



Prof. Emilio Cafaro GRF-DENER-C  
Dipartimento di Energetica Politecnico di Torino



## Valutazione del Rischio Incendio negli Edifici



### Premessa

La sicurezza è definita come una condizione:

- OGGETTIVA -> Quantificazione
- GARANTITA -> Procedure

contro

- EVENTUALI PERICOLI -> Caratterizzazione statistica

2

## Premessa

- **QUANTIFICAZIONE DELLA SICUREZZA**, locuzione polisemica in quanto sintesi di uno stato d'animo e di un giudizio politico-etico, in termini di **RISCHIO ACCETTATO**

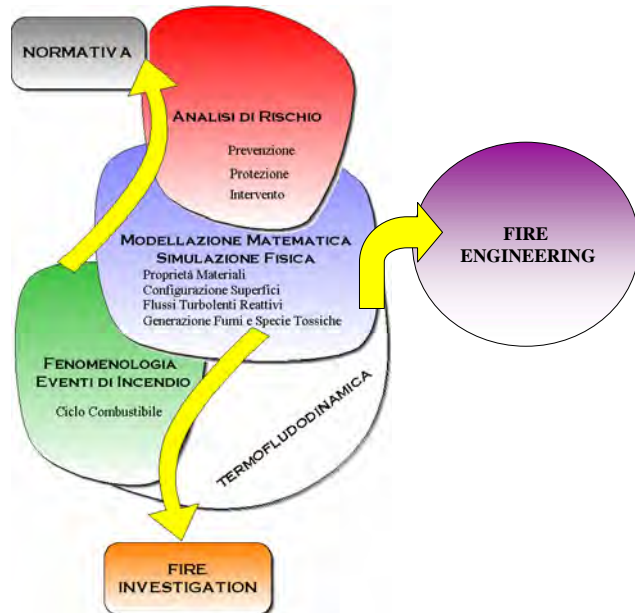
3

## Premessa

- Il **RISCHIO**, in quanto grandezza non misurabile, deve essere **MODELLATO**:
- **MODELLO DI RISCHIO**
- **LIVELLO DI ANALISI DI RISCHIO**

4

## Ruolo e legami della modellazione degli eventi di incendio



## Problema della Sicurezza



## Prolegomeni al problema della sicurezza

**Tipologia eventi pericolosi:** Eventi di incendio, Esplosioni, Eventi di Rilascio

**Tipologia Ambienti:**

Grandi ambienti: scuole, ospedali, grandi magazzini, aeroporti, locali di pubblico spettacolo...

Strutture Sotterranee: metropolitane, gallerie stradali, gallerie ferroviarie, parcheggi

**Strumenti:** Fire Engineering(Aspetti Progettuali), Fire Investigation(Aspetti Legali)

**Problema:** Sicurezza

**Teoria:** Analisi di rischio

Valutazione del rischio: Analisi di vulnerabilità, Quantificazione del rischio, Controllo del rischio: Attuazione e mantenimento, Gestione del rischio

