
PERFORMANCE BASED BUILDING CODES

1

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Negli anni Sessanta si è avuto un aumento sempre crescente della produzione del materiale ferroso, il quale venne impiegato anche come struttura portante negli edifici di civile abitazione. Onde evitare l'impiego indiscriminato di tale materiale, che avrebbe potuto determinare gravi pericoli per la stabilità delle opere e quindi per le persone in caso di incendio, vennero presi in considerazione i requisiti della resistenza al fuoco delle strutture in acciaio.

- **Circolare n. 91 del 14 settembre 1961:** resistenza al fuoco degli elementi strutturali in acciaio secondo la qualità e la quantità dei materiali combustibili presenti nei singoli locali, ecc.;
- **D.M. 06 Marzo 1986:** vengono emanate le prime disposizioni per le strutture portanti in legno;
- **Circolare n. 52 del 20 novembre 1982:** estende l'utilizzo della Circolare n. 91 anche ad elementi in cls, laterizio, acciaio, legno ed elementi compositi;

2

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

I migliori documenti per la progettazione antincendio sono i nostri Eurocodici ...

Per più di vent'anni i paesi europei hanno lavorato per tracciare le coordinate di una nuova normativa comunitaria, raccolta nei cosiddetti **Eurocodici Strutturali**. Questi documenti hanno lo scopo di unire assieme differenti punti di vista riguardanti tutti gli aspetti della progettazione strutturale, per tutti i materiali tipici della costruzione. Nel 1990, dopo aver consultato i rispettivi Paesi membri, la CCE (Commissione delle Comunità Europee) incaricò CEN (**Comité Européen de Normalisation**) del lavoro di sviluppo ulteriore, dell'emanazione e dell'aggiornamento degli Eurocodici Strutturali. Il Comitato Tecnico **CEN/TC 250** è responsabile di tutti gli Eurocodici strutturali.

3

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

I migliori documenti per la progettazione antincendio sono i nostri Eurocodici ...

Gli Eurocodici rappresentano la necessità degli stati membri di pianificare delle norme di sicurezza nelle costruzioni a livello comunitario ma variabili da paese a paese. Infatti i codici di ogni paese membro sono caratterizzati da una normativa di carattere generale, rappresentata appunto dagli Eurocodici, con possibilità di modifiche locali a seconda delle peculiarità ed esigenze della singolo Stato membro.

4

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

- **ENV 1991:** Eurocodice 1 Basi di calcolo ed azioni sulle strutture.
- **ENV 1992:** Eurocodice 2 Progettazione delle strutture in cls.
- **ENV 1993:** Eurocodice 3 Progettazione delle strutture in acciaio.
- **ENV 1994:** Eurocodice 4 Progettazione delle strutture composte acciaio-cls.
- **ENV 1995:** Eurocodice 5 Progettazione delle strutture in legno.
- **ENV 1996:** Eurocodice 6 Progettazione delle strutture in muratura.
- **ENV 1997:** Eurocodice 7 Progettazione geotecnica.
- **ENV 1998:** Eurocodice 8 Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture
- **ENV 1999:** Eurocodice 9 Progettazione delle strutture di alluminio.

5

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Il CEN/TC 250 ha costituito dei sottocomitati, uno per ciascuno degli Eurocodici citati. L'UNI (**Ente Nazionale Italiano di Unificazione**) ha pubblicato gli Eurocodici come norme europee sperimentali (**ENV**) per un periodo iniziale di anni. L'UNI partecipa, in rappresentanza dell'Italia, all'attività normativa degli organismi sovranazionali di normazione: ISO (International Organization for Standardization) e CEN (Comité Européen de Normalisation).

La norma sperimentale è da intendersi come applicazione sperimentale sottoposta a commenti.

6

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

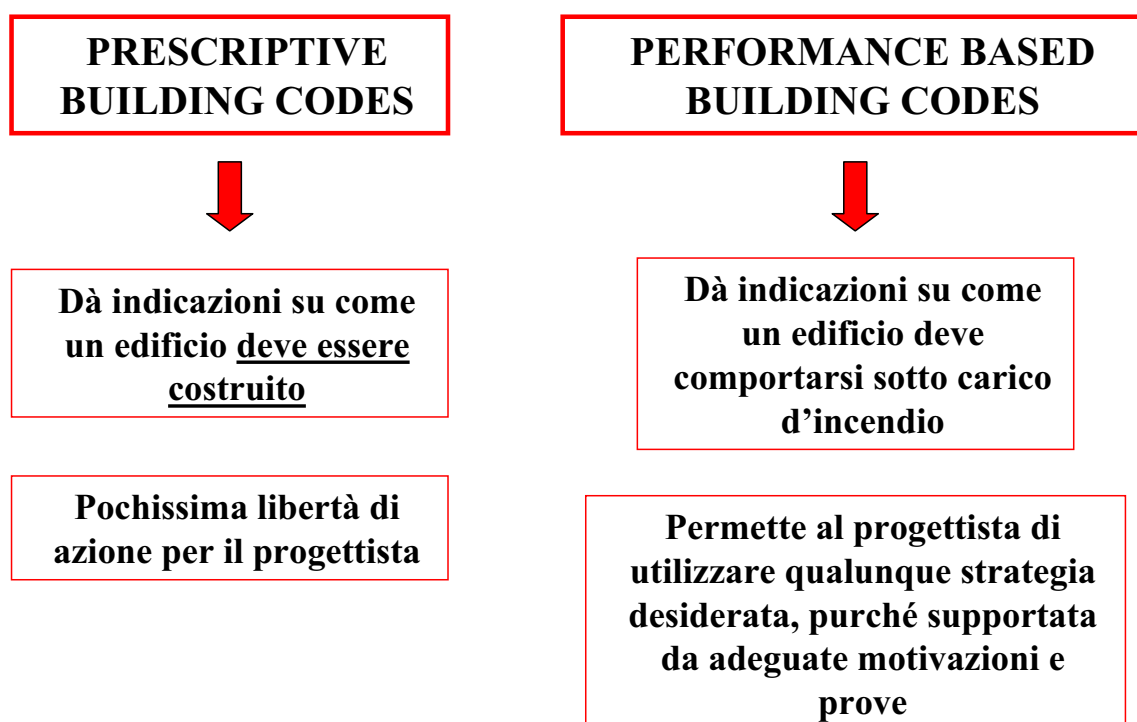
Un cambio di filosofia progettuale è necessario ...

La progettazione di strutture resistenti al fuoco è storicamente basata su richieste **prescrittive**, che hanno le loro basi in ricerche condotte nei primi del '900. Questi metodi tipicamente prescrivono la **resistenza minima associata al singolo elemento strutturale in funzione dell'altezza dell'edificio e della destinazione d'uso**. Se da un lato strutture progettate secondo questa metodologia hanno dimostrato in passato un'ottimo comportamento al fuoco, non considerando le tipologia di incendio a cui gli edifici possono essere sottoposti e la performance strutturale ad alte temperature **non si riesce ad avere una valutazione globale del comportamento della struttura soggetta al fuoco.**

7

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Un cambio di filosofia progettuale è necessario ...



8

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

PERFORMANCE BASED BUILDING CODES

Per raggiungere una progettazione sicura dell'edificio dal punto di vista anti incendio è necessario capire come **NON È POSSIBILE DEFINIRE REGOLE GENERALI CHE DESCRIVONO COME UN EDIFICIO DEBBA ESSERE COSTRUITO PER ESSERE SICURO**. Un progettista deve essere libero di utilizzare ogni strategia desiderata, purché sostenuta da adeguate prove di sicurezza. Infatti le costruzioni moderne sono così complesse e differenti le une dalle altre che una visione globale del comportamento dell'edificio costituisce l'unica possibilità per una appropriata progettazione.



9

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Inoltre sovente gli edifici più complessi, quali i grattacieli, utilizzano materiali **MOLTO SENSIBILI AL CALORE** quali l'acciaio e l'alluminio. Essi sono realmente pericolosi in caso di incendio perché la loro resistenza crolla con la temperatura. Per esempio l'enorme incendio di idrocarburi del WTC fu una delle principali cause del collasso delle torri.

C'è ancora un grosso GAP nella conoscenza, un ostacolo significativo per la diffusione e lo sviluppo del performance-based design: è necessario creare una connessione fra risposta termica e strutturale dell'edificio.



10

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

PERFORMANCE BASED BUILDING CODES

La progettazione antincendio degli edifici basata sul comportamento globale della struttura può essere suddivisa in tre passi:

- Determinare le condizioni di incendio (**FIRE BOUNDARY CONDITIONS**) alle quali la struttura può essere sottoposta;
- Determinare la risposta termica degli elementi strutturali (**THERMAL RESPONSE OF THE STRUCTURE**);
- Condurre l'analisi di risposta strutturale con l'utilizzo delle proprietà dei materiali alle elevate temperature (**STRUCTURAL RESPONSE ANALYSIS**)

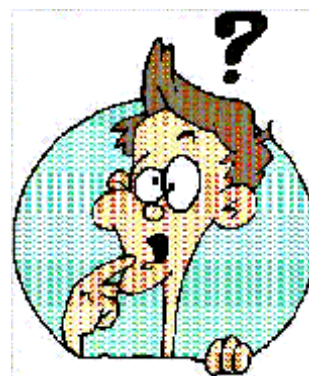
11

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

FIRE BOUNDARY CONDITIONS

Per determinare le condizioni di incendio a cui una struttura può essere sottoposta, è necessario utilizzare degli opportuni strumenti di lavoro. Infatti, un calcolo manuale è impensabile, specialmente se devono essere analizzate strutture complesse. I principali strumenti che vengono utilizzati sono:

- **Modelli a Zone** (Codici di Calcolo Semplificati), come il C FAST.
- **Codici di Calcolo Fluidodinamici CFD** (Computational Fluid Dynamic), come l'FDS o il PHOENICS;



Entrambi servono per determinare la **distribuzione delle temperature** nell'edificio e la propagazione dei fumi.

