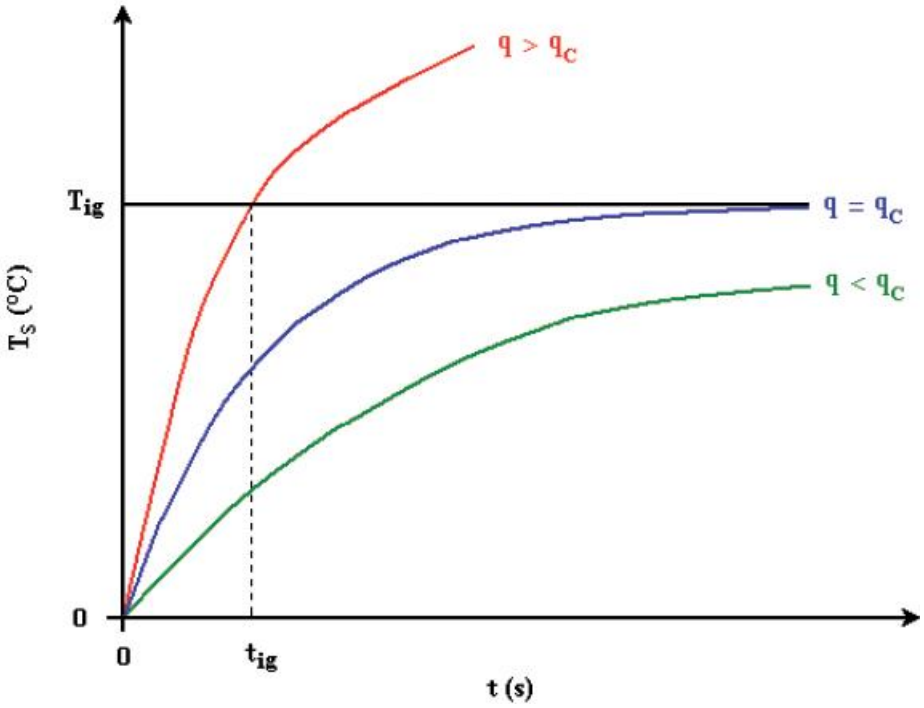
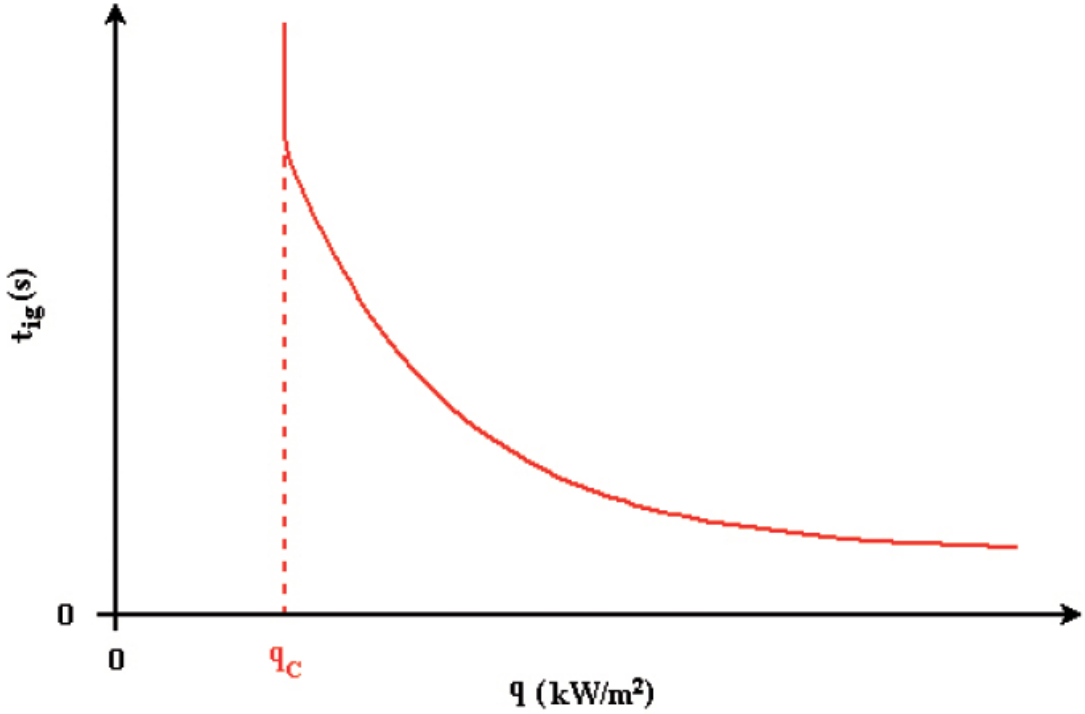
FIRE SAFETY ENGINEERING

Il metodo dell’ingegneria della sicurezza antincendio

FASE DI IGNIZIONE DELL'INCENDIO

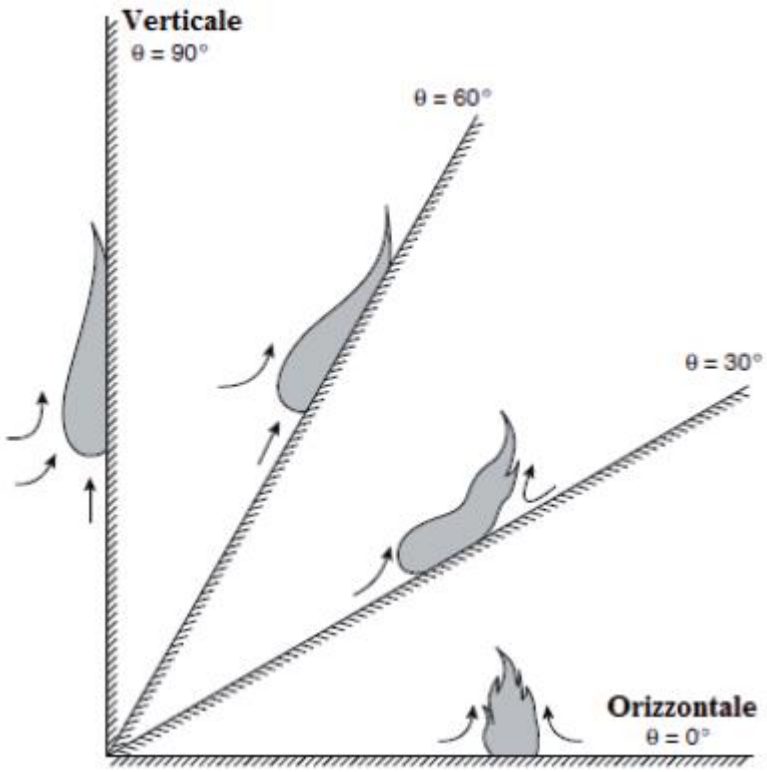
$$t_{ig} = \frac{(T_{ig} - T_s)^2 \cdot (\lambda \cdot \rho \cdot c_p) \cdot \pi/4}{(q - q_c)^2}$$





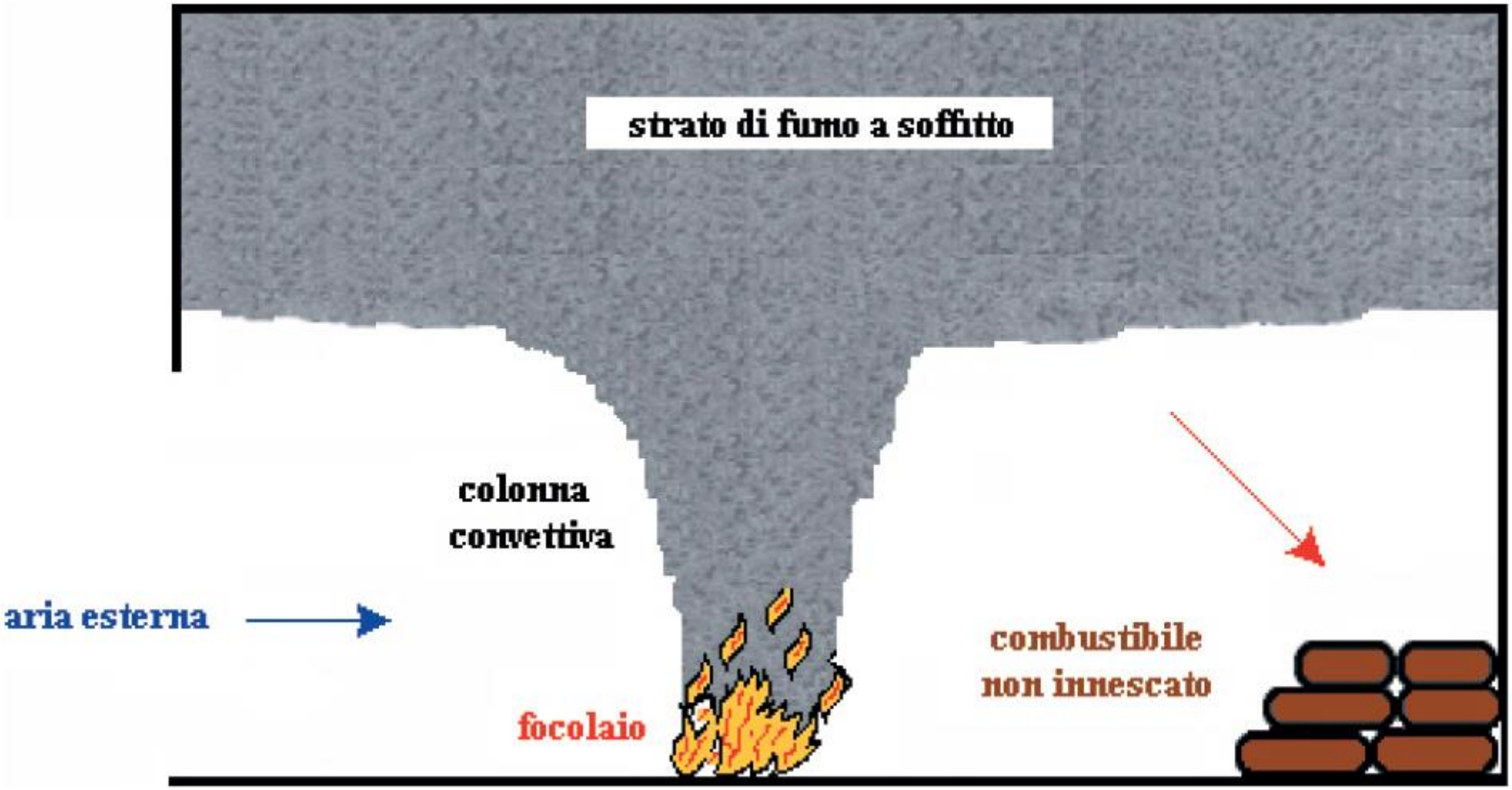
FASE DI IGNIZIONE E CRESCITA DELL'INCENDIO

FASE DI IGNIZIONE E CRESCITA DELL'INCENDIO



FASE DI IGNIZIONE E CRESCITA DELL'INCENDIO

FASE DI CRESCITA DELL'INCENDIO



FASE DI CRESCITA DELL'INCENDIO

$$\mathbf{RHR}\,(\mathbf{t}) = \mathbf{1000} \cdot (\mathbf{t}/\mathbf{t}_{\alpha})^2 \qquad \textit{per } t < t_A$$

Crescita parabolica (quadratica) $\mathbf{RHR}\,(\mathbf{t}) = \alpha \cdot t^2$ *con* $\alpha = \mathbf{1000}/(\mathbf{t}_{\alpha})^2$

t_α = *600 s (Lento)*	□	RHR (t) = 0,00278 · t^2
t_α = *300 s (Medio)*	□	RHR (t) = 0,01111 · t^2
t_α = *150 s (Rapido)*	□	RHR (t) = 0,04444 · t^2
t_α = *75 s (Ultra-rapido)*	□	RHR (t) = 0,17778 · t^2

RHR è espressa in kW

POTENZA TERMICA MINIMA CHE PROVOCA *IGNIZIONE DI ALTRI MATERIALI COMBUSTIBILI (NFPA 555)*

Materiali facilmente accendibili (tende, tappeti, giornali)

$$RHR\ min = 30 \cdot 10^{(D+0,08)/0,89}$$

Materiali normalmente resistenti all'ignizione (poltrone e mobili imbottiti)

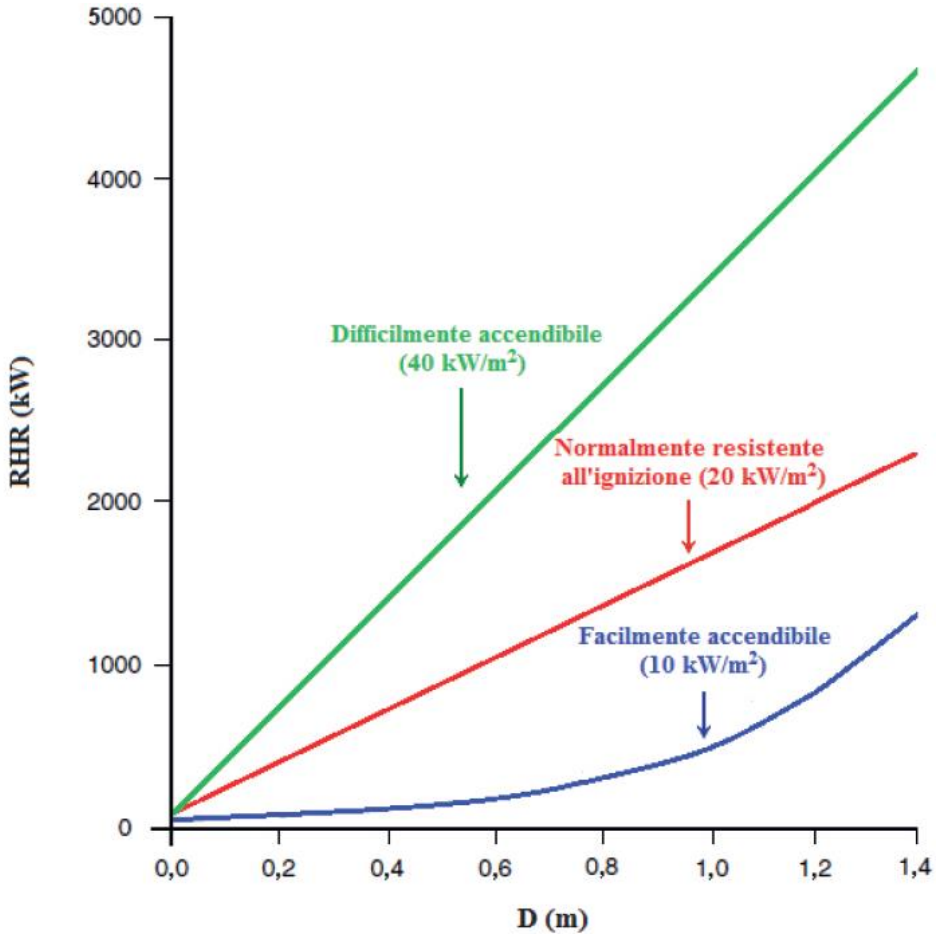
$$RHR\ min = 30 \,.\, (D + 0,05) / 0,019$$

