
SICUREZZA IN CASO DI INCENDIO: FIRE SAFETY DESIGN

1

FIRE SAFETY DESIGN

I campi del Fire Safety Design

Per controllare i rischi connessi ad un incendio e raggiungere tali obiettivi vengono utilizzati in modo congiunto i seguenti sistemi di progettazione:

- **PREVENZIONE (Contents/Finish control)**
- **PROTEZIONE PASSIVA (Passive Fire Protection)**
- **PROTEZIONE ATTIVA (Active Fire Protection)**
- **SMOKE MANAGEMENT SYSTEM**
- **RILEVAZIONE ED ALLARME (Detection and alarm)**
- **IMPIANTI DI SPEGNIMENTO MANUALE (Manual firefighting)**
- **SISTEMI DI EVACUAZIONE (Egress Systems)**

2

Obiettivi della progettazione

Gli obiettivi primari del **FIRE SAFETY DESIGN**, cioè di una progettazione sicura in caso di incendio, sono quelli di:

- **RIDURRE LE PERDITE UMANE** (sia dei civili che dei pompieri);
- **LIMITARE I DANNI ALLE STRUTTURE**
- **CONTENERE LE PERDITE MONETARIE DOVUTE ALLA INTERROTTE ATTIVITÀ.**

Questi obiettivi vengono raggiunti contenendo la propagazione del fuoco e limitando la quantità di fumi e calore che possono raggiungere gli occupanti, i vari ambienti e gli impianti dell'edificio.

3

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

IL LIVELLI DI PRESTAZIONE

A seconda dell'obiettivo che si vuole conseguire fra quelli appena elencati, è possibile suddividere la progettazione in livelli di prestazione richiesti. La CNR n°192 del 1999 ne distingue cinque:

- **Livello 1:** Nessun requisito di resistenza specifico al fuoco dove le conseguenze del crollo delle strutture siano accettabili o dove il rischio di incendio sia trascurabile;
- **Livello 2:** Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro;
- **Livello 3:** Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture tali da evitare, per tutta la durata dell'incendio, il collasso delle strutture stesse;
- **Livello 4:** Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse;
- **Livello 5:** Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse.

4

VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA AL FUOCO

Il passo fondamentale nella progettazione antincendio delle strutture è quello di verificare che la **resistenza della struttura** (o di ogni parte della struttura) sia più grande della **severità dell'incendio** a cui si trova assoggettata la struttura. Questa verifica richiede che: $R_{fi,d}$ con l'effetto di progetto delle azioni nella situazione di progetto $E_{fi,d}$, entrambe valutate in caso di incendio (il pedice "fi" sta per fire), e controllando che risulti:

$$\text{Resistenza al fuoco } (R_{fi,d}) \geq \text{Severità dell'incendio } (E_{fi,d})$$

5

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Valutazione della resistenza al fuoco

$$\text{Resistenza al fuoco} \geq \text{Severità dell'incendio}$$

DOMINIO	UNITÀ	RESISTENZA AL FUOCO	SEVERITÀ DELL'INCENDIO
Tempo	minuti o ore	Tempo al collasso	Durata dell'incendio indicata dal codice o determinata dai calcoli
Temperatura	°C	Temperatura che causa il collasso	Massima temperatura raggiunta durante l'incendio
Resistenza	kN o kN·m	Capacità di carico ad elevate temperature	Carico applicato durante l'incendio

6

Combinazione delle azioni

L'azione incendio rientra nella categoria delle **azioni eccezionali**, per le quali i valori rappresentativi sono valori nominali o indicativi, che vanno utilizzati, unitamente alle azioni permanenti ed alle azioni variabili, con i coefficienti parziali di sicurezza e con i coefficienti di combinazione specificati per le combinazioni eccezionali.