12

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

MODELLI PER LA VALUTAZIONE DELL'INCENDIO

MODELLI A ZONE

Permettono il calcolo della temperatura dei gas in funzione del tempo, integrando le equazioni differenziali ordinarie esprimenti le leggi di conservazione della massa e dell'energia

IN OGNI ZONA DEL COMPARTIMENTO



MODELLI CFD

Il termine '**Computational fluid dynamic**', o semplicemente CFD, significa utilizzare dei codici che consentono, integrando le equazioni della fluido-dinamica

SU VOLUMI DI CONTROLLO,

di ottenere soluzione numerica a problemi di fluido-dinamica

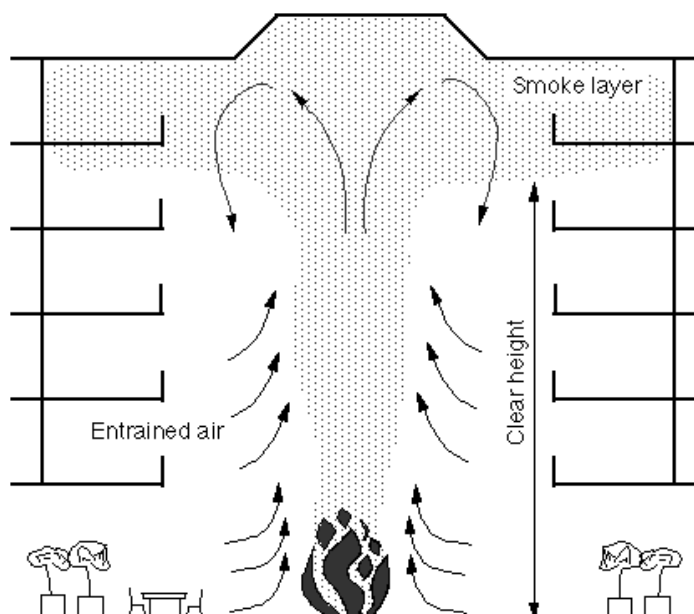
13

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

ZONE MODELS

I modelli a zona sono degli strumenti numerici comunemente utilizzati per il calcolo della variazione della temperatura all'interno di compartimento nel corso di un incendio.

L'elemento base di tale modello è la **ZONA**. La principale ipotesi che viene fatta è che **proprietà quali la temperatura e la densità possono essere considerate uniformi all'interno della zona**.



14

ZONE MODELS

Esistono due tipi di modelli a zone:

- **MODELLI A UNA ZONA**, nei quali la temperatura è considerata uniforme nell'intero compartimento. Questo tipo di modellazione è valida nel caso di INCENDI TOTALMENTE SVILUPPATI (FULLY DEVELOPED FIRES).

- **MODELLI A DUE ZONE**, nei quali il compartimento viene diviso in due zone: un layer di gas caldi collocato in prossimità del soffitto (UPPER LAYER) ed un layer di gas più freddi rasente il pavimento (LOWER LAYER).

15

TWO ZONE MODELS – C FAST

Il **C-fast** è uno dei più famosi modelli a due zone. Esso viene rilasciato gratuitamente dal **NIST** (National Institute for Standard and Technology).

SITO INTERESSANTE PER LA PROGETTAZIONE ANTI-INCENDIO:

<http://www.fire.nist.gov/>

IPOTESI DI BASE DEL C-FAST:

- Ogni compartimento è diviso in due volumi V_U (strato superiore) e V_L (strato inferiore) dove le caratteristiche termodinamiche e le concentrazioni dei fumi e delle specie chimiche sono uniformi (**ipotesi di mescolamento perfetto**);

- Ogni volume di ogni stanza scambia calore e massa con gli altri volumi secondo relazioni che rispettano le leggi della conservazione dell'energia e della massa di derivazione semiempirica (**teoria del "Plume" e dei "Vents"**).

16

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

- Viene **ignorata la conservazione della quantità di moto** all'interno del compartimento. Comunque ai bordi del dominio, in corrispondenza ad esempio di finestre, porte e così via, l'Equazione di Eulero viene integrata esplicitamente per supportare le equazioni di Bernulli.
- La **pressione viene considerata uniforme all'interno del compartimento**. Infatti un cambio di pressione di un paio di decine di Pascal lungo l'altezza del compartimento può essere trascurato se paragonato alla pressione atmosferica. Comunque la variazione idrostatica delle pressioni è tenuta in conto nel calcolare la differenza di pressione fra compartimenti.
- Le **reazioni di combustione avvengono a velocità infinita**;
- **L'irraggiamento e la conduzione termica** tra le zone e le pareti sono calcolati con **formule approssimate**.

17

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

TWO ZONE MODELS – C FAST

Il **C-fast** è basato sulla determinazione di **11 VARIABILI** associate al layer superiore (UPPER) ed inferiore (LOWER):

- m_U and m_L : massa del gas;
- T_U and T_L : temperatura del gas;
- V_U and V_L : volume della zona;
- E_U and E_L : energia interna;
- ρ_U and ρ_L : densità del gas;
- p : pressione assoluta del compartimento nella sua interezza.

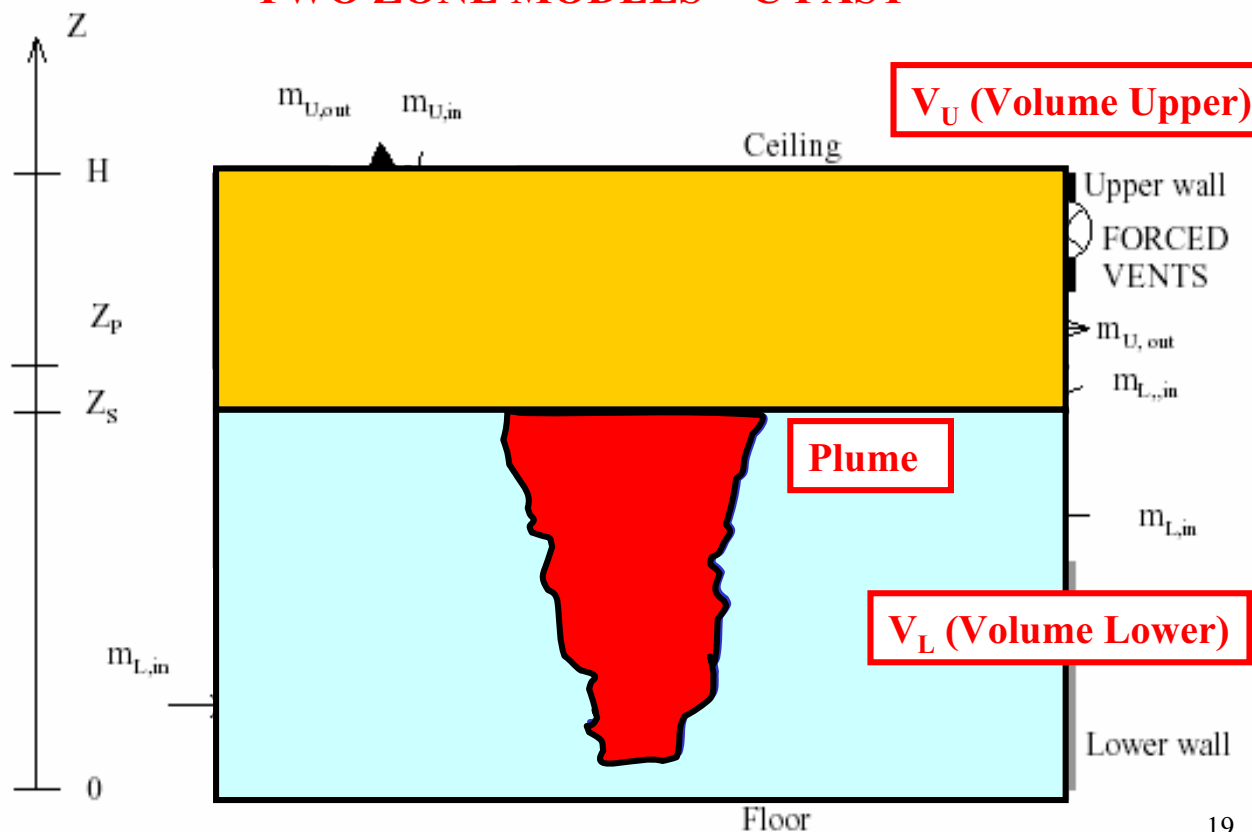
Queste variabili sono collegate da:

- **7 VINCOLI**;
- **4 EQUAZIONI DIFFERENZIALI** che descrivono il bilancio di massa e di energia in ogni zona.

L'integrazione di queste equazioni differenziali nel tempo permette di descrivere le caratteristiche del gas in ogni zona.

18

TWO ZONE MODELS – C FAST



19

TWO ZONE MODELS – C FAST

7 VINCOLI:

DENSITÀ $\rho_U = \frac{m_U}{V_U}$ $\rho_L = \frac{m_L}{V_L}$ **2 vinc.**

ENERGIA INTERNA $E_U = c_v m_U T_U$ $E_L = c_v m_L T_L$ **2 vinc.**

LEGGE DEI GAS IDEALI $P = R \rho_U T_U$ $P = R \rho_L T_L$ **2 vinc.**

VOLUME $V = V_U + V_L$ **1 vinc.**

Si ricordi che: $R = c_p - c_v$ $c_p = 1000 \text{ kJ / kg}^\circ\text{K}$

$\gamma = c_p / c_v$ $\gamma = 1.4$

20

TWO ZONE MODELS – C FAST

BILANCIO DI MASSA (2 equazioni)

In ogni momento la variazione della massa del gas in una zona è uguale alla massa dei gas prodotti dalla combustione, più la massa entrante nel compartimento attraverso le aperture meno l'aria uscente attraverso le aperture.

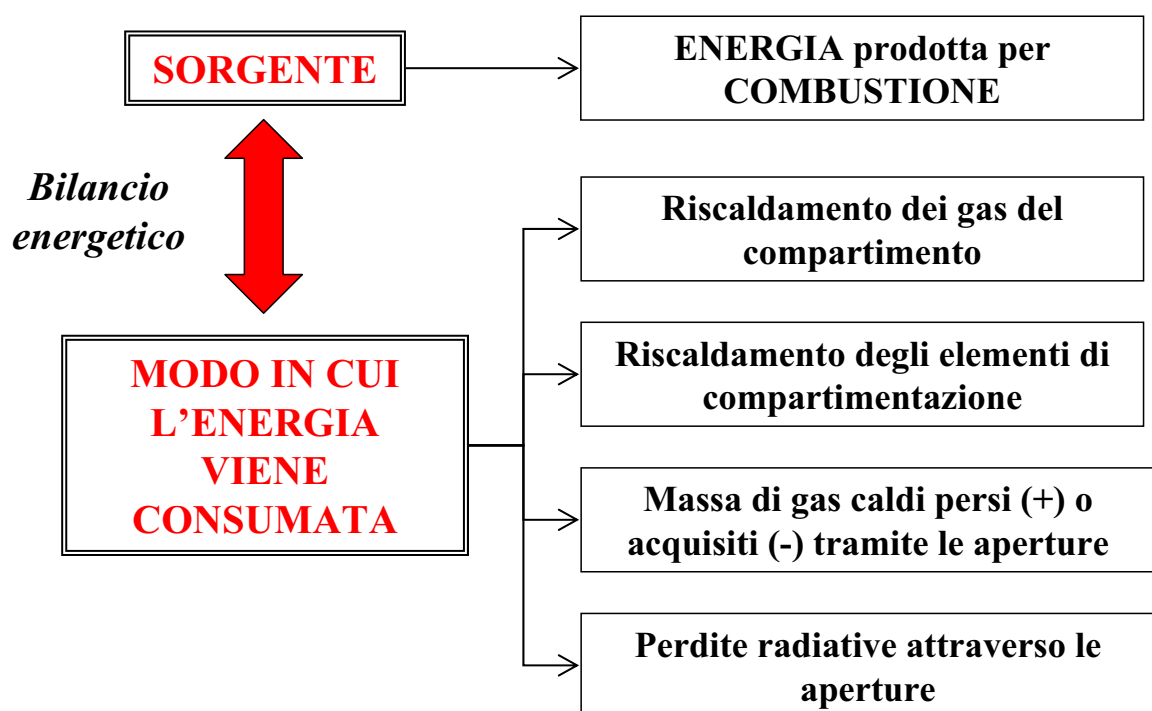
LOWER LAYER $\frac{dm_L}{dt} = \dot{m}_L$