7

## Explicatio paradigma della sicurezza

### Modelli di rischio

1. Fattoriale
2. Bayesiano
3. Bayesiano-Analisi incertezze
4. ....

### Quantificazione del rischio

Modelli di incendio  
Modelli di esodo

### Misure di rischio

Rischio individuale                      Rischio sociale

**Costrutto logico-formale polisemico**

8

## Hiatus transitus

Progettazione deterministica e prescrittiva



Progettazione probabilistica e prestazionale

9

## Componenti dell'Analisi di Rischio

### Fire Engineering & Fire Investigation

Analisi  
Vulnerabilità

Quantificazione  
Rischio

Controllo  
Rischio

Attuazione  
Mantenimento

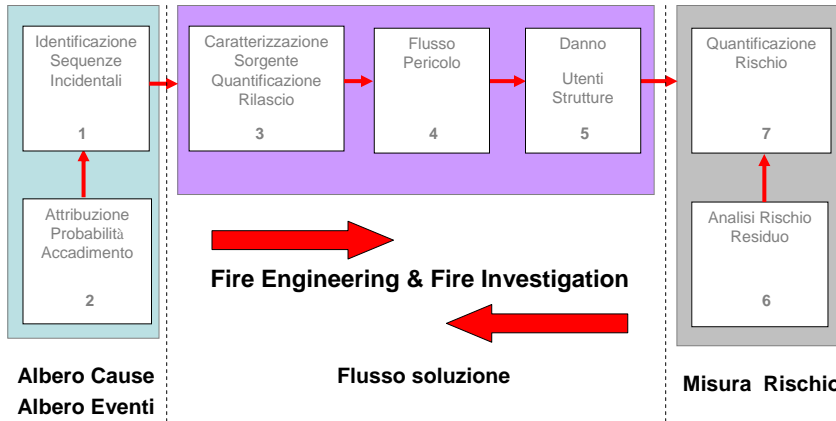
Valutazione del Rischio

**Progettazione della Sicurezza**

Gestione del Rischio

10

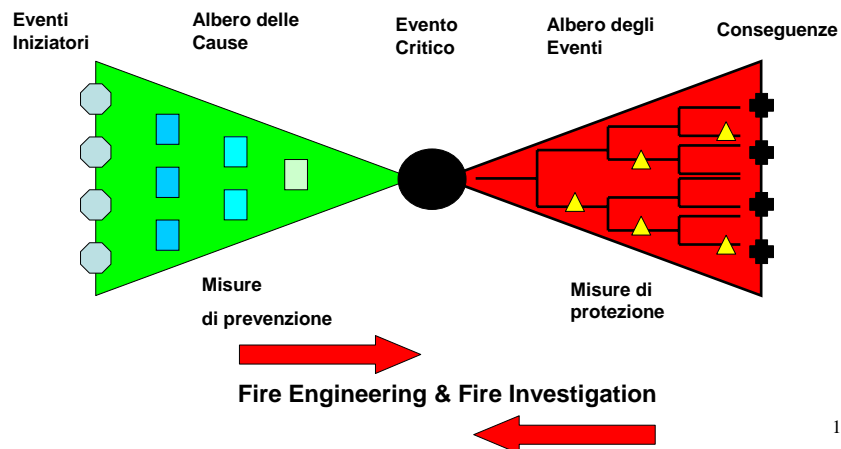
## Capisaldi dell'analisi di rischio



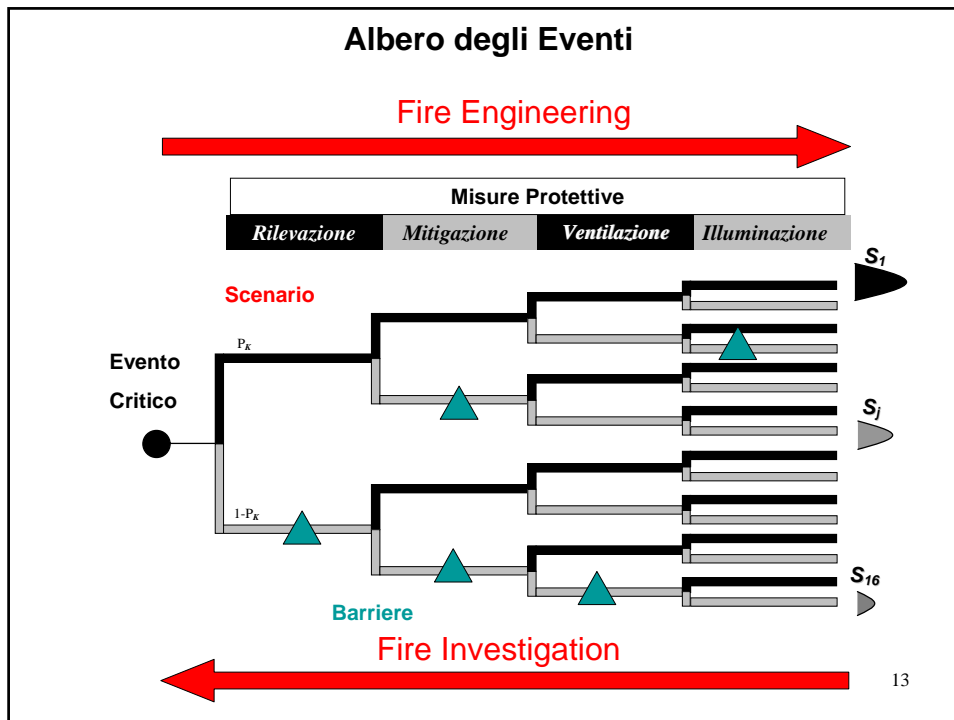
11

## Tecniche di analisi di rischio

*Rappresentazione del rischio:*  
 Diagramma a farfalla  
*Tecniche di rappresentazione:*  
 Albero delle cause (FTA)  
 Albero degli eventi (ETA)



12



### Modellazione degli eventi di incendio

**Teoria:** Termofluidodinamica degli eventi di incendio

**Approccio metodologico:** Teoria Macroscopica Fenomenologica

**Approccio formale:** Teoria dei Campi Interagenti

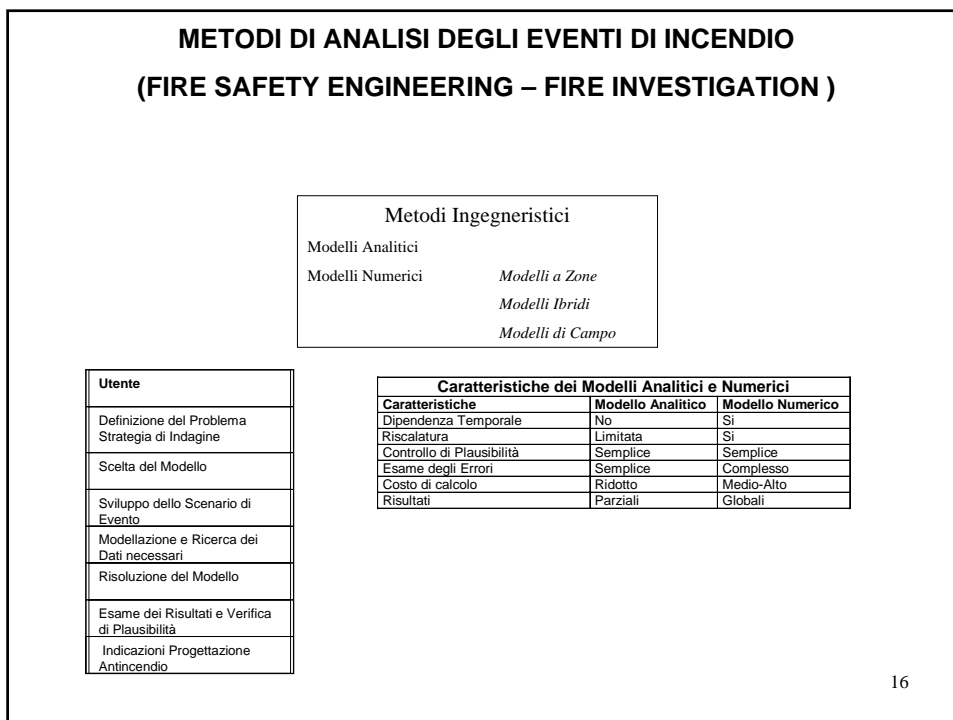
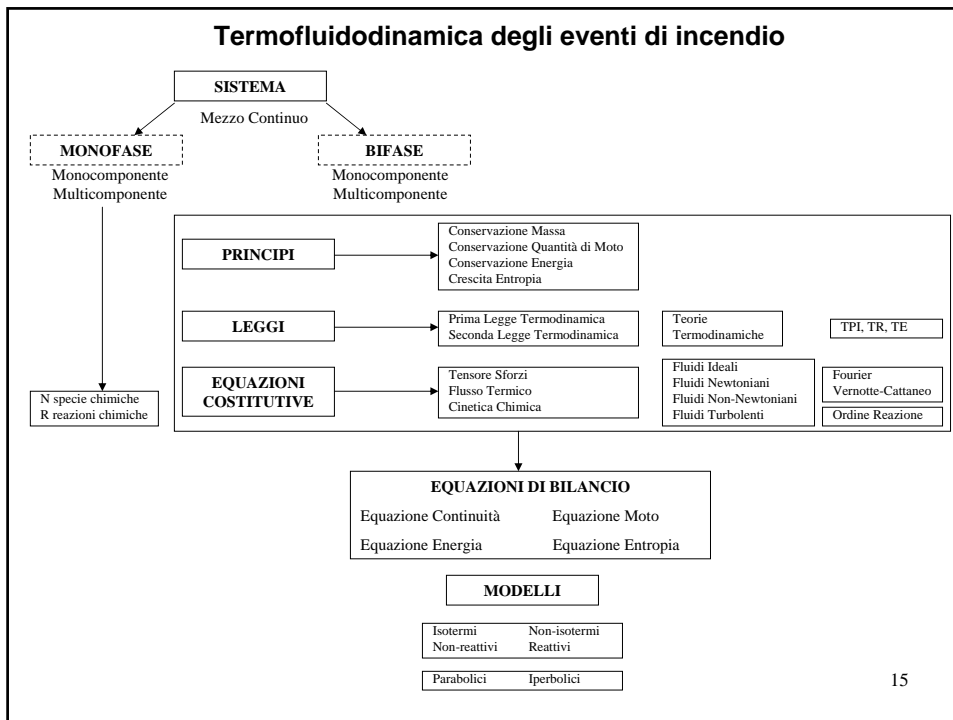
- Proprietà Fisico-Chimiche dei Materiali
- Processo della Combustione
- Flusso Turbolento Reattivo
- Processi di Scambio Termico

