ
RELATIVA DELLA
SUPERFICIE, MINORE È IL
RISCALDAMENTO
DELL'ELEMENTO

STATO DELL'ARTE

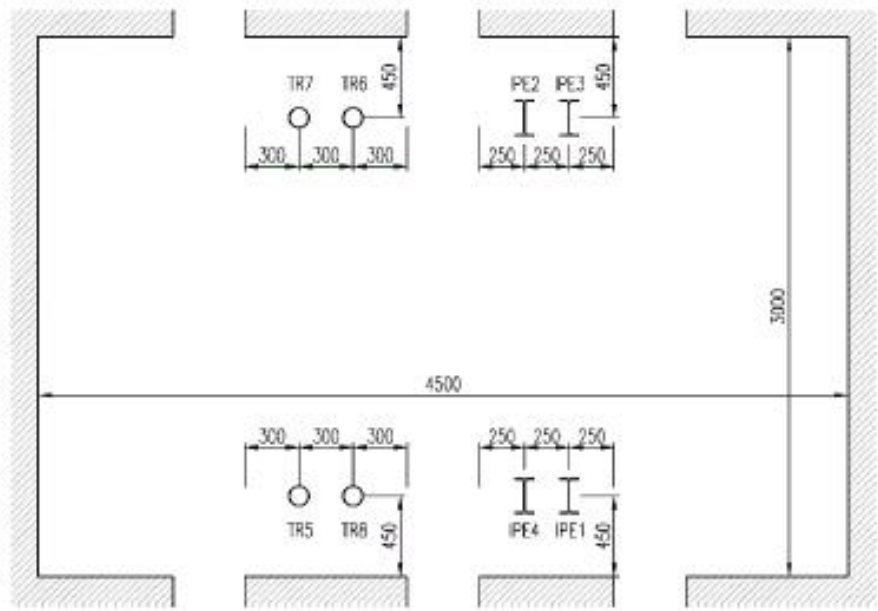
sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

1. CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE (J. Jirku e F. Wald)

PROVA SPERIMENTALE A SCALA REALE IN FORNO ORIZZONTALE

Provini sottoposti a prova

- 4 sezioni IPE 200
- 4 sezioni circolari cave TR 114,3X4



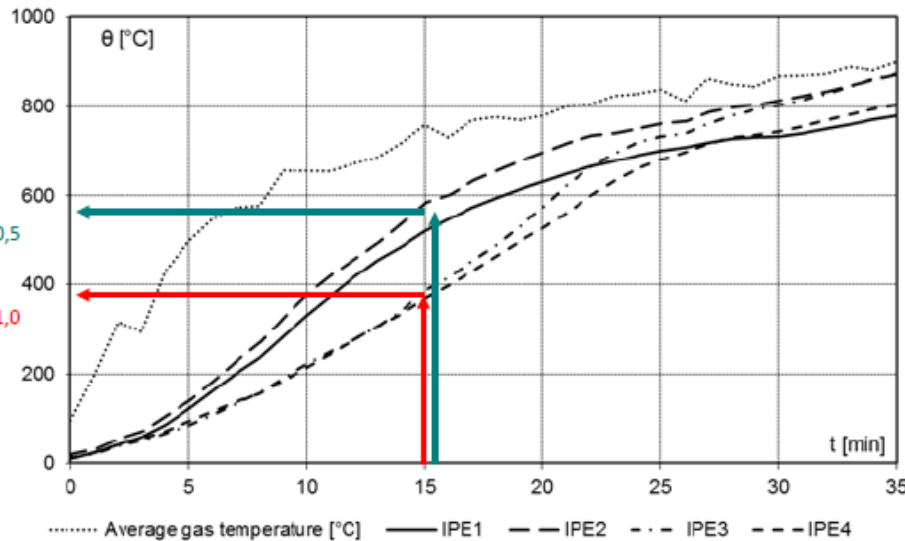
STATO DELL'ARTE

sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

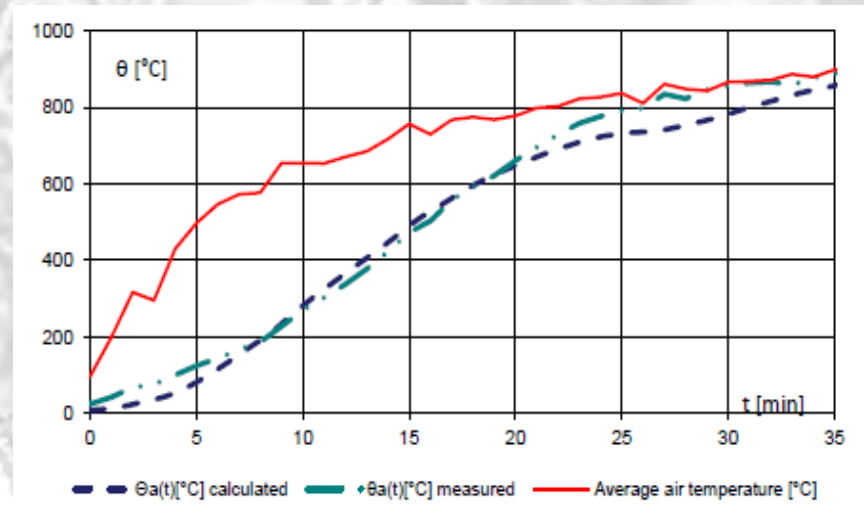
1. CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE (J. Jirku e F. Wald)

PROVA SPERIMENTALE A SCALA REALE IN FORNO ORIZZONTALE

Risultati sperimentali



Confronto tra la curva di temperatura del campione zincato misurata e la curva calcolata con un valore di emissività calcolato risultante dei campioni zincati $\varepsilon = 0,32$



STATO DELL'ARTE

sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

2. TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH, TUM (M. Mensinger e C. Gaigl)

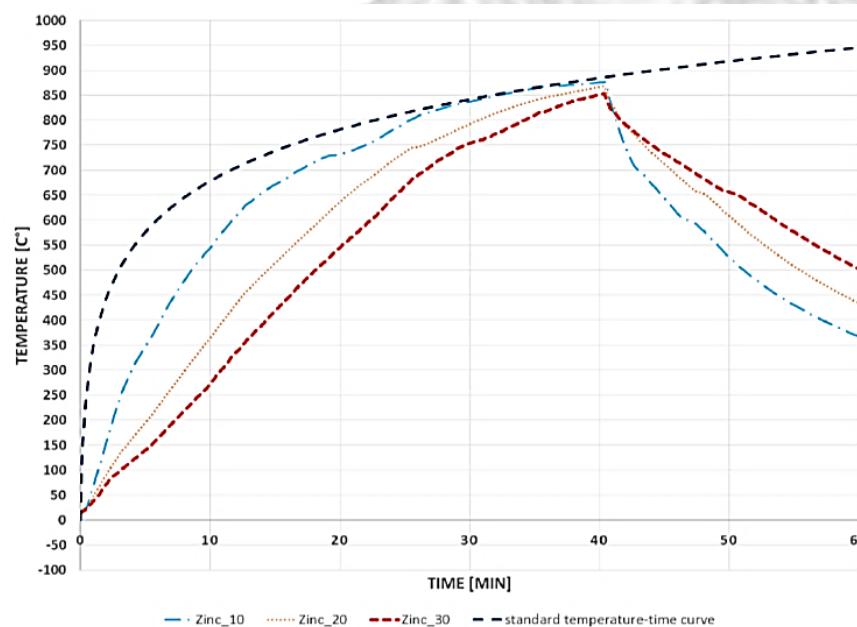
PROVE PRELIMINARI IN FORNO

Provini sottoposti a prova

- piatti in acciaio zincato, non zincato e arrugginito con diversi valori dei fattori di sezione A_m/V



Risultati sperimentali ottenuti per i campioni zincati:



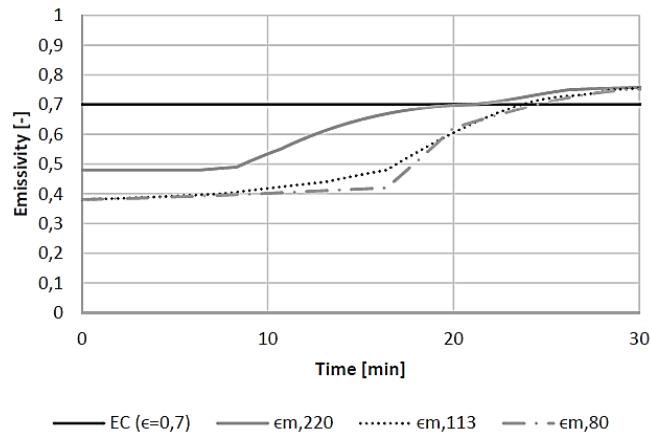
STATO DELL'ARTE

sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

2. TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH, TUM (M. Mensinger e C. Gaigl)

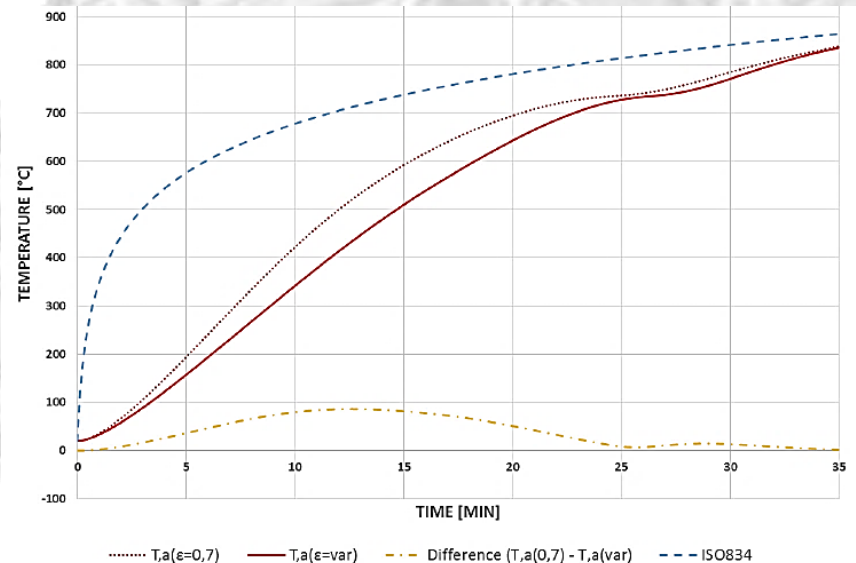
PROVE PRELIMINARI IN FORNO

Curve di emissività - tempo per ciascun A_m/V



- l'emissività dipende dalla temperatura dell'elemento con valori minori del valore costante fornito dall'Eurocodice di 0,7
- Il momento in cui l'emissività aumenta cambia in accordo ai diversi A_m/V

Curve di temperatura calcolate per $A_m/V=113 \text{ m}^{-1}$ calcolate con ϵ_{var} e $\epsilon_{\text{cost}}=0,7$



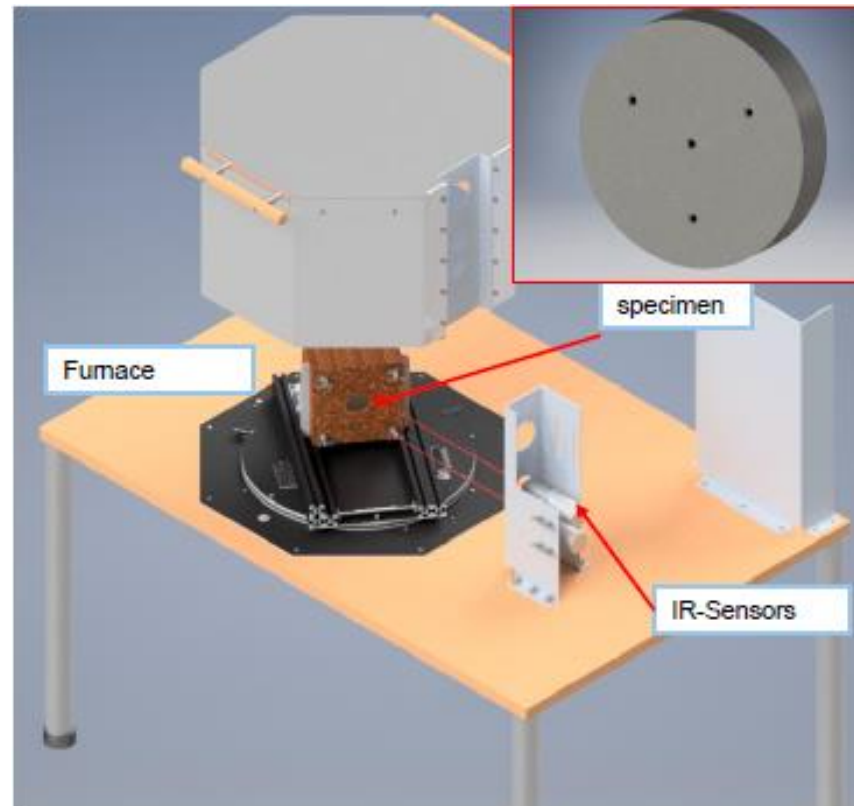
STATO DELL'ARTE

sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

2. TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH, TUM (M. Mensinger e C. Gaigl)

PROVE DI EMISSIVITÀ IN PICCOLA SCALA (EMISSIONITY PERFORMANCE-TEST, EP-T)

Setup di prova EP-T



(Gaigl C., Mensinger M. TUM)

STATO DELL'ARTE

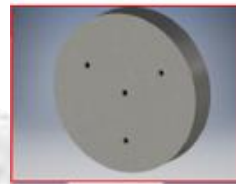
sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

2. TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH, TUM (M. Mensinger e C. Gaigl)

PROVE DI EMISSIVITÀ IN PICCOLA SCALA (EMISSIVITY PERFORMANCE-TEST, EP-T)

Provini sottoposti a prova

- campioni circolari con un diametro di 50mm e uno spessore di 10mm di tre diverse categorie di acciaio A, B e D (secondo la norma EN ISO 14713-2)



Category A	low silicon content steel ($\text{Si} \leq 0.04\%$)
Category B	non-Sandelin intermediate composition steels ($0.14\% < \text{Si} \leq 0.22\%$)
Category C	Sandelin steel ($0.04\% < \text{Si} \leq 0.14\%$)
Category D	hyper-Sandelin steels ($\text{Si} > 0.22\%$)

Poiché l'emissività dipende da diverse caratteristiche superficiali e in maniera particolare dalla composizione chimica, dalla rugosità e dal grado di ossidazione.