Materiali difficilmente accendibili (legno e plastiche termoindurenti)

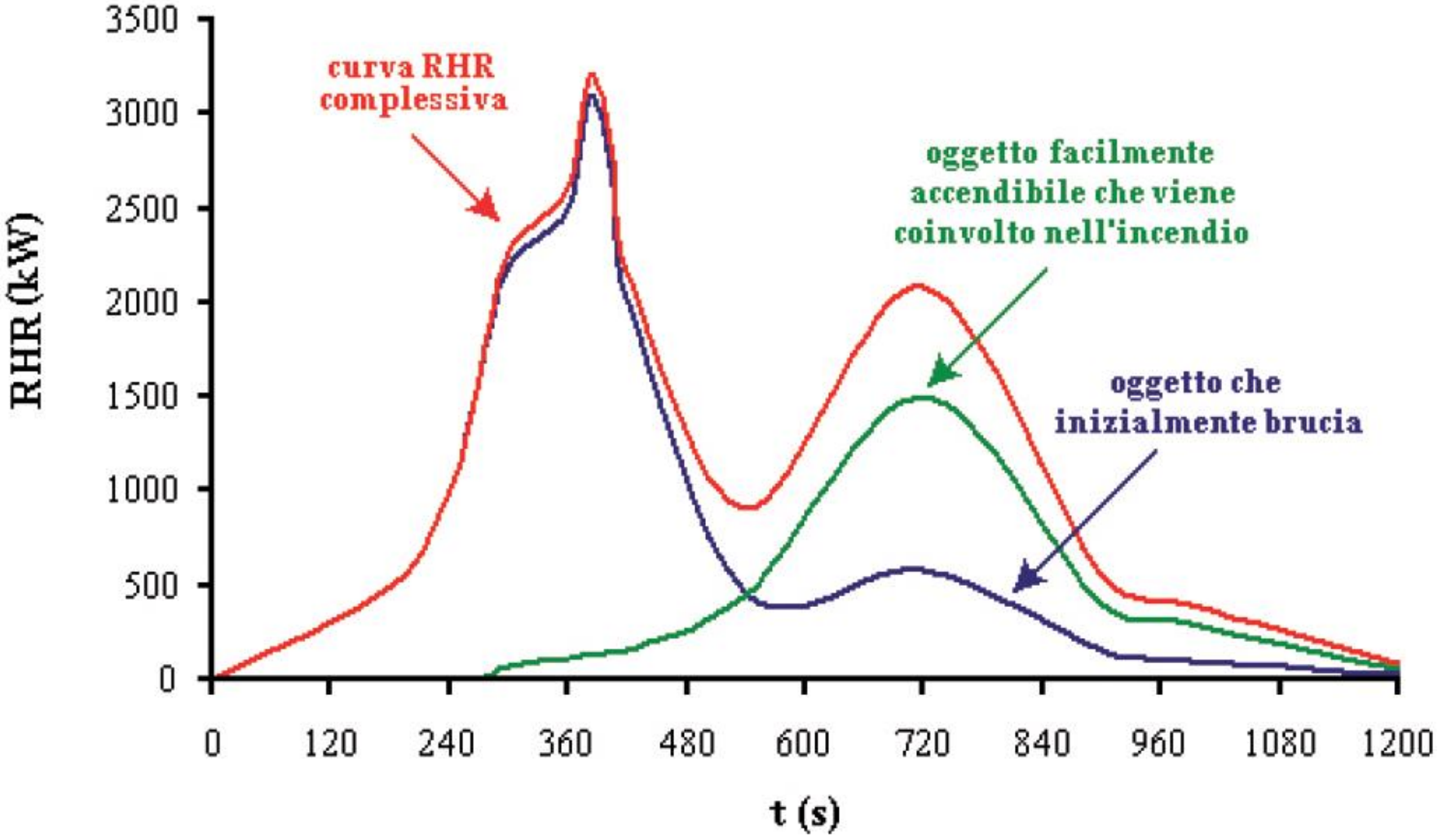
$$RHR\ min = 30 \,.\, (D + 0,02) / 0,0092$$

- *RHR min (kW): potenza termica minima che provoca per irraggiamento l'ignizione*
- *D (m): distanza tra il materiale che brucia e quello che può essere innescato*

POTENZA TERMICA MINIMA CHE PROVOCA *IGNIZIONE DI ALTRI MATERIALI COMBUSTIBILI (NFPA 555)*



FASE DI CRESCITA DELL'INCENDIO



Heat Release Rate – HRR

L'incendio si può schematizzare come una sorgente di tipo volumetrico, ossia **bruciatore che rilascia calore** *(HRR)* e quantità di **particolato** *(soot)* e di **gas**.

I **valori assunti dal progettista** per la costruzione della curva HRR per un dato scenario devono essere opportunamente giustificati.

L' HRR rappresenta la peculiarità dell'incendio ed è il parametro di input principale per i software di simulazione incendi.

POTENZA TERMICA RILASCIATA DALL'INCENDIO

- *Istante per istante un incendio produce energia termica sotto forma di calore variabile in funzione del potere calorifico e della velocità di combustione.*
- *Ad ogni istante dell'incendio corrisponde un valore di potenza termica rilasciata che, espressa in kW è pari a:*

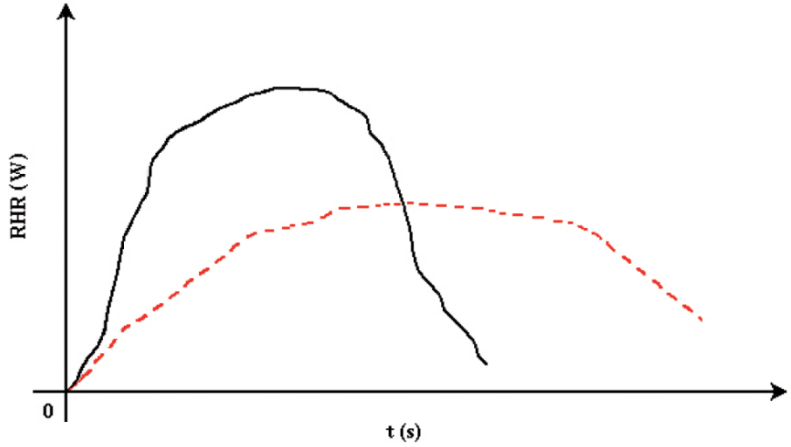
$$HRR\ (t) = H \cdot m_c\ (t)$$

dove:

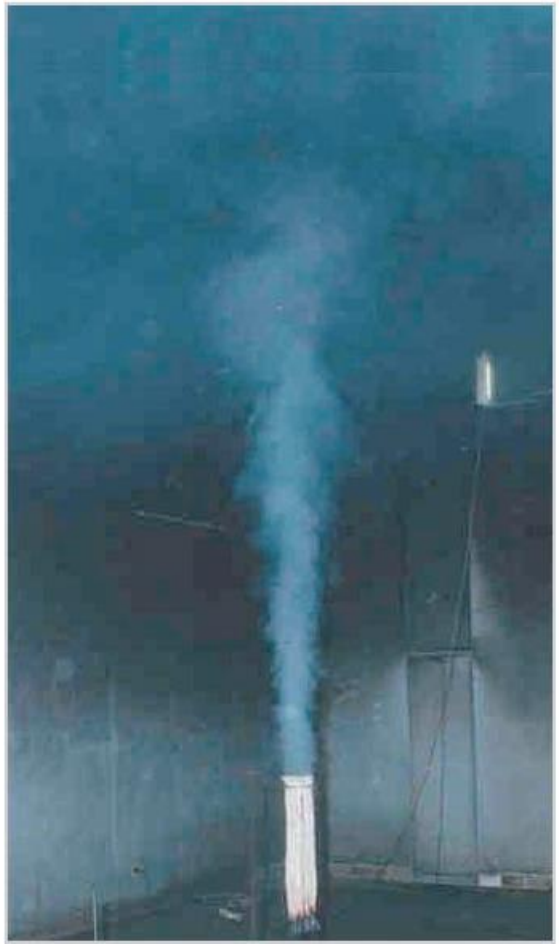
HRR = Heat Release Rate (kW)

H = Potere calorifico (kJ/kg)

m_c (t) = velocità di combustione (kg/s)