Per la determinazione degli effetti prodotti dalla esposizione all'incendio e dalle azioni dirette applicate alla costruzione deve essere adottata l'azione di progetto $F_{fi,d}$ corrispondente alla seguente combinazione eccezionale, come prevista nella vigente normativa italiana e nell'Eurocodice 1, parte 2.2:

7

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

$$F_{fi,d} = \gamma_{GA} \cdot G_K + \gamma_p \cdot P_K(t) + \psi_{1,1} \cdot Q_{K,1} + \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{K,i} + \sum A_d(t)$$

dove:

G_K è il valore caratteristico delle azioni permanenti;

$P_K(t)$ è il valore caratteristico della forza di precompressione variabile con il tempo di esposizione all'incendio;

$Q_{K,1}$ è il valore caratteristico dell'azione variabile considerata come principale;

$Q_{K,i}$ sono i valori caratteristici delle altre azioni variabili;

$A_d(t)$ sono i valori di progetto delle azioni derivanti dalla esposizione all'incendio;

$\gamma_{GA} = 1.0$ è il coefficiente parziale di sicurezza per le azioni permanenti in situazioni eccezionali;

$\gamma_p = 1.0$ è il coefficiente parziale di sicurezza per la precompressione in situazioni eccezionali;

$\psi_{1,1}$ è il coefficiente di combinazione dell'azione variabile considerata come principale (valore variabile tra 0.5 e 0.9 a seconda della categoria dell'edificio);

$\psi_{2,i}$ è il coefficiente di combinazione generico delle altre azioni variabili (valore variabile tra 0.3 e 0.8 a seconda della categoria dell'edificio).

8

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Combinazione delle azioni

In alternativa, con procedimento semplificato, le azioni di progetto per la verifica al fuoco $F_{fi,d}$ possono essere ottenute riducendo le azioni di progetto allo stato limite ultimo a temperatura ordinaria F_d attraverso la formula:

$$F_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot F_d$$

dove:

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} + \psi_{1,1} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi} = \frac{1.0 + \psi_{1,1} \cdot \xi}{1.4 + 1.5 \cdot \xi}$$

$\xi = Q_{k,1}/G_k$ è il rapporto tra la principale azione variabile e l'azione permanente

$\gamma_G = 1.35$ è il coefficiente parziale di sicurezza per l'azione permanente (nella norma italiana è 1.40)

$\gamma_Q = 1.50$ è il coefficiente parziale di sicurezza per la principale azione variabile

$\gamma_{GA} = 1.00$ è il coefficiente parziale di sicurezza per le azioni permanenti in situazioni eccezionali.

9

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Proprietà dei materiali in condizione d'incendio

Nella CNR 192/1999 paragrafo 4, sono riportate, per i principali materiali da costruzione, le proprietà meccaniche e termiche che descrivono il comportamento del materiale per temperature elevate e per durate di esposizione al fuoco non superiori a 240 minuti. I valori riportati per le proprietà meccaniche sono riferiti ai valori caratteristici delle stesse proprietà a temperatura ordinaria, mentre quelli per le proprietà termiche sono da considerarsi direttamente come valori di progetto, in quanto rappresentano il risultato di indagini sperimentali convenzionalmente accettate.

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

Valutazione della resistenza al fuoco degli elementi strutturali

La normativa italiana e quella europea stabiliscono i criteri da seguire per determinare la resistenza al fuoco di un elemento costruttivo. Essi sono basati su:

● **CONTROLLO SPERIMENTALE:** tale tipo di controllo è applicabile a tutti gli elementi costruttivi e consiste nel determinare il tempo sperimentale per raggiungere il collasso per stabilità o lo stato limite di tenuta e di isolamento. La durata di resistenza al fuoco viene determinata sottoponendo l'elemento considerato a **prove in forni convenzionali secondo la curva temperatura-tempo standard con modalità** anch'esse **normalizzate**. Per verificare sperimentalmente la resistenza al fuoco di un elemento strutturale è necessario che la prova sia ripetuta su almeno due campioni identici con esito favorevole in entrambi i casi; si assumerà come valore di resistenza al fuoco sperimentale il minore dei risultati delle due prove suddette. La verifica si considera soddisfatta ogni qual volta la capacità portante sia mantenuta per un tempo di esposizione al fuoco maggiore del tempo richiesto di resistenza al fuoco.

11

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

● **VERIFICA TABELLARE:** sulla base di numerose prove in forno sono state fornite in forma tabellare **prescrizioni sul dimensionamento degli spessori degli elementi strutturali e sui rivestimenti protettivi da adottare per i diversi materiali costruttivi**, per le varie classi di strutture e per le diverse tipologie degli elementi strutturali. La verifica tabellare garantisce la prestazione di resistenza al fuoco del singolo elemento strutturale, ma non consente la valutazione del comportamento globale della struttura.