**Modelli:**

Formule semplificate (SFPA)  
 Modelli a zone  
 Modelli di campo  
 Modelli Ibridi

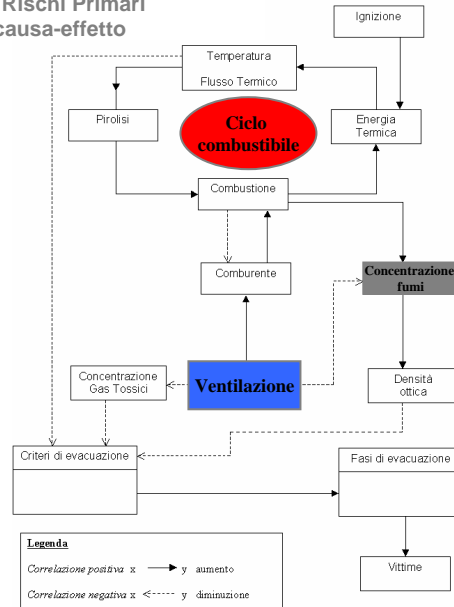
**Domini:**

Liberi: boschi, depositi  
 Confinati: locali abitativi, scuole, ospedali, locali di pubblico spettacolo, grandi magazzini, aeroporti, gallerie, metropolitane



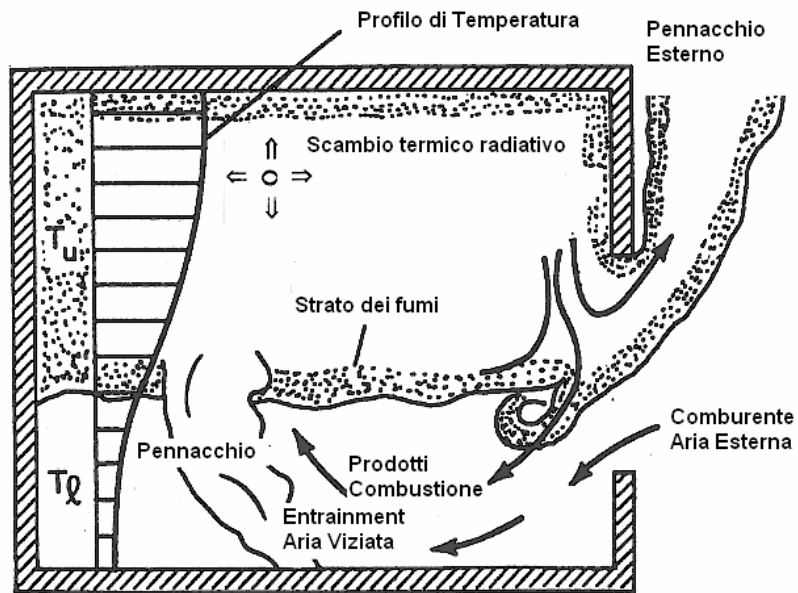
## Fenomenologia degli Eventi di Incendio