VALORI DI RHR



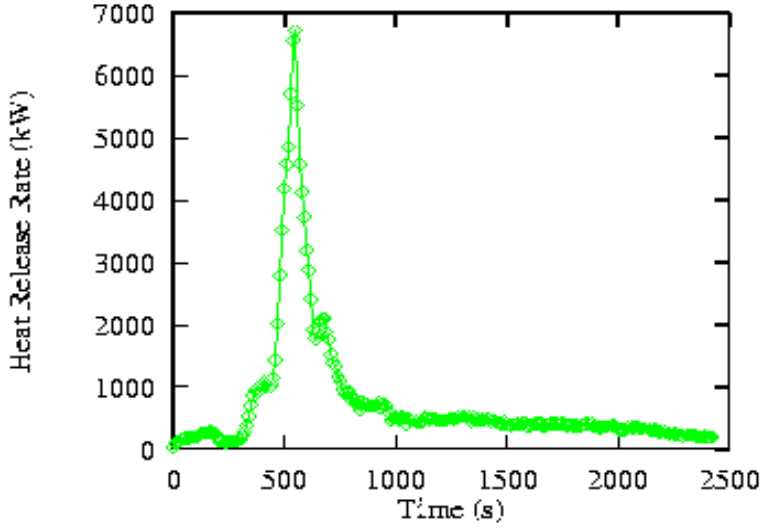
VALORI DI POTENZA TERMICA RILASCIATA NELLA COMBUSTIONE DI SINGOLI OGGETTI

POSTAZIONE DI LAVORO VDT

INIZIO

PICCO MAX

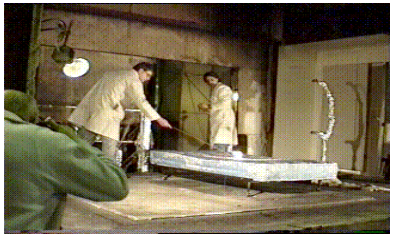
FINE



Valore max HRR: **6750kW**
Energia totale rilasciata: **1745MJ**

VALORI DI POTENZA TERMICA RILASCIATA NELLA COMBUSTIONE DI SINGOLI OGGETTI

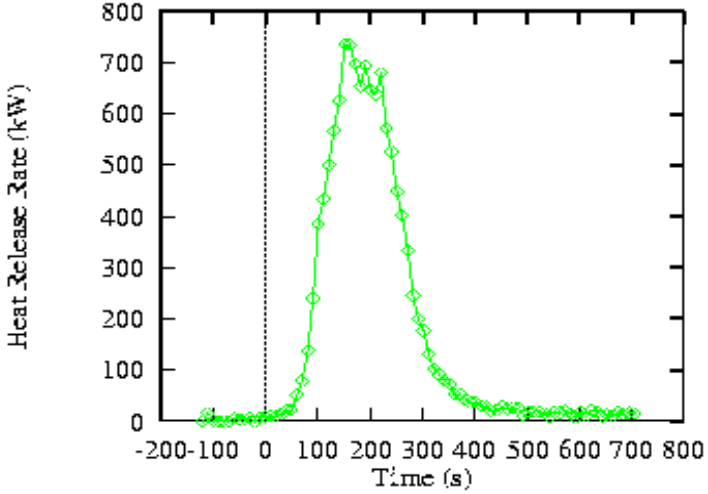
MATERASSO IGNIZIONE CENTRALE



INIZIO

PICCO MAX

FINE

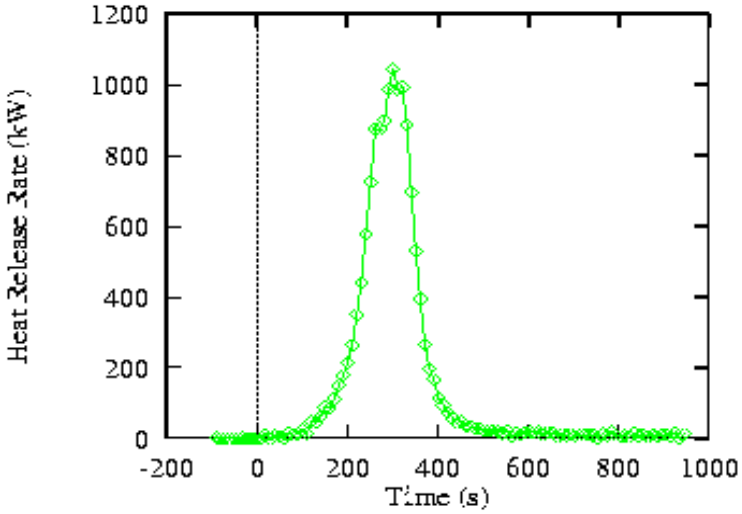


MATERASSO IGNIZIONE D'ANGOLO

INIZIO

PICCO MAX

FINE



Valore max HRR: **1050kW**
Energia totale rilasciata: **150MJ**

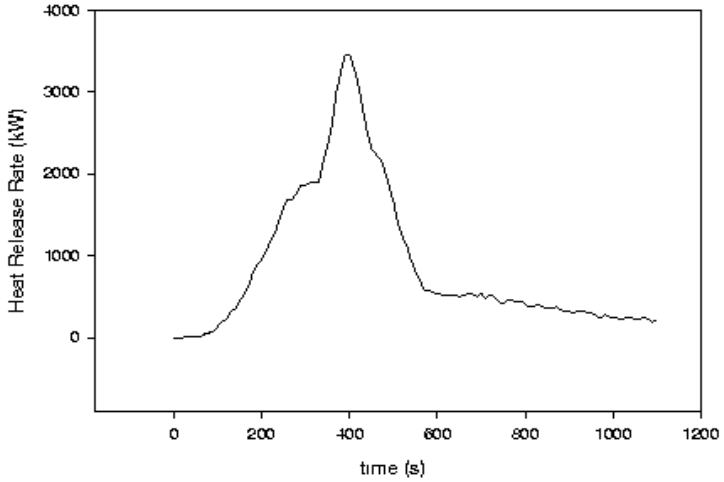
VALORI DI POTENZA TERMICA RILASCIATA NELLA COMBUSTIONE DI SINGOLI OGGETTI

DIVANO

INIZIO

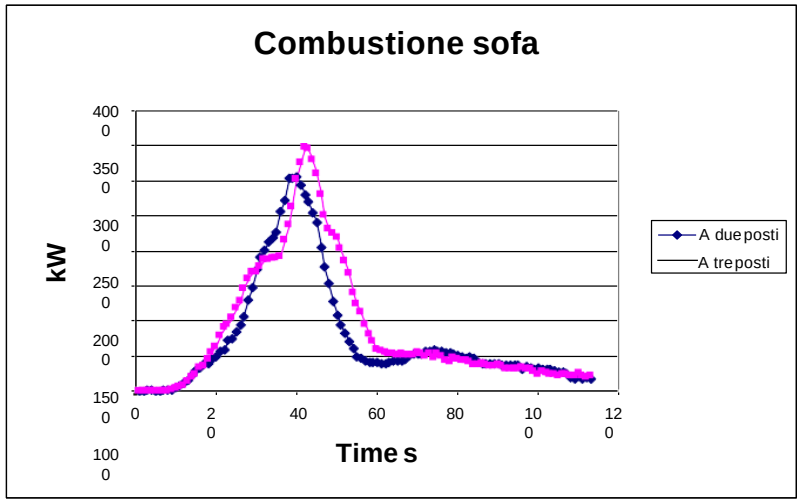
PICCO MAX

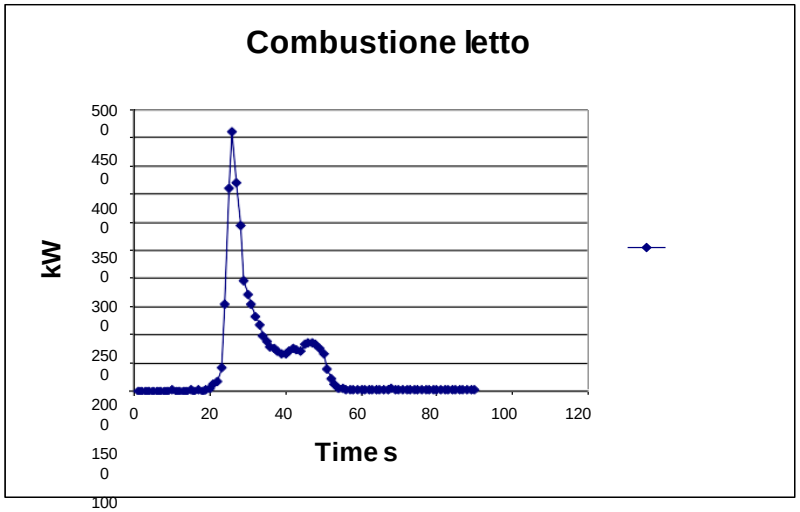
FINE

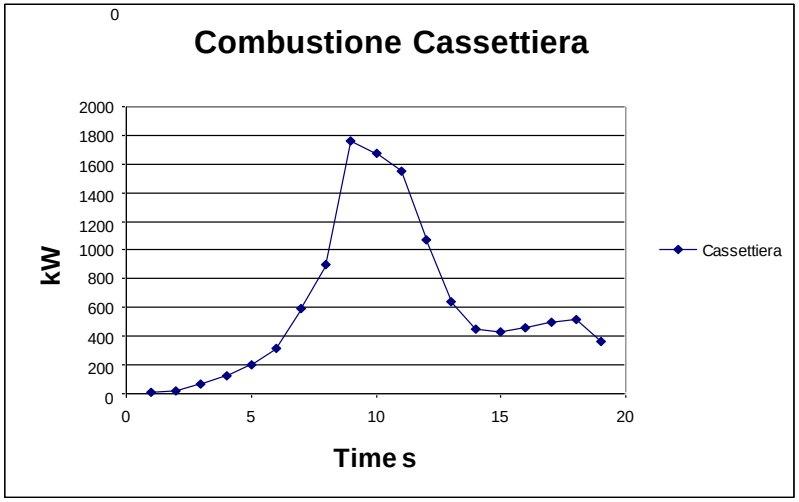


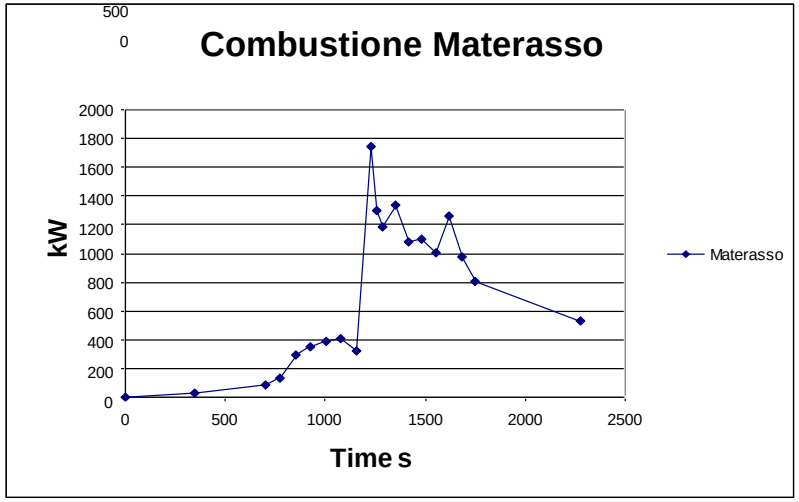
Valore max HRR: **3500kW**
Energia totale rilasciata: **850MJ**

VALORI DI POTENZA TERMICA RILASCIATA NELLA COMBUSTIONE DI SINGOLI OGGETTI

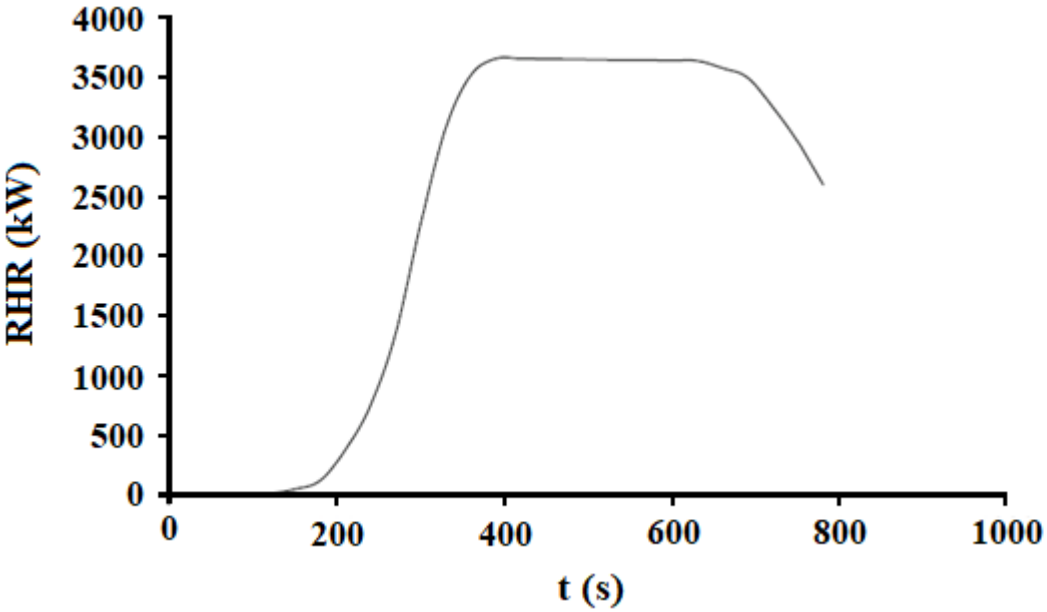


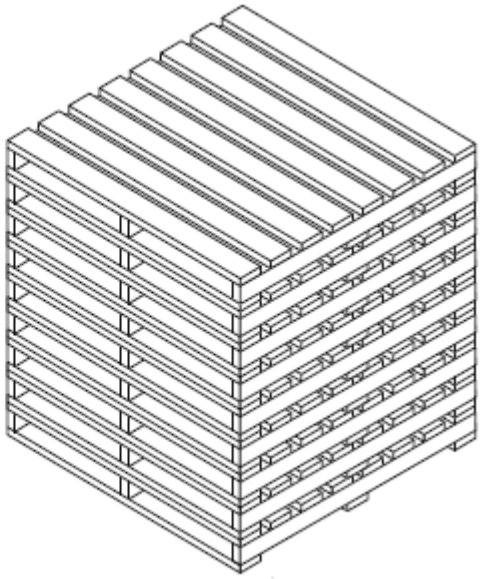




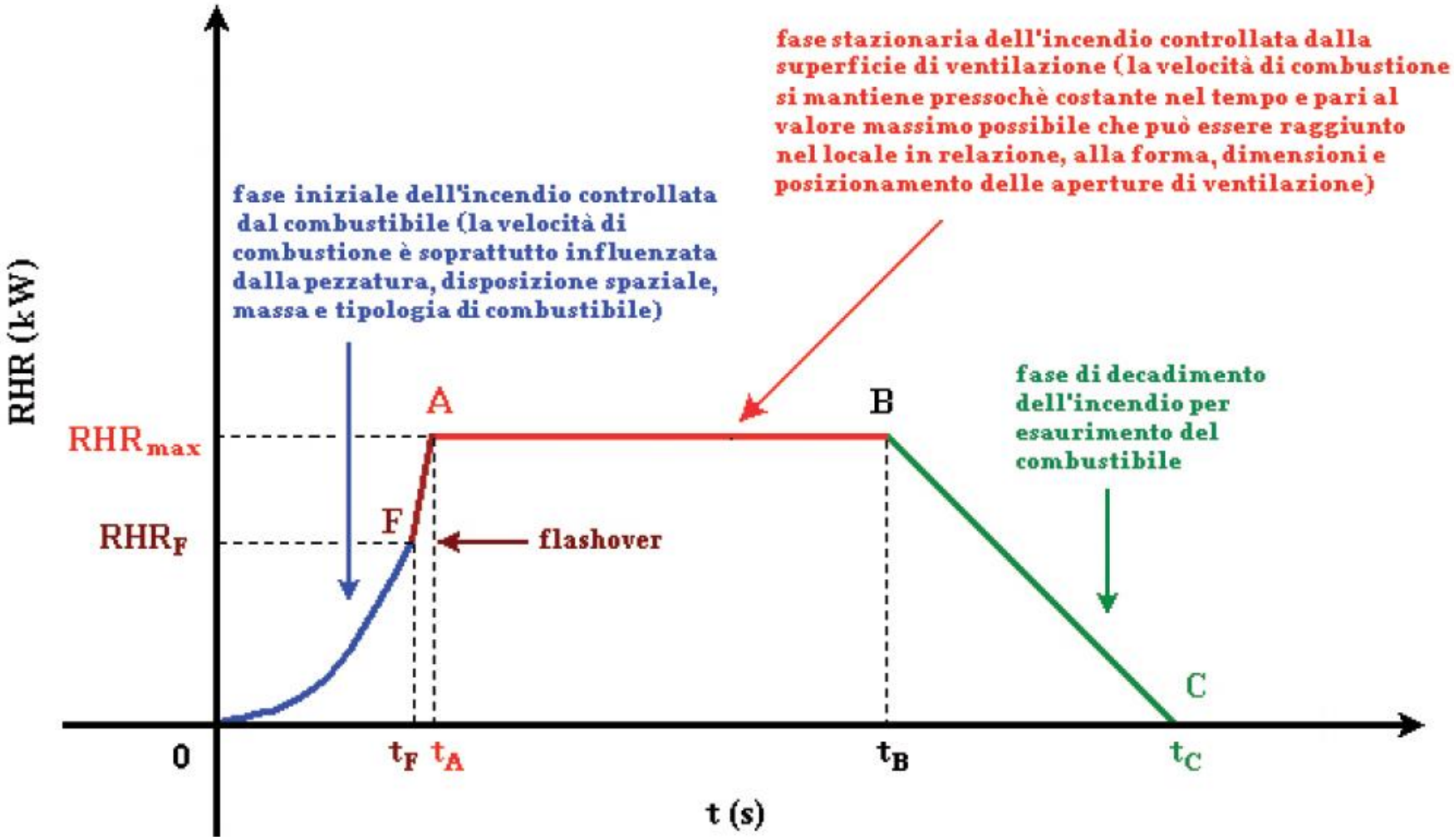


VALORI DI POTENZA TERMICA RILASCIATA NELLA COMBUSTIONE DI SINGOLI OGGETTI





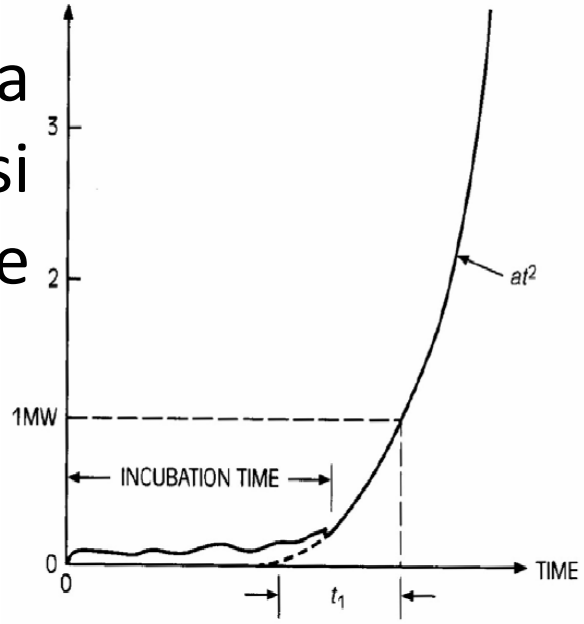
Heat Release Rate – HRR



HRR e carico d'incendio

Nelle valutazioni della temperatura raggiunta in un compartimento nella **fase di pre-flashover**, **HRR** come dato di input **è più attendibile del carico d'incendio** *(in tale fase* ***solo una parte del combustibile partecipa alla combustione****)*.

Con il carico di incendio, la stima della temperatura risulta molto conservativa perché si suppone che tutto il combustibile pre- sente partecipi alla combustione.



Ciò è **ammissibile** solo nel **post-flashover**.

HRR in prima fase è approssimata a funzione **quadratica: HRR = $\alpha \cdot t^2$**

Incendio - caratterizzazione quantitativa del focolare

Ai fini della caratterizzazione quantitativa del focolare il professionista antincendio può:

- Impiegare **dati sperimentali** *(prove di laboratorio)*.
- Usare **dati di letteratura** *(autorevoli, condivisi e attentamente valutati)*.
- Impiegare delle **metodologie di stima**.
- In alternativa, può impiegare i **focolari predefiniti** *(forniti dal Codice)* nell'ambito delle limitazioni ivi specificate.