● **VERIFICA ANALITICA:** è applicabile solo per verificare le **caratteristiche di stabilità di un dato elemento costruttivo in acciaio, c.a., c.a.p., muratura e legno**, tutti con eventuali protezioni isolanti. Per gli elementi in acciaio la verifica si esegue determinando, in base a considerazioni di bilancio termico, la durata dell'incendio convenzionale necessaria affinché gli elementi portanti metallici raggiungano la temperatura critica e quindi lo stato limite di stabilità. Queste verifiche risultano alquanto complesse e fattibili usando dei codici di calcolo appropriati.

12

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

PASSI DA ESEGUIRE PER LA VERIFICA DI RESISTENZA DI UN EDIFICIO

- 1) L'edificio deve essere suddiviso in compartimenti di superficie non superiore a quella indicata nel **D.M. 16 Maggio 1987, n°246**.
- 2) Viene calcolato il Carico di incendio specifico di progetto e successivamente, in base al livello di prestazione richiesto, la Classe di Resistenza al Fuoco di ogni compartimento (**D.M. 09-03-2007**) con la relazione:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \cdot q_f \quad [\text{MJ/m}^2] \quad \text{Carico d'incendio specifico di progetto}$$

- 3) Calcolata la classe C è necessario dimensionare le strutture portanti e quelle di chiusura del compartimento in modo tale **da possedere una resistenza al fuoco maggiore od uguale a C**. Per esempio se la classe richiesta è la 60, si richiederanno strutture portanti R 60 e separanti REI 60.

13

ANALISI AL FUOCO DELLE STRUTTURE

PASSI DA ESEGUIRE PER LA VERIFICA DI RESISTENZA DI UN EDIFICIO

- 4) Calcolo della resistenza delle strutture portanti tale che
Resistenza al fuoco ($R_{fi,d}$) \geq Severità dell'incendio ($E_{fi,d}$)
secondo 3 differenti modalità:

➡ **VERIFICA TABELLARE:** la norma fornisce delle tabelle per calcolare gli spessori delle pareti, dei solai, dei rivestimenti da applicarsi alle colonne ed alle travi in funzione della classe C richiesta

➡ **CONTROLLO SPERIMENTALE:** la resistenza al fuoco di elementi costruttivi può essere determinata mediante prove in forni da parte di laboratori autorizzati (**norma UNI 7678**);

➡ **VERIFICA ANALITICA:** la resistenza al fuoco di elementi costruttivi può essere determinata analiticamente mediante le norme:

- **UNI 9502 (per c.a. e c.a.p.)**
- **UNI 9503 (per acciaio)**
- **UNI 9504 , EC5 parte 1.2, CNR-DT 206/2006 (per legno)**
- **Eurocodici + annessi tecnici contenenti i parametri nazionali**

14

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

VERIFICA ANALITICA

Il calcolo della resistenza al fuoco per via analitica prevede lo svolgimento dei seguenti passi procedurali:

- 1) Calcolo della distribuzione delle temperature all'interno dell'elemento al variare del tempo di esposizione all'incendio normalizzato;
- 2) Valutazione della variazione delle proprietà meccaniche dei materiali associata all'andamento delle temperature;
- 3) Verifica della capacità portante dell'elemento.

Nel seguito verranno analizzati uno ad uno i seguenti passi con riferimento a tre tipologie di elementi costruttivi: quelli composti da cemento armato, quelli in acciaio ed infine gli elementi in legno. Prima di affrontare tale argomento è necessario, però, approfondire qualche concetto relativo alla trasmissione del calore.

15

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

IL PROBLEMA DELLA TRASMISSIONE DEL CALORE

Questo paragrafo ha come obiettivo quello di determinare **un'espressione analitica generale che permetta di conoscere, note le condizioni iniziali e le condizioni al contorno del problema in esame, la distribuzione della temperatura all'interno di un elemento strutturale**. In questo modo è possibile condurre una verifica sulla capacità portante, operando secondo la procedura esplicita poc'anzi. A tal fine è necessario fare una breve panoramica sulle modalità di trasmissione del calore ed accennare alle due leggi di Fourier.

16

IL CONCETTO DI CALORE

Il **calore** è un **FLUSSO DI ENERGIA** essenzialmente dovuto ai moti molecolari. Questa energia “in transito” fluisce sempre dai punti a temperatura maggiore a quelli a temperatura minore, finché non si raggiunge l'equilibrio termico.