Produzione Rischi Primari  
Relazioni causa-effetto

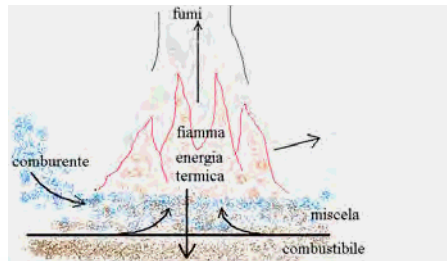


17

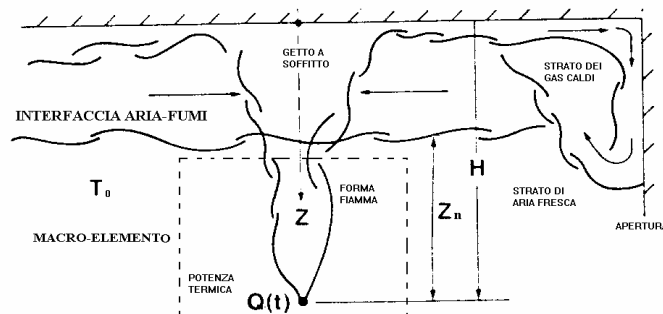
## Flussi caratteristici in ambiente confinato sede di un evento di incendio



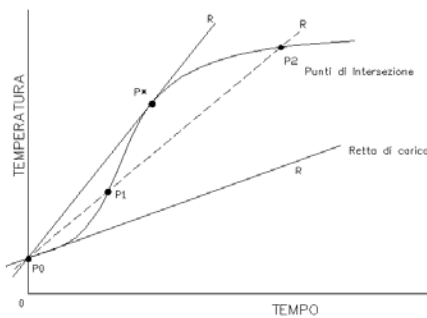
### Macro- elementi modello a zone FOCOLAIO



### PENNACCHIO



19



I punti di intersezione della curva rappresentativa dell'evoluzione della variabile temperatura con la *retta di carico* rappresentativa degli scambi termici fra fluido e pareti della galleria individuano possibili stati di equilibrio dell'evento di incendio.

Possono darsi i seguenti casi:

- un solo punto di intersezione individua uno stato di equilibrio instabile denominato *extinction jump*, ossia, l'inibizione dell'evento;
- tre punti di intersezione individuano due stati di equilibrio stabile ed uno stato di equilibrio instabile denominato *flashover jump*, ossia, una condizione di rapida diffusione dell'evento.

20

## Instabilità Flashover

Risultati sperimentali	$\langle T_g \rangle_c$ [ °C]	$\langle \Phi_{tr} \rangle_c$ [ kW/m <sup>2</sup> ]
Hagglund (1974)	600	-
Parker-Lee (1974)	-	20
Fang (1975)	450 - 650	17 – 33
Lee – Breese (1978)	650	17 – 30
Babrauskas (1979)	600	20
Fang - Breese (1980)	708 ± 92	20
Thomas (1980)	520	22
Mc Caffrey – Quintiere (1981)	600	17,7 – 25
<b>Criteria quantitativi</b>	<b>≥ 600</b>	<b>≥ 20</b>
<b>Criterio qualitativo</b>	<b>Spill fire phenomenon</b>	

21

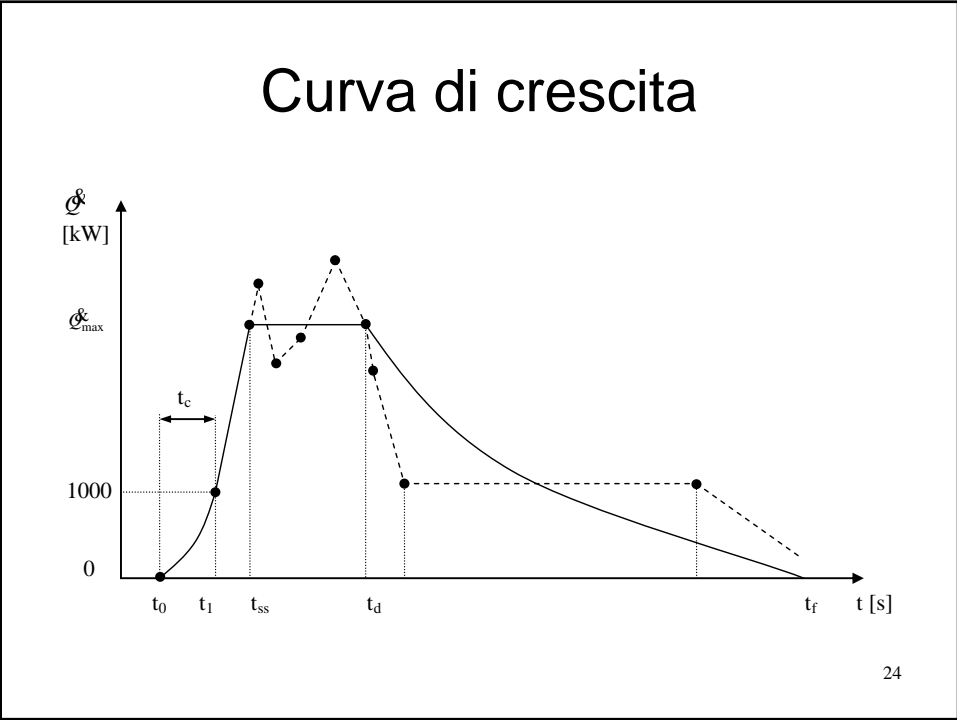
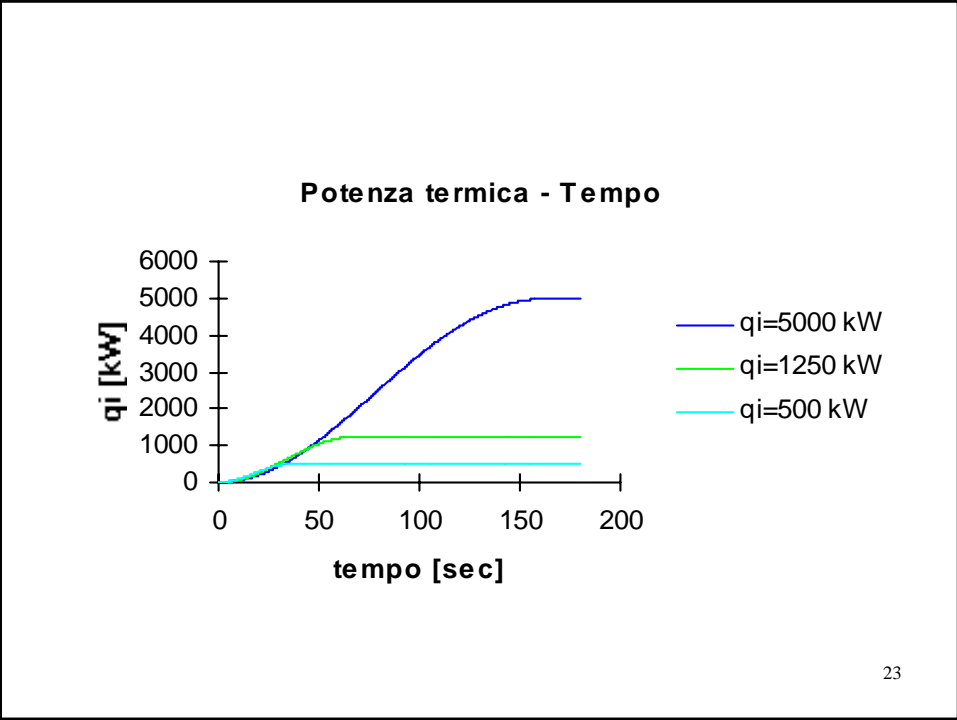
## Modello di crescita dell'evento di incendio