Durata degli scenari d'incendio di progetto

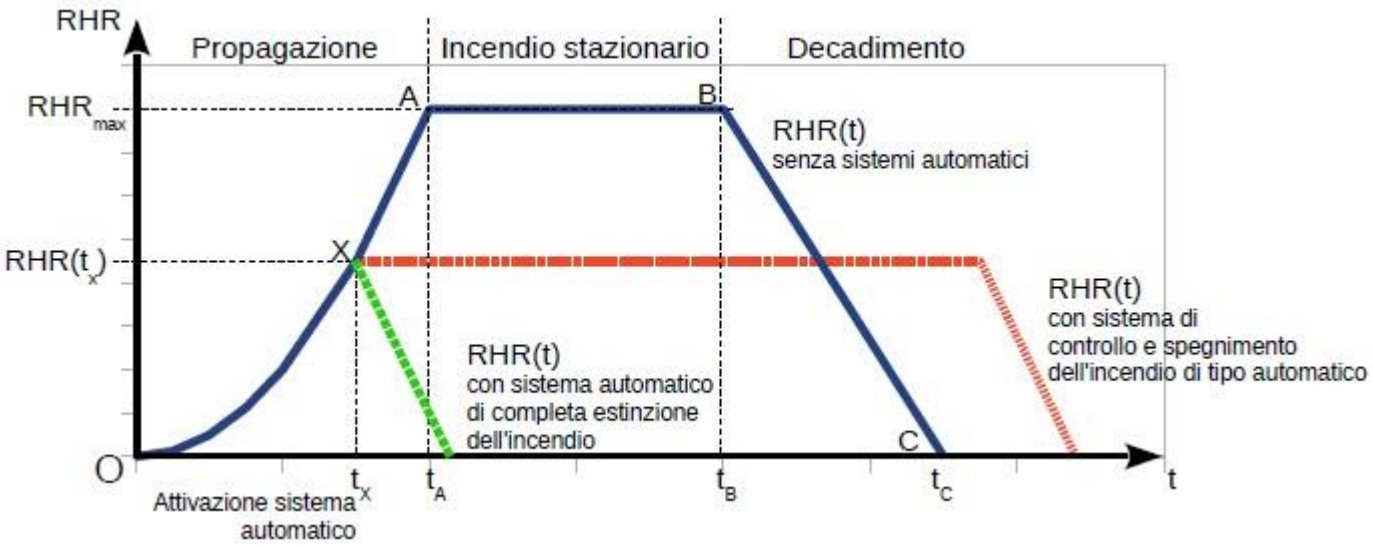
Deve essere descritta la sequenza di evoluzione dell'incendio, a **partire dall'evento iniziatore** per un intervallo di **tempo** che dipende dai seguenti **obiettivi di sicurezza**:

Obiettivo di sicurezza antincendio	Durata minima degli scenari di incendio di progetto
Salvaguardia della vita degli occupanti	Dall'evento iniziatore fino al momento in cui tutti gli occupanti dell'attività raggiungono o permangono in un luogo sicuro. Se il luogo sicuro è prossimo o interno all'opera da costruzione, devono essere valutate eventuali interazioni tra il mantenimento della capacità portante dell'opera da costruzione ed il luogo sicuro.
Salvaguardia della vita dei soccorritori	Dall'evento iniziatore fino a 5 minuti dopo il termine delle operazioni previste per i soccorritori o l'arrivo delle squadre dei Vigili del fuoco presso l'attività. Il tempo di riferimento per l'arrivo dei Vigili del fuoco può essere assunto pari alla media dei tempi d'arrivo desunti dall'*Annuario statistico dei Vigili del fuoco* (http://www.vigilfuoco.it), considerando i dati dell'ultimo anno disponibile, riferiti all'ambito provinciale.
Mantenimento della capacità portante in caso d'incendio	Dall'evento iniziatore fino all'arresto dell'analisi strutturale, in fase di raffreddamento, al momento in cui gli effetti dell'incendio sono ritenuti non significativi in termini di variazione temporale delle caratteristiche della sollecitazione e degli spostamenti

Stima della curva RHR

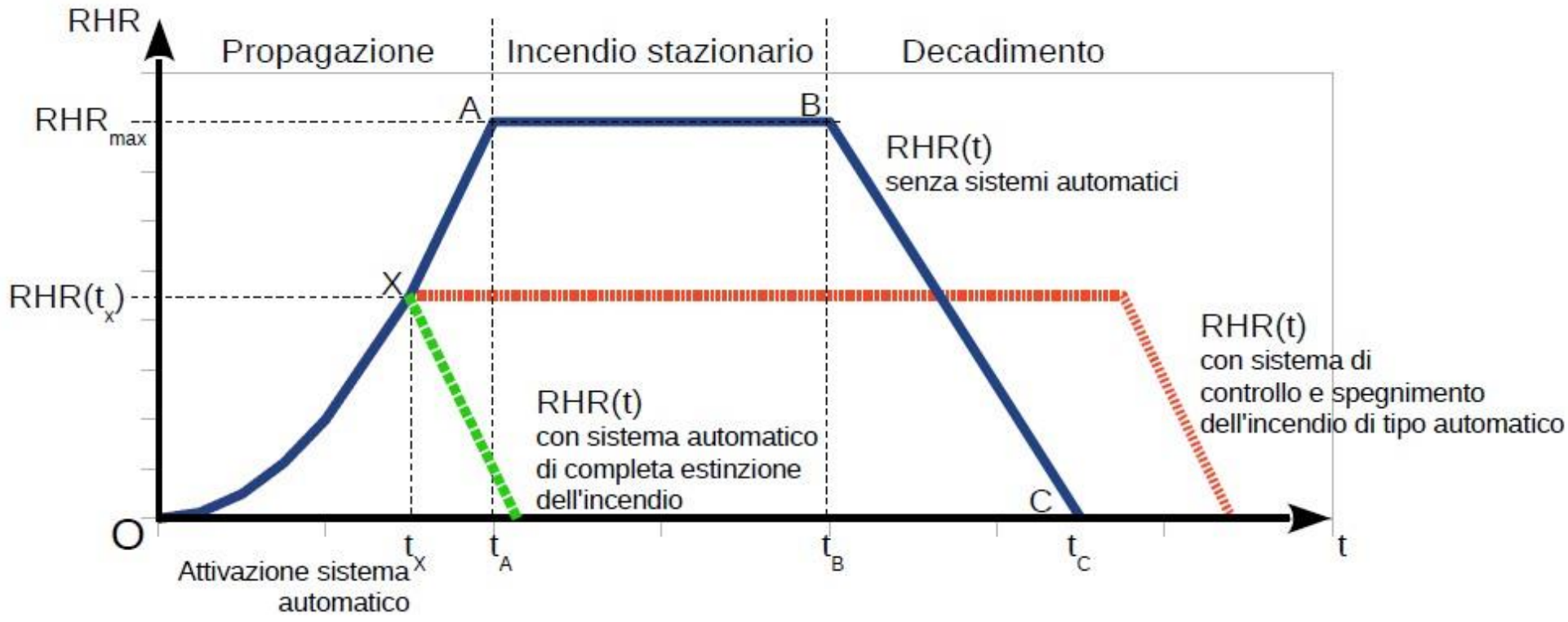
La definizione quantitativa delle fasi d'incendio si riferisce alla seguente curva qualitativa. La metodologia può essere utilizzata per:

- Costruire **curve naturali d'incendio** per valutare la capacità portante delle opere da costruzione;
- Valutare la portata di fumo per la progettazione dei SEFC.

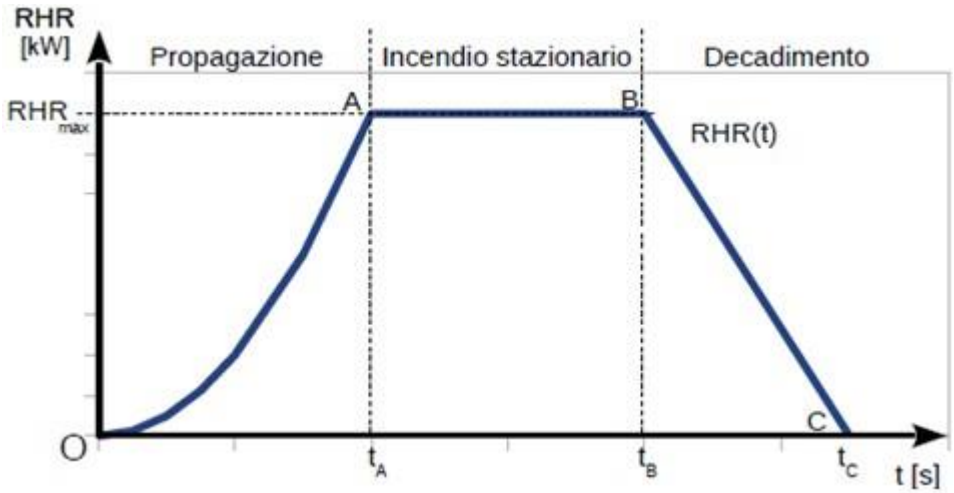


Curva RHR durante le varie fasi di sviluppo dell'incendio

Propagazione - Incendio stazionario - Decadimento



La curva **RHR** è una **schematizzazione semplificata** dell'**incendio naturale**, con l'individuazione di **3 fasi:**

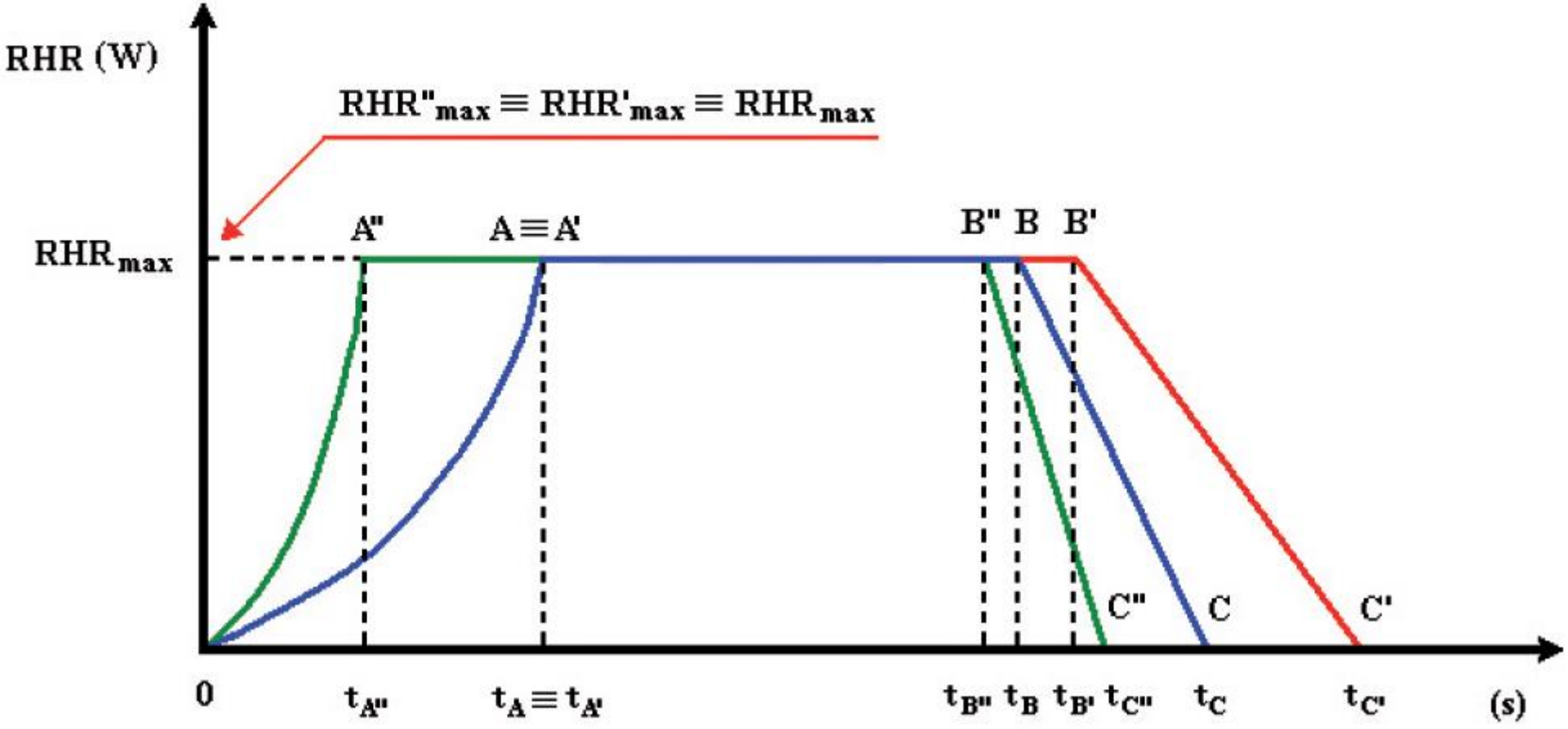


- **iniziale** *(quadratica)*,
- **intermedia** *(costante)*
- **finale** *(lineare)*.

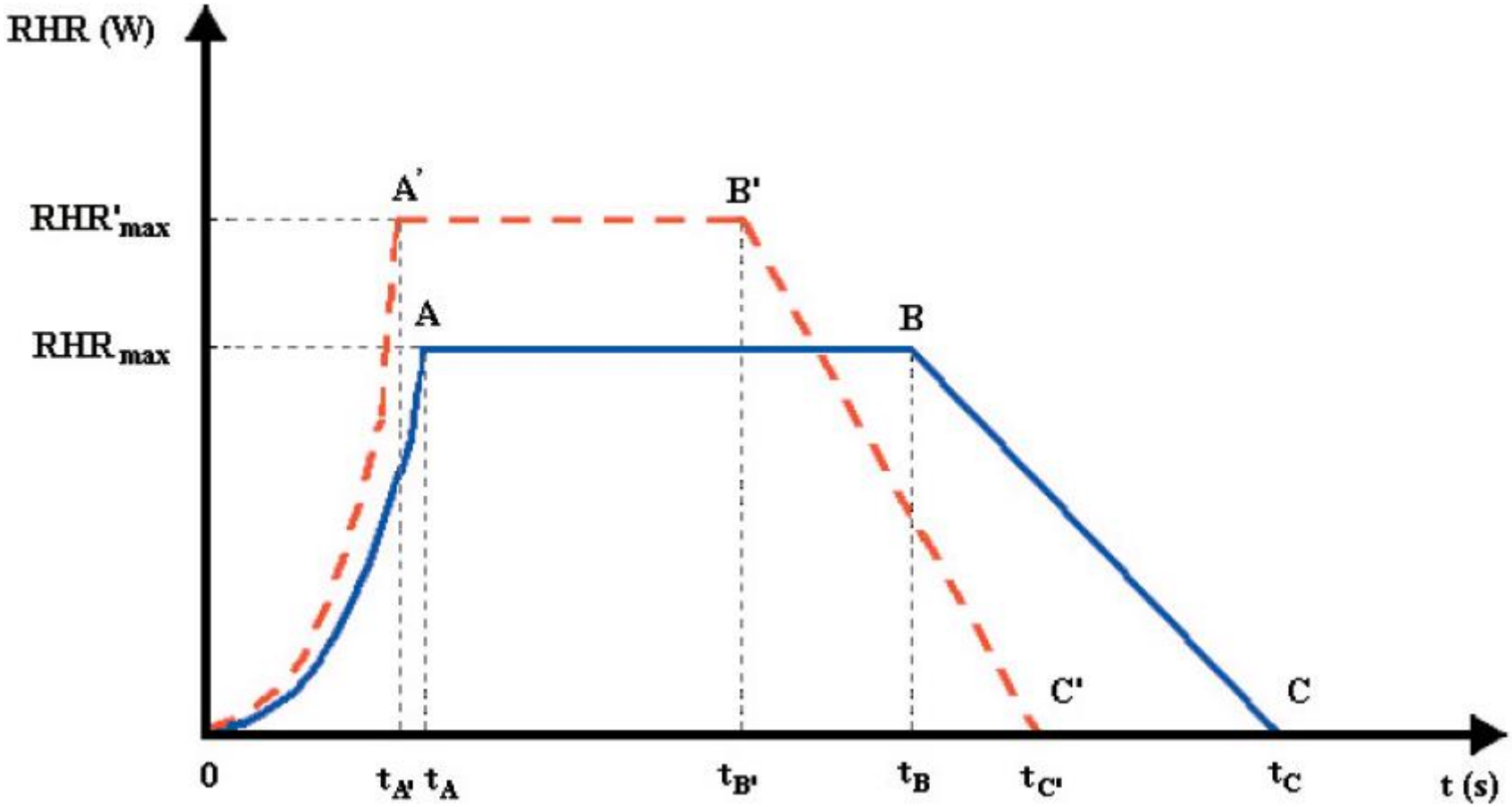
La curva è associata non solo al **carico di incendio**, ma anche alla **dinamica della combustione** *(incendio lento, veloce, …)*.