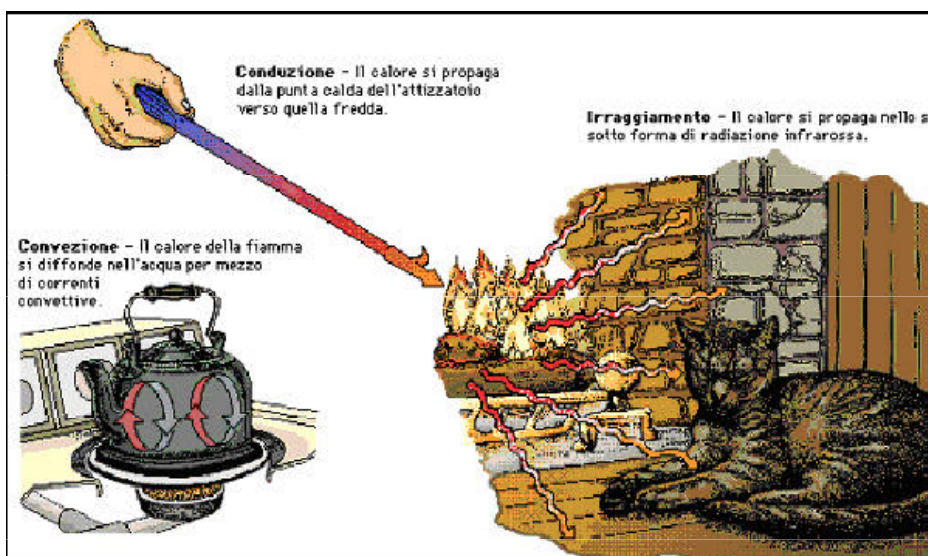
L'unità di misura del calore nel sistema SI è il **joule**.

E' utile considerare il tasso di calore, vale a dire il calore che transita per unità di tempo. Questo tasso si chiama **POTENZA TERMICA TRASMESSA**, si misura in **watt** e viene comunemente chiamato **flusso termico**.

17

IL CONCETTO DI CALORE

Il calore può propagarsi da un corpo caldo ad uno freddo, o da una data regione calda ad altre meno calde dello stesso corpo, in tre modi distinti e cioè per **conduzione**, per **convezione** e per **irraggiamento**.



La trasmissione del calore **in un corpo solido** avviene prevalentemente secondo la prima modalità e quindi, nell'analisi del problema, inizialmente si prenderà in considerazione solo il **termine conduttivo**.

18

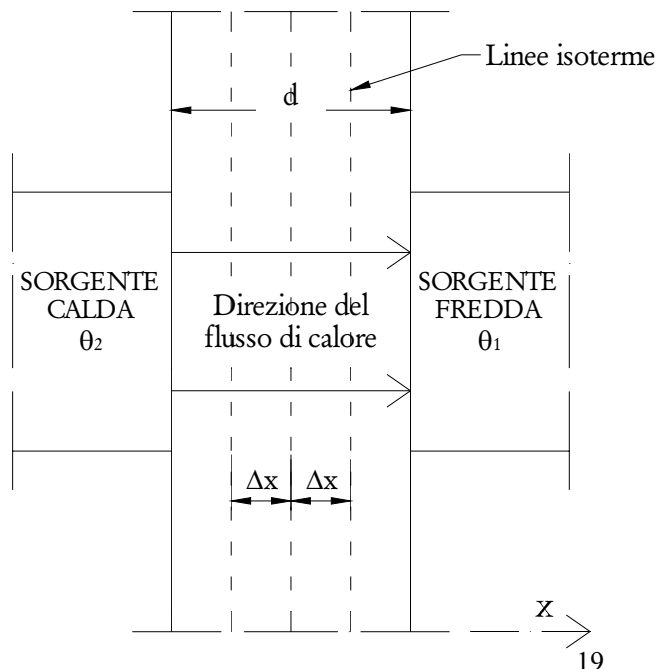
VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

DEFINIZIONE DI CONDUZIONE: la conduzione può essere definita come un processo tramite il quale il calore passa da una zona di un corpo ad un'altra vicina avente temperatura inferiore, **senza che vi sia movimento di materia**

Si consideri il caso di un muro di materiale solido di spessore d le cui facce vengano mantenute a temperature costanti θ_1 e θ_2 con $\theta_1 < \theta_2$.