### *Potenza Termica Generata dalla Fiamma*

$$q_i(t) = \begin{cases} \alpha \cdot t^2 \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{t^*}\right)^2\right] & t < t^* \\ q_\infty & t \geq t^* \end{cases}$$

$$t^* = \sqrt{\frac{q_\infty \cdot e}{\alpha}}$$

22



## Tempi caratteristici

- $t_0$  = tempo di ignizione
- $t_{ss}$  = tempo di inizio della fase stazionaria
- $t_d$  = tempo di decadimento
- $t_f$  = tempo di estinzione
- $t_1$  = tempo corrispondente ad una potenza termica pari a 1000 kW
- $t_c$  = tempo di crescita ( $t_1 - t_0$ )

25

## Modello di crescita $t^2$

$$\dot{Q} = \alpha_f (t - t_0)^2$$

Incendio	$\alpha_f$ [kW/s <sup>2</sup> ]	$t_0$ [s]
Molto lento	<0.000412	>1600
Lento	0.000412 – 0.006594 (0.00293)	400-1600 (600)
Medio	0.006594 – 0.026375 (0.01172)	200-400 (300)
Veloce	0.026375 – 0.1055 (0.04690)	100-200 (150)
Ultra-veloce	>0.1055 (0.18760)	<100 (75)

26

## Modello di crescita $t^2$

$$\dot{Q} = \alpha t^2$$

**Coefficiente di crescita**

$$\alpha = \frac{\dot{Q}^2 (A_1 t_1^2 + A_2 t_2^2)}{(t_1^4 + t_2^4)}$$

**Tempo di raddoppio**

$$t_r = \frac{\Delta t_{1-2} \ln(2)}{\ln(A_2/A_1)}$$

	$\alpha$	$t_r$ [s]
Edificio		
Magazzini	0.057 - 0.145	120 - 180
Fabbriche	0.028 - 0.110	60
Uffici	0.023	300
Edifici pubblici	0.023 - 0.034	80 - 120
Negozi	0.027 - 0.31	90 - 120
Scuole	0.066	30

dove  $\dot{Q}$  è la potenza termica specifica (kW/m<sup>2</sup>) A<sub>1</sub> è l'area dell'incendio all'atto della rivelazione (m<sup>2</sup>), A<sub>2</sub> è l'area dell'incendio all'arrivo dei Vigili del Fuoco (m<sup>2</sup>), t<sub>1</sub> è l'intervallo di tempo intercorso tra l'ignizione e la rivelazione (s), t<sub>2</sub> è l'intervallo di tempo intercorso tra la rivelazione e l'arrivo dei Vigili del Fuoco.

27

## Tempo di riempimento di un locale

Bilancio della massa  
Conservazione dell'energia

Soluzioni

$$A \frac{dh}{dt} = -0,21 \left( \frac{\dot{Q}_g}{\rho_a c_p T_\infty} \right)^{1/3} h^{5/3} - \frac{\dot{Q}(1-x_r)}{\rho_\infty c_p T_\infty}$$

$$1 - \frac{h}{H} = \frac{[Q(1-x_r)/\rho_\infty c_p T_\infty] AH}{1 - \exp\left[(-Q(1-x_r)/\rho_\infty c_p T_\infty) AH / (1 - (1/1+x)^{3/2})\right]}$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_f c_p (T_f - T_\infty) V_f) = \dot{Q}(1-x_r)$$

$$\frac{T_f}{T_\infty} = \exp\left[ \frac{(Q(1-x_r)/\rho_\infty c_p T_\infty) AH}{1 - (1/1+x)^{3/2}} \right]$$

$$Q = \int_0^t \dot{Q}(t) dt$$

$$x = 0,14 \left( \frac{g}{\rho_\infty c_p T_\infty} \right)^{1/3} \int_0^t [\dot{Q}(t)]^{1/3} dt \frac{H^{2/3}}{A}$$