L'area sottesa dalla curva RHR *(in ascissa il tempo [s] e in ordinata la potenza termica [KW] = [kJ s^{-1}])* rappresenta il **carico d'incendio** *[kJ]*, l'energia disponibile per essere rilasciata.

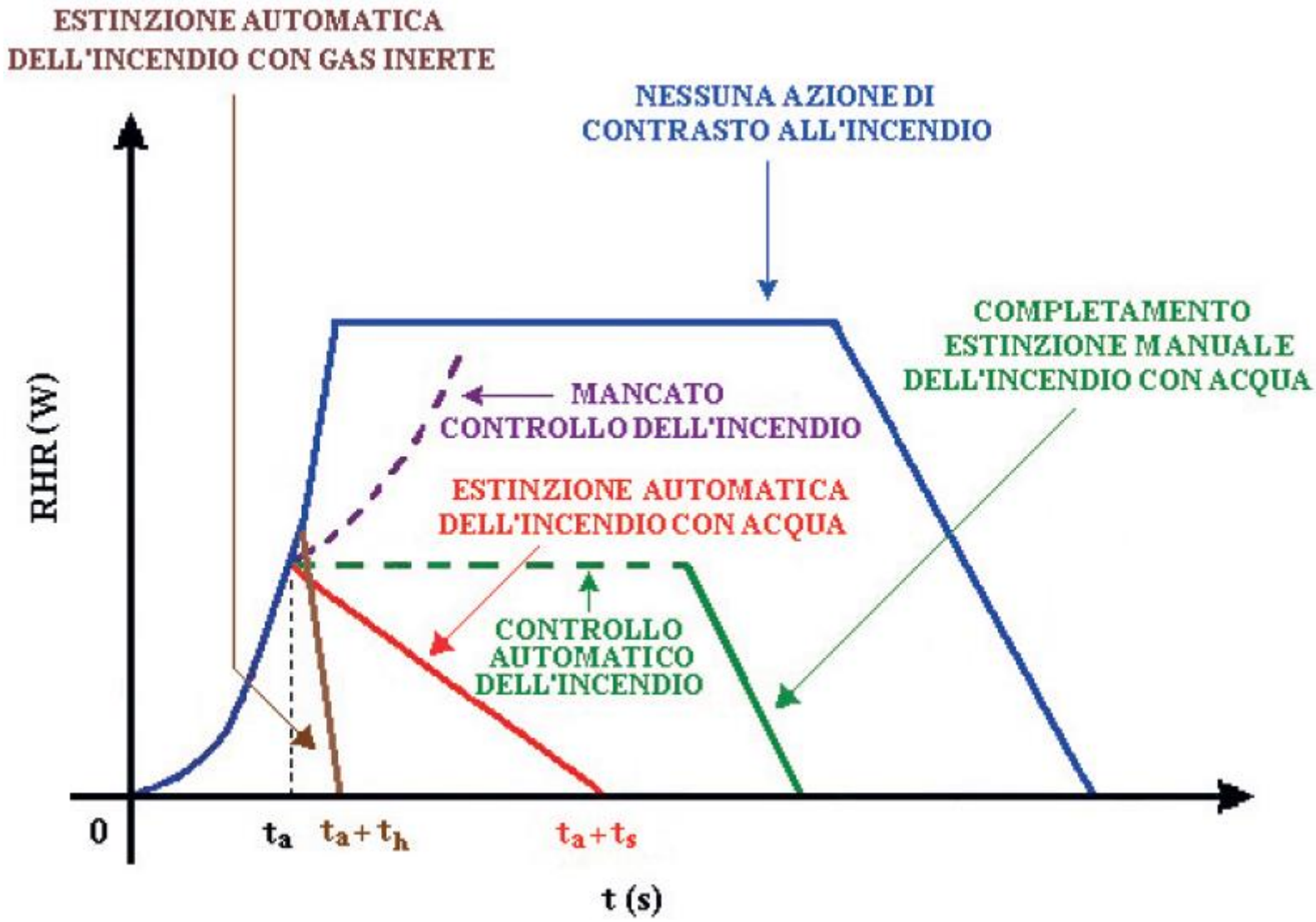
Modifica curva RHR al variare del carico d'incendio specifico



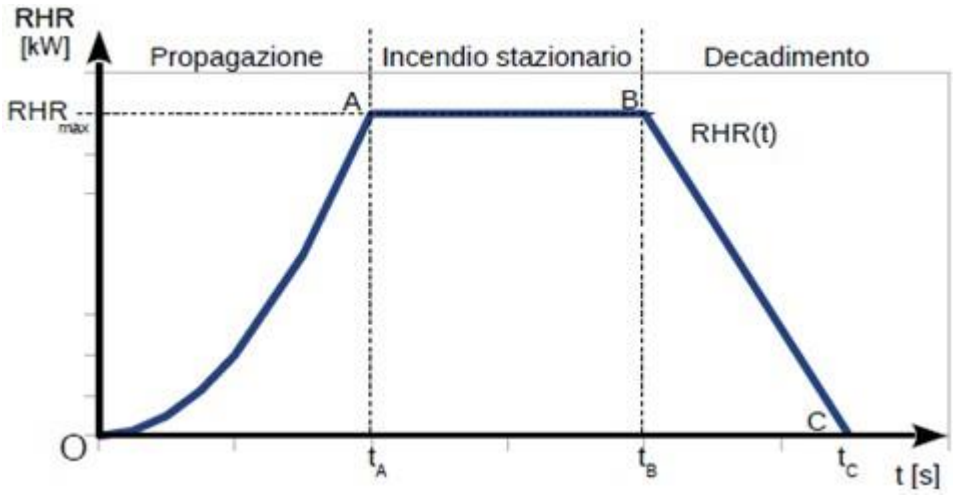
Modifica curva RHR al variare della superficie di ventilazione



Modifica curva RHR in presenza ed in assenza di un'azione di estinzione



Prima fase (pre-flashover): dipendente dalla velocità di combustione e dal quantitativo di combustibile *(energia)* disponibile. Si ha una **crescita quadratica**, con pendenza *(velocità)* in funzione del materiale e sue condizioni fisiche.

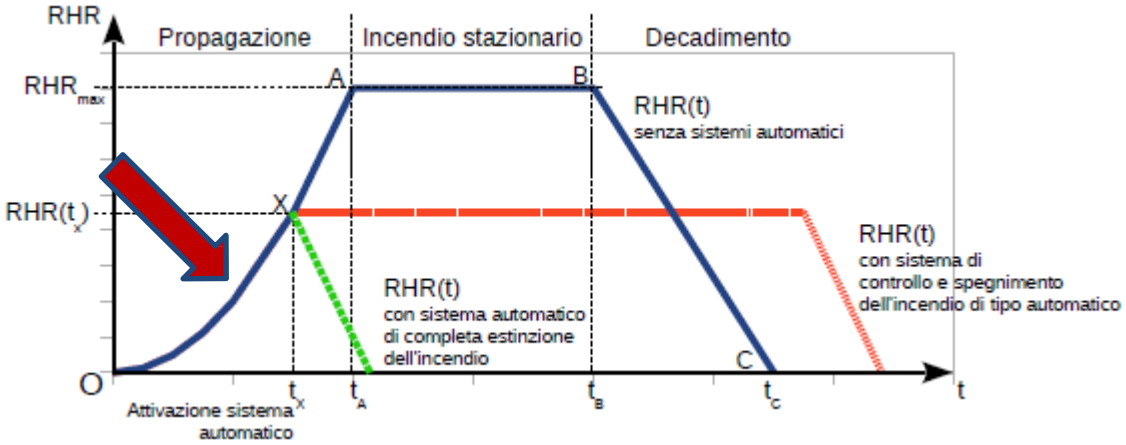


Seconda fase: In ambiente chiuso si raggiunge, dopo un certo t, una temperatura tale da provocare l'incendio di tutti i materiali; il fattore determinante diventa la ventilazione e il materiale che può bruciare dipende solo dalla ventilazione disponibile. Si ha un **diagramma orizzontale**, con RHR_{max} limitato dalla ventilazione;

Terza fase: **lineare**, rappresenta il progressivo spegnimento.

FASE DI PROPAGAZIONE DELL'INCENDIO *(Prima fase)*

Durante la fase di propagazione, la potenza termica rilasciata dall'incendio nel tempo può essere rappresentata da:



$$RHR(t) = 1000\left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2 \quad \text{per } t < t_A$$

RHR(t) :	*potenza termica rilasciata dall'incendio*	*[kW]*
t :	*tempo*	*[s]*
t_α :	*tempo affinché RHR raggiunga 1000 kW (come da tabella seguente)*	*[s]*

δ_α : VALORI CARATTERISTICI DELL'INCENDIO

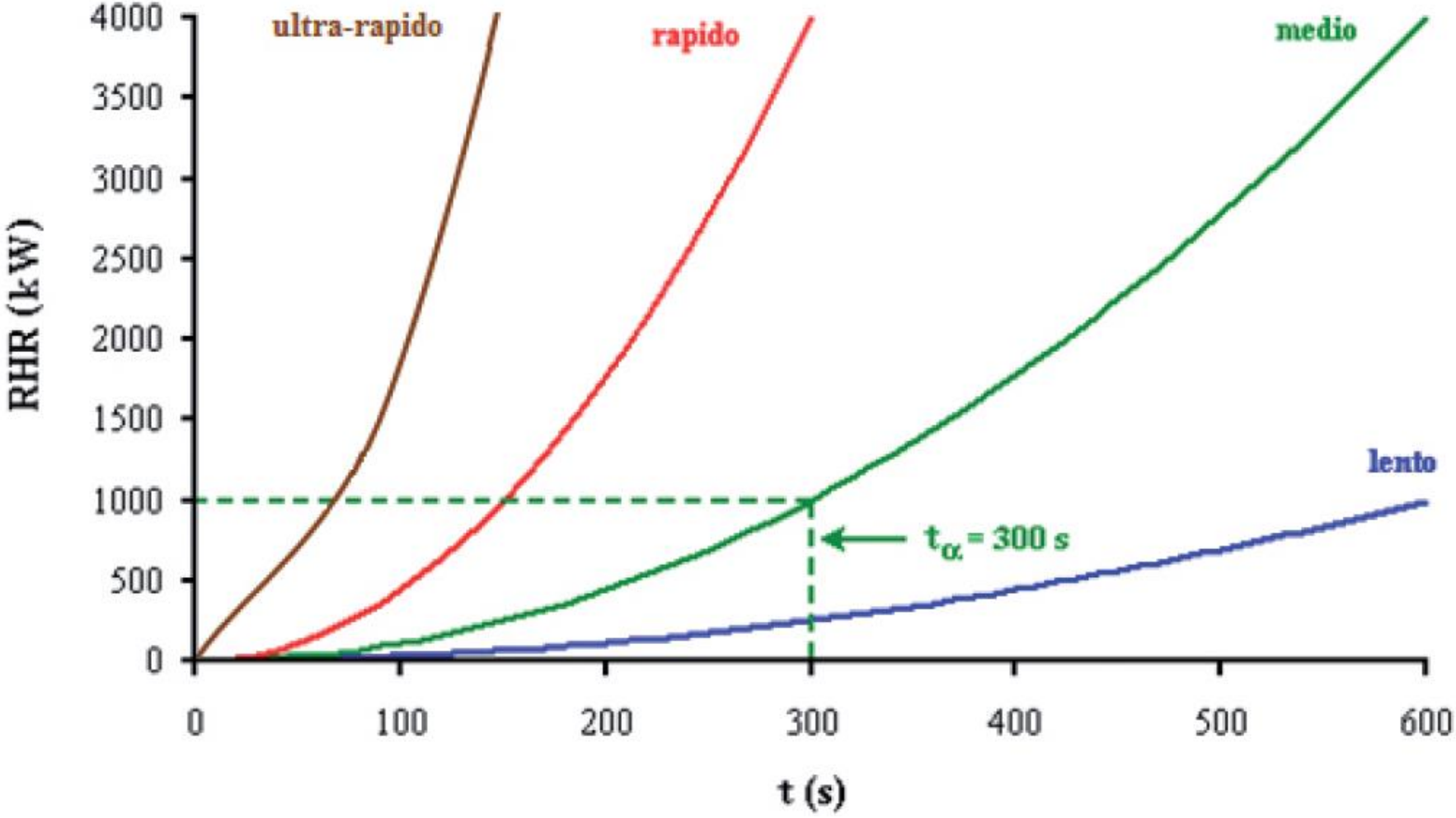
δ_α	t_α [1]	Criteri
1	600 s lenta	Ambiti di attività con carico di incendio specifico $q_f \leq 200$ MJ/m^2, oppure ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo trascurabile all'incendio.
2	300 s media	Ambiti di attività ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo moderato all'incendio.
3	150 s Rapida	Ambiti con presenza di significative quantità di materiali plastici impilati, prodotti tessili sintetici, apparecchiature elettriche e elettroniche, materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco (capitolo S.1). Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con 3,0 m < h ≤ 5,0 m [2]. Stoccaggi classificati HHS3 oppure attività classificate HHP1, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti con impianti tecnologici o di processo che impiegano significative quantità di materiali combustibili. Ambiti con contemporanea presenza di materiali combustibili e lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.
4	75 s ultra rapida	Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con h > 5,0 m [2]. Stoccaggi classificati HHS4 oppure attività classificate HHP2, HHP3 o HHP4, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti ove siano presenti o in lavorazione significative quantità di sostanze o miscele pericolose ai fini dell'incendio, oppure materiali plastici cellulari/espansi o schiume combustibili non classificati per la reazione al fuoco.

A meno di valutazioni più approfondite da parte del progettista (es. dati di letteratura, misure dirette, …), si ritengono *non significative* ai fini della presente classificazione almeno le quantità di materiali nei compartimenti con carico di incendio specifico $q_f \leq 200$ MJ/m^2.