Se si analizza la distribuzione delle temperature all'interno del muro, si trova che, in condizioni stazionarie, esiste un gradiente di temperature e precisamente che la temperatura diminuisce uniformemente allontanandosi dalla faccia calda.

$$\Delta\theta/\Delta x = (\theta_2 - \theta_1)/d$$



19

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

Sperimentalmente si verifica che la quantità di calore Q che passa attraverso il muro nell'intervallo di tempo $(0,t)$ è proporzionale a t , al gradiente di temperatura ed all'area S delle facce delle pareti, vale cioè la relazione seguente, nota come **PRIMA LEGGE DI FOURIER**:

$$Q = \lambda S \frac{\theta_2 - \theta_1}{d} t$$

λ è una costante di proporzionalità, variabile da sostanza a sostanza, chiamata **conducibilità termica** o **coefficiente di conduttività interna**.

Nel limite di uno strato di spessore infinitesimo dx , con differenza di temperatura $d\theta$ tra le sue facce, si ottiene la seguente relazione fondamentale per la conduzione del calore:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda S \frac{d\theta}{dx}$$

dove il segno negativo a secondo membro è dovuto al fatto che l'asse x si considera orientato nel verso di propagazione del calore e quindi $d\theta/dx < 0$

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

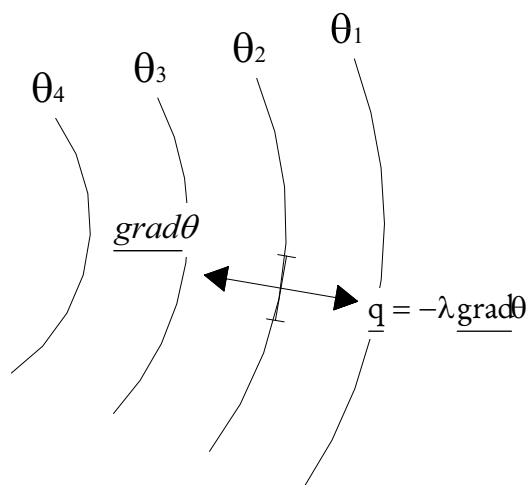
Generalizzando l'espressione per un flusso di calore che si propaga nelle tre direzioni dello spazio si ottiene la seguente relazione per il gradiente di temperatura:

$$\underline{\text{grad}\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \underline{i} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \underline{j} + \frac{\partial \theta}{\partial z} \underline{k}$$

e la forma generale della 1° legge di Fourier:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda S \frac{d\theta}{dx} \quad \rightarrow \quad \underline{q} = -\lambda \underline{\text{grad}\theta}$$

dove $\underline{q} = \frac{dQ}{dt \cdot S}$



è la **densità di flusso di calore** o di **potenza termica** (Joule/m²s), data dalla variazione del flusso di calore che attraversa l'area S.

21

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

Nella tabella seguente vengono riportati i valori della conducibilità termica di alcune sostanze. Come si vede, rispetto agli altri materiali, i metalli hanno conducibilità termica maggiore per almeno un fattore 100; esiste, infatti, una **relazione di proporzionalità tra la conducibilità termica e quella elettrica**, cosicché i migliori conduttori di corrente elettrica sono anche i migliori conduttori di calore.

SOSTANZA	λ [cal/(°C cm s)]
Acqua	1.43×10^{-3}
Alluminio	0.566
Argento	1.03
Aria	5.6×10^{-5}
Ferro	0.19
Ghiaccio (a 0°C)	5.3×10^{-3}
Marmo	7.5×10^{-3}
Mercurio	0.020
Piombo	0.084
Rame	0.96
Vetro	$(1 \div 3) \times 10^{-3}$

22

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

E' necessario, ora, introdurre in modo più approfondito il **CONCETTO DI QUANTITÀ DI CALORE**. Dall'esperienza quotidiana, nonché da una serie di semplici osservazioni sperimentali ricavate a seguito degli scambi termici fra corpi di natura diversa che si trovano inizialmente a diversa temperatura, si possono ricavare le seguenti considerazioni:

- La quantità di calore ceduta da un corpo aumenta all'aumentare della sua temperatura;
- Due corpi della stessa sostanza mantenuti alla stessa temperatura cedono due diverse quantità di calore se hanno massa diversa, in particolare ne cede di più quello di massa maggiore;
- A parità di condizioni, la quantità di calore ceduta da un corpo dipende dalla natura del corpo.