UPPER LAYER $\frac{dm_U}{dt} = \dot{m}_U$

21

TWO ZONE MODELS – C FAST

BILANCIO DI ENERGIA (2 equazioni)



22

ZONE MODELS – C FAST

BILANCIO DI ENERGIA (2 equazioni)

LOWER LAYER $\frac{dE_L}{dt} + P \frac{dV_L}{dt} = \dot{\epsilon}_L$

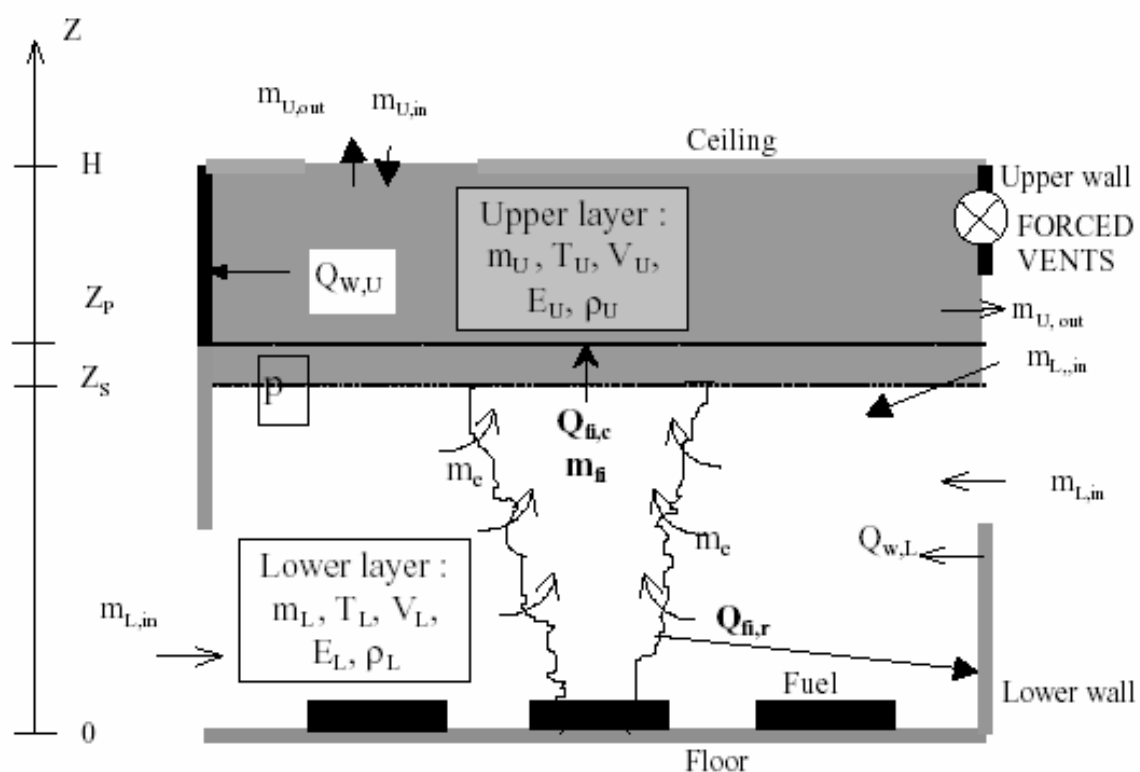
UPPER LAYER $\frac{dE_U}{dt} + P \frac{dV_U}{dt} = \dot{\epsilon}_U$

ENTALPIA

ENERGIA INTERNA LAVORO

23

TWO ZONE MODELS - CFAST



24

TWO ZONE MODELS

Dal bilancio di massa e di energia si ottengono le seguenti disequazioni:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{\varepsilon}_L + \dot{\varepsilon}_U)$$

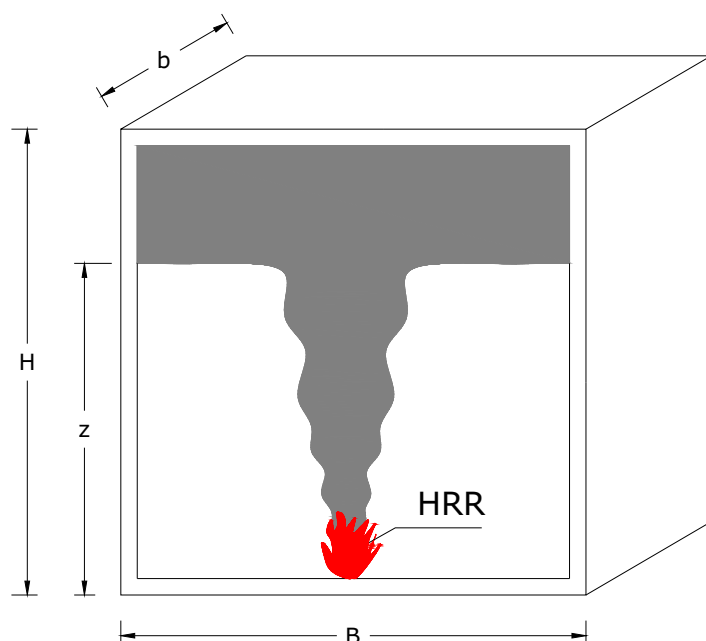
$$\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p V_U \rho_U} \left[(\dot{\varepsilon}_U - c_p \dot{m}_{pU} T_U) + V_U \frac{dP}{dt} \right]$$

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p V_L \rho_L} \left[(\dot{\varepsilon}_L - c_p \dot{m}_{pL} T_L) + V_L \frac{dP}{dt} \right]$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{P\gamma} \left[(\gamma - 1) \dot{\varepsilon}_L - V_L \frac{dP}{dt} \right]$$

25

TWO ZONE MODELS – BASIC EQUATION



DATI DI INPUT

GEOMETRIA DELLA STANZA:
B, b, H

PROPRIETÀ DEGLI ELEMENTI DI COMPARTIMENTAZIONE:
spessore dei muri (s), calore specifico (c_p), peso specifico (ρ_w), conduttività (λ), coefficiente di emissività (ε), coefficiente convettivo interno ed esterno (h_i)

CONDIZIONI INIZIALI: temperatura esterna ed interna iniziale (T_a , T_e), pressione iniziale (P_a)

FUOCO: HRR_{fire} , t_a , A_{fire} , ΔH

26

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

POTENZA EMESSA DA UN INCENDIO

La curva HRR, **Heat Release Rate** o Tasso di Calore Rilasciato, definisce la quantità di energia rilasciata per unità di tempo (kW).

Dipende da:

- disponibilità di ossigeno nel compartimento;
- velocità di combustione del materiale.

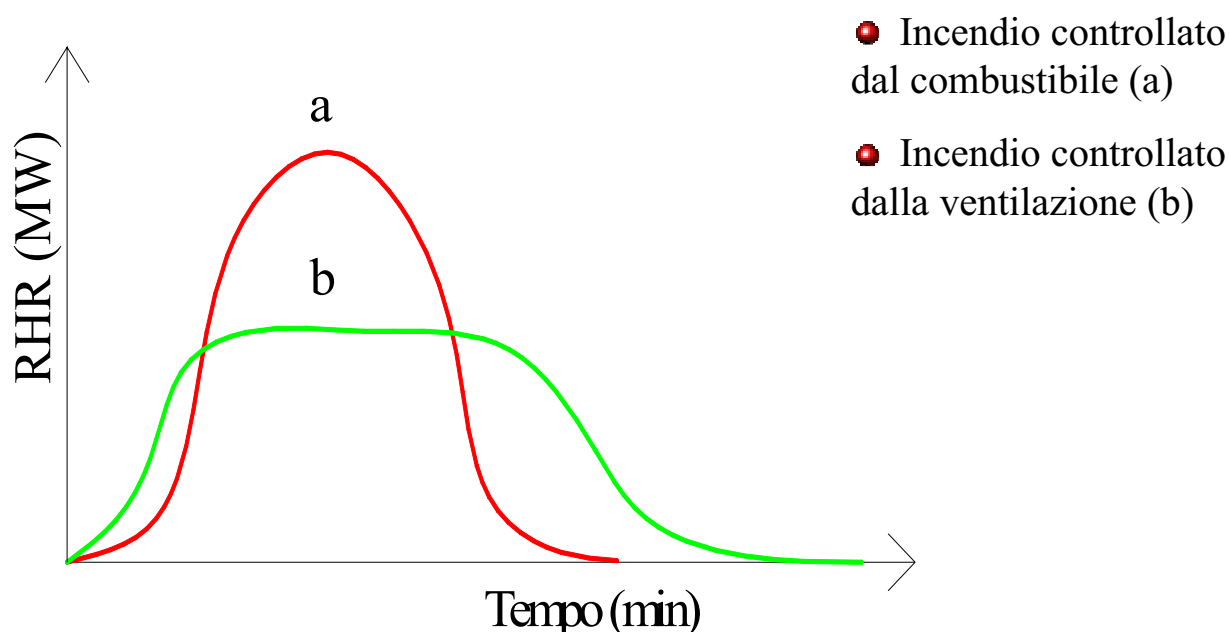
INCENDIO CONTROLLATO DAL COMBUSTIBILE : vi è disponibilità infinita di ossigeno e l'incendio dipende esclusivamente dalla quantità di materiale combustibile.

INCENDIO CONTROLLATO DALLA VENTILAZIONE : non vi è sufficiente disponibilità di ossigeno da permettere la combustione completa.