[1] Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio.

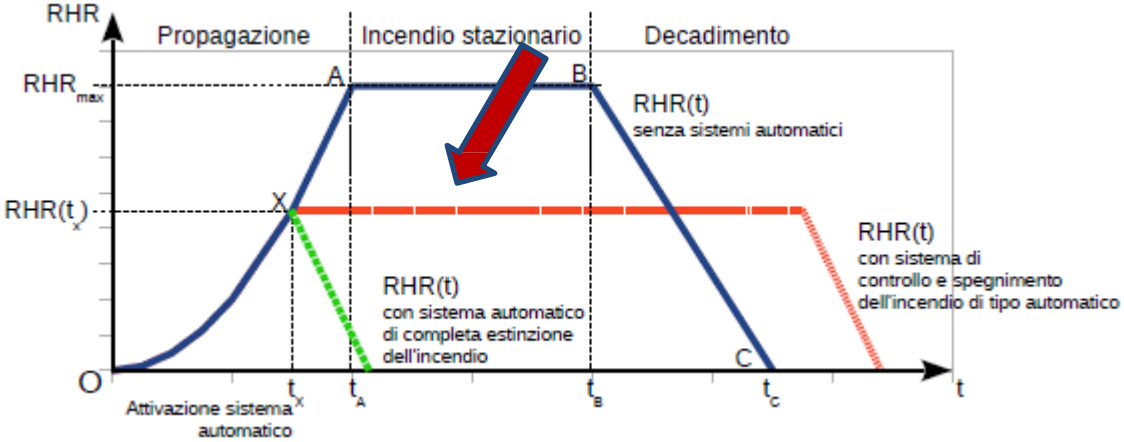
[2] Con h altezza d'impilamento.

δ_α : VALORI CARATTERISTICI DELL'INCENDIO



Effetto dei sistemi automatici di controllo dell'incendio

Con **sistemi di controllo dell'incendio automatici** *(es. sprinkler)*, RHR(t) non raggiunge RHR_{max}, che po- teva raggiungere in base a combustibile e ambiente.



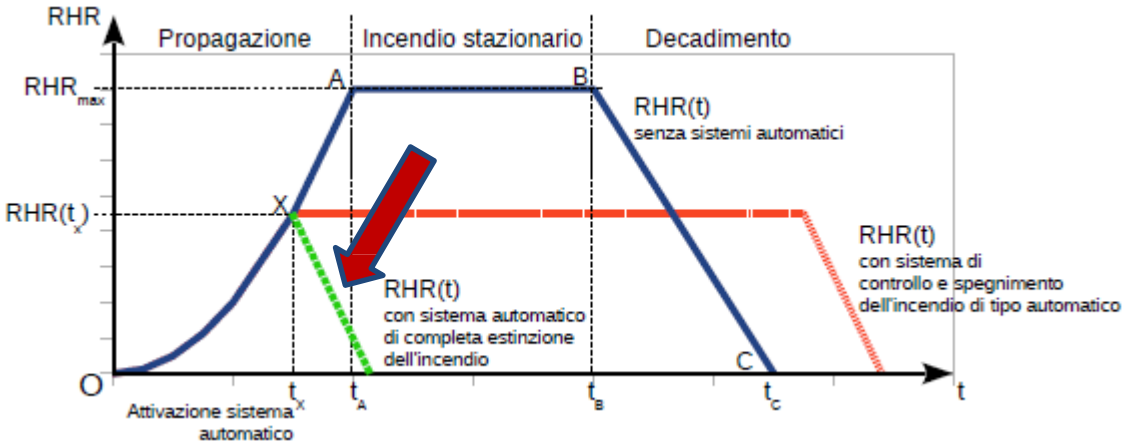
RHR può essere assunto **costante**, pari a $RHR(t_x)$ **raggiunto all'istante t_X** di entrata in funzione dell'impianto.

Fanno eccezione le autorimesse (D.M. 15/05/2020)

Il valore $RHR(t_x)$ permane per un tempo pari alla durata di alimentazione prevista, entro cui si presume che l'incendio controllato venga estinto con l'intervento manuale.

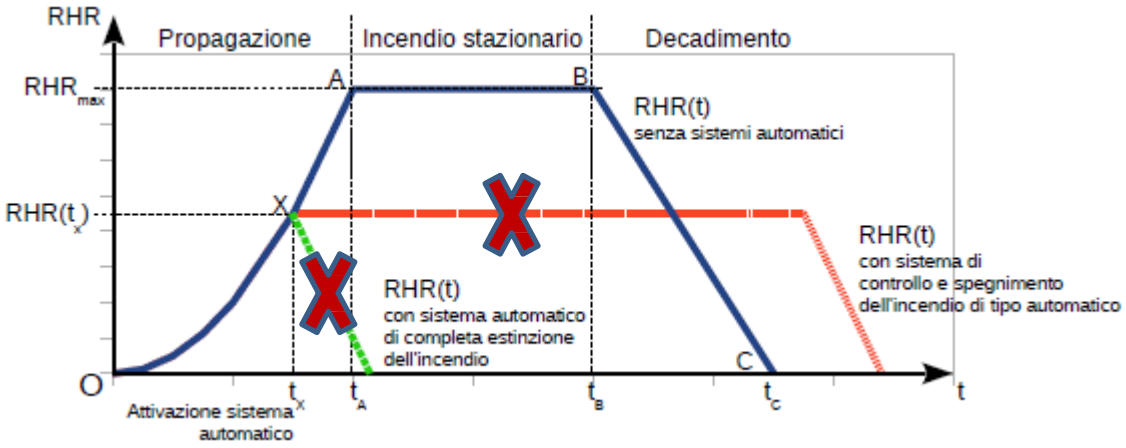
Effetto dei sistemi automatici di controllo dell'incendio

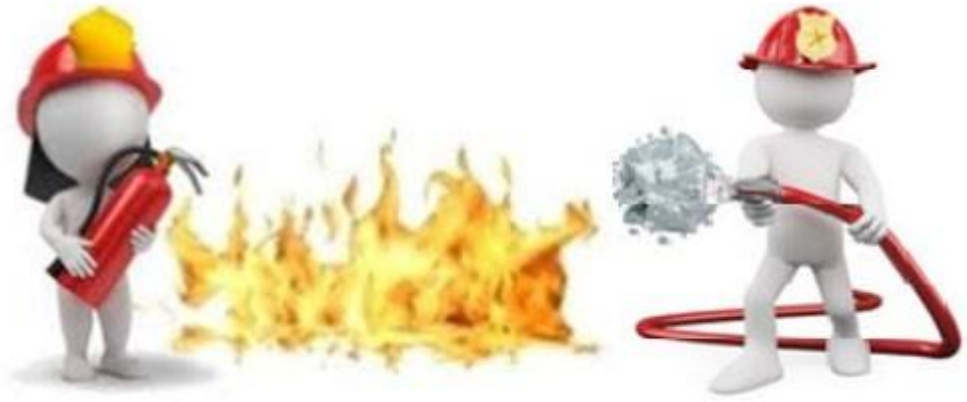
Se nell'attività sono previsti **sistemi automatici di estinzione completa** dell'incendio *(es. sprinkler ESFR - early suppression fast response, water mist, ecc.)*, il loro effetto deve essere **valutato caso per caso** in relazione allaloro efficaciaed all'affidabilità di funzionamento.



Effetto dell’intervento manuale di controllo dell'incendio

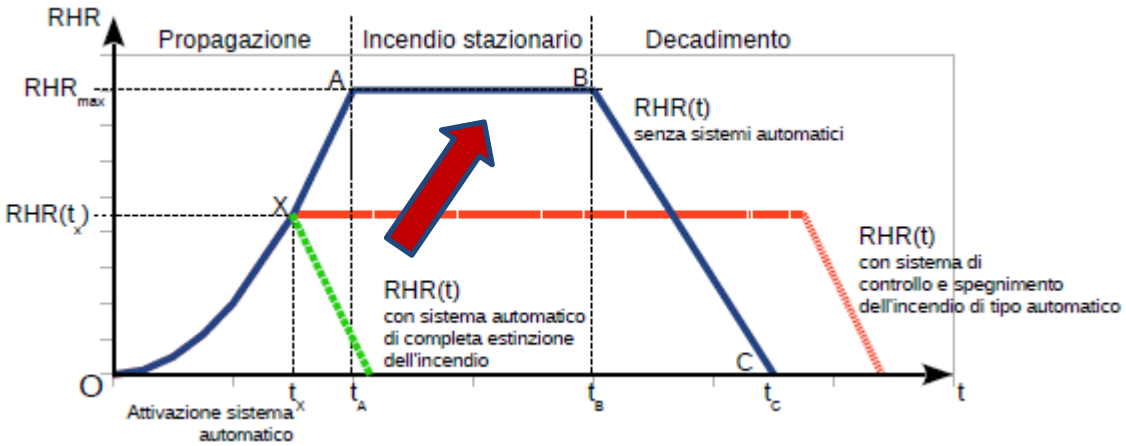
A differenza dell’attivazione dei sistemi automatici, **l’intervento manuale** effettuato dalle squadre antincendio **non può essere considerato** in fase progettuale **ai fini della modifica** dell'andamento della curva RHR(t).





FASE DELL'INCENDIO STAZIONARIO *(Seconda fase)*

Si ipotizza **che anche dopo il flashover la curva cresca proporzionalmente a t^2** fino al tempo t_A che corrisponde alla massima potenza RHR_{max} rilasciata nel compartimento.



Il Codice da indicazioni per **determinare RHR_{max}**:

- **Controllato dal combustibile** *(all'aperto o in edifici con elevata superficie di ventilazione).* $RHR_{max} = RHR_f \cdot A_f$

- **Limitato dal valore della superficie di ventilazione** *(in edifici con superficie di ventilazione ordinaria).* $RHR_{max} = 0{,}10 \cdot m \cdot H_u \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}$

Determinazione di HRR_f

HRR_f massimo tasso di rilascio termico prodotto da 1 m^2 di incendio nel caso di combustione controllata dal combustibile.

Un riferimento è, in **ambito civile**, la tab. E.5 dell'Eurocodice 1 UNI EN 1991-1-2.

In **ambito industriale** si può far riferimento a valori diversi in base a sperimentazioni.

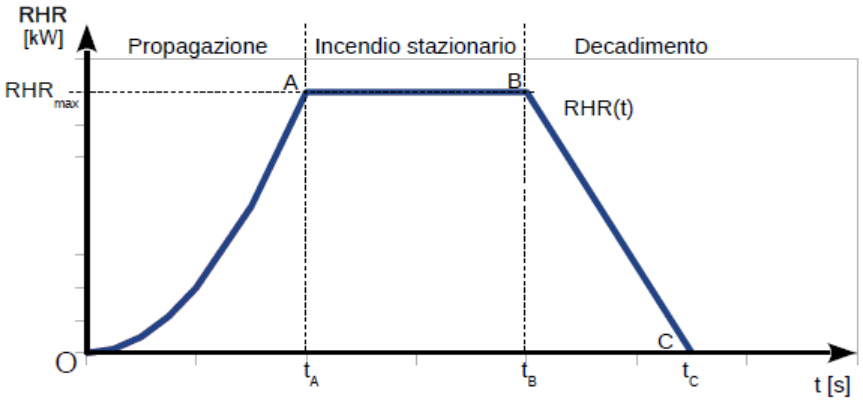
Table E.5 — Fire growth rate and RHR_f for different occupancies

Max Rate of heat release RHR_f			
Occupancy	Fire growth rate	t_α [s]	RHR_f [kW/m^2]
Dwelling	Medium	300	250
Hospital (room)	Medium	300	250
Hotel (room)	Medium	300	250
Library	Fast	150	500
Office	Medium	300	250
Classroom of a school	Medium	300	250
Shopping centre	Fast	150	250
Theatre (cinema)	Fast	150	500
Transport (public space)	Slow	600	250

Fase dell'incendio stazionario

Noto il valore di ***RHR$_{max}$*** *si calcola* ***t$_A$*** *di inizio fase d'incendio stazionario.*

$$t_A = \sqrt{RHR_{max} \frac{t_\alpha^2}{1000}}$$



Questa termina a ***t$_B$,*** *(inizio fase decadimento) ove il 70% dell'energia termica disponibile* ***q$_f$ · A$_f$*** *è stata rilasciata.*

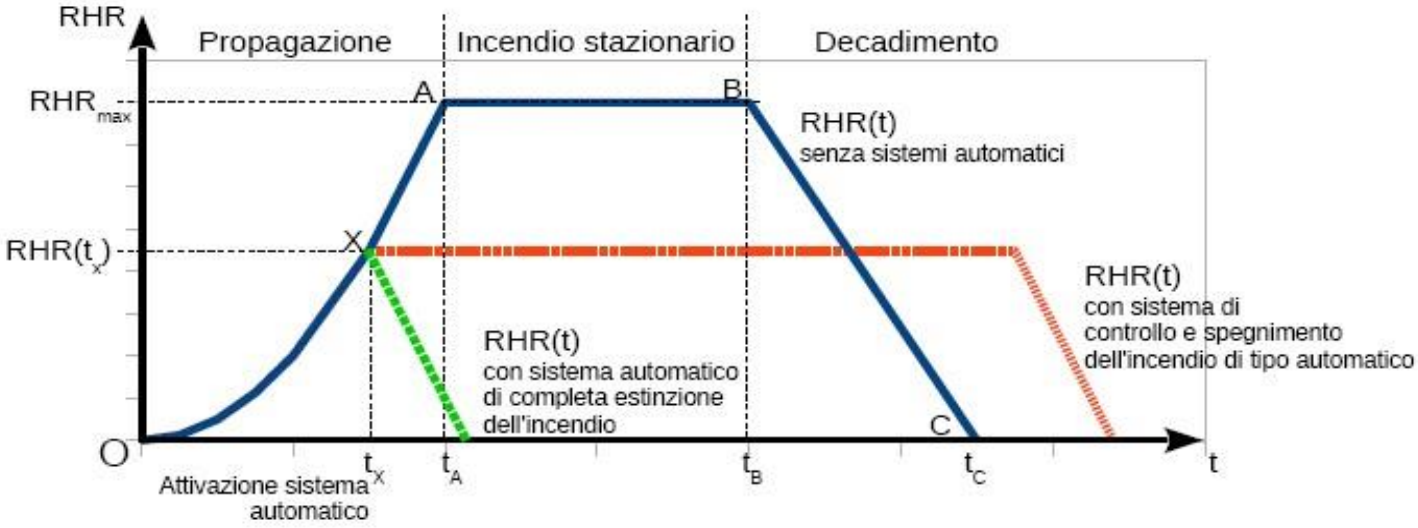
q$_f$ *: carico d'incendio specifico*

A$_f$ *: superficie lorda del compartimento*

$$q_f = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i \cdot H_i \cdot m_i \cdot \psi_i}{A}$$