Tutto ciò si può tradurre nella legge: $Q = mc\theta$

dove **Q** è la **quantità di calore** posseduta dal corpo di temperatura θ e di massa m , con c costante di proporzionalità caratteristica della natura del corpo considerato chiamata **calore specifico** del corpo, espressa in cal/g°C.

23

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

Il CALORE SPECIFICO di una sostanza è definito come la quantità di calore necessaria per aumentare di 1 grado Kelvin la temperatura di un chilogrammo di materiale.

Dividendo l'espressione $Q = mc\theta$ per il volume del corpo, si può infine definire la **densità di energia U** (Joule/m³), indice della quantità di energia termica posseduta dal corpo di massa m , alla temperatura θ gradi:

$$U = \rho c \theta$$

dove ρ è la massa volumica del materiale (kg/m³).

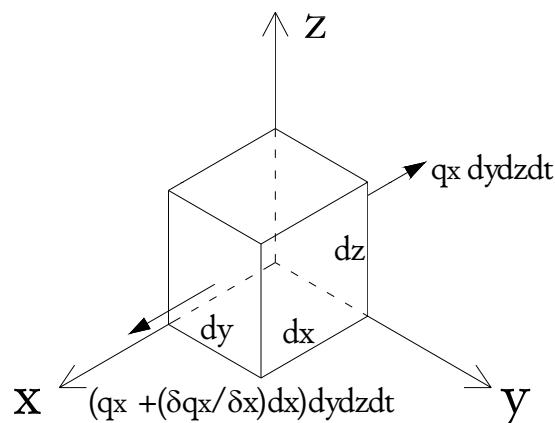
24

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

EQUAZIONE DI BILANCIO TERMICO: Il calore prodotto entro una regione in un intervallo di tempo, in parte si accumula nell'interno della regione, ed in parte esce attraverso il contorno della regione.

Si prenda in considerazione un volume elementare di dimensioni $dV=dx \cdot dy \cdot dz$, per un intervallo di tempo elementare dt . La 2° legge di Fourier, che fornisce l'espressione del bilancio termico, dice che il contributo della variazione dell'energia interna U posseduta dal volume considerato sommato al flusso di calore q uscente da esso deve essere uguale alla quantità di calore generata w dalla sorgente, cioè:

$$\begin{array}{rcl}
 \text{accumulo (aumento) di energia interna } U & + & \\
 \text{flusso di calore uscente} & = & \\
 \hline
 \text{quantità di calore generata, cioè uscita dalla sorgente} & &
 \end{array}$$



25

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

Sviluppando ed elaborando i termini si ottiene:

1° termine: $U(t+dt)dx dy dz - U(t)dx dy dz = U(t)dx dy dz + \frac{\partial U}{\partial t} dt dx dy dz - U(t)dx dy dz = \frac{\partial U}{\partial t} dt dx dy dz$

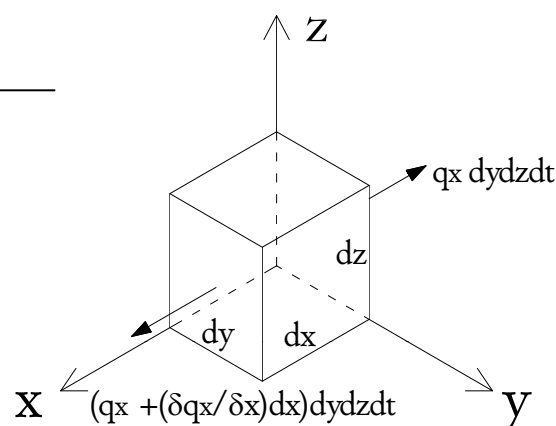
2° termine: $\left(q_x + \frac{\partial q}{\partial x} dx \right) dy dz dt - q_x dy dz dt + \left(q_y + \frac{\partial q}{\partial y} dy \right) dx dz dt - q_y dx dz dt + \left(q_z + \frac{\partial q}{\partial z} dz \right) dx dy dt - q_z dx dy dt =$
 $= \left(\frac{\partial q}{\partial x} dx \right) dy dz dt + \left(\frac{\partial q}{\partial y} dy \right) dx dz dt + \left(\frac{\partial q}{\partial z} dz \right) dx dy dt$