28

## Temperatura dello strato dei fumi

Fase di crescita

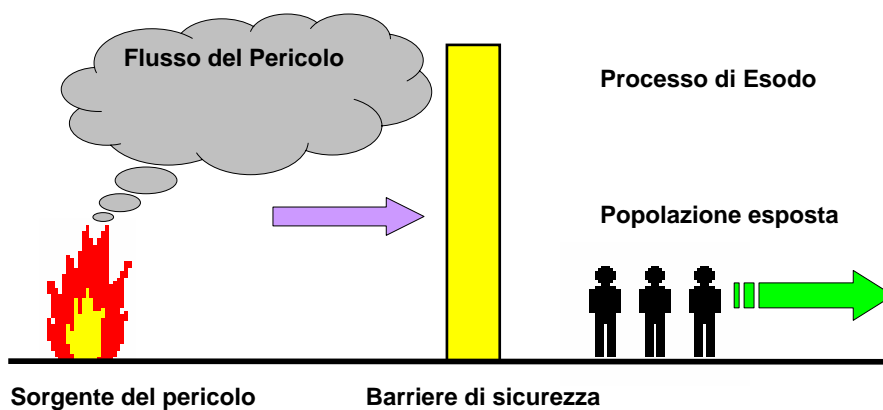
$$\frac{T_f}{T_\infty} = 1 + 0,0236 \frac{\dot{Q}^{2/3}}{(hA_w A_0 H_0^{1/2})^{1/3}}$$

Fase post - Flashover

$$T_f = T_\infty + (1450 - T_\infty) \vartheta_1 \vartheta_2 \vartheta_3 \vartheta_4$$

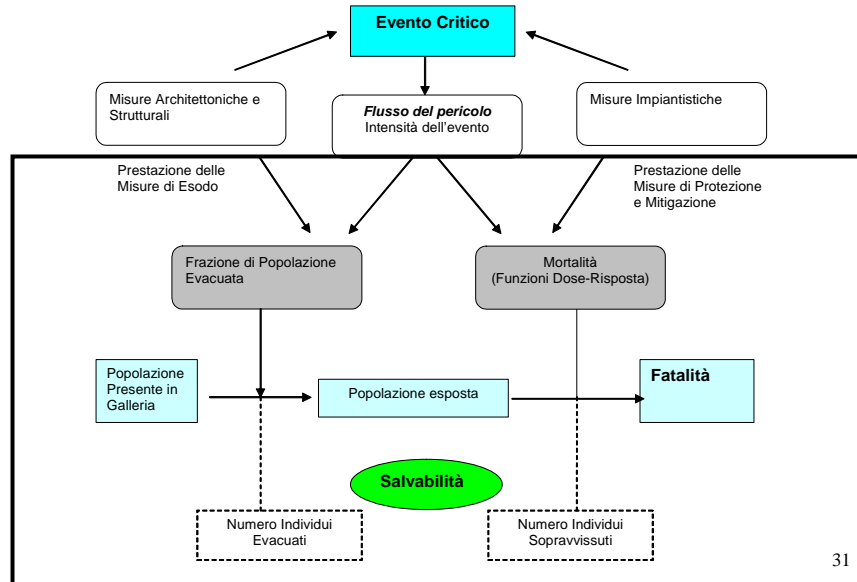
29

## Flusso soluzione

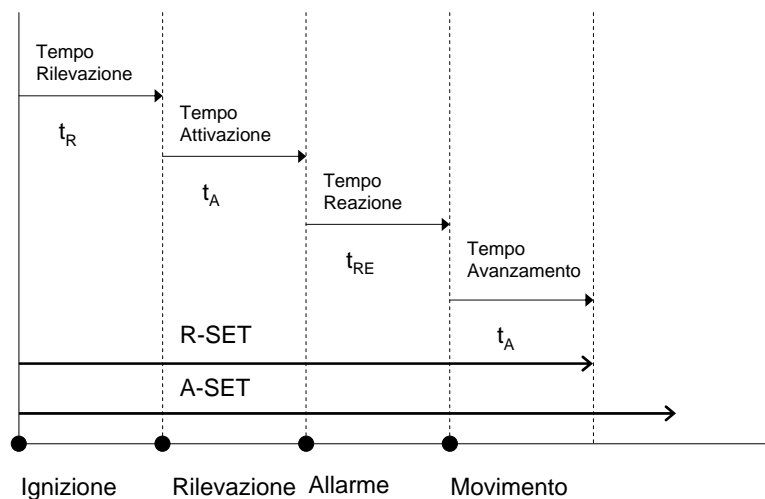


30

## Modellazione del processo di esodo-Scenario di esodo



## Analisi A-SET vs R-SET



## Numero Atteso di Fatalità Scenario di Esodo (Life Safety Assessment)

Ingegneria della Sicurezza Antincendio - Approccio Prestazionale

**Tempo di Esodo in Sicurezza Disponibile**      **Tempo di Esodo in Sicurezza Richiesto**

**ASET**

Dinamica Evento di Incendio  
Vincoli Sistemi di Sicurezza

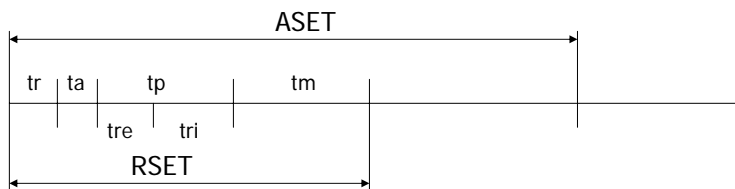
**RSET**

Dinamica Popolazione Esposta  
Percorsi di Esodo

### Componenti Stocastiche

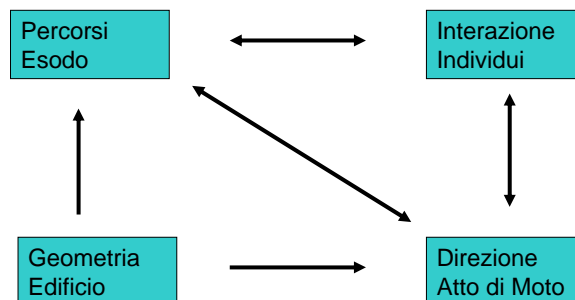
Tasso di Crescita del Focolaio	Tempo di Rilevazione
Tempo di Rilevazione ed Attivazione	Tempo di Allarme
Tempo di Attivazione Sistema di Ventilazione	Tempo di Pre-movimento
Efficienza del Sistema di Ventilazione	Tempo di Movimento