Le diverse superfici zincate sono state combinate con diverse condizioni superficiali

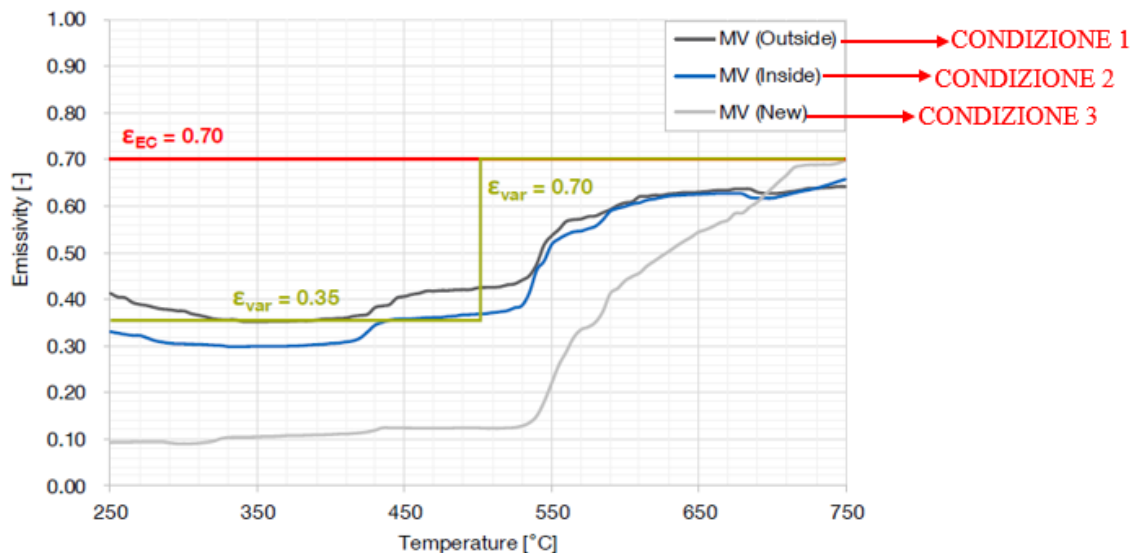
STATO DELL'ARTE

sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

2. TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH, TUM (M. Mensinger e C. Gaigl)

PROVE DI EMISSIVITÀ IN PICCOLA SCALA (EMISSIVITY PERFORMANCE-TEST, EP-T)

Curve di emissività al variare della temperatura per i campioni di acciaio di categoria A



CONDIZIONE 1: Campione zincato conservato in modo sfavorevole per otto settimane e successivamente conservato, per un anno, all'esterno.

CONDIZIONE 2: Campione zincato conservato in modo sfavorevole per otto settimane e successivamente conservato, per un anno, all'interno di una sala con aria fresca.

CONDIZIONE 3: Campione appena zincato conservato all'interno in una sala con aria fresca per un tempo di conservazione più breve di quattro settimane.

STATO DELL'ARTE

sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

3. EFFECTIS – CTICM / EGGA / GALVAZINC

DUE PROVE SPERIMENTALI A SCALA REALE IN FORNO

Provini sottoposti a prova

- Colonne esposte su 4 lati
- Travi esposte su 3 lati



	Specimen	Steel profile	Specificity ⁽¹⁾
Columns (Test no. 1)	C1	IPE 180	G
	C2	IPE 240	G
	C3	IPE 400	G
	C4	HEM 300	G
	C5	HEA 400	G
	C6	IPE 180	SG
	C7	IPE 240	SG
	C8	IPE 400	SG
	C9	IPE 400	B
Columns (Test no. 2B)	C1	IPE 400	G
	C2	IPE 400	B
	C3	S325×10	G
	C4	S325×10	B
Beams (Test no. 2A)	B1	IPE 180	G
	B2	IPE 240	G
	B3	IPE 400	G
	B4	IPE 400	B
	B5	HEM 300	G
	B6	HEA 400	G

⁽¹⁾ "G": galvanized, "SG": sand-blasted and galvanized, "B": bare

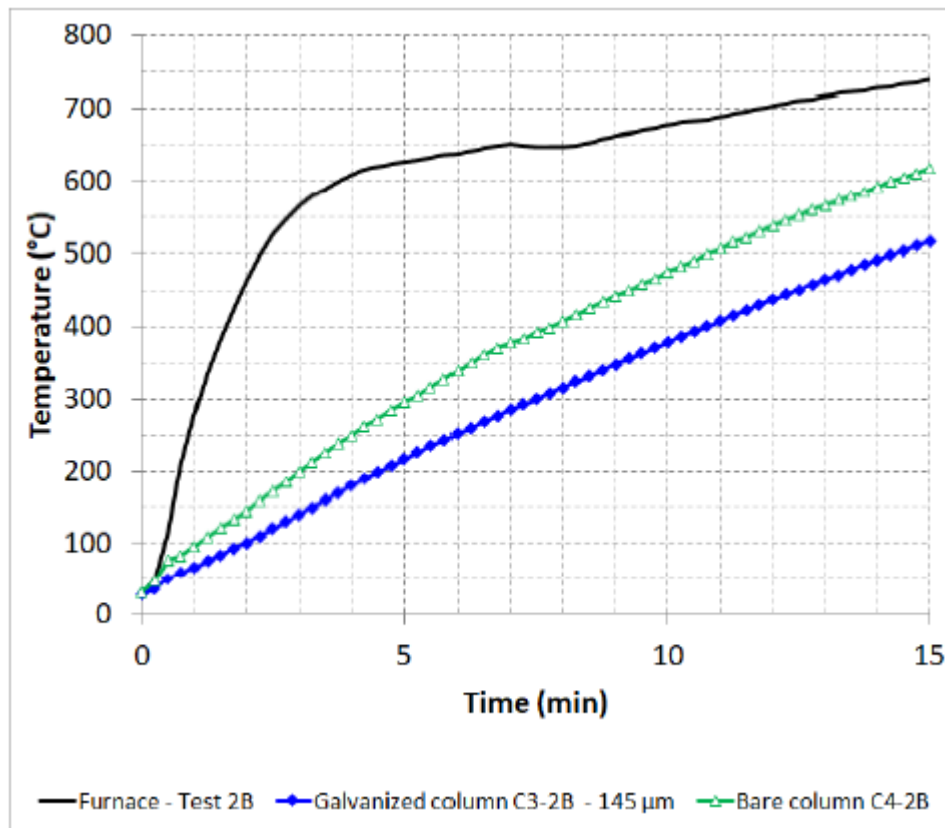
STATO DELL'ARTE

sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

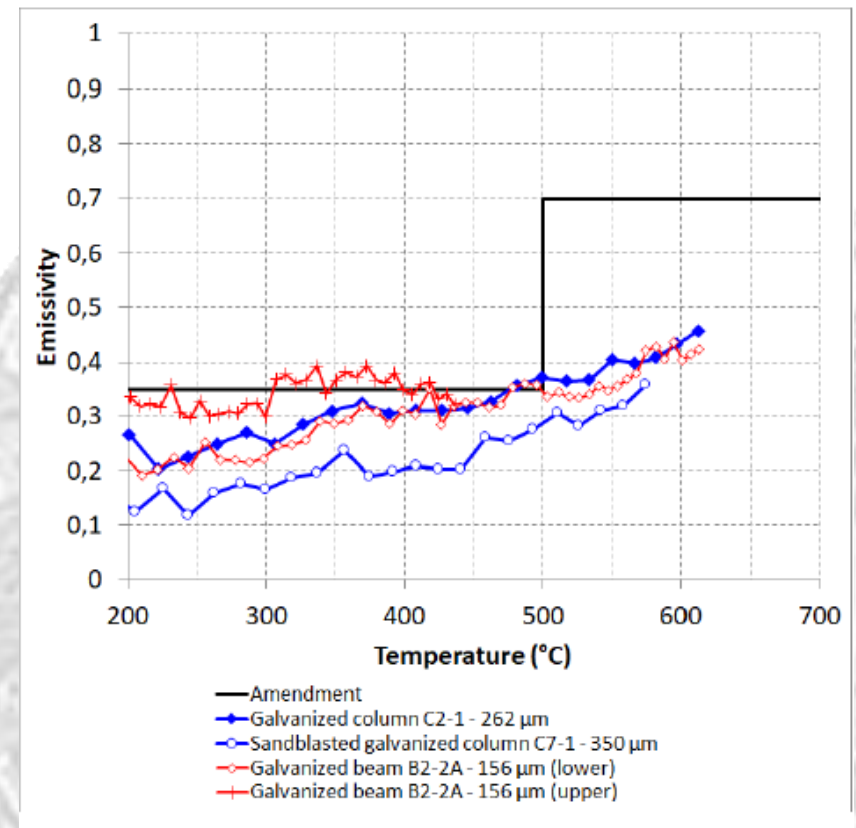
3. EFFECTIS – CTICM / EGGA / GALVAZINC

DUE PROVE SPERIMENTALI A SCALA REALE IN FORNO

Curve di temperature sperimentali per la colonna con sezione S325x10



Curve di emissività ottenute per la colonna e la trave con sezione IPE 240



STATO DELL'ARTE

sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

- EN1993-1-2 attualmente fornisce un valore di emissività per l'acciaio strutturale costante indipendente dalla superficie pari a: $\varepsilon_{ECcost} = 0,70$

PER L'ACCIAIO ZINCATO L'EMISSIVITÀ DIPENDE DALLA TEMPERATURA

$$\varepsilon = 0.35 \quad \theta_a \leq 500^\circ\text{C} \quad \varepsilon = 0.70 \quad \theta_a > 500^\circ\text{C}$$

Modifica proposta per il prossimo Eurocodice EN1993-1-2

Type of steel	$\varepsilon_m \leq 500^\circ\text{C}$	$\varepsilon_m > 500^\circ\text{C}$
Carbon steel	0.70	
HDG steel ¹	0.35	0.70

¹⁾ Steel that has been hot-dip galvanized according to EN ISO 1461[1] and with a steel composition according to category A or B of EN ISO 14713-2 [10]

[Nuovo approccio per la bozza gli Eurocodici strutturali EN1993-1-2:20XX]

STATO DELL'ARTE

**sui recenti studi teorico-sperimentali relativi al comportamento di elementi di acciaio
dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio**

ATTIVITÀ DI RICERCA IN CORSO PRESSO

**IL DiST - DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L' INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA
CON**