27

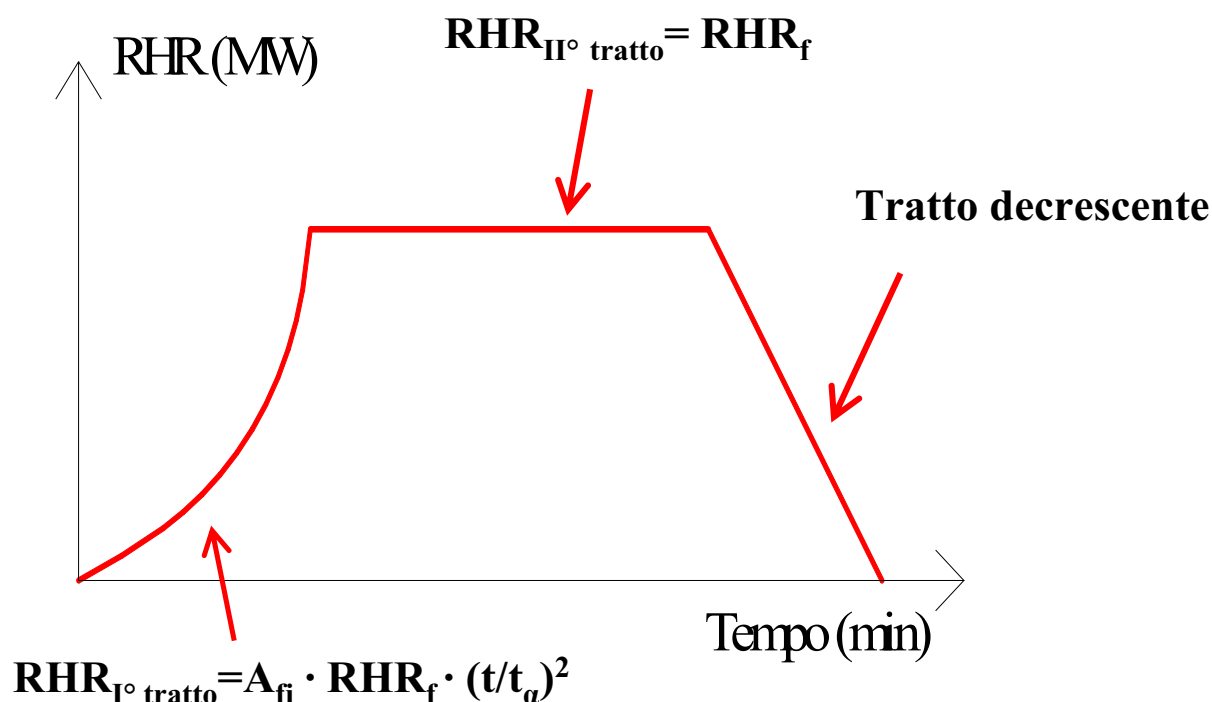
ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

INCENDI CONTROLLATI DAL COMBUSTIBILE E INCENDI CONTROLLATI DAL VENTILAZIONE



28

POTENZA EMESSA DA UN INCENDIO



29

POTENZA EMESSA DA UN INCENDIO

Il **PRIMO TRATTO** ad andamento parabolico è descritto dalla seguente equazione:

$$HRR_{I^{\circ} \text{ tratto}} = A_{fi} \cdot HRR_f \cdot (t/t_{\alpha})^2$$

- A_{fi} : area dove è distribuito il combustibile [m^2];
- HRR_f : HRR massimo raggiungibile per unità di area (dipende dal tasso di combustione e dal fattore di ventilazione) [kW/m^2];
- t : tempo [s];
- t_{α} : costante di tempo

30

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

VALORE DELLA COSTANTE DI TEMPO t_{α} :

Destinazione d'uso/Attività	Tasso di crescita dell'incendio	Costante tempo t_{α} (s)
Gallerie d'arte	Bassa	600
Depositi (bassa combustibilità).	Bassa	600
Residenziale	Media	300
Camera di albergo	Media	300
Uffici	Media	300
Depositi (tessuti a base di cotone e poliestere).	Media	300
Negozi	Veloce	150
Depositi (sacchi postali pieni, resina espansa)	Veloce	150
Impianti chimici	Ultra Veloce	75
Depositi (contenitori di alcool infiammabile)	Ultra Veloce	75

31

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Il **SECONDO TRATTO** ad andamento costante (plateau) assume il valore RHR_f dove quest'ultimo è ricavato in maniera sperimentale.

Tipo di materiale/ destinazione d'uso	RHR_f
Per pallets di legno, altezza di stoccaggio 0.5 m	1250 kW/m ²
Per pallets di legno, altezza di stoccaggio 3.0 m	6000 kW/m ²
Per bottiglie di plastico in cartoni, altezza di stoccaggio 4.6 m	4320 kW/m ²
Per pannelli isolanti con altezza di stoccaggio 4.3 m	2900 kW/m ²
Edifici per negozi	500 kW/m ²
Edifici per uffici	250 kW/m ²

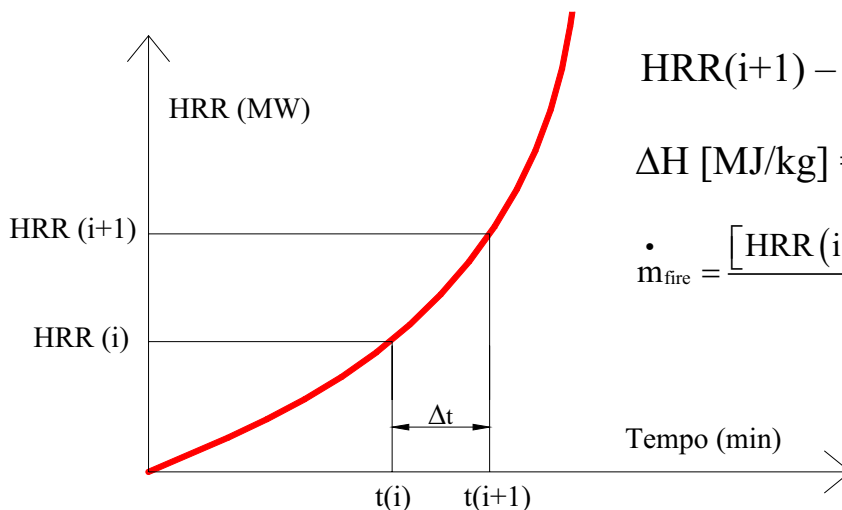
L'ultima e **TERZA FASE**, quella decrescente, ha andamento lineare. Basandosi su risultati di prove sperimentali, si può stimare che questa inizi quando il 70% di tutto il carico di incendio è stato bruciato.

32

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

L'ALGORITMO

- Si impongano le condizioni iniziali di temperatura e di pressione sul dominio di analisi;
- Si consideri un incendio governato dalla quantità di ossigeno. L'analisi viene suddivisa in intervalli temporali Δt . Per ogni intervallo si deve calcolare la quantità di calore rilasciato dall'incendio:



$$HRR(i+1) - HRR(i) \rightarrow [MW] = [MJ/s]$$

$$\Delta H [MJ/kg] = \text{Calore di combustione}$$

$$\dot{m}_{\text{fire}} = \frac{[HRR(i+1) - HRR(i)]}{\Delta H} = \frac{[MJ/s]}{[MJ/kg]} = \left[\frac{kg}{s} \right]$$

33

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

- Lo scambio di massa e di energia fra il layer inferiore e superiore nei modelli a due zone avviene solo tramite il **PLUME**. Per conteggiare tali scambi vengono utilizzate formule empiriche:

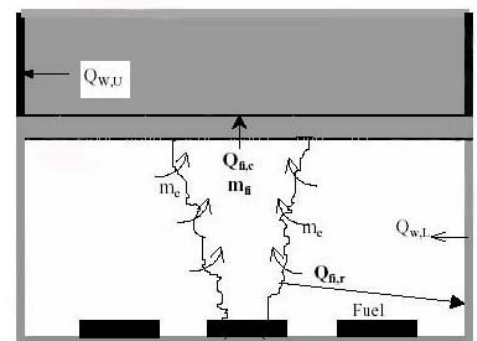
PLUME EMPIRICAL EQUATION Mass Balance

$$\dot{m}_p = 0.011 \cdot Q_c [kW] \cdot \left(\frac{z}{Q_c [W]^{2/5}} \right)^{0.566} \quad 0 \leq \left(\frac{z}{Q_c^{2/5}} \right) < 0.08$$

$$\dot{m}_p = 0.026 \cdot Q_c [kW] \cdot \left(\frac{z}{Q_c [W]^{2/5}} \right)^{0.909} \quad 0.08 \leq \left(\frac{z}{Q_c^{2/5}} \right) < 0.2$$

$$\dot{m}_p = 0.124 \cdot Q_c [kW] \cdot \left(\frac{z}{Q_c [W]^{2/5}} \right)^{1.895} \quad 0.2 \leq \left(\frac{z}{Q_c^{2/5}} \right)$$

dove z è l'altezza del layer di fumo rispetto al pavimento, $Q_c = \psi_c HRR$ è la quantità di calore che partecipa al flusso convettivo.



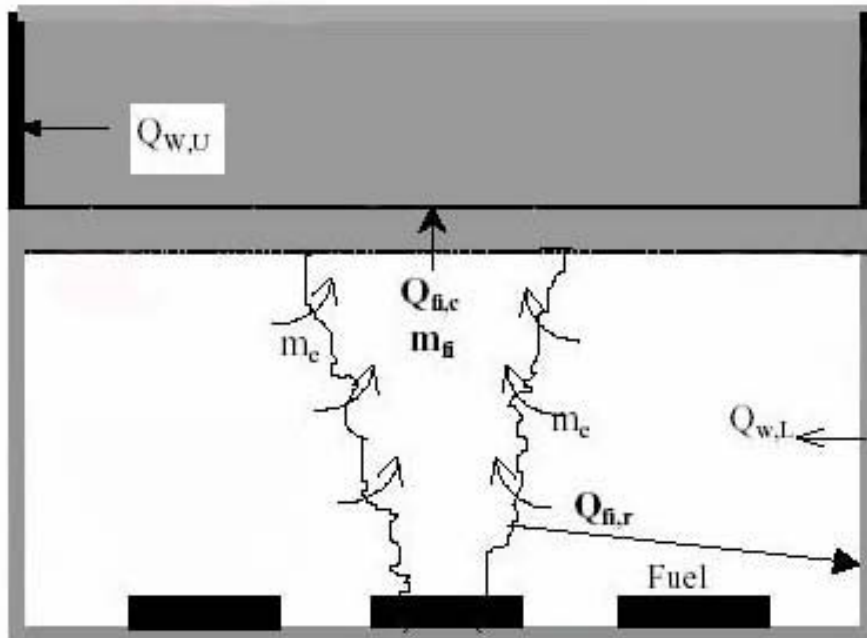
Questa espressione tiene conto dell'aria fresca del layer inferiore che penetra all'interno del pennacchio.