3° termine: $w dx dy dz$

Sommando e dividendo per $dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$, si ottiene

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} = w \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div} \underline{q} = w}$$

**2° LEGGE DI
FOURIER**



26

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

Dalle due leggi di Fourier, per sostituzione di q ottenuto dalla 1^a legge nella 2^a legge, si arriva all'equazione finale:

1^a legge di Fourier

$$\underline{q} = -\lambda \underline{\text{grad}}\theta$$

2^a legge di Fourier

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div} \underline{q} = w$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(-\lambda \underline{\text{grad}}\theta) = w$$

$$U = \rho c \theta$$

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(\lambda \underline{\text{grad}}\theta) + w$$

$$\forall P \in V, P \notin \mathfrak{I}(V)$$

27

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

Per i punti appartenenti alla frontiera del volume considerato (cioè tutti i punti appartenenti alla superficie del solido), devono essere definite delle **opportune condizioni al contorno**. Infine, per risolvere il problema, mancano ancora da definire le condizioni iniziali.

● **Condizione iniziale:** $\theta(x, y, z, t_0) = \theta_0(x, y, z) \quad \forall P \in V \quad \forall P \in \mathfrak{I}(V)$

deve essere definita al tempo t_0 la temperatura associata ad ogni punto del corpo preso in esame (sia ai punti appartenenti al volume che a quelli della frontiera);

● **Condizione al contorno:** $\forall P \in \mathfrak{I}(V)$ per definire l'equazione che impone le condizioni al contorno sulla frontiera, è necessario introdurre le altre due modalità di propagazione del calore, cioè la propagazione per **convezione** e per **irraggiamento**.

28

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

◆ **PROPAGAZIONE DEL CALORE PER CONVEZIONE:** è un processo di propagazione del calore accompagnato da un movimento di materia ed è caratteristico dei fluidi. La convezione ha un'importanza fondamentale nella vita pratica ma è un fenomeno assai complesso che è difficile da tradurre in un problema ben definito. Qui ci limiteremo a considerare il caso del raffreddamento di un corpo immerso in un fluido, ad esempio nell'aria. Il calore viene ceduto dal corpo attraverso la sua superficie sia per convezione che per conduzione, in accordo alla seguente legge empirica di Newton: "La quantità di calore ceduta nell'unità di tempo dall'unità di superficie di un corpo, ad un fluido circostante è proporzionale alla differenza di temperatura fra corpo e fluido." In formula si ha:

$$Q = \alpha_c S (\theta_{SURF} - \theta_{AMB})$$

dove Q è la quantità di calore ceduta dal corpo nell'intervallo di tempo (0,t), S è l'area della superficie disperdente e $(\theta_{SURF} - \theta_{AMB})$ è la differenza fra la temperatura del corpo θ_{SURF} e la temperatura dell'ambiente nei punti lontani dal corpo θ_{AMB} . Il valore del coefficiente α_c , che si chiama coefficiente di trasferimento di calore per convezione (Joule/sm²°C), dipende dalla natura e dallo stato della superficie disperdente nonché dalle condizioni di agitazione del fluido circostante. Il valore di α_c suggerito dall'EC1 (Parte 2-2) è di 25 W/m²°C.

29

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

◆ **PROPAGAZIONE DEL CALORE PER IRRAGGIAMENTO:** la trasmissione del calore per irraggiamento è un processo di trasferimento di calore per mezzo di onde elettromagnetiche. Un corpo caldo emette onde elettromagnetiche e la sua temperatura diminuisce; un corpo più freddo le assorbe e si riscalda. La quantità e il tipo di onde elettromagnetiche emesse dal corpo dipendono dalla natura del corpo ma, soprattutto, dalla sua temperatura. Un corpo capace di assorbire tutte le radiazioni elettromagnetiche incidenti su di esso senza rifletterne o lasciarne trasparire alcuna parte, viene detto *corpo nero*. Quest'ultimo irradia secondo una legge assai semplice: la quantità di energia emessa nell'unità di tempo dall'unità di superficie, risulta proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta:

$$q_{IRR} = \sigma \cdot [\theta_{SURF}^4 - \theta_{AMB}^4]$$

dove θ_{SURF} e θ_{AMB} sono rispettivamente le temperature del corpo e dell'ambiente circostante espresse in gradi Kelvin e $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ è la costante di Stefan-Boltzmann.