AIZ - ASSOCIAZIONE ITALIANA ZINCATURA



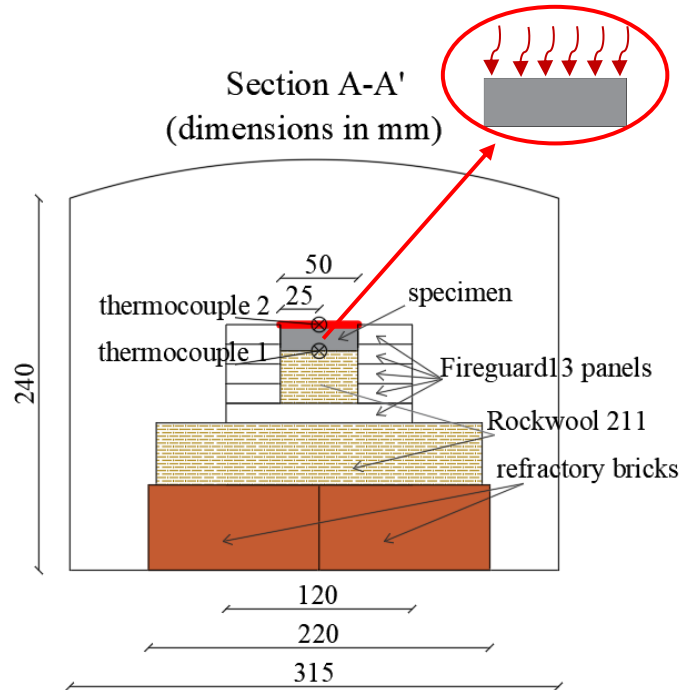
**EFFETTI DELLA ZINCATURA SULLA RESISTENZA AL
FUOCO DI ELEMENTI DI ACCIAIO**

GRUPPO DI LAVORO

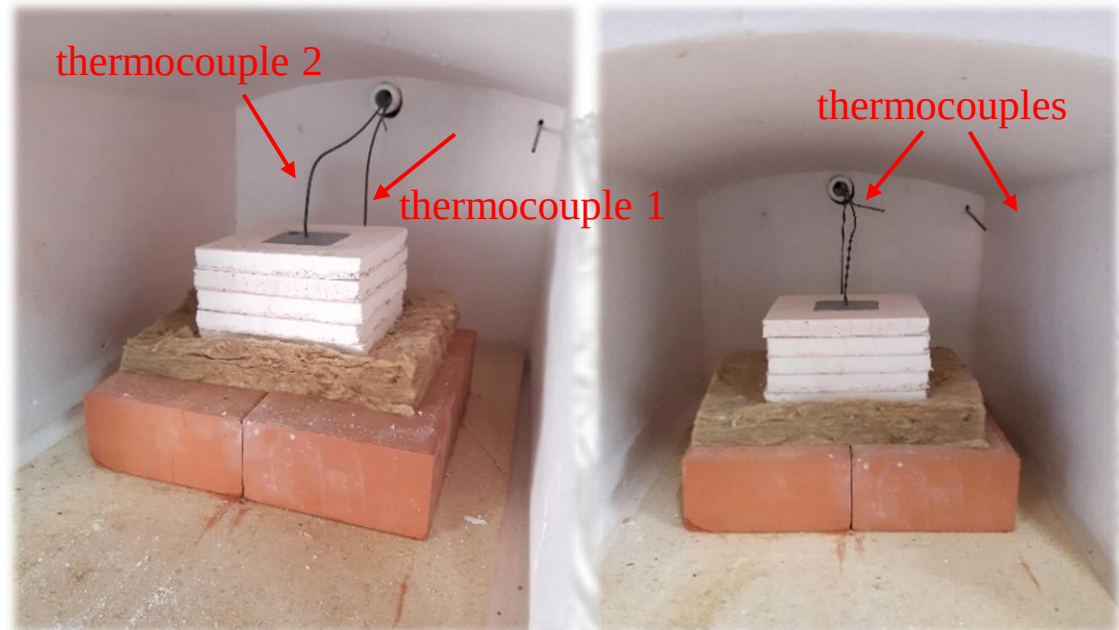
Emidio Nigro , Margherita Autiero , Antonio Bilotta , Donatella de Silva

Comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

PROVE SPERIMENTALI SU ELEMENTI DI ACCIAIO ZINCATI E NON ZINCATI IN PICCOLA SCALA



setup di prova : sezione trasversale

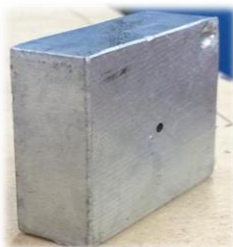
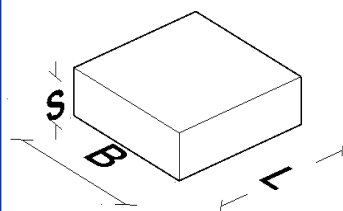


setup composto prima dell'esecuzione della prova

Comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

PROVINI SOTTOPOSTI A PROVA

B=L=50mm



**NON
ZINCATO (NG)**

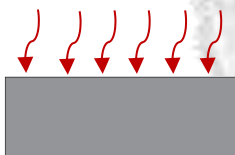


ZINCATO (G)



Blank steel	Galvanized steel			A_m/V [m ⁻¹]	s [mm]
20_NG_1	20_G_1	20_G_2	20_G_3	20	50
30_NG_1	30_G_1	30_G_2	30_G_3	30	35
40_NG_1	40_G_1	40_G_2	40_G_3	40	25
50_NG_1	50_G_1	50_G_2	50_G_3	50	20
60_NG_1	60_G_1	60_G_2	60_G_3	60	17
70_NG_1	70_G_1	70_G_2	70_G_3	70	14
80_NG_1	80_G_1	80_G_2	80_G_3	80	12.5
90_NG_1	90_G_1	90_G_2	90_G_3	90	11
100_NG_1	100_G_1	100_G_2	100_G_3	100	10
125_NG_1	125_G_1	125_G_2	125_G_3	125	8
200_NG_1	200_G_1	200_G_2	200_G_3	200	5

Fattore di sezione $A_m/V = \frac{\text{Superficie esposta al fuoco}}{\text{Volume dell'elemento}}$



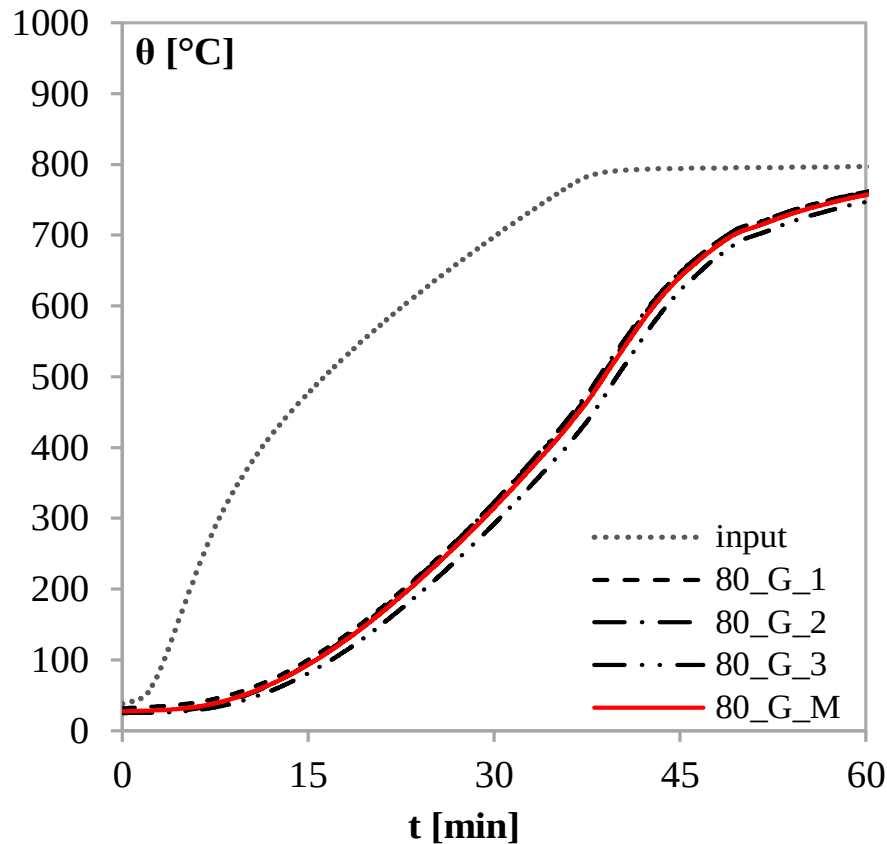
**piatto esposto al fuoco
su un lato**

$\Rightarrow A_m/V = \frac{1}{s}$

Comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

CONFRONTO DEI RISULTATI SPERIMENTALI

Curve di temperatura di tre provini ZINCATI con lo stesso valore di $A_m/V = 80 \text{ m}^{-1}$

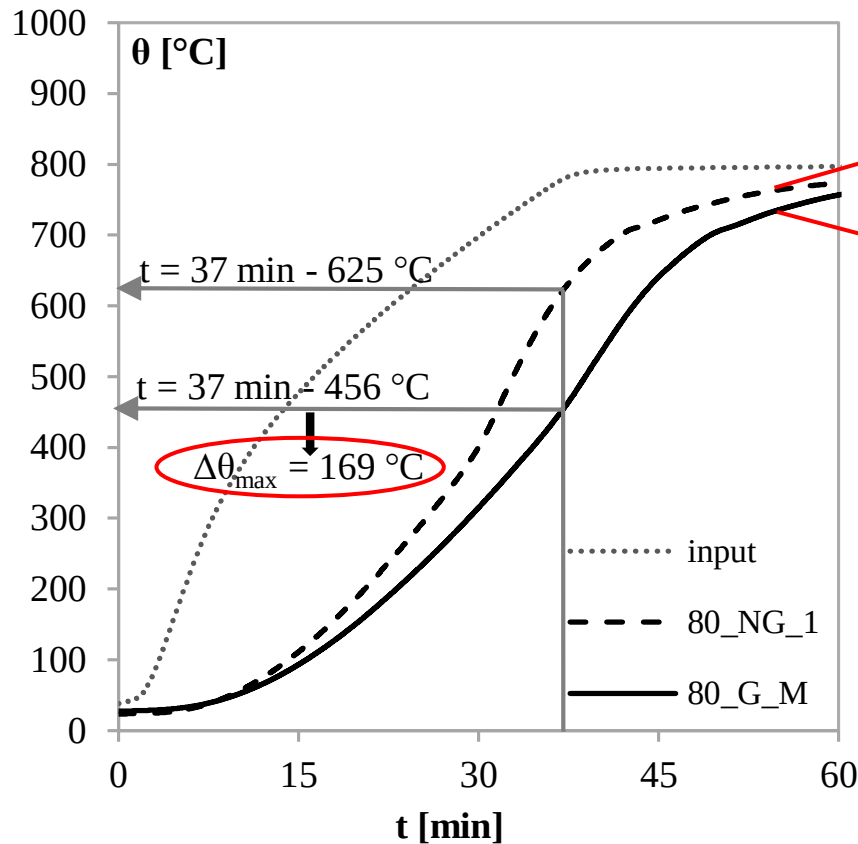


Gli andamenti di temperatura per i tre provini zincati sono sufficientemente uguali; ciò permette di considerare un andamento di temperatura medio (indicato come G_M), per ogni A_m/V

Comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

CONFRONTO DEI RISULTATI SPERIMENTALI

Curve di temperatura del provino non zincato (G) e il valore medio dei provini ZINCATI (G) con lo stesso valore di $A_m/V = 80 \text{ m}^{-1}$



Non zincato (NG)

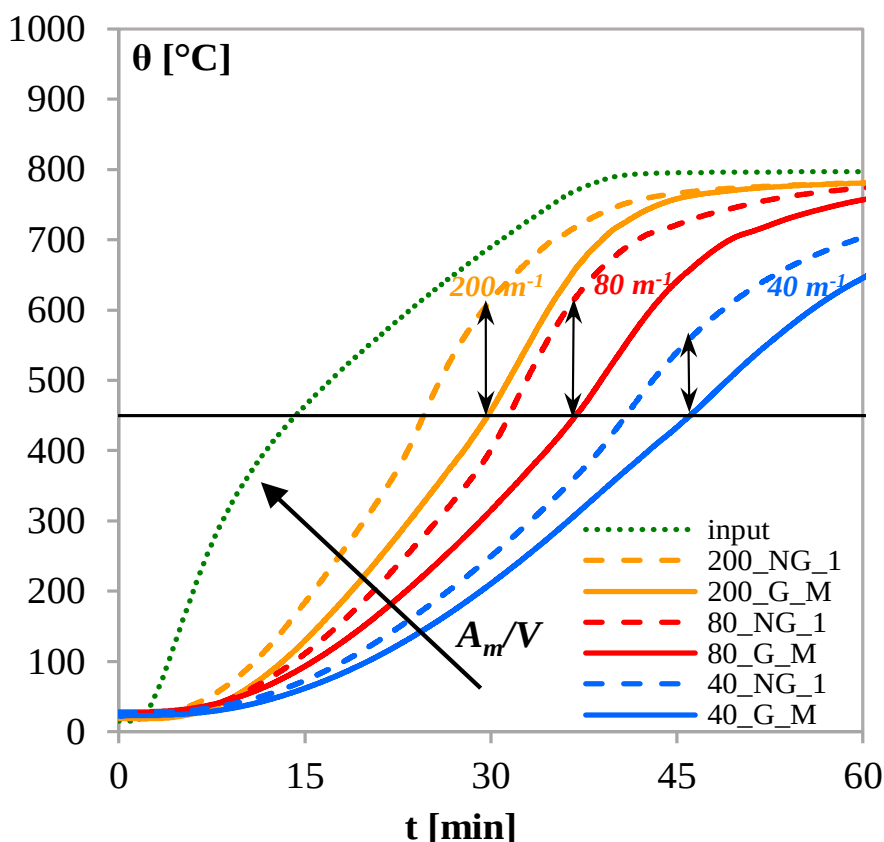
Zincato (G)