34

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

● BILANCIO DI MASSA

$$\dot{m}_p = 0.011 \cdot Q_c \cdot \left(\frac{z}{Q_c^{2/5}} \right)^{0.566} \quad \dot{m}_{\text{fire}} = \frac{[\text{HRR}(i+1) - \text{HRR}(i)]}{\Delta H} = \frac{[\text{MJ/s}]}{[\text{MJ/kg}]} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$



$$\dot{m}_p = \dot{m}_U$$

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{\text{fire}} - \dot{m}_p = -\dot{m}_e$$

35

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Utilizzando i 7 vincoli visti in precedenza:

UPPER LAYER

$$T_U = T_{i-1}$$

$$\dot{m}_U = \dot{m}_p \cdot \Delta T$$

$$V_U = (H - z) \cdot A$$

$$\rho_U = \dot{m}_U / V_U$$

$$E_U = c_v \dot{m}_U T_U$$

$$P = R \rho_U T_U$$

LOWER LAYER

$$T_L = T_{i-1}$$

$$\dot{m}_L = \rho_L \cdot V_L$$

$$V_L = V - V_U$$

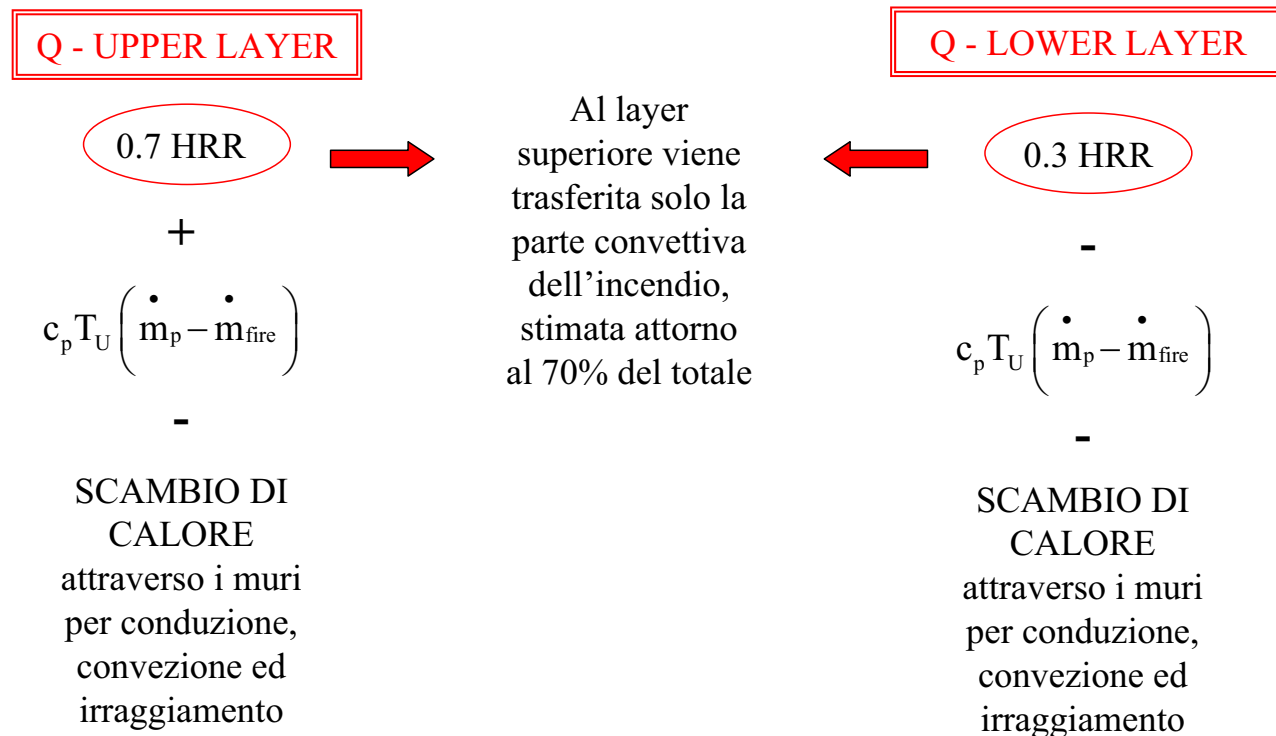
$$\rho_L = P / R T_L$$

$$E_L = c_v \dot{m}_L T_L$$

36

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

● BILANCIO DI ENERGIA



37

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

● Quantifichiamo gli scambi di calore tra i muri

UPPER LAYER

Si considerino le temperature interne ed esterne delle murature agli istanti temporali t_{i-2} , t_{i-1} e t_i e vengano chiamate rispettivamente T_{i-2} , T_{i-1} e T_i . La temperatura all'istante di tempo T_i può essere calcolata mediante la seguente espressione:

$$T_i = T_{i-2} + \frac{4\Delta t}{s \cdot c \cdot \rho} \left[h(T_U - T_{i-1}) + \sigma \varepsilon (T_U^4 - T_{i-1}^4) + \frac{R}{s} (T_{est,i-1} - T_{i-1}) \right]$$

CONVEZIONE

IRRAGGIAMENTO

CONDUZIONE

$q = \Delta Q / \Delta t \text{ [J/m}^2\text{s]}$

38

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

TWO ZONE MODELS

Dal bilancio di massa e di energia si ottengono le seguenti disequazioni:

$$\Delta P = \frac{\gamma - 1}{V} (\text{HRR}) \cdot \Delta t$$

$$P_i = P_{i-2} + \Delta P \cdot \Delta t$$

$$\Delta T_U = \frac{1}{C_p V_U \rho_U} \left[(Q_U - c_p \dot{m}_{pU} T_U + V_U \Delta P) \right] \cdot \Delta t$$

$$T_U = T_{i-2} + \Delta T \cdot \Delta t$$

$$\Delta T_L = \frac{1}{C_p V_L \rho_L} \left[(Q_L - c_p \dot{m}_{pL} T_L) + V_L \Delta P \right] \cdot \Delta t$$

$$T_L = T_{i-2} + \Delta T \cdot \Delta t$$

$$\Delta z_s = \frac{1}{A_{fi} \cdot P_{i-1} \cdot \gamma} \left[(\gamma - 1) \text{HRR} - V_L \Delta P \right] \cdot \Delta t$$

$$z_s = z_{i-2} + \Delta z_s \cdot \Delta t$$

39

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

CFD – Computational Fluid Dynamic

L'unico strumento in grado di analizzare il complesso meccanismo dei fumi e di modellare accuratamente il comportamento del fuoco è un Codice Fluidodinamico.

Il termine 'Computational fluid dynamic', o semplicemente CFD, significa utilizzare dei codici che consentono di ottenere soluzione numerica a problemi di fluido-dinamica.

Questi sono strumenti molto potenti ma richiede enormi tempi di analisi. Tale fatto è inaccettabile nella normale progettazione, specialmente se il programma viene lanciato su computer con limitata CPU. Quindi, nella progettazione ordinaria, si preferisce utilizzare modelli a zone (che richiedono tempi di esecuzione sull'ordine delle decine di minuti contro i CFD che richiedono dalle ore alle settimane a seconda del risolutore e della mesh). Naturalmente il grado di accuratezza è notevolmente inferiore, in molti casi al limite dell'accettabilità.

40

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

CFD – Computational Fluid Dynamic

Le equazioni dei modelli a volumi di controllo sono:

Equazione di conservazione della massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Equazioni di conservazione dell'energia

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} + v_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \right) + \dot{q} + \dot{\phi} + \beta \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + v_j \frac{\partial p}{\partial x_j} \right)$$

Equazioni di conservazione della quantità di moto

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = \rho B_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right]_{41}$$

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

CFD – Computational Fluid Dynamic

Esistono molti tipi di CFD. La principale differenza fra tutte queste varianti dipende dal modo di modellare la turbolenza. Secondo questo criterio è possibile suddividere i CFD in tre categorie:

- Direct Numerical Simulation (DNS) models (es: FDS);
- Large Eddy Simulation (LES) models (es: FDS);
- Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) models (es: PHOENICS).

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

DNS – Direct Numerical Simulation

Il DNS risolve direttamente le equazioni di Navier-Stokes senza alcuna approssimazione, fornendo in questo modo i risultati in assoluto più accurati fra tutti i tipi di CFD.

Il modello, però, richiede l'utilizzo di una **GRIGLIA DI RISOLUZIONE VERAMENTE ACCURATA**, che sia in grado di cogliere i più piccoli vortici di turbolenza del flusso.

Un esempio di CFD che permette di utilizzare il metodo risolutivo DNS è l'**FDS** (Fire Dynamic Simulator) rilasciato gratuitamente da NIST.

43

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

LES – Large Eddy Simulation

Il LES è in grado di simulare solo i vertici più grandi ed importanti, contenenti un livello energetico elevato, mentre i vertici più piccoli vengono modellati attraverso varie sottogriglie associate a diversi modelli di turbolenza.

Questo fatto permette di **NON DOVER UTILIZZARE GRIGLIE FINISSIME PER OTTENERE BUONE ANALISI**, e quindi accorcia i tempi di analisi, rispetto al DNS.

Il problema, naturalmente, consiste nel trovare dei modelli di turbolenza e dei criteri di suddivisione fra grandi e piccoli vortici appropriati. Inoltre, nonostante i tempi di analisi siano più brevi rispetto al DNS, si hanno comunque lunghi tempi di attesa.

44

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

RANS – Reynolds Average Navier-Stokes models

Il RANS risolve le equazioni di Navier-Stokes mediate su base statistica, con lo scopo di fornire le quantità caratteristiche del flusso mediate. Dato che RANS non risolve i moti turbolenti, la griglia può essere significativamente inferiore in modo tale che catturi solamente i percorsi di flusso più grandi ed importanti.

I TEMPI DI ANALISI, QUINDI, RISULTANO NOTEVOLMENTE INFERIORI rispetto alle altre due categorie (DNS e LES) e quindi RANS trova maggior applicazioni nella comune progettazione antincendio.