Il Codice fornisce indicazioni per determinare ***t$_B$*** *.*

Fase dell'incendio stazionario



$$RHR_{max} = 0{,}10\, m\, H_u A_v \sqrt{h_{eq}}$$

Incendio con sviluppo controllato dalla superficie di ventilazione

$$h_{eq} = \frac{\sum_i A_{v,i} h_i}{\sum_i A_{v,i}}$$

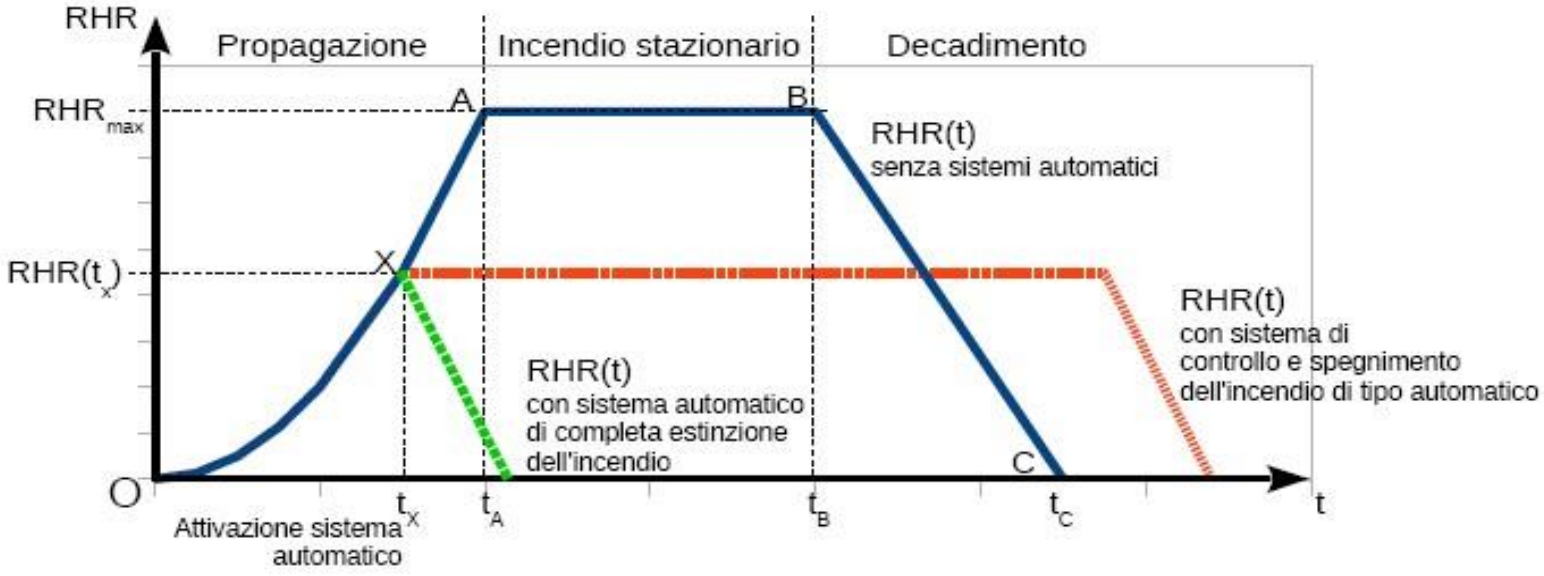
con:

h_{eq}	altezza equivalente delle aperture verticali	[m]
$A_{v,i}$	area dell'apertura verticale i-esima	[m²]
h_i	altezza dell'apertura verticale i-esima	[m]

con:

m	fattore di partecipazione alla combustione di cui al capitolo S.2 del presente documento.
H_u	potere calorifico inferiore del legno pari a 17500 kJ/kg.
A_v	area totale delle *aperture verticali* su tutte le pareti del compartimento [m²]

Fase dell'incendio stazionario



Incendio con sviluppo controllato dalla superficie di ventilazione

$$RHR_{max} = 0{,}10\, m\, H_u\, A_v \sqrt{h_{eq}}$$

$$h_{eq} = \frac{\sum_i A_{v,i} h_i}{\sum_i A_{v,i}}$$

con:

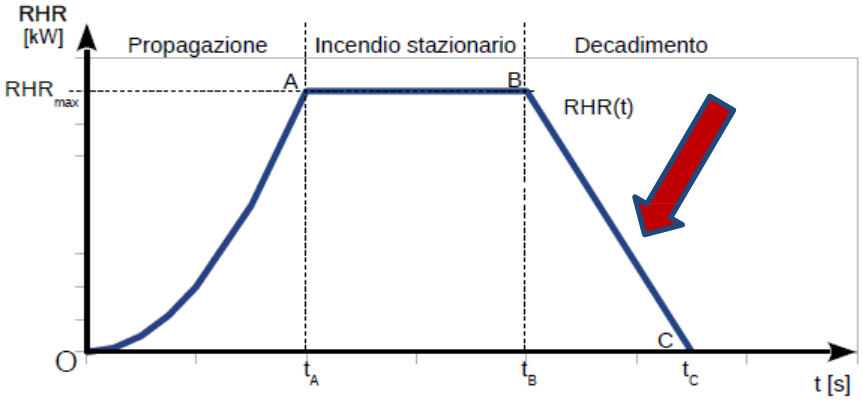
h_{eq}	altezza equivalente delle aperture verticali	[m]
$A_{v,i}$	area dell'apertura verticale i-esima	[m²]
h_i	altezza dell'apertura verticale i-esima	[m]

con:

m	fattore di partecipazione alla combustione di cui al capitolo S.2 del presente documento.
H_u	potere calorifico inferiore del legno pari a 17500 kJ/kg.
A_v	area totale delle *aperture verticali* su tutte le pareti del compartimento [m²]

FASE DI DECADIMENTO *(Terza fase)*

Il tempo t_C*, trascorso il quale la potenza termica rilasciata dall'incendio si annulla, viene calcolato considerando che nella fase di decadimento e consumato il restante 30% dell'energia termica inizialmente disponibile.*



$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 30\% \; q_f A_f}{RHR_{max}}$$

Determinazione curva RHR

Il D.M. 18/10/2019 indica che in un compartimento antincendio per determinare la curva naturale d'incendio, per la quale bisogna preventivamente procedere al calcolo della variazione nel tempo della potenza termica rilasciata da un incendio, è necessario che:

a. **in caso di impiego del modello di incendio localizzato descritto nell'appendice C della norma UNI EN 1991-1-2, si utilizza il valore del carico d'incendio q_f specifico;**

b. **qualora si impieghi un modello di incendio numerico avanzato di fluidodinamica computazionale, bisogna utilizzare il valore del carico d'incendio q_f specifico;**

c. **nel caso in cui si utilizzi il modello di incendio numerico semplificato esposto nell'appendice A della norma UNI EN 1991-1-2 (si applica agli elementi strutturali che si trovano all'interno di un compartimento antincendio), occorre utilizzare il valore del carico d'incendio $q_{f,d}$ specifico di progetto ponendo pari a 1 i coefficienti δ_{ni} relativi alle misure antincendio modellate;**

Determinazione curva RHR

Il D.M. 18/10/2019 indica che in un compartimento antincendio per determinare la curva naturale d'incendio, per la quale bisogna preventivamente procedere al calcolo della variazione nel tempo della potenza termica rilasciata da un incendio, è necessario che:

d. **nel caso in cui si impieghi il modello di incendio numerico semplificato esposto nell'appendice B della norma UNI EN 1991-1-2 (si applica agli elementi strutturali che si trovano all'esterno di un compartimento antincendio), occorre utilizzare il valore del carico d'incendio $q_{f,d}$ specifico di progetto ponendo pari a 1 i coefficienti δ_{ni} relativi alle misure antincendio modellate;**

e. **quando si impiega un modello di incendio numerico avanzato a zone, occorre utilizzare il valore del carico d'incendio $q_{f,d}$ specifico di progetto ponendo pari a 1 i coefficienti δ_{ni} relativi alle misure antincendio modellate.**

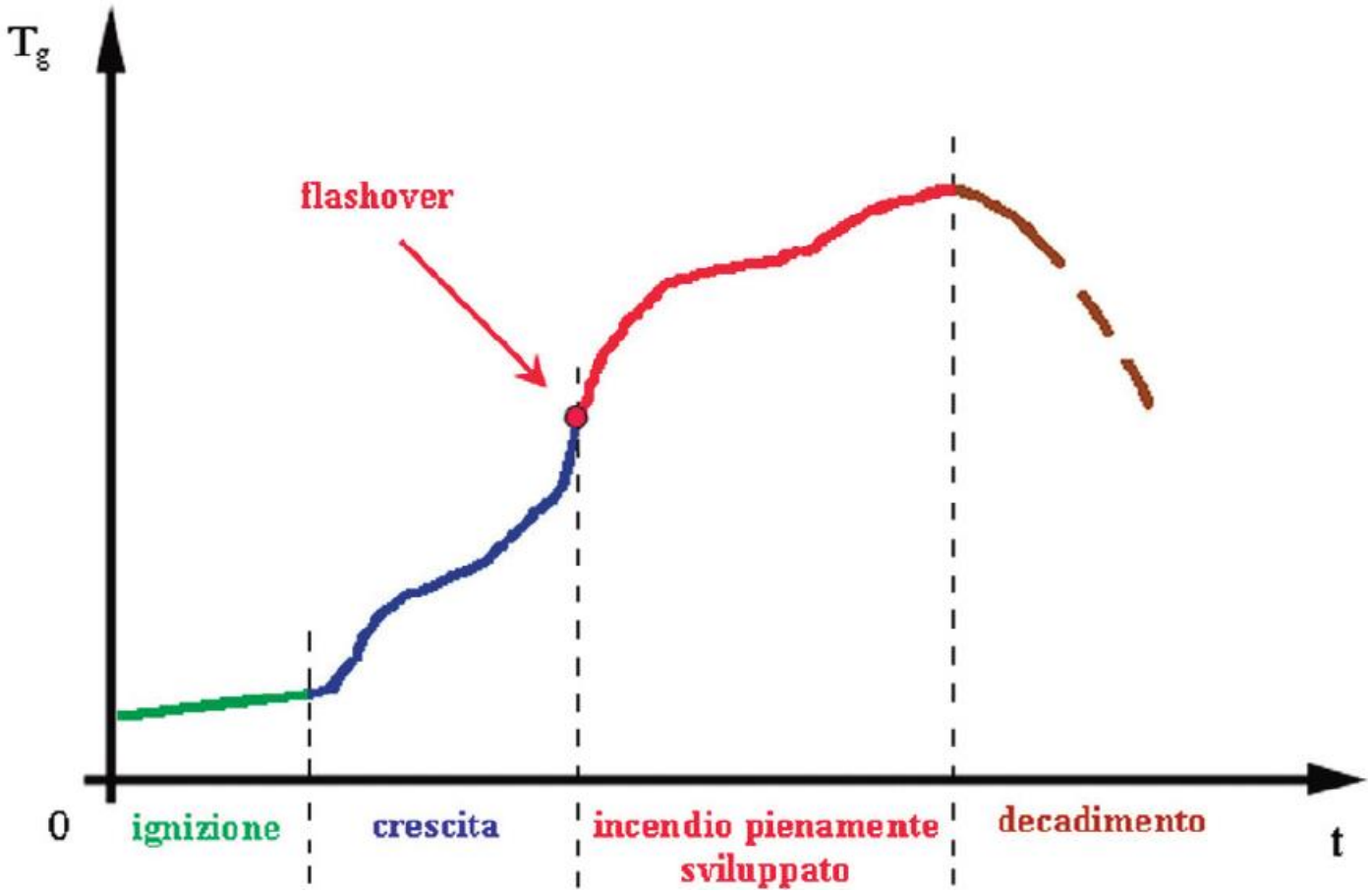
Focolare predefinito

In alternativa, si possono adottare i focolari predefiniti utilizzando i valori dei parametri di cui alla tabella (spesso, però, essi conducono a valutazioni conservative).

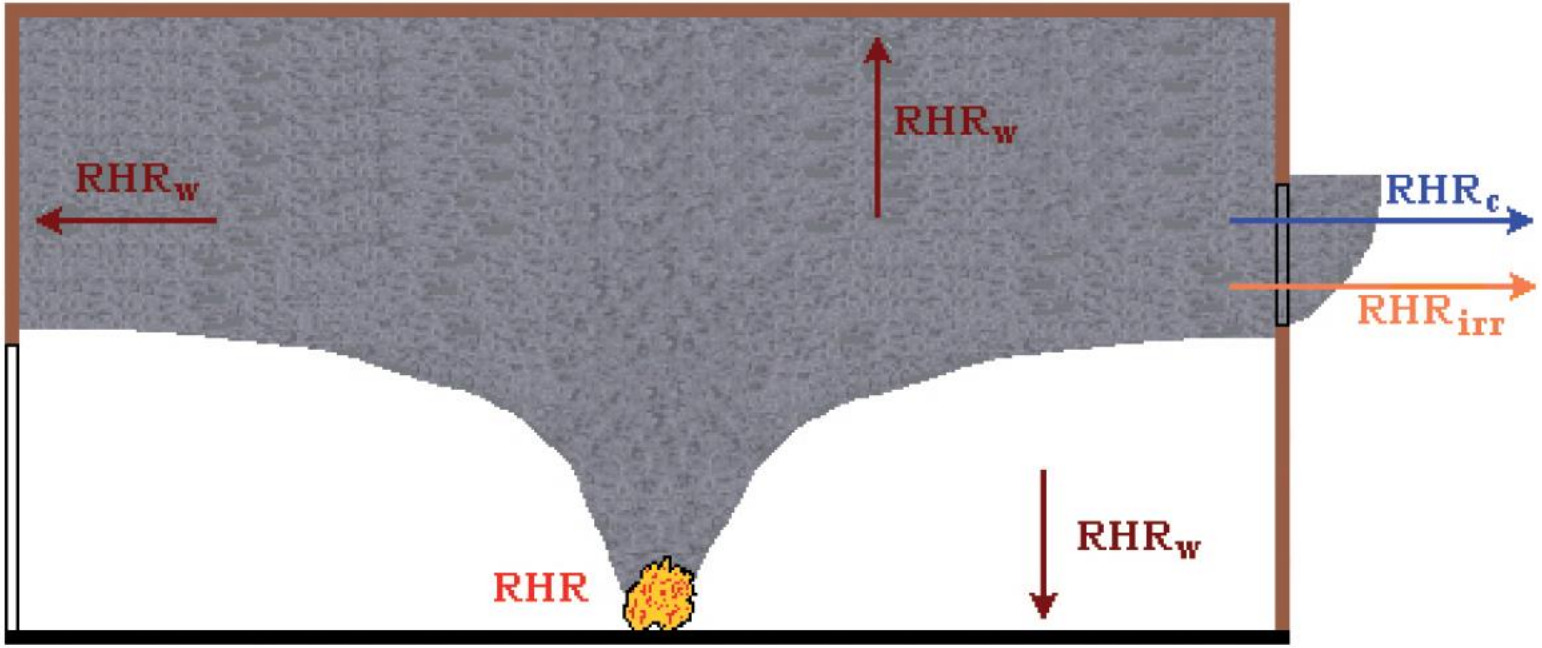
Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio t_α	150 s (*fast*)	75 s (*ultra-fast*)
RHR_{max} totale RHR_{max} per m^2 di superficie del focolare	5 MW 250–500 kW/m^2 [1]	50 MW 1000 kW/m^2 [1]
Resa in particolato Y_{soot}	Pre flashover: 0,07 kg/kg [2,3] Post flashover: 0,14 kg/kg [2,3]	Pre flashover: 0,18 kg/kg [4] Post flashover: 0,36 kg/kg [4]
Resa in monossido di carbonio Y_{CO}	Pre flashover: 0,10 kg/kg [5] Post flashover: 0,40 kg/kg [5]	
Calore di combustione effettivo ΔH_C	20 MJ/kg [3]	
Resa in biossido di carbonio Y_{CO2}	1,5 kg/kg [3,6]	
Resa in acqua Y_{H2O}	0,82 kg/kg [3,6]	
Frazione di RHR(t) in irraggiamento (*Radiative fraction*)	35% [3]	

[1] Da impiegare in alternativa all'RHR_{max} totale, considerando la massima superficie del focolare, pari al compartimento antincendio nel caso di carico di incendio uniformemente distribuito, ma che può essere un valore inferiore nel caso d'incendio localizzato.
[2] Robbins A P, Wade C A, Study Report No.185 *"Soot Yield Values for Modelling Purposes – Residential Occupancies"*, BRANZ, 2008
[3] *"C/VM2 Verification method: Framework for fire safety design"*, New Zealand Building Code
[4] *"SFPE handbook of fire protection engineering"*, NFPA, 4th ed., 2008. Tabella 3-4.16, pag. 3-142, da *polyurethane flexible foams*.
[5] Stec A A, Hull T R, *"Fire Toxicity"*, Woodhead Pub., 2010. § 2.4 con Φ = 1,25 (*underventilated fire*)
[6] In alternativa alle rese Y_{CO2} e Y_{H2O}, si può imporre nel codice di calcolo il combustibile generico $CH_2O_{0,5}$.