**L'EFFETTO DELLA ZINCATURA
SUL RALLENTAMENTO DEL
RISCALDAMENTO DEL
PROVINO ZINCATO (G)**

Comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

CONFRONTO DEI RISULTATI SPERIMENTALI

Provini ZINCATI e provini NON ZINCATI con differenti valori di A_m/V



- Effetto di A_m/V

- Effetto della zincatura

$$\theta_G < \theta_{NG}$$
$$\Delta\theta_{\max} \text{ quando } \theta_G \approx 450 \text{ }^\circ\text{C}$$

Comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

CONFRONTO RISULTATI SPERIMENTALI E ANALITICI

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

CALCOLO ANALITICO DELLE TEMPERATURE NELLE SEZIONI IN ACCIAIO
Metodo semplificato EN1993-1-2

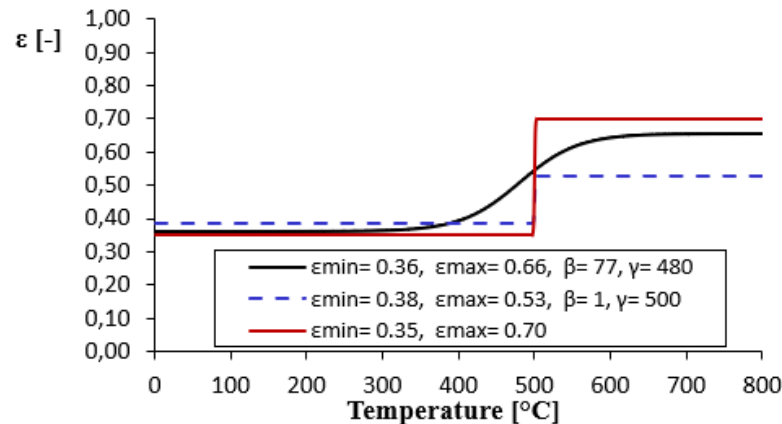
$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad \dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

coefficiente di convezione α_c
calcolato in base alle
temperature registrate per i
campioni non zincati:

$$\alpha_c = 6.4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\varepsilon = 0.5 \cdot (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \cdot \tanh \left[\left(\frac{1}{\beta} \right) \cdot (\theta_{a,t} - \gamma) \right] + 0.5 \cdot (\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min})$$



- **Calibrazione 1 per ogni fattore di sezione A_m/V**
- **Calibrazione 2 tenendo conto di tutti i risultati delle prove**
- **Approccio a due fasi suggerito in Mensinger and Gaigl (2019) e inserito nella bozza degli Eurocodici**

Le tre calibrazioni confermano che l'emissività dipende dalla temperatura dell'acciaio, con un valore minore fino ad una temperatura di circa 500 °C

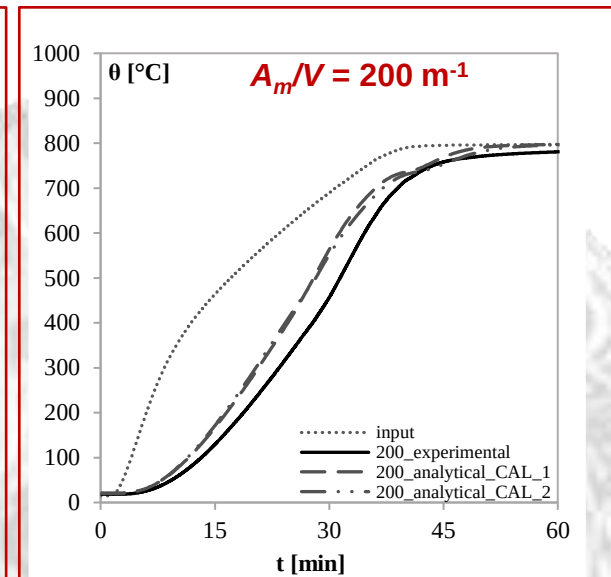
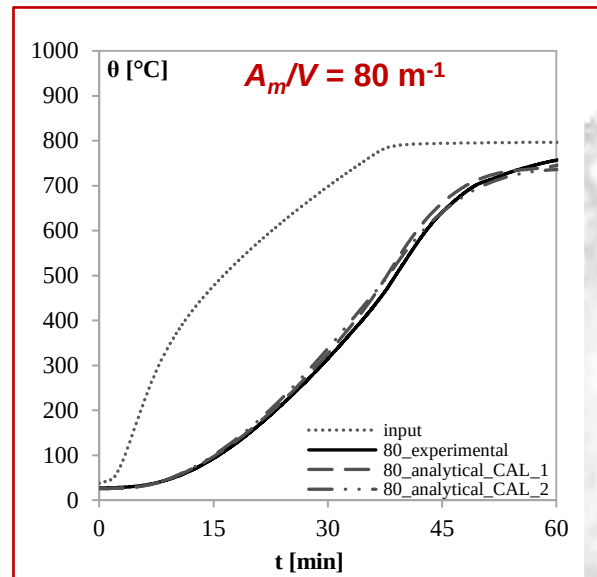
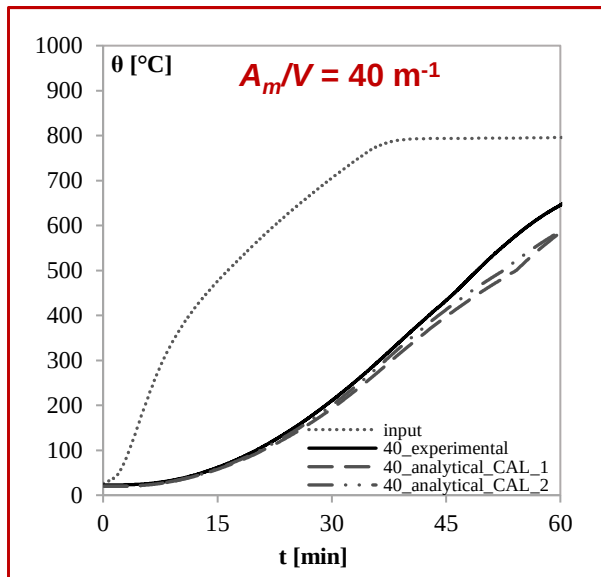
Comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

CONFRONTO RISULTATI SPERIMENTALI E ANALITICI

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

CALCOLO ANALITICO DELLE TEMPERATURE NELLE SEZIONI IN ACCIAIO

Metodo semplificato EN1993-1-2



LE VARIE CALIBRAZIONI PORTANO A RISULTATI SIMILI

Comportamento di elementi di acciaio dotati di zincatura esposti agli effetti dell'incendio

ANALISI TERMICHE DI ELEMENTI DI ACCIAIO ZINCATI

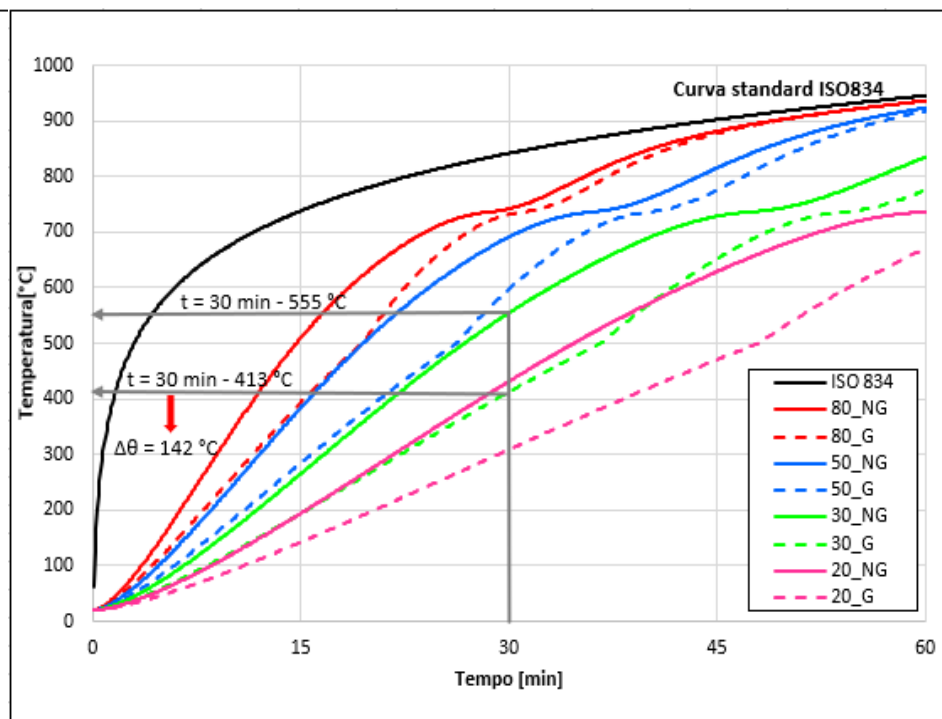
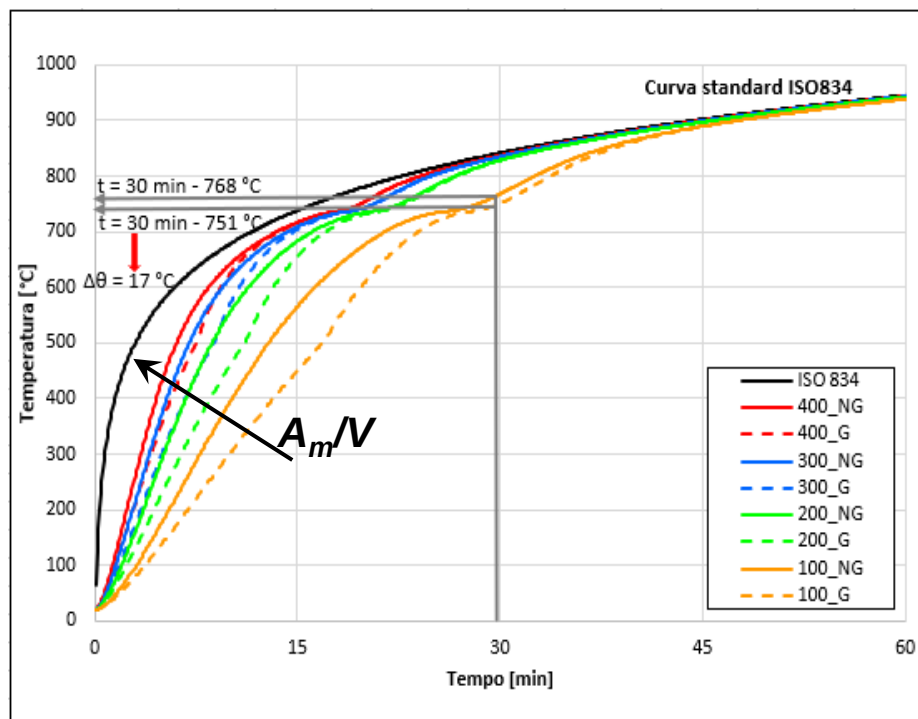
Implementazione del metodo analitico per la valutazione della temperatura per sezioni zincate e non zincate

Curve continue – Natural steel

$\epsilon_{\text{cost}} = 0,70$ (EN1993-1-2)

Curve tratteggiate – Galvanized steel

$\epsilon = 0,35 \quad \theta_a \leq 500^\circ\text{C} \quad \epsilon = 0,70 \quad \theta_a > 500^\circ\text{C}$



ANALISI CON CURVA DI INCENDIO NOMINALE STANDARD

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

METODO DELLA TEMPERATURA CRITICA

□ In accordo ai modelli di calcolo semplificati, per **elementi riscaldati uniformemente**: $R_{fi,d,t} = k_{y,\theta} R_{fi,d,0}$

□ D'altro canto, la resistenza al fuoco deve soddisfare:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d} = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} R_{fi,d,0} = \mu_0 R_{fi,d,0} \Rightarrow k_{y,\theta} \geq \mu_0$$

□ In particolare, quando $k_{y,\theta} = \mu_0$ la temperatura corrispondente è definita come temperatura critica θ_{cr}

□ In EN1993-1-2, è data una semplice formula per determinare la temperatura critica θ_{cr}

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

□ Verifica nel campo delle temperature:

$$\theta_{d,t} \leq \theta_{cr}$$

"Nomogramma" – Resistenza al fuoco

Nomogramma

Metodo grafico di valutazione della resistenza al fuoco di strutture in acciaio (basato su EN 1993-1-2 Luglio 2005)



Premessa

Il 20 gennaio 2006, su iniziativa di Fondazione Promozione Acciaio e con la partecipazione del Ministero dell'Interno, è stata costituita la **Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in caso di Incendio**.