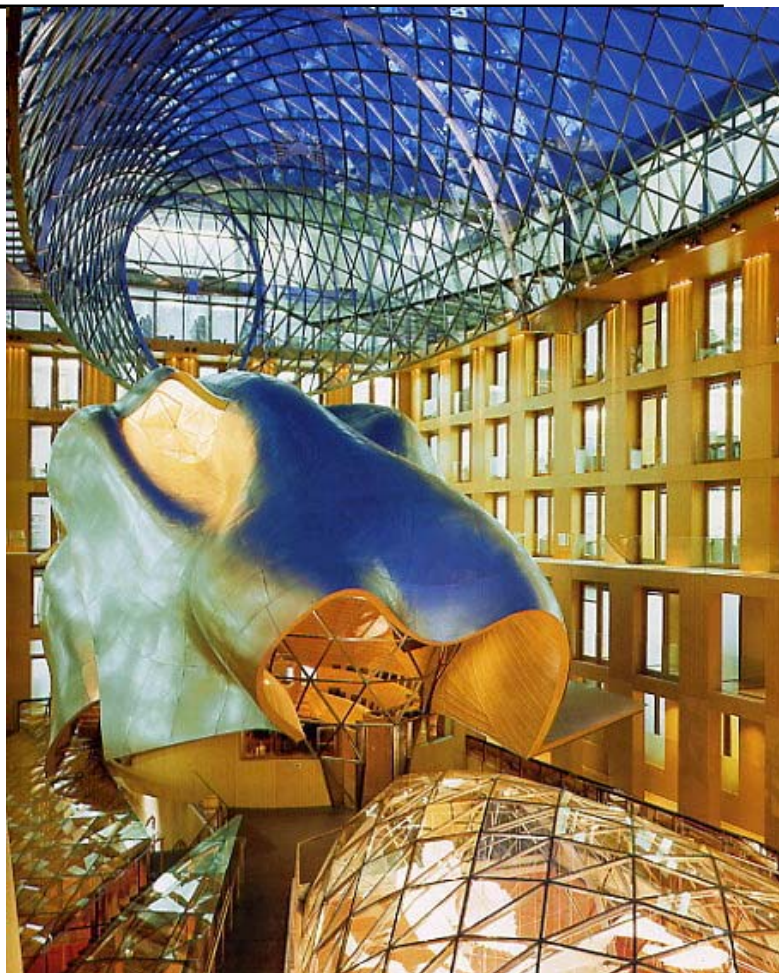
Il problema più grosso risiede nel fatto che per modellare gli effetti turbolenti dei macro-flussi, è necessario utilizzare degli opportuni modelli di turbolenza. Essi inficiano notevolmente sui risultati ed è difficile stabilire se sono adatti o meno per ogni caso particolare.

45

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

ESEMPIO – DG BANK BERLINO

Per lo studio dell'effetto del fuoco in modo avanzato in ambienti di grandi dimensioni è stata analizzata la copertura della DG Bank alla Pariser Platz nel centro di Berlino, realizzata da Gartner-Permasteelisa S.p.a. Essa è una struttura reticolare di grande leggerezza e trasparenza, realizzata in vetro ed acciaio che fornisce riparo e notevole luminosità ad un atrio di forma rettangolare dalle dimensioni di 61m x 20m.



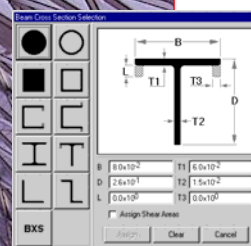
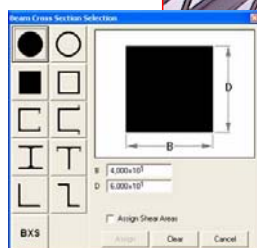
Il DG-Bank

FUNI
PRETESE

PIASTRA
DI NODO

TRAVI A "T" DI
IRRIGIDIMENTO

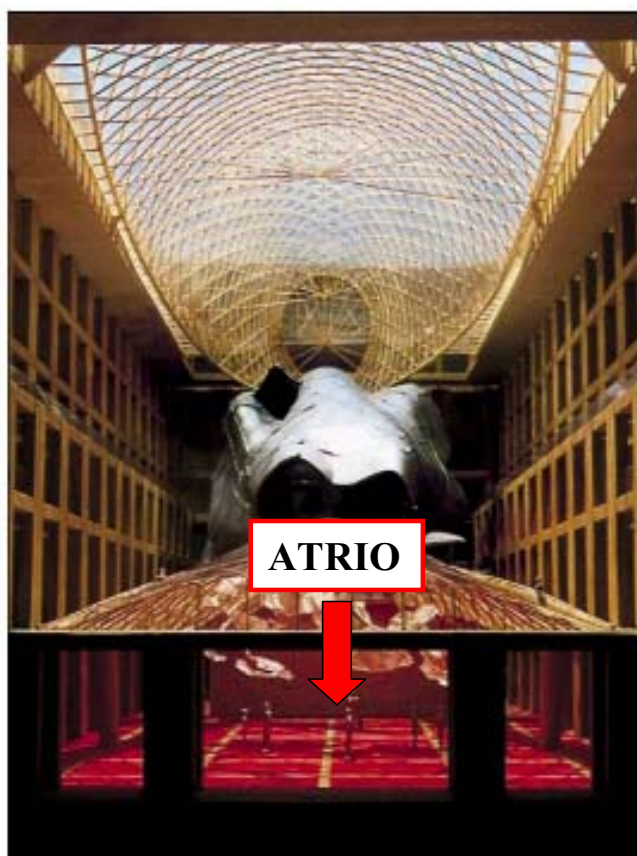
ASTE D'ARCO IN
ACCIAIO DI
FORMA
RETTANGOLARE



47

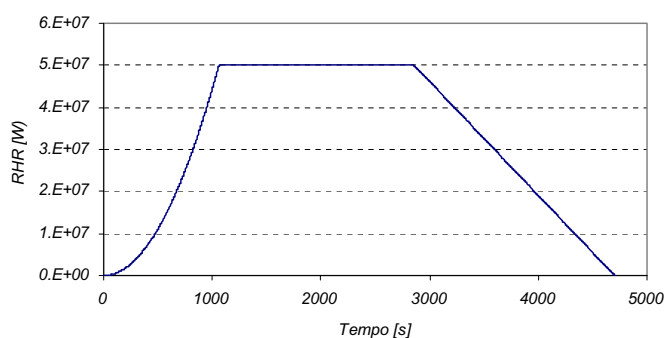
ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK



COMPARTIMENTI
LATERALI, A
DESTINAZIONE
D'USO DI LIBRERIA
ED UFFICI

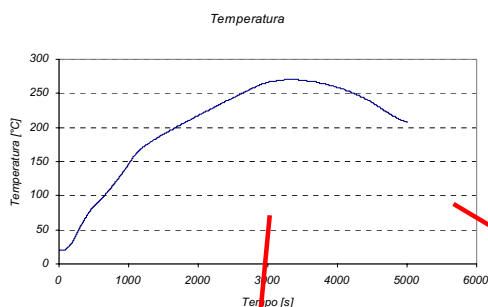
RHR



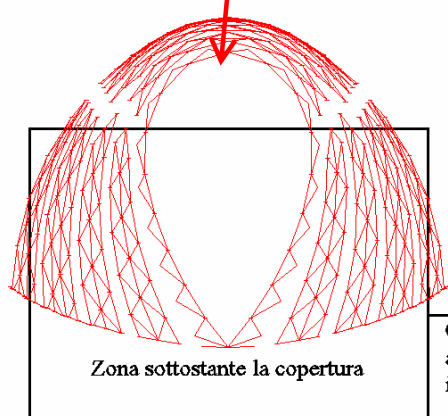
ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK

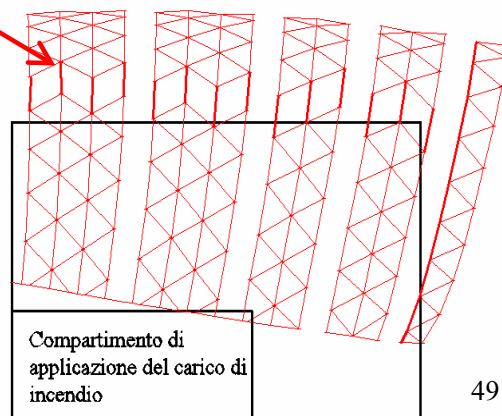
CURVA TEMPO-TEMPERATURA DATA DAL C-FAST



Agendo in favore di sicurezza come volume totale viene considerato solo quello della parte più alta della copertura dato che si è fatta l'ipotesi che i gas ed i fumi caldi siano localizzati solo in quella zona



Compartimento di
applicazione del carico di
incendio

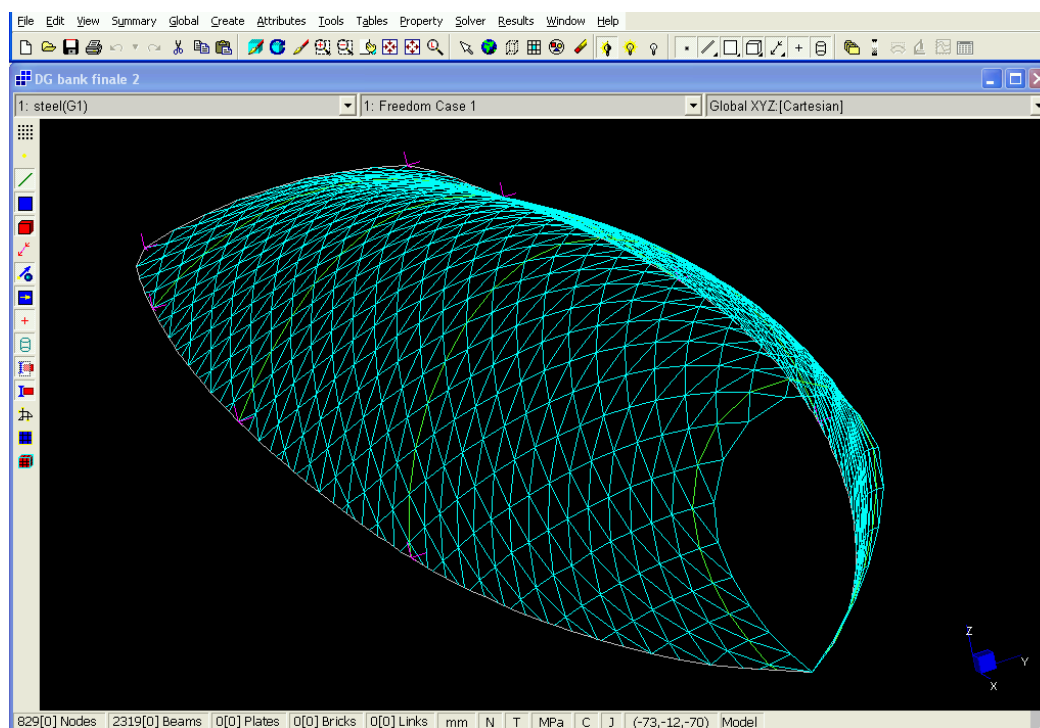


49

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – Analisi strutturale in condizione di incendio