30

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

Se in luogo di considerare la radiazione emessa dal corpo nero, prendiamo in esame quella riguardante un corpo qualsiasi, poiché a parità di condizioni quest'ultima rappresenta solo una frazione ridotta di quella corrispondente al corpo nero, l'equazione precedente viene espressa nella forma:

$$q_{IRR} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [\theta_{SURF}^4 - \theta_{AMB}^4] \quad \forall P \in \mathfrak{I}(V)$$

dove ε è l'**emissività superficiale** di valore compreso fra zero ed uno (il valore suggerito dall'EC1 Parte 2-2 è di 0.56)

Concludendo, come condizione al contorno si impone che tutti i punti della superficie possano trasmettere calore sia per convezione che per irraggiamento:

$$q = q_{CONV} + q_{IRR} \quad \forall P \in \mathfrak{I}(V)$$

31

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

Nell'ipotesi che il mezzo sia omogeneo, isotropo e Foureriano, e che siano assenti termini di generazione di energia ($w=0$), il campo di temperatura, in coordinate cartesiane, è quindi individuato dalle seguenti equazioni:

Legge di distribuzione della temperatura:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div}(\lambda \underline{\text{grad}} \theta)$$

Condizione iniziale:

$$\theta(x, y, z, t_0) = \theta_0(x, y, z)$$

Condizione al contorno:

$$q = q_{CONV} + q_{IRR} \quad \begin{array}{l} \nearrow q_{conv} = \alpha_c (\theta_{SURF} - \theta_{AMB}) \\ \searrow q_{IRR} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [\theta_{SURF}^4 - \theta_{AMB}^4] \end{array}$$

Elaborando la condizione al contorno, si ottiene:

$$q = q_{CONV} + q_{IRR} = (\lambda \underline{\text{grad}} \theta)_m = \alpha_c (\theta_{SURF} - \theta_{AMB}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (\theta_{SURF}^4 - \theta_{AMB}^4) = (\alpha_c + \alpha_i) \cdot (\theta_{SURF}^4 - \theta_{AMB}^4)$$

$$\text{dove: } \alpha_i = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{\theta_{SURF} - \theta_{AMB}} \cdot [\theta_{SURF}^4 - \theta_{AMB}^4]$$

$\theta_{SURF} = \theta_0 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1)$ è la temperatura dell'incendio in gradi Kelvin

θ_{AMB} è la temperatura dell'elemento in gradi Celsius.

32

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

Le condizioni di non linearità, presenti nell'equazione differenziale alle derivate parziali per la dipendenza della conducibilità dalla temperatura e nella condizione al contorno per il termine radiativi, rendono il problema **non risolubile analiticamente** e richiedono **l'uso di soluzioni numeriche**.

Riscrivendo il problema in forma adimensionale, si evidenzia che il campo di temperatura dipende anche da un parametro dimensionale, detto '**Numero di Biot**', definito come:

$$N_B = \left[\frac{(\alpha_c + \alpha_i)}{\lambda} \right] \frac{V}{A}$$

dove α e λ sono le grandezze valutate in opportune condizioni di riferimento del problema; il rapporto A/V è detto **fattore di sezione o di massività** ed è definito come il rapporto fra la superficie esposta al fuoco ed il volume dell'elemento in analisi.

Per valori del numero di Biot piccoli, tipicamente inferiori a 1/10, il campo di temperatura risulta essere essenzialmente indipendente dal punto all'interno dell'elemento e rimane solo funzione del tempo.

33

VALUTAZIONE ANALITICA DELLA R AL FUOCO

In tali condizioni, che si verificano ad esempio per elementi in acciaio con profili laminati o saldati, la soluzione del problema è notevolmente semplificata in quanto l'equazione differenziale alle derivate parziali degenera in un'equazione differenziale ordinaria del primo ordine, che di fatto esprime il bilancio dell'energia relativamente all'intero elemento:

$$\rho c V \frac{\partial \theta}{\partial t} = S \cdot (\alpha_c + \alpha_i) \cdot (\theta_{SURF} - \theta_{AMB})$$

$$\theta(t = 0) = \theta_a$$

34