### Funzioni di Distribuzione



33

## Atto di moto della popolazione esposta



34

## FED – Limiti di sopravvivenza

Tenability	Limite – Rule of thumb
CO	6000 ppm
CO <sub>2</sub>	7%
O <sub>2</sub> deficit	13%
HCN	150 ppm
OD	0,1 m-1
T	80 °C
HF	2,5 kW/m <sup>2</sup>
CLH (Clear Layer Height)	1 m

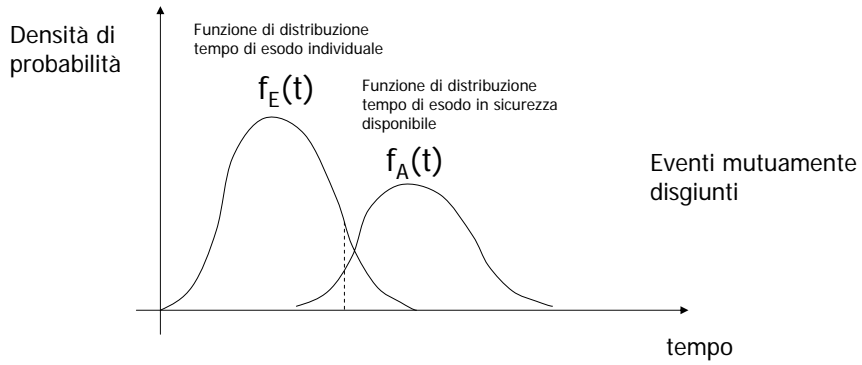
35

## Modelli Processo di Esodo

Prospettiva	Comportamento popolazione esposta
<i>Globale</i>	Capacità dei percorsi d'esodo (Reazioni occupanti non modellate) Analogia funzionale (informazioni statistiche, prescrizioni informate)
<i>Individuale</i>	Reazioni occupanti modellate Intelligenza artificiale Potenziali di interazione Teoria dei giochi

36

# Conseguenze



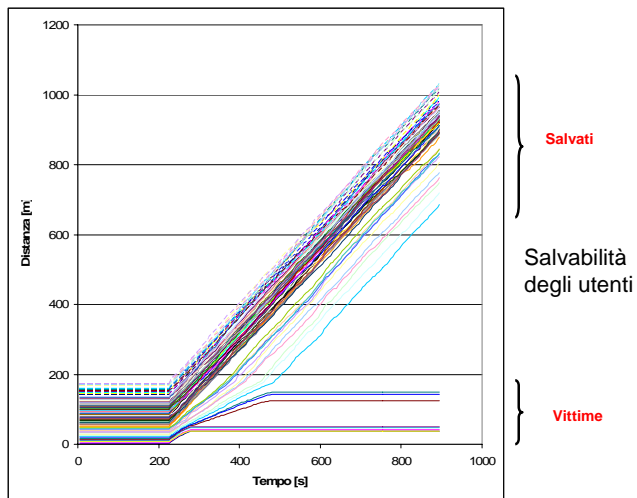
Popolazione esposta =  $N \int_0^{\infty} f_E(t) dt$

Numero di fatalità =  $\int_0^{\infty} \left[ \left( N \int_0^{\infty} f_E(t) dt \right) \cdot f_A(t) \right] dt$

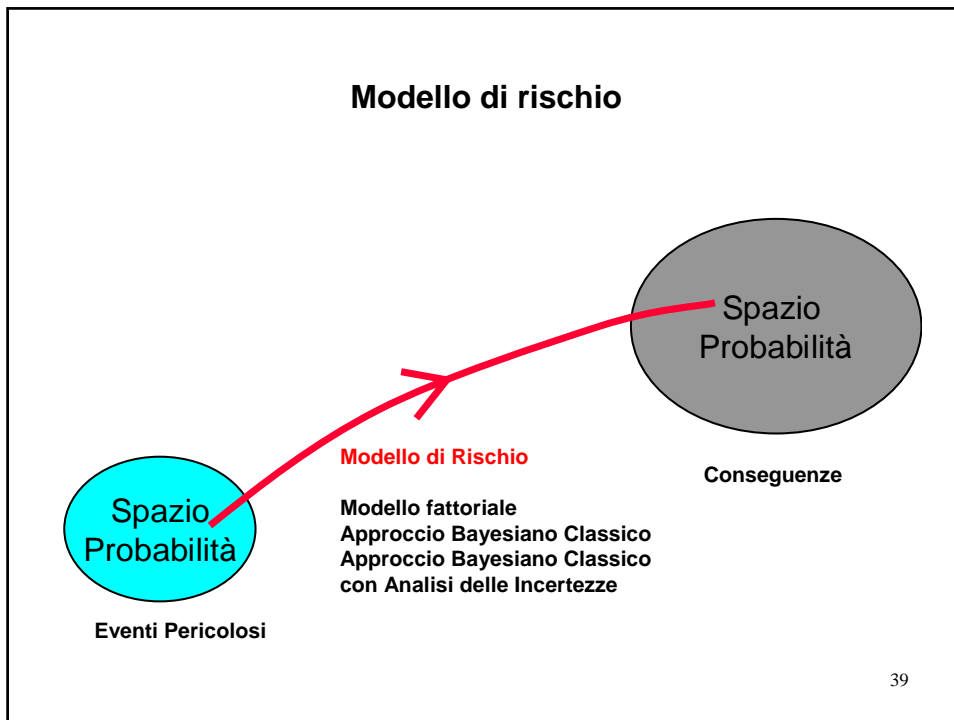
Probabilità di Accadimento ASET =  $f_A(t) dt$