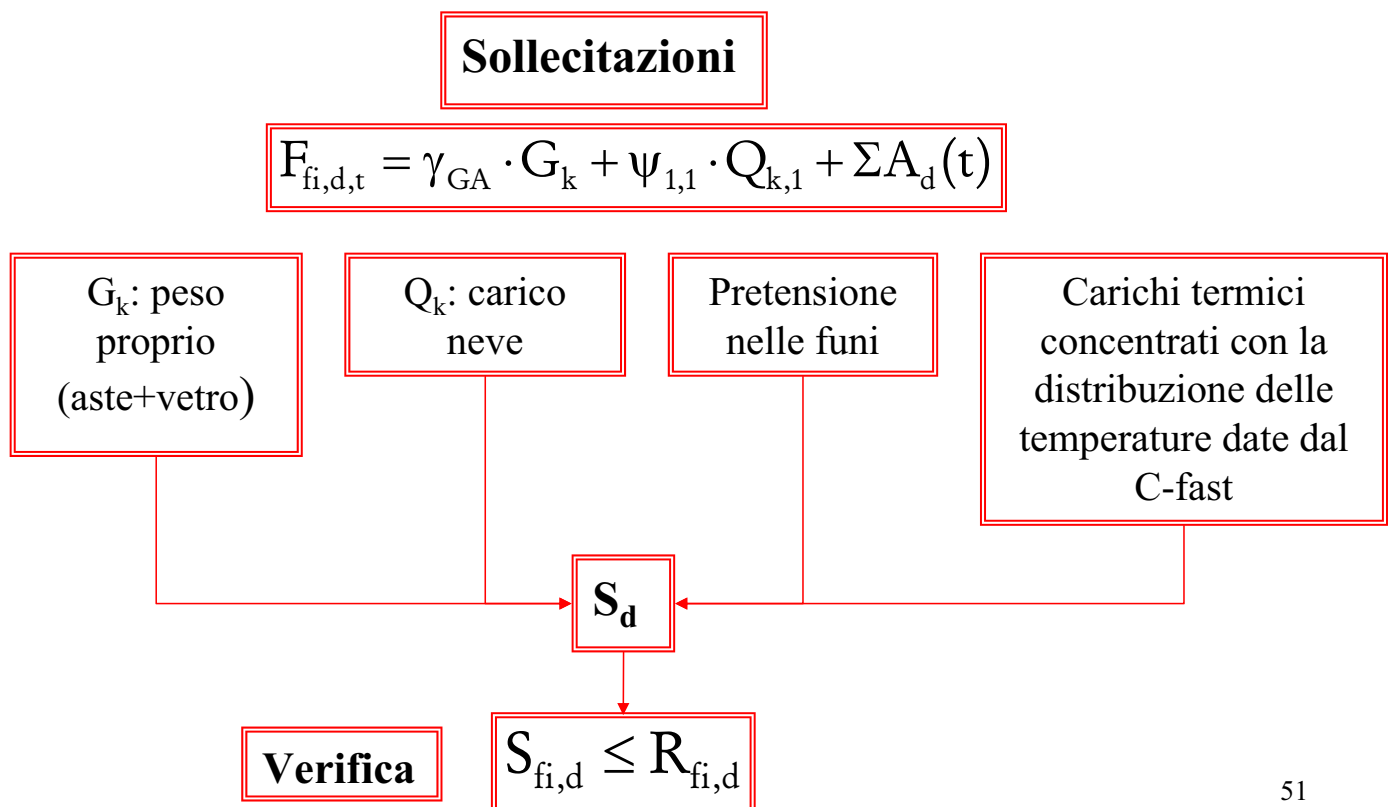
Per la modellazione delle funi sono stati utilizzati i cut-off bar con comportamento elasto-fragile; con tali elementi si ha la possibilità di fissare i valori massimi raggiungibili in trazione e in compressione.



50

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – Analisi strutturale in condizione di incendio



51

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – VERIFICHE DI RESISTENZA

Devono essere verificati i due elementi maggiormente sollecitati della copertura: una trave di irrigidimento di sezione a T e un'asta d'arco di sezione rettangolare. Tali elementi devono resistere a sforzo di compressione. La resistenza di progetto al carico di punta $N_{b,fi,t,Rd}$ di una sezione trasversale di classe 1, 2 o 3 è definita in tale modo dall'EC3:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \left[\frac{\chi_{fi}}{1,2} \right] \cdot \frac{A \cdot k_{y,\theta_{max}} \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

- $k_{y,q,max}$ è il fattore di riduzione da 3.2.1 ENV 1993-1-1 per la resistenza allo snervamento dell'acciaio alla temperatura massima dell'acciaio $q_{a,max}$ raggiunta al tempo t ;

52

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – VERIFICHE DI RESISTENZA

- χ_{fi} è il fattore di riduzione per l'instabilità flessionale in una situazione di progettazione di incendio. Essa viene definito partendo dal fattore di riduzione per temperatura ambiente definito come:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \lambda_{q,max}]^{0,5}} \rightarrow \phi = 0,5 \left[1 + \alpha \lambda_{q,max} - 0,2 \right) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\lambda_{q,max} = \bar{\lambda} \cdot [k_{y,\theta,max} / k_{E,\theta,max}]^{0,5}$$

$$\bar{\lambda} = (\lambda / \lambda_1) \cdot [\beta_A]^{0,5}$$

$$\lambda = l_0 / \rho_{min}$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot [E / f_y]^{0,5} = 93,9\epsilon$$

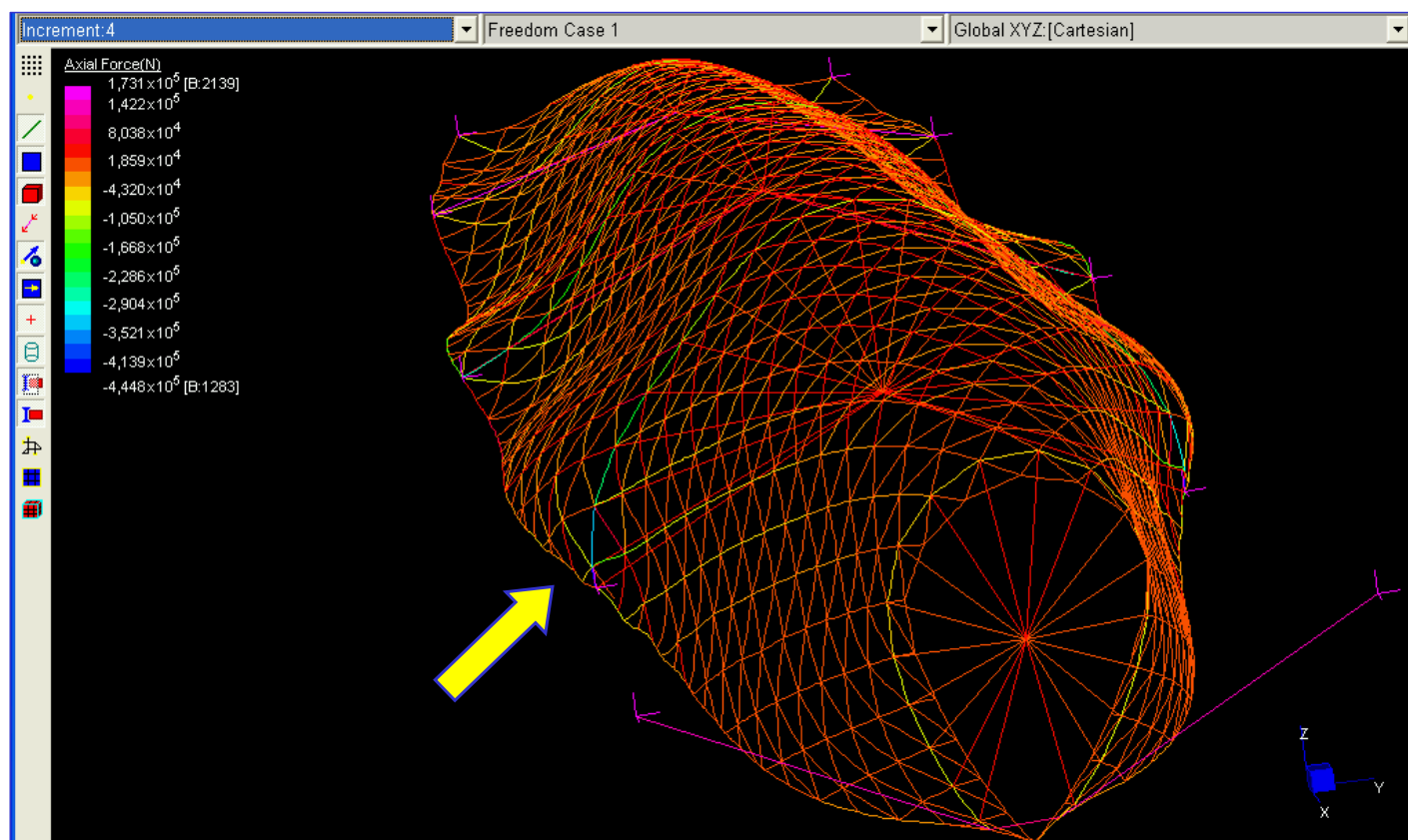
$$\epsilon = \left[(235 / f_y) \cdot (k_{E,\theta} / k_{y,\theta}) \right]^{0,5}$$

Determinazione di ϵ in $f(t)$			
t [°C]	$k_{E,\theta}$ [/]	$k_{y,\theta}$ [/]	ϵ [/]
20	1,000	1,000	0,81
100	1,000	1,000	0,81
200	0,900	1,000	0,77
300	0,800	1,000	0,73
400	0,700	1,000	0,68
500	0,600	0,780	0,71
600	0,310	0,470	0,66
700	0,130	0,230	0,61
800	0,090	0,110	0,74
900	0,068	0,060	0,86
1000	0,045	0,040	0,86
1100	0,023	0,020	0,86
1200	0,000	0,000	0,00

53

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

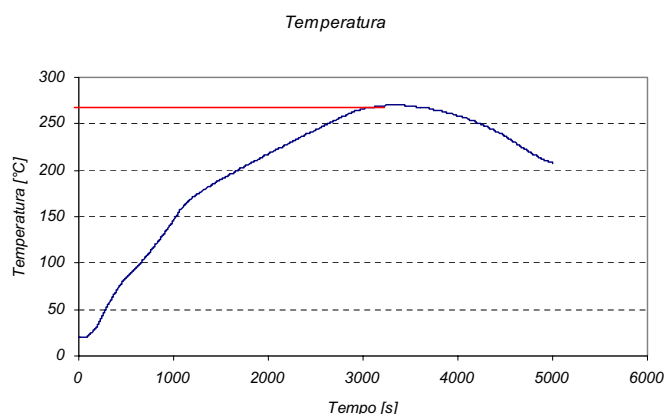
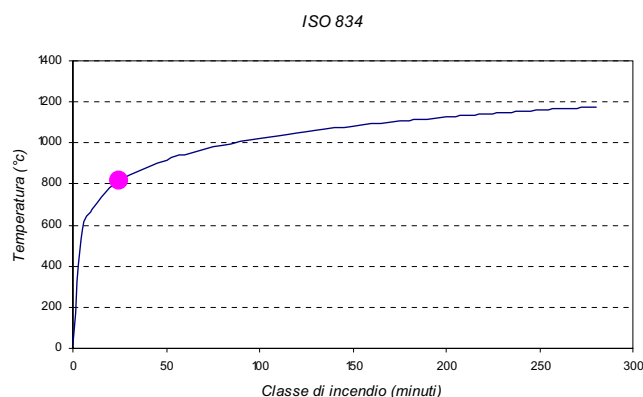
Esempio – Copertura DG BANK – VERIFICHE DI RESISTENZA



ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – VERIFICHE DI RESISTENZA

E' necessario calcolare la variazione di R in $f(t)$. Facendo riferimento all'analisi eseguita con il C-fast, si vede come la struttura sia in grado di resistere alla temperatura massima raggiunta (circa 300°C) mentre se si fa riferimento alla curva ISO tale verifica non è soddisfatta.