La Commissione Tecnica, che è composta da rappresentanti nazionali nel campo della ricerca europea, da esponenti del Ministero dell'Interno coinvolti nella definizione del quadro normativo nazionale, da docenti universitari e da liberi professionisti, si propone come un vero e proprio punto di riferimento a livello nazionale per professionisti e operatori di settore italiani sul tema del fuoco.

Il "Nomogramma", primo fra i diversi strumenti tecnici che la **Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in caso di Incendio** intende divulgare, è un semplice supporto operativo, basato sull'Eurocodice EN1993-1-2, a disposizione del professionista per lo stima della resistenza al fuoco delle strutture di acciaio.

È sempre possibile un aggiornamento sui lavori della Commissione consultando il sito: www.promozioneacciaio.it

1- INTRODUZIONE

Le richieste di resistenza al fuoco per le strutture (classi di resistenza: R30/R60/R90...) sono stabilite dai regolamenti vigenti. Tali requisiti sono fissati in generale sulla base della destinazione d'uso degli edifici, dell'altezza e della superficie in pianta dell'edificio, del carico di incendio, del numero di persone presenti e dell'effetto delle misure di protezione adottate quali, ad esempio gli sprinkler, la rete di idranti, gli evacuatori di fumo e calore, i sistemi di rivelazione, la facilità di accesso degli operatori VVF, etc.

Il presente report descrive il metodo analitico per il calcolo per elementi di acciaio basato sul procedimento semplificato tratto dal documento europeo: **EN 1993-1-2 - Progettazione delle strutture di acciaio. Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio (Luglio 2005)**.

I metodi analitici sono i procedimenti di riferimento per il calcolo di strutture ed elementi strutturali. Essi possono essere attuati in forma avanzata o semplificata, come nel presente report, attraverso il ricorso a grafici o tabelle. I metodi analitici, alternativi in generale alle prove di laboratorio, possono essere da esse integrati, come nel caso della determinazione del contributo offerto dai sistemi protettivi.

2 - PRINCIPI DI CALCOLO

2.1 - Ipotesi generali

Il procedimento di calcolo è applicato ad elementi sottoposti a trazione pura, flessione pura o compressione pura. Il metodo non è applicabile ad elementi soggetti a sollecitazioni composte e a fenomeni di svrgolamento. Non sono inclusi metodi di calcolo per elementi con sezione composta acciaio-c/c. La sezione risulta verificata fino a che la resistenza di progetto è superiore alle sollecitazioni di progetto:

$$E_{k,d} \leq R_{k,d} \quad [2.1]$$

dove

$E_{k,d}$ sollecitazione di progetto dell'elemento in caso di incendio, ottenuta attraverso la combinazione dei carichi definita nel Testo Unico "Norme Tecniche per le Costruzioni".

$R_{k,d}$ resistenza di progetto della sezione durante l'incendio, al tempo t , calcolata in accordo a EN 1993-1-2 ($\gamma_{k,d} = 1.0$).

Le ipotesi principali sono quelle valide nell'ambito del metodo di calcolo semplificato per singoli elementi:

- la curva di incendio impiegata nel calcolo è la curva temperatura-tempo nominale standard (ISO834);
- la temperatura è uniforme sull'elemento strutturale ad ogni istante;
- si trascurano gli effetti delle dilatazioni termiche;
- per le sezioni di classe di duttilità 4 la temperatura critica è 350°C;
- il procedimento è valido per tutti i tipi di acciaio indicati in EN 10025.

2.2 - Caratteristiche meccaniche dell'acciaio alle alte temperature

Le caratteristiche meccaniche dell'acciaio cambiano al variare della temperatura (Fig. 1). Per un elemento con distribuzione di temperature uniforme la temperatura critica è definita come la temperatura per la quale la resistenza diventa uguale alla sollecitazione dovuta ai carichi applicati.

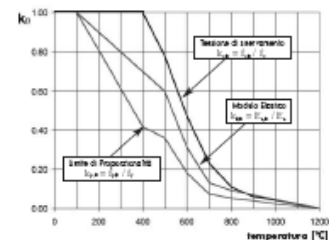


Fig. 1: Curve di riduzione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio

☐ progettisti :

valutazione preliminare della resistenza al fuoco di strutture di acciaio

☐ operatori di controllo (VVF)

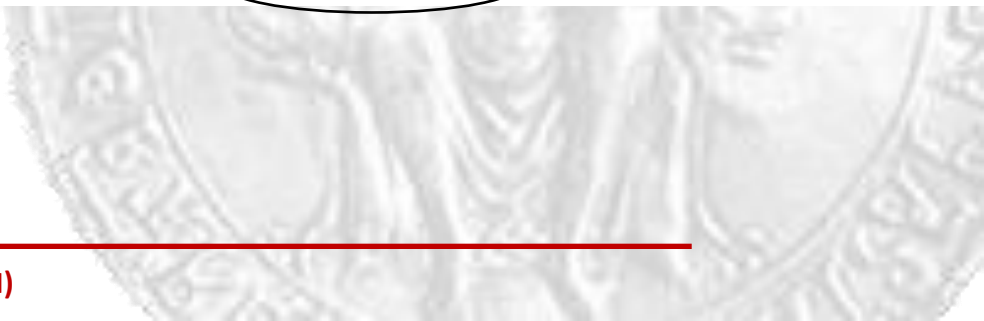
progetti soggetti al controllo dell'autorità competente

EN 1993-1-2



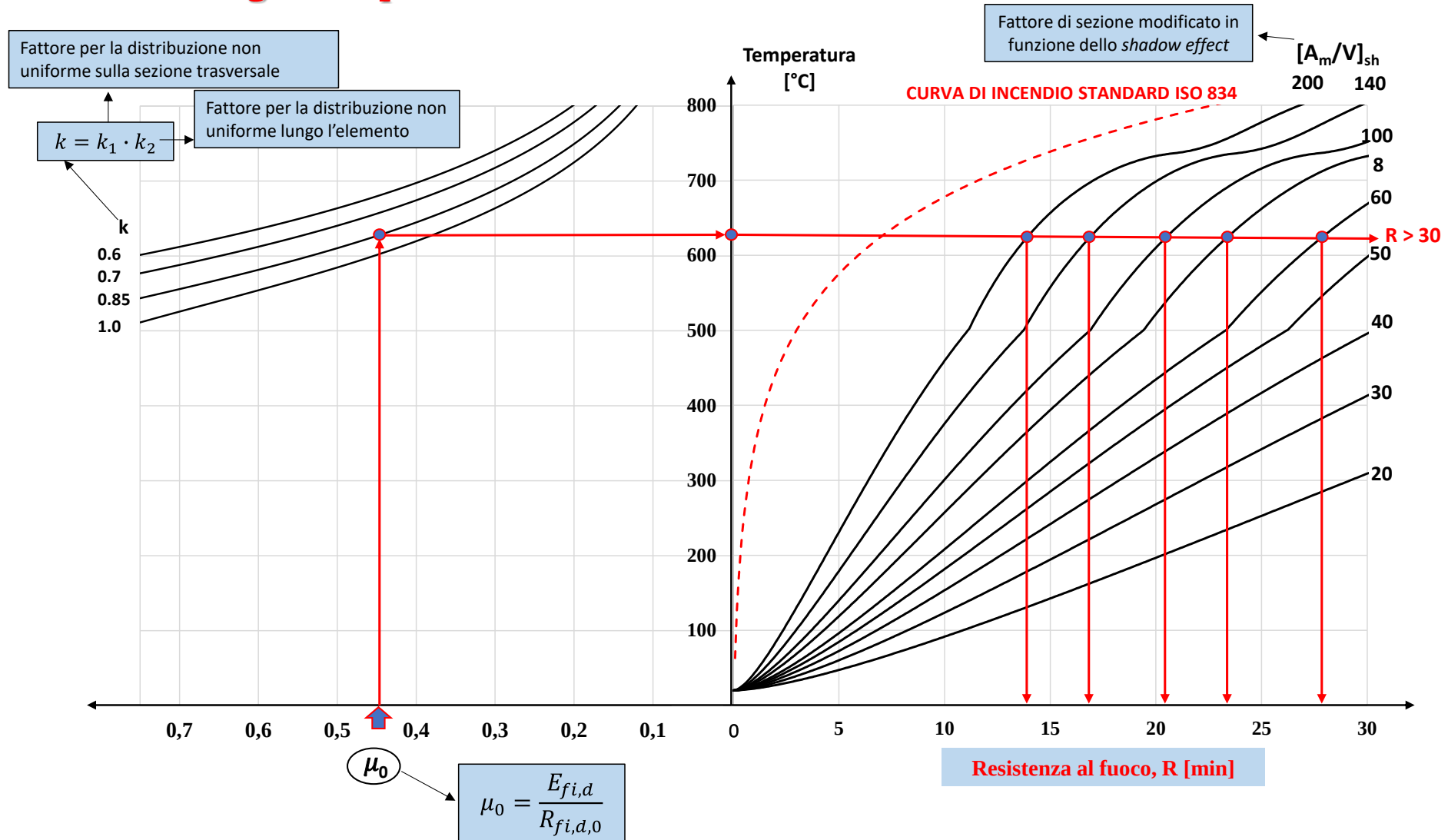
IL NOMOGRAMMA PER ELEMENTI DI ACCIAIO ZINCATI

metodo grafico per il dimensionamento delle strutture in acciaio zincate



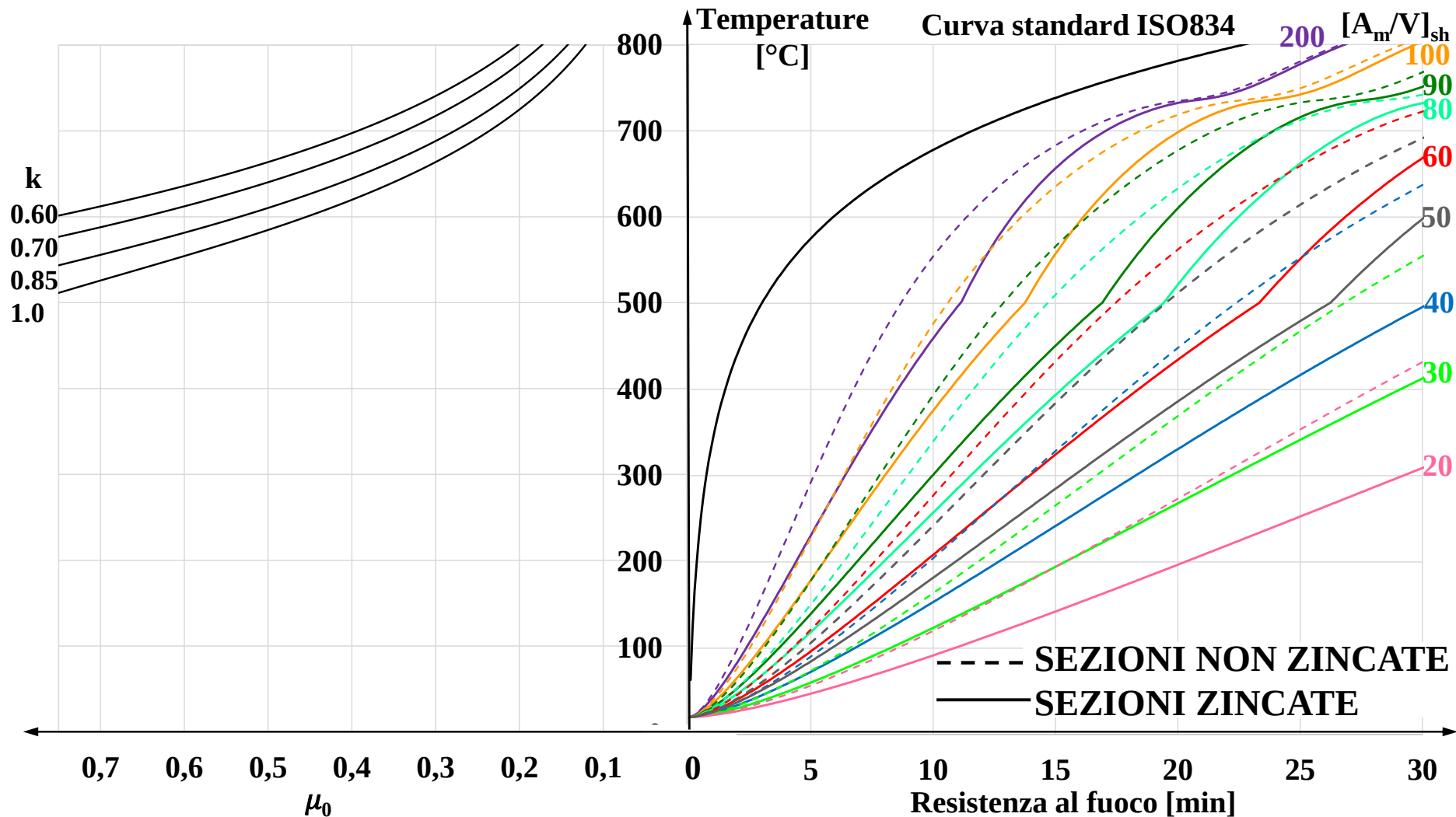
CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