37

# Simulazione probabilistica del processo di esodo



38



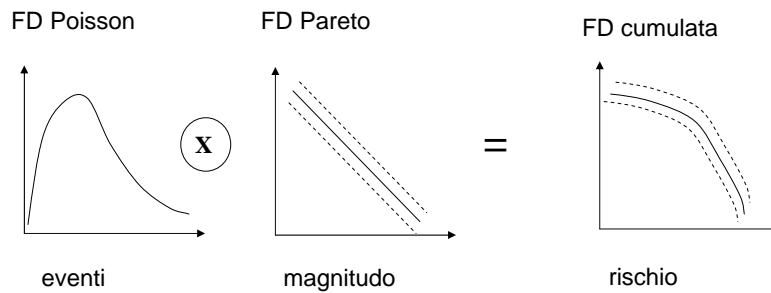
### Modelli di Rischio

Formula fattoriale del rischio: = Pericolosità x Vulnerabilità  
 (evento) (struttura)  
 Probabilità x Probabilità  
 Accadimento Danno  
 P(e) x P(d)  
 (numero) (numero)  
 Funzione Funzione  
 Distribuzione Distribuzione  
 (evento) (magnitudo)  
 FD(e) x FD(m)

40

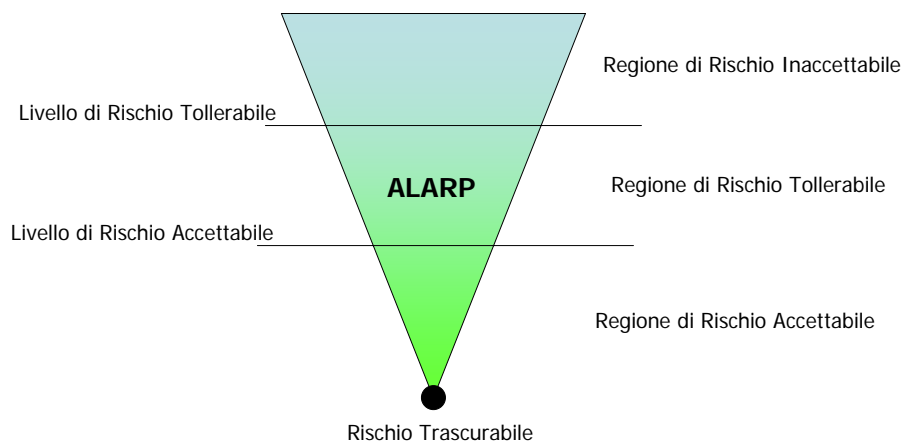
## Modello di Rischio Bayesiano Classico

### Convoluzione Funzioni di Distribuzione



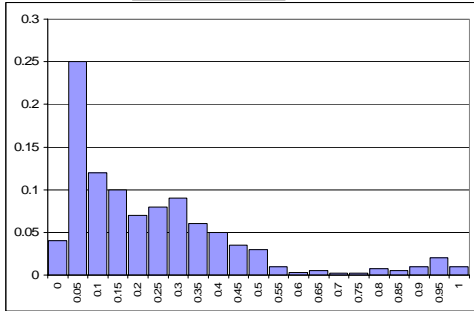
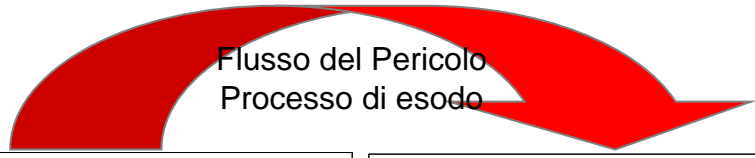
41

## Dottrina Accettazione del Rischio

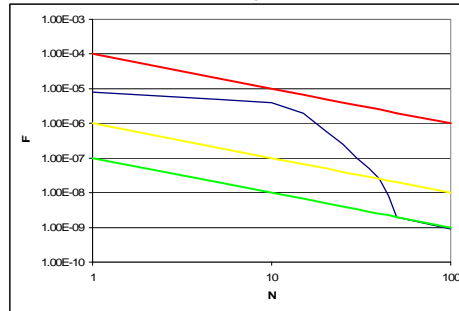


42

## Modello di rischio Bayesiano-Analisi delle incertezze



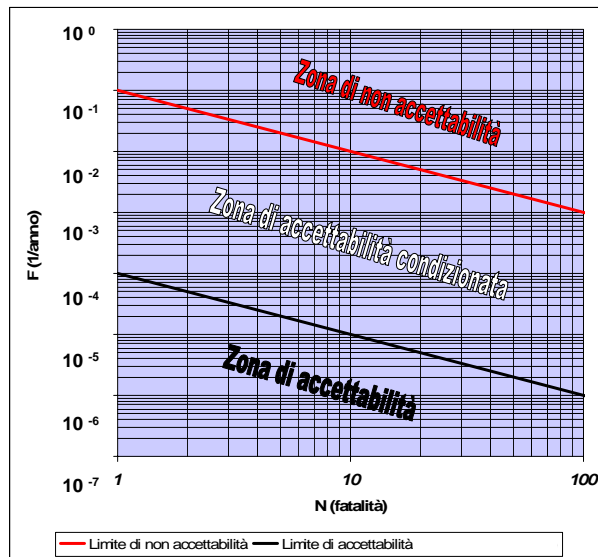
Funzione di distribuzione  
evento pericoloso



Misura di Rischio Collettivo

43

## Dottrina dell'accettabilità del rischio



44