55

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – VERIFICHE DI RESISTENZA

OSSERVAZIONE: per semplicità si suppone di far variare con la temperatura solo la parte relativa alla resistenza. In teoria si dovrebbe far variare anche la parte sollecitante, ma se si dimostra che la struttura non è in grado di resistere ad un carico di minore entità, non ha senso fare analisi più accurate. Inoltre le sollecitazioni aggiuntive dovute alle deformazioni termiche sono di modesta entità se messe in relazione con le perdite di resistenza a parità di temperatura.

56

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – VERIFICHE DI RESISTENZA

VERIFICA SEZIONE A T

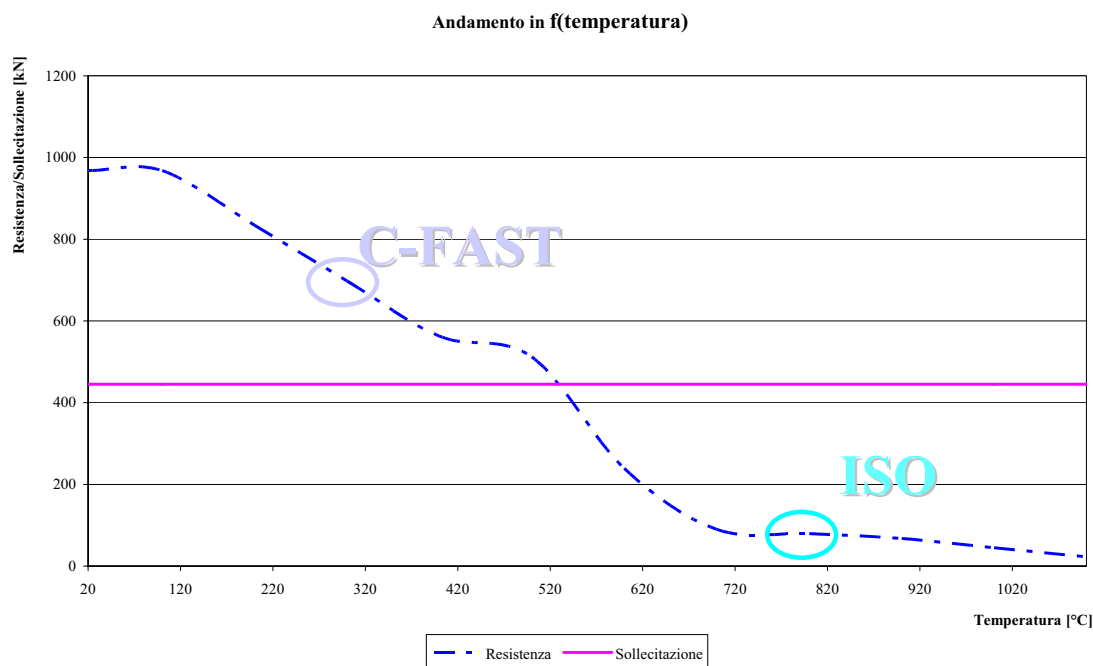
Determinazione di $N_{b,fi,t,Rd}$											
T	$\gamma_{m,fi}$	$k_{y,\theta max}$	λ_0	λ_1	$\lambda'_{t=20^\circ C}$	$\lambda'_{\theta, max}$	ϕ	χ_{fi}	$N_{b,fi,t,Rd}$	$N_{s,d}$	Verifica
[°C]	[/]	[/]	[m]	[m]	[/]	[/]	[/]	[/]	[kN]	[kN]	
20	1,00	1,00	94	76	1,23	1,23	1,51	0,42	968	445	ok
100	1,00	1,00	94	76	1,23	1,23	1,51	0,42	968	445	ok
200	1,00	1,00	94	72	1,30	1,37	1,72	0,36	835	445	ok
300	1,00	1,00	94	68	1,38	1,54	2,01	0,30	698	445	ok
400	1,00	1,00	94	64	1,47	1,76	2,43	0,24	563	445	ok
500	1,00	0,78	94	67	1,40	1,60	2,12	0,28	512	445	ok
600	1,00	0,47	94	62	1,51	1,87	2,65	0,22	240	445	Cede
700	1,00	0,23	94	57	1,64	2,18	3,35	0,17	90	445	Cede
800	1,00	0,11	94	69	1,36	1,50	1,95	0,31	80	445	Cede
900	1,00	0,06	94	81	1,16	1,09	1,32	0,49	68	445	Cede
1000	1,00	0,04	94	81	1,16	1,09	1,32	0,49	45	445	Cede
1100	1,00	0,02	94	81	1,16	1,09	1,32	0,49	23	445	Cede

57

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – VERIFICHE DI RESISTENZA

VERIFICA SEZIONE A T



58

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – VERIFICHE DI RESISTENZA

VERIFICA SEZIONE RETTANGOLARE

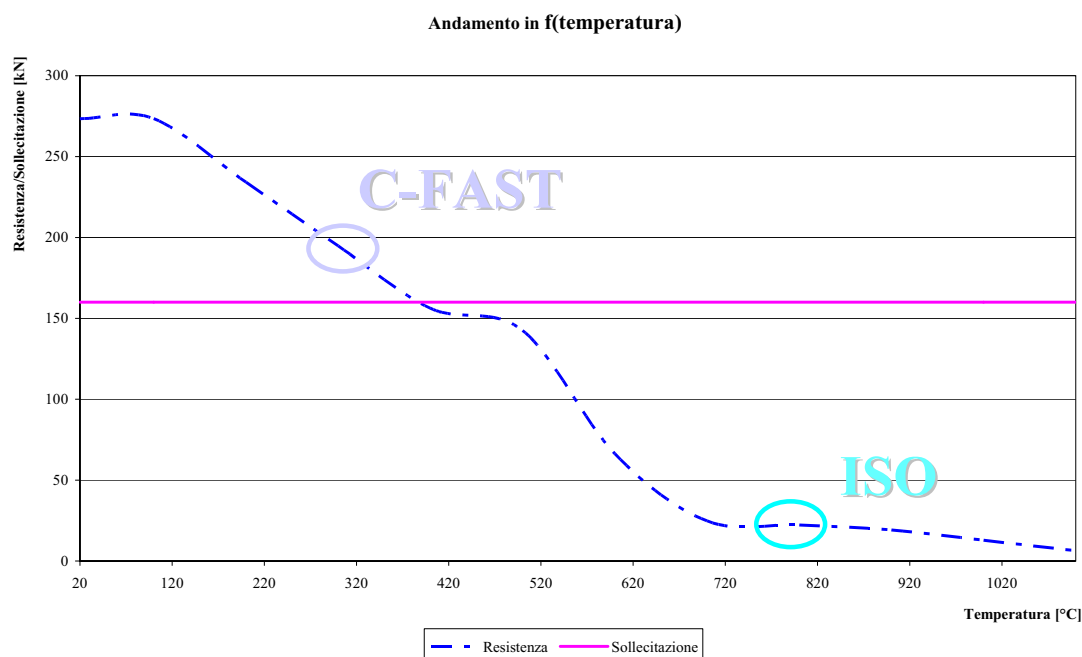
Determinazione di $N_{b,fi,t,Rd}$											
T	$\gamma_{m,fi}$	$k_{y,0max}$	λ_0	λ_1	$\lambda'_{t=20^\circ C}$	$\lambda'_{\theta,max}$	ϕ	χ_{fi}	$N_{b,fi,t,Rd}$	$N_{s,d}$	Verifica
[°C]	[/]	[/]	[m]	[m]	[/]	[/]	[/]	[/]	[kN]	[kN]	
20	1,00	1,00	100	76	1,31	1,31	1,63	0,39	273	160	ok
100	1,00	1,00	100	76	1,31	1,31	1,63	0,39	273	160	ok
200	1,00	1,00	100	72	1,38	1,45	1,86	0,33	234	160	ok
300	1,00	1,00	100	68	1,46	1,64	2,19	0,27	195	160	ok
400	1,00	1,00	100	64	1,56	1,87	2,66	0,22	156	160	Cede
500	1,00	0,78	100	67	1,49	1,70	2,32	0,26	143	160	Cede
600	1,00	0,47	100	62	1,61	1,98	2,91	0,20	66	160	Cede
700	1,00	0,23	100	57	1,74	2,32	3,70	0,15	25	160	Cede
800	1,00	0,11	100	69	1,45	1,60	2,12	0,28	22	160	Cede
900	1,00	0,06	100	81	1,23	1,16	1,41	0,45	19	160	Cede
1000	1,00	0,04	100	81	1,23	1,16	1,41	0,45	13	160	Cede
1100	1,00	0,02	100	81	1,23	1,16	1,41	0,45	6	160	Cede

59

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Esempio – Copertura DG BANK – VERIFICHE DI RESISTENZA

VERIFICA SEZIONE RETTANGOLARE



60

Esempio – Copertura DG BANK – CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

- La curva ISO di normativa risulta troppo severa per analizzare ambienti di grandi dimensioni, in particolare se si devono verificare strutture in acciaio, molto sensibili alle temperature. In questo caso sarebbe opportuno eseguire un'analisi più completa della situazione tramite, ad esempio, l'utilizzo della curva tempo-temperatura fornita dal C-fast.