IL NOMOGRAMMA PER ELEMENTI DI ACCIAIO ZINCATI metodo grafico per il dimensionamento delle strutture in acciaio zincate



CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

IL NOMOGRAMMA PER ELEMENTI DI ACCIAIO ZINCATI – CURVA STANDARD

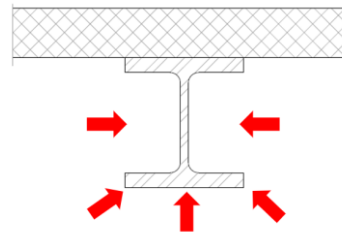
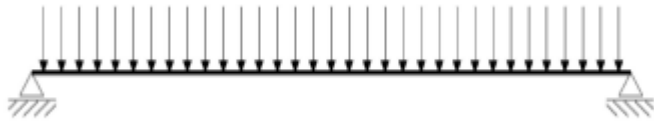


CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

IL NOMOGRAMMA

metodo grafico per il dimensionamento delle strutture in acciaio zincate

Esempio di applicazione



HE240M
Classe 1
 $A_m/V=55$

2. Determinazione del fattore di utilizzazione

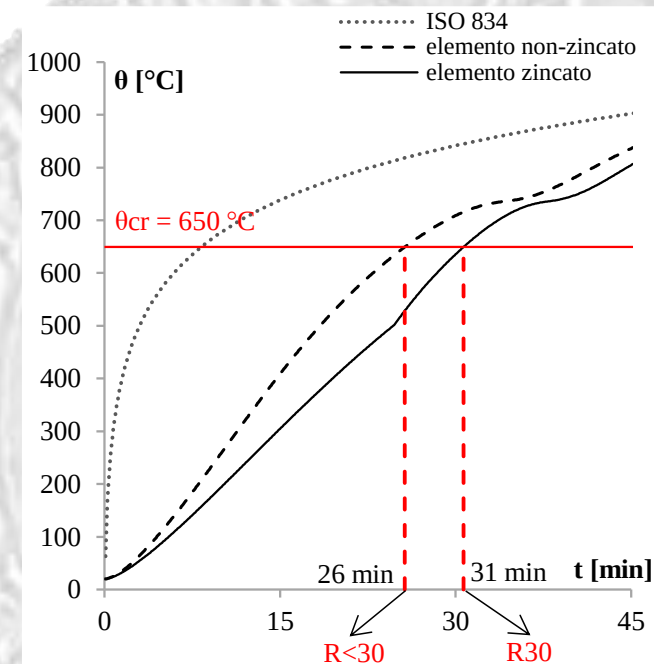
$$\mu_0 = \frac{M_{fi,d}}{W_{pl} \cdot f_y} = \frac{130 \cdot 10^5}{1006 \cdot 10^3 \cdot 275} = 0.47$$

3. Determinazione del coefficiente k

$k=k_1 \cdot k_2=0,7$ (non protette esposte su tre lati)

4. Determinazione della temperatura critica

$$\theta_{cr} = 650 \text{ } ^\circ\text{C}$$



CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

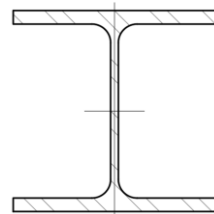
Curva di incendio nominale standard														
A _m /V	Tempo massimo di esposizione alla curva di incendio per elementi non zincati (NG) ed elementi zincati (G) [minuti]													
	μ ₀ = 0,8		μ ₀ = 0,7		μ ₀ = 0,6		μ ₀ = 0,5		μ ₀ = 0,4		μ ₀ = 0,3		μ ₀ = 0,2	
	t _{NG}	t _G	t _{NG}	t _G	t _{NG}	t _G	t _{NG}	t _G	t _{NG}	t _G	t _{NG}	t _G	t _{NG}	t _G
10	54	76	57	79	61	82	64	85	69	89	75	94	86	104
20	34	48	37	50	39	51	41	53	44	56	48	59	56	66
30	27	36	28	38	30	39	32	41	34	43	38	46	44	51
40	22	30	24	31	25	33	27	34	29	36	32	38	38	43
50	19	26	21	27	22	28	24	29	25	31	28	33	33	38
60	17	23	19	24	20	25	21	26	23	28	25	30	30	34
70	16	21	17	22	18	23	19	24	21	25	23	27	28	31
80	15	19	16	20	17	21	18	22	19	23	22	25	26	29
90	14	18	15	19	16	20	17	20	18	22	20	23	25	27
100	13	17	14	18	15	18	16	19	17	20	19	22	24	26
110	12	16	13	17	14	17	15	18	16	19	18	21	23	25
120	12	15	12	16	13	16	14	17	16	18	18	20	22	24
130	11	14	12	15	13	16	14	16	15	17	17	19	21	23
140	11	14	11	14	12	15	13	16	14	17	16	18	21	22
150	10	13	11	14	12	14	13	15	14	16	16	18	20	21
160	10	13	11	13	11	14	12	15	14	16	15	17	20	21
170	9	12	10	13	11	13	12	14	13	15	15	17	19	20
180	9	12	10	12	11	13	12	14	13	15	15	16	19	20
190	9	11	10	12	10	13	11	13	12	14	14	16	19	19
200	9	11	9	12	10	12	11	13	12	14	14	15	18	19

CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

IL NOMOGRAMMA

metodo grafico per il dimensionamento delle strutture in acciaio zincate

ESEMPI DI APPLICAZIONE: esempio 1 Valutare la resistenza al fuoco di una colonna compressa con sezione di acciaio HE260B ed acciaio tipo S235



Profilo HE260B

Lunghezza libera di inflessione $L_{fi} = 4 \text{ m}$

Sforzo normale di progetto in caso di incendio
 $N_{fi,Ed} = 1340 \text{ kN}$

1. Determinazione della classe di duttilità della sezione in caso di incendio

Classe di duttilità dell'anima

$$\varepsilon_{fi} = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85$$

$$\frac{c}{t} = \frac{(260 - 2 \cdot 17,5 - 2 \cdot 24) \text{ mm}}{10} = \frac{177 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 17,70$$

$$33 \cdot \varepsilon = 28,05 \quad \text{Poiché } \frac{c}{t} < 33 \cdot \varepsilon \text{ l'anima è di CLASSE 1}$$

Classe di duttilità delle ali

$$\frac{c}{t} = \frac{(260 - 10 - 2 \cdot 24) \text{ mm} / 2}{17,5} = \frac{101 \text{ mm}}{17,5 \text{ mm}} = 5,77$$

$$9 \cdot \varepsilon = 7,65 \quad \text{Poiché } \frac{c}{t} < 9 \cdot \varepsilon \text{ le ali sono di CLASSE 1}$$

CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

IL NOMOGRAMMA

metodo grafico per il dimensionamento delle strutture in acciaio zincate

ESEMPI DI APPLICAZIONE: esempio 1

2. Determinazione della snellezza adimensionale

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \quad \bar{\lambda}_{(20^\circ\text{C})} = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_1} = \frac{l_{fi}}{i \cdot \lambda_1} = \frac{4}{0,0709 \cdot 93,9} = 0,60$$

3. Determinazione della tensione critica di compressione per la quale la resistenza diventa uguale al carico applicato:

$$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} = \frac{N_{fi,Ed}}{A} = \frac{1340}{11850} = 113,1 \text{ N/mm}^2$$

4. Determinazione della temperatura critica

Dalla Tabella valida per S235
interpolando si ottiene la
temperatura critica:
 $\theta_{cr} = 500^\circ\text{C}$

$\bar{\lambda}_{(20^\circ\text{C})}$	Temperatura critica θ_c					
	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} \text{ [N/mm}^2\text{]}$						
0,0	235	183	110	54	26	14
0,1	218	171	102	50	24	13
0,2	202	159	94	46	22	13
0,3	187	147	87	42	21	12
0,4	171	136	80	38	19	11
0,5	156	124	72	34	18	10
0,6	140	113	65	30	16	10
0,7	126	102	58	26	15	9
0,8	112	91	51	23	13	8
0,9	99	81	45	20	12	7
1,0	88	73	40	18	11	7
1,1	78	65	35	16	9	6
1,2	70	58	31	14	8	6
1,3	62	52	28	12	8	5
1,4	56	47	25	11	7	5
1,5	50	42	22	10	6	4
1,6	45	38	20	9	6	4
1,7	41	35	18	8	5	4
1,8	37	31	17	7	5	3
1,9	34	29	15	7	4	3
2,0	31	26	14	6	4	3

CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

IL NOMOGRAMMA

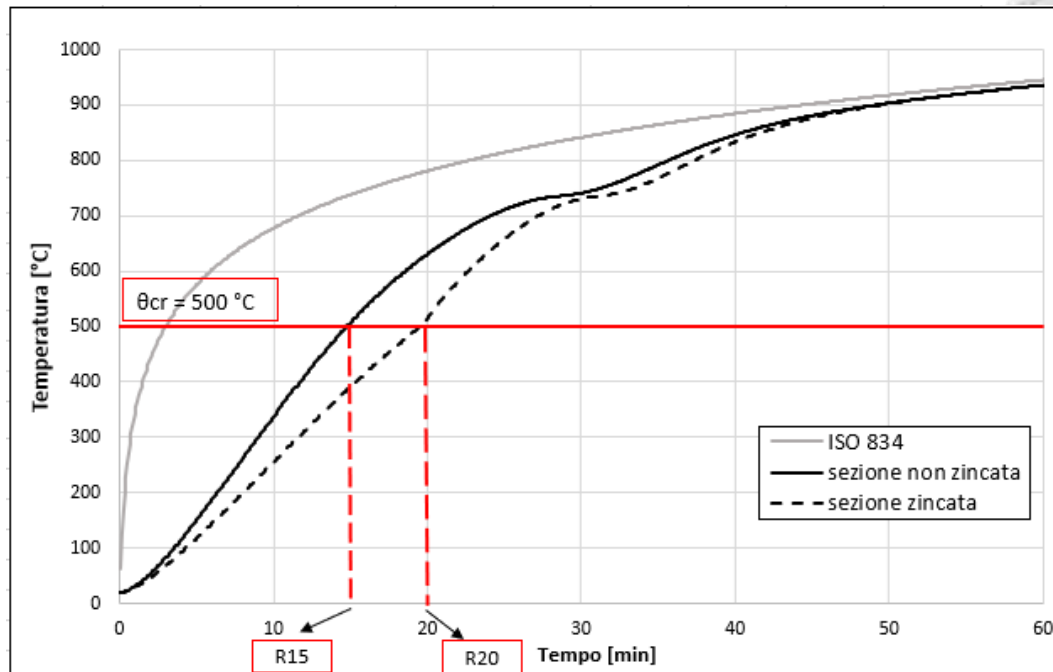
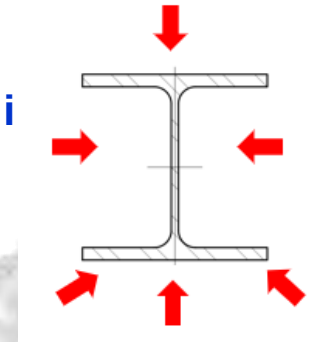
metodo grafico per il dimensionamento delle strutture in acciaio zincate

ESEMPI DI APPLICAZIONE: esempio 1

5. Fattore di sezione della colonna HE260B esposta su tutti i lati considerando lo *shadow effect*

$$A_m/V = 79\text{m}^{-1}$$

6. Applicazione del Nomogramma



La stessa θ_{cr} viene raggiunta

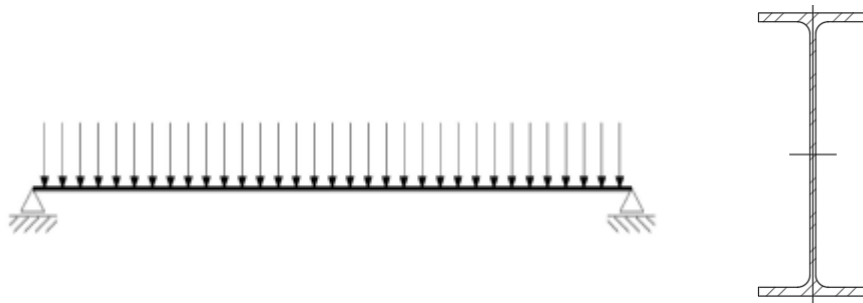
- nel caso di elemento non zincato con un tempo di esposizione pari a $t_{es} = 15\text{min}$ **R15**
- nel caso di elemento zincato con un tempo di esposizione pari a $t_{es} = 20\text{ min}$ **R20**

CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

IL NOMOGRAMMA

metodo grafico per il dimensionamento delle strutture in acciaio zincate

ESEMPI DI APPLICAZIONE: esempio 2 Valutare la resistenza al fuoco di una trave con sezione di acciaio IPE550 ed acciaio tipo S275



Momento flettente di progetto in caso di incendio $M_{fi,Ed} = 410 \text{ kNm}$

Profilo
IPE550

1. Determinazione della classe di duttilità della sezione in caso di incendio

$$\varepsilon_{fi} = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,7857$$

Classe di duttilità dell'anima

$$\frac{c}{t} = \frac{(550 - 2 \cdot 17,2 - 2 \cdot 24) \text{ mm}}{11,1} = \frac{467,6 \text{ mm}}{11,1 \text{ mm}} = 42,13 \quad 72 \cdot \varepsilon = 56,57 \quad \text{Poiché } \frac{c}{t} < 72 \cdot \varepsilon \text{ l'anima è di CLASSE 1}$$

Classe di duttilità delle ali

$$\frac{c}{t} = \frac{(210 - 11,1 - 2 \cdot 24) \text{ mm} / 2}{17,2} = \frac{75,45 \text{ mm}}{17,2 \text{ mm}} = 4,39 \quad 9 \cdot \varepsilon = 7,07 \quad \text{Poiché } \frac{c}{t} < 9 \cdot \varepsilon \text{ le ali sono di CLASSE 1}$$

CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

IL NOMOGRAMMA

metodo grafico per il dimensionamento delle strutture in acciaio zincate

ESEMPI DI APPLICAZIONE: esempio 2

2. Determinazione del fattore di utilizzazione

$$\mu_0 = \frac{M_{fi,d}}{W_{pl} \cdot f_y} = \frac{41.000.000}{2787 \cdot 27500} = 0.535$$

3. Determinazione del coefficiente k

Nel caso in esame la trave risulta non protetta ed esposta su tre lati, pertanto:

$$k = k_1 \cdot k_2 = 0,7$$

4. Determinazione della temperatura critica

Conoscendo il valore del coefficiente k e del fattore di utilizzazione μ_0 dalla parte destra del nomogramma si ottiene la temperatura critica.

$$\theta_{cr} = 630 \text{ } ^\circ\text{C}$$

CRITERI SEMPLIFICATI PER IL PROGETTO/VERIFICA DI ELEMENTI STRUTTURALI DI ACCIAIO ZINCATI SOGGETTI AD INCENDIO

IL NOMOGRAMMA

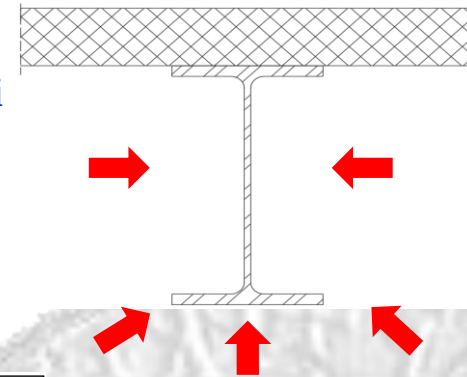
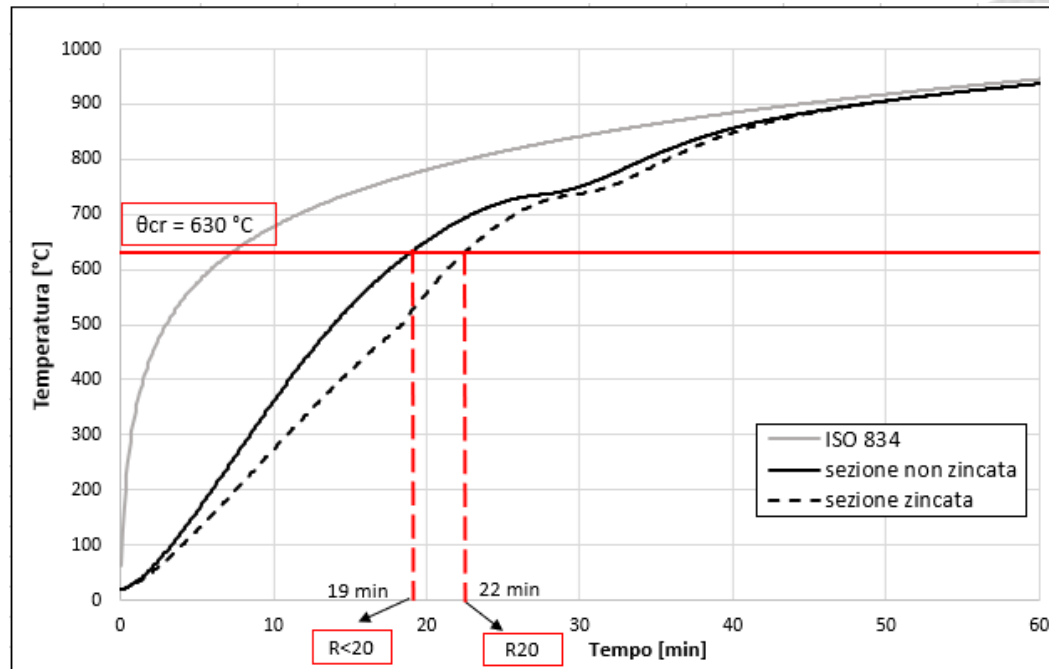
metodo grafico per il dimensionamento delle strutture in acciaio zincate

ESEMPI DI APPLICAZIONE: esempio 2

5. Fattore di sezione della trave IPE550 esposta su tre lati considerando lo *shadow effect*

$$A_m/V = 87\text{m}^{-1}$$

6. Applicazione del Nomogramma



La stessa θ_{cr} viene raggiunta

- nel caso di elemento non zincato con un tempo di esposizione pari a $t_{es} = 19\text{min}$ **R15**
- nel caso di elemento zincato con un tempo di esposizione pari a $t_{es} = 22\text{ min}$ **R20**

METODI DI CALCOLO AVANZATI

PROGETTAZIONE DI STRUTTURE IN ACCIAIO IN EDIFICI INDUSTRIALI IN CASO DI INCENDIO

Livello di prestazione	Descrizione
I	Assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale
II	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione.
III	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la durata dell'incendio.
IV	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento della costruzione.
V	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità della costruzione stessa.



Il codice italiano, in accordo con quelli europei, definisce cinque livelli di prestazione a seconda dell'importanza dell'edificio; nel caso di quelli industriali, è possibile scegliere **il livello di prestazione I e il livello di prestazione II.**

PROGETTAZIONE DI STRUTTURE IN ACCIAIO IN EDIFICI INDUSTRIALI IN CASO DI INCENDIO CON APPROCCIO INGEGNERISTICO

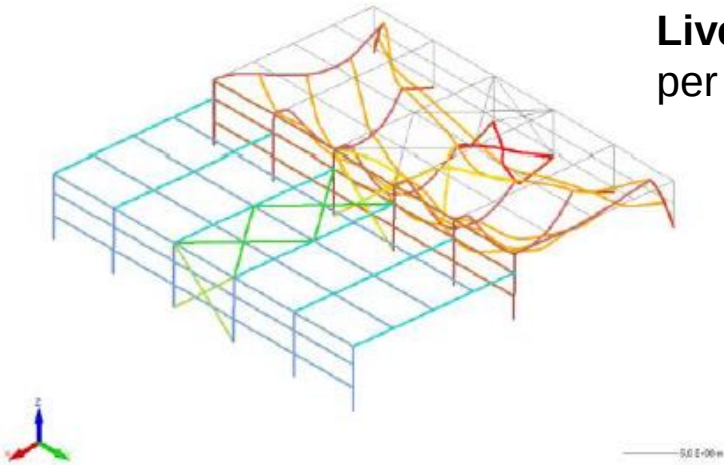


Figura 61. Deformazione a rottura.

Livello di prestazione I: Assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale

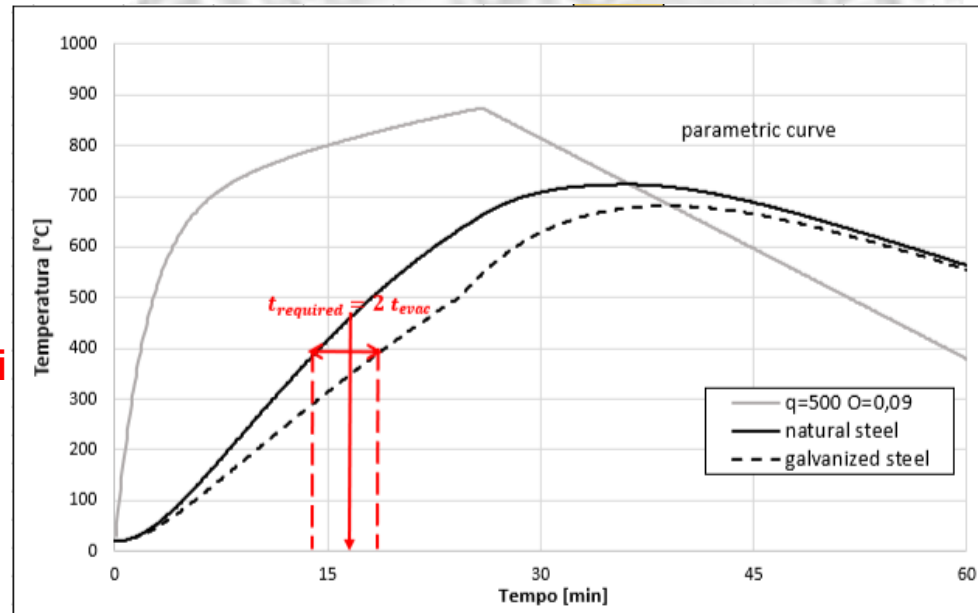
il progettista deve dimostrare che il **meccanismo di collasso della struttura sia di tipo implosivo**

Livello di prestazione II: Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione:

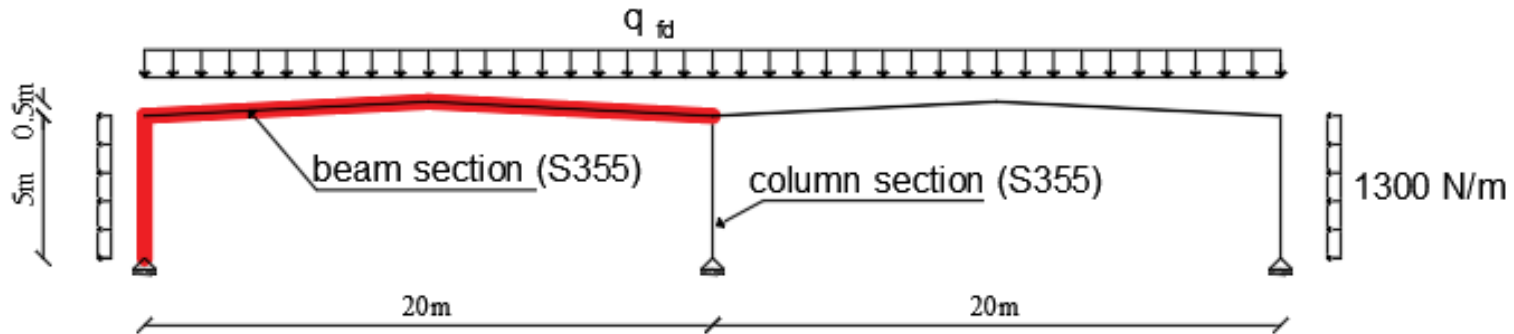
$$t_R \geq \max\{2 \cdot t_{esodo} ; 15 \text{ min}\}$$

Negli edifici industriali abbiamo un tempo di evacuazione di circa 6/7 min

Pertanto, il requisito di tempo di resistenza richiesto consente di apprezzare l'effetto della zincatura



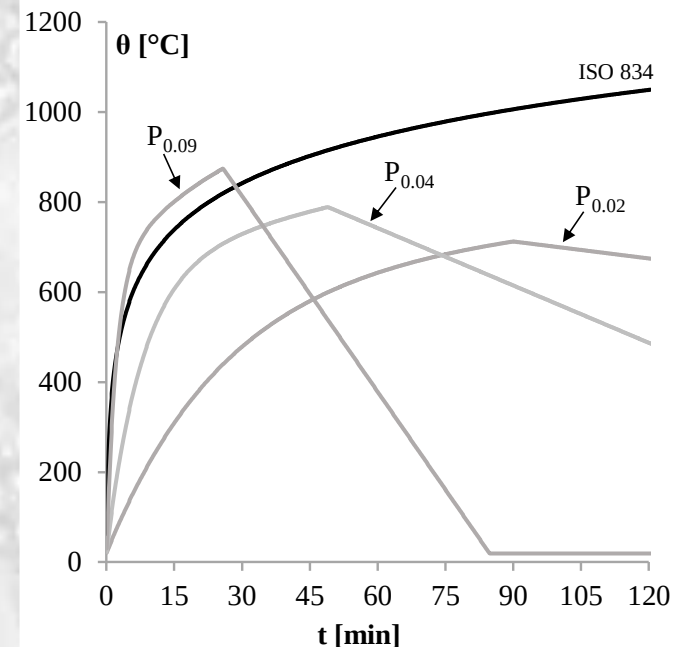
ANALISI TERMO-MECCANICHE AVANZATE DI EDIFICI INDUSTRIALI IN ACCIAIO ZINCATO E NON ZINCATO



4 curve di incendio considerate:

- La curva di incendio standard ISO834;
- Tre curve di incendio parametriche P0.02, P0.04, P0.09;

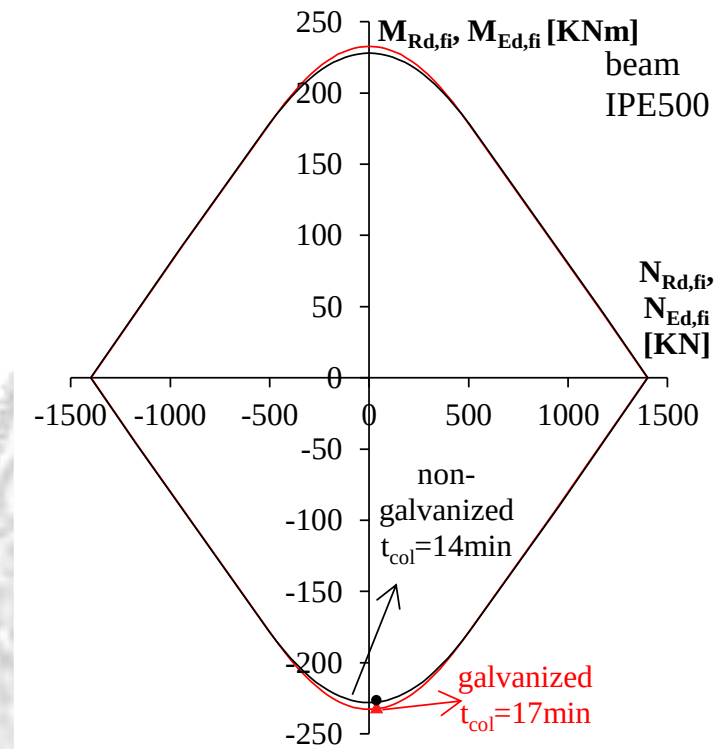
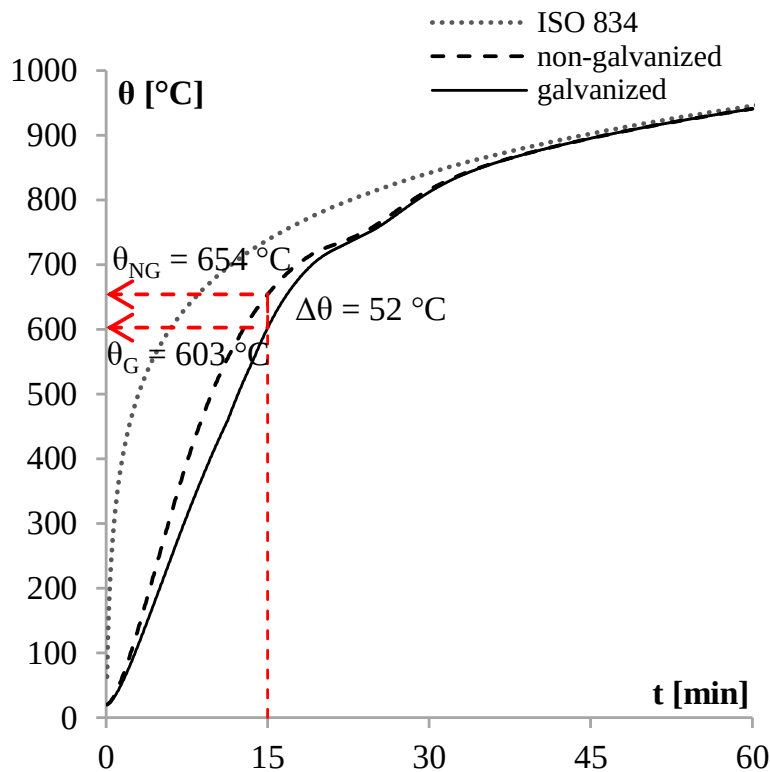
Fire curve	q_{fd} [N/m]	Beam section	Column section
ISO834 per R15	6540	IPE500	IPE450
ISO834 per R30	7470	HE400B	HE450B
Natural fire curves	4700	IPE500	IPE450



ANALISI TERMO-MECCANICHE AVANZATE DI EDIFICI INDUSTRIALI IN ACCIAIO ZINCATO E NON ZINCATO

- Curva di incendio standard ISO834

Collasso nella trave



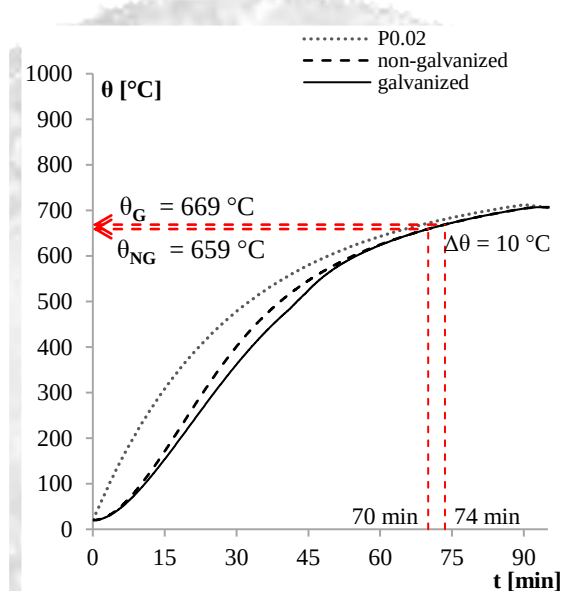
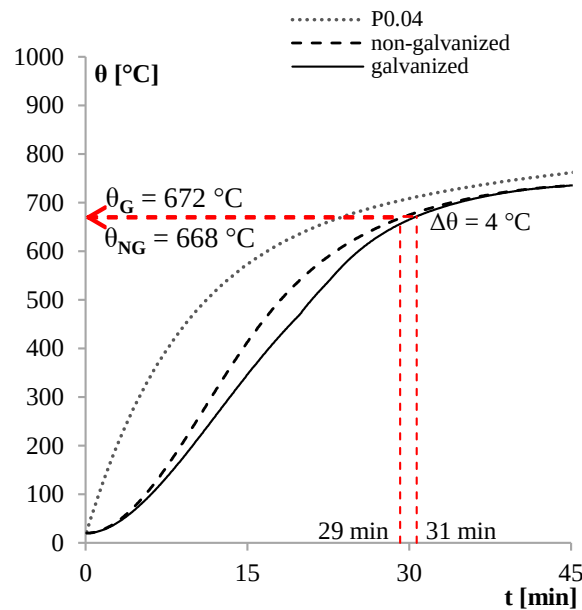
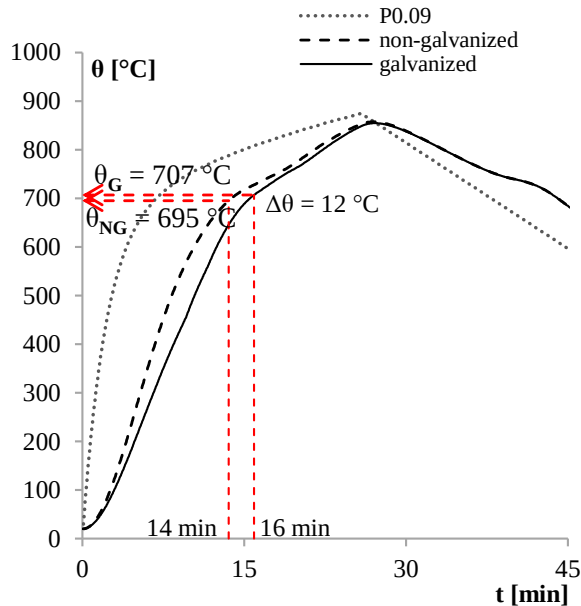
Fattore di sezione della trave IPE550, esposta su 4 lati, $A_m/V = 151\text{m}^{-1}$
Con un fattore di utilizzazione di $\mu_0 = 0.15$

ANALISI TERMO-MECCANICHE AVANZATE DI EDIFICI INDUSTRIALI IN ACCIAIO ZINCATO E NON ZINCATO

- Curve di incendio naturali

Tempi di collasso nel caso di elementi zincati e non zincati :

	$P_{0.09}$		$P_{0.04}$		$P_{0.02}$	
	t_{col_NG}	t_{col_G}	t_{col_NG}	t_{col_G}	t_{col_NG}	t_{col_G}
[min]	14	16	29	31	70	74



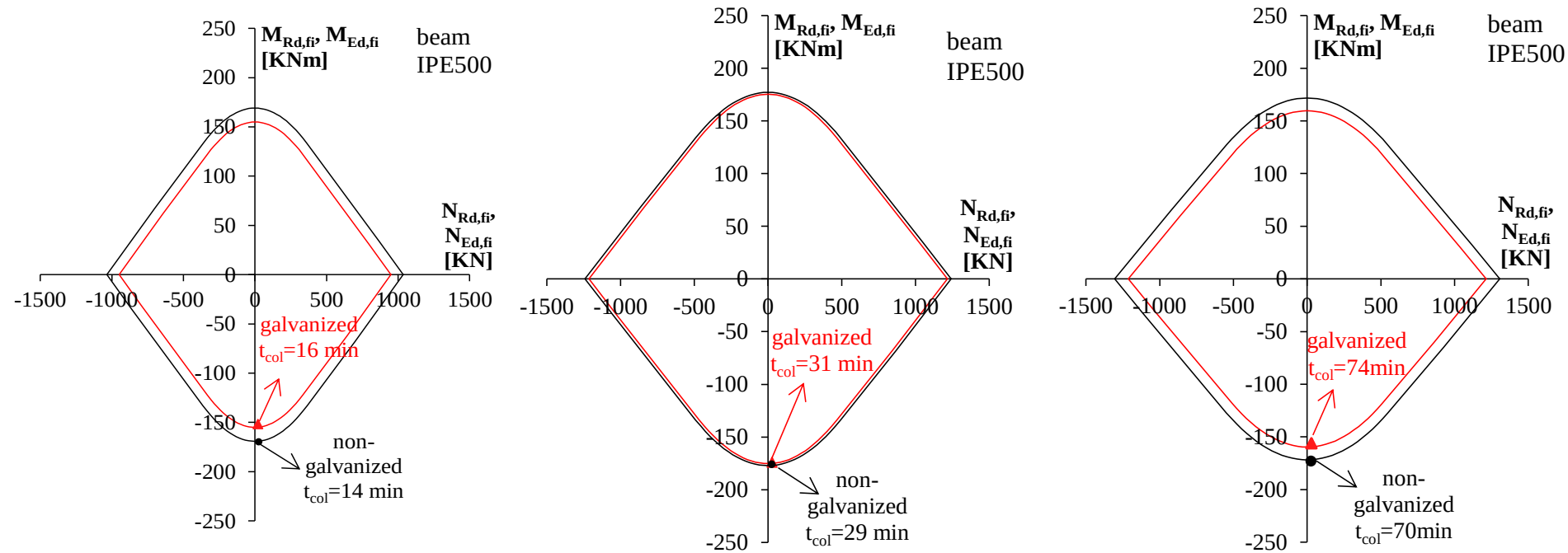
trave IPE550 con un fattore di sezione $A_m/V = 151 \text{ m}^{-1}$

ANALISI TERMO-MECCANICHE AVANZATE DI EDIFICI INDUSTRIALI IN ACCIAIO ZINCATO E NON ZINCATO

- Curve di incendio naturali

Tempi di collasso nel caso di elementi zincati e non zincati :

	$P_{0.09}$		$P_{0.04}$		$P_{0.02}$	
	t_{col_NG}	t_{col_G}	t_{col_NG}	t_{col_G}	t_{col_NG}	t_{col_G}
[min]	14	16	29	31	70	74



trave IPE550 con un fattore di sezione $A_m/V = 151 \text{ m}^{-1}$

Grazie per l'attenzione!



Dott. Ing. Donatella de Silva

**Di.St. - Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
Università di Napoli Federico II (e-mail: donatella.desilva@unina.it)**