CURVA NATURALE D'INCENDIO



CURVA NATURALE D'INCENDIO



$$RHR = RHR_c + RHR_w + RHR_{irr} + RHR_{gas}$$

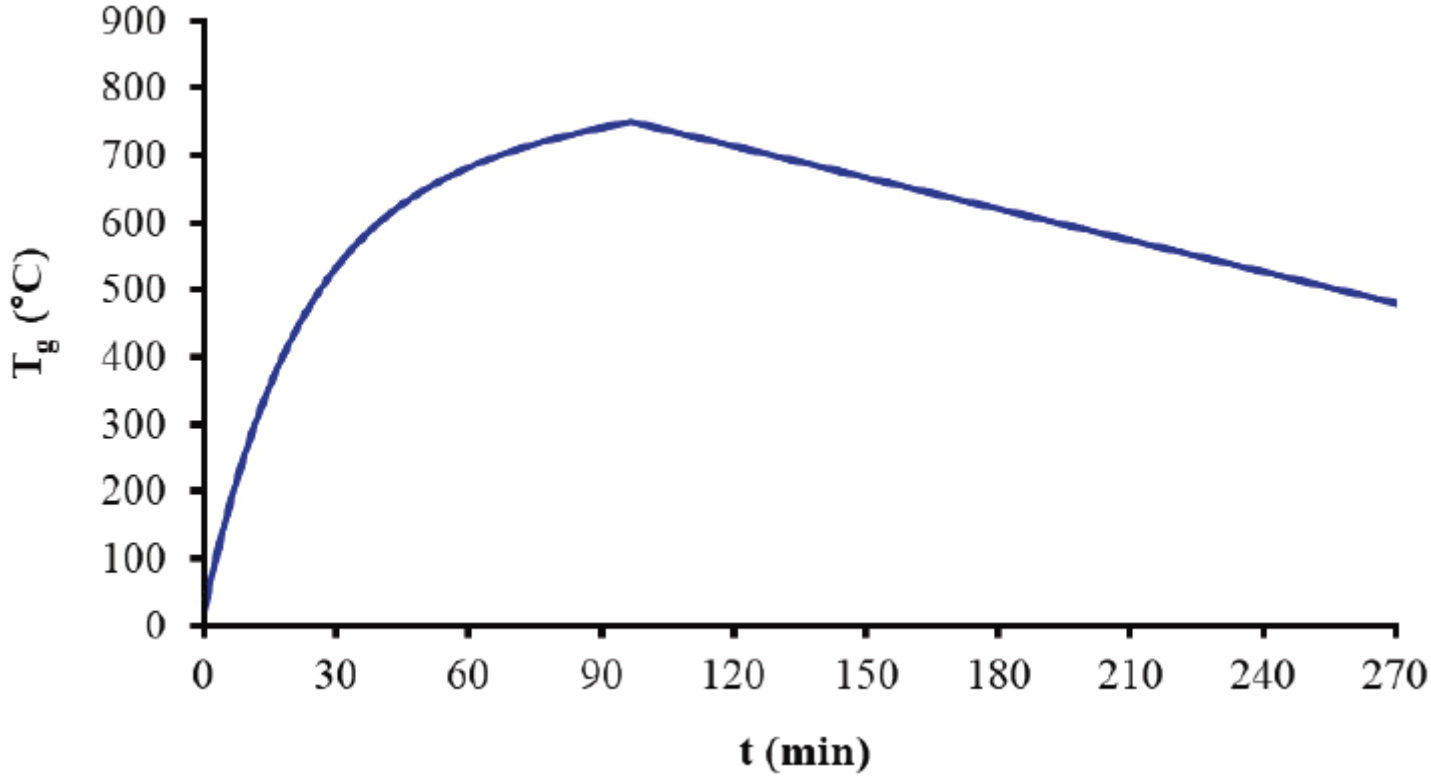
CURVE NATURALI D'INCENDIO

Le curve naturali considerano tutta la durata dell'incendio fino al ritorno nel compartimento della temperatura ambiente; esse sono ottenute attraverso modelli di incendio numerici semplificati o avanzati (curva parametrica della norma UNI EN 1991-1-2, modelli a zone e modelli di campo).

Per quanto attiene i **modelli d'incendio numerici semplificati**, il Codice di prevenzione incendi ammette solamente l'impiego del modello descritto nella norma UNI EN 1991-1-2 (curva parametrica); essa, che è applicabile soltanto alla fase di post-flashover, descrive la variazione nel tempo dei gas caldi di combustione in funzione del carico di incendio, della geometria e delle aperture di ventilazione e delle caratteristiche delle pareti di delimitazione del compartimento.

I modelli d'incendio numerici avanzati (ad esempio, CFAST, Ozone, FDS, ecc.) si distinguono in modelli a zone e di campo e il loro impiego risulta più complesso.

CURVA NATURALE D'INCENDIO PREVISTA NELLA NORMA UNI EN 1991-1-2

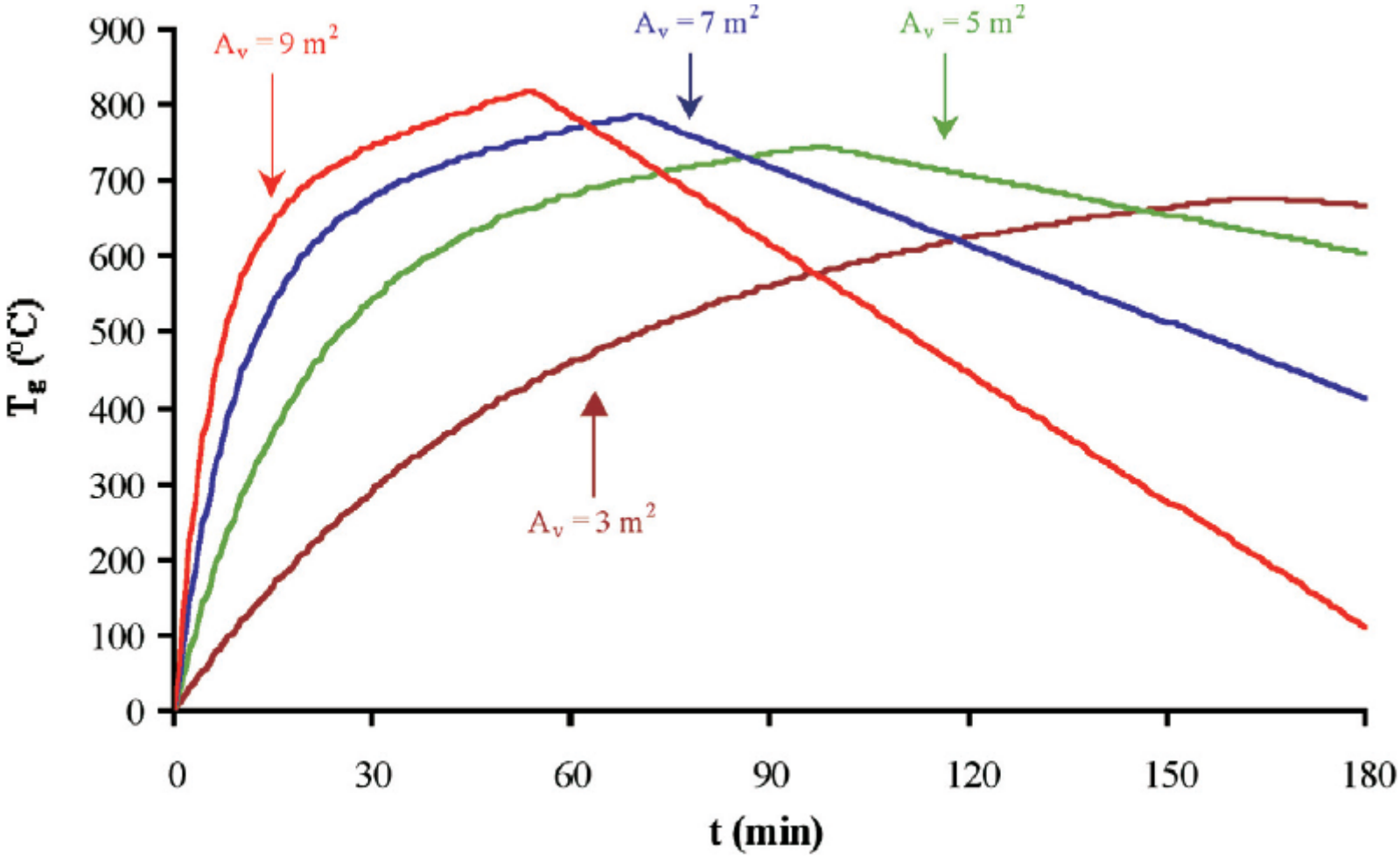


$$T_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0{,}324 \cdot e^{-0{,}2 \cdot t^*} - 0{,}204 \cdot e^{-1{,}7 \cdot t^*} - 0{,}472 \cdot e^{-19 \cdot t^*})$$

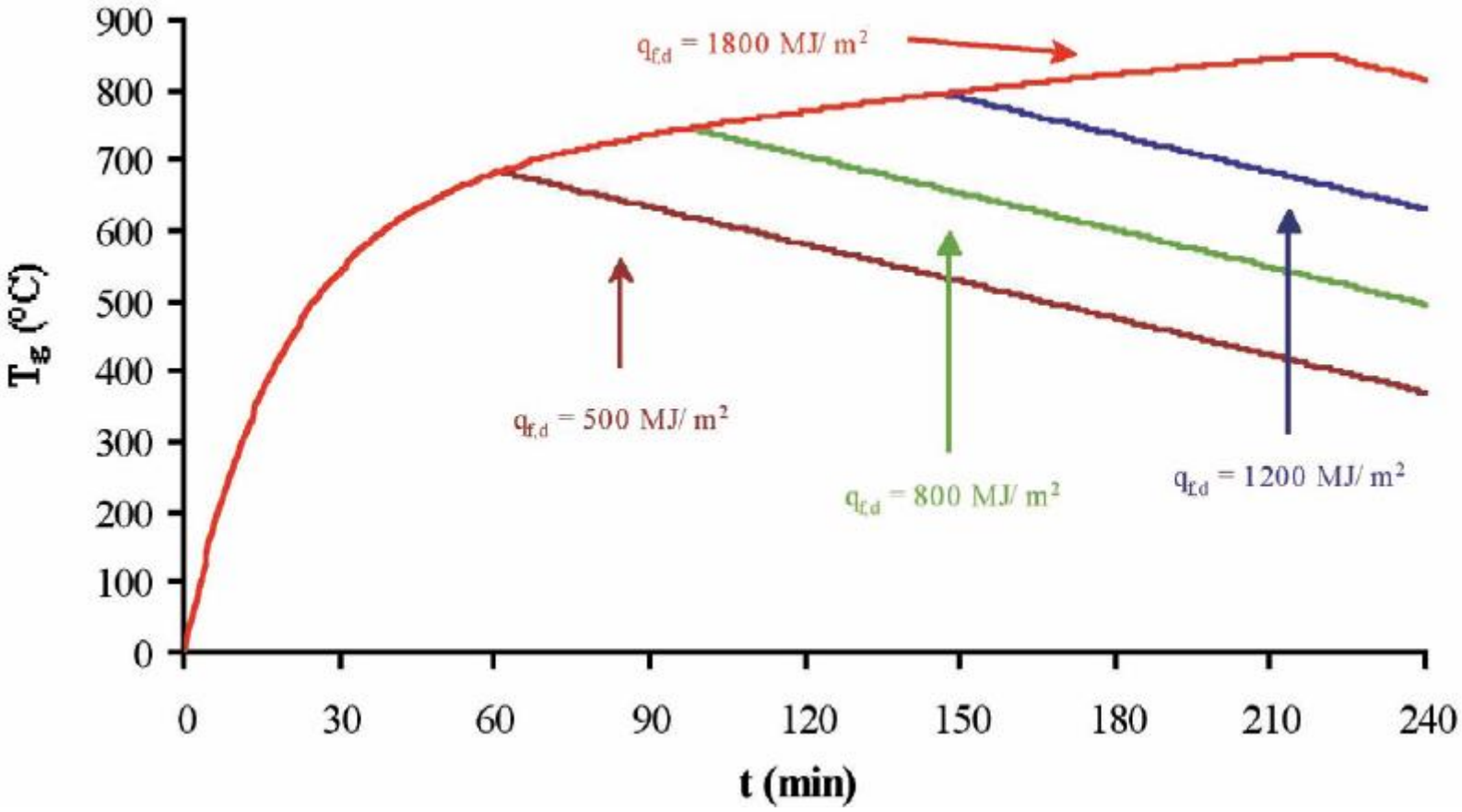
Nel caso che sia $t^*_{max} < 0{,}5$ h e, conseguentemente, $(dT/dt)_{rif} = 625$ °C/h, si ha:

$$T_g = T_{max} - 625 \cdot (t^* - t^*_{max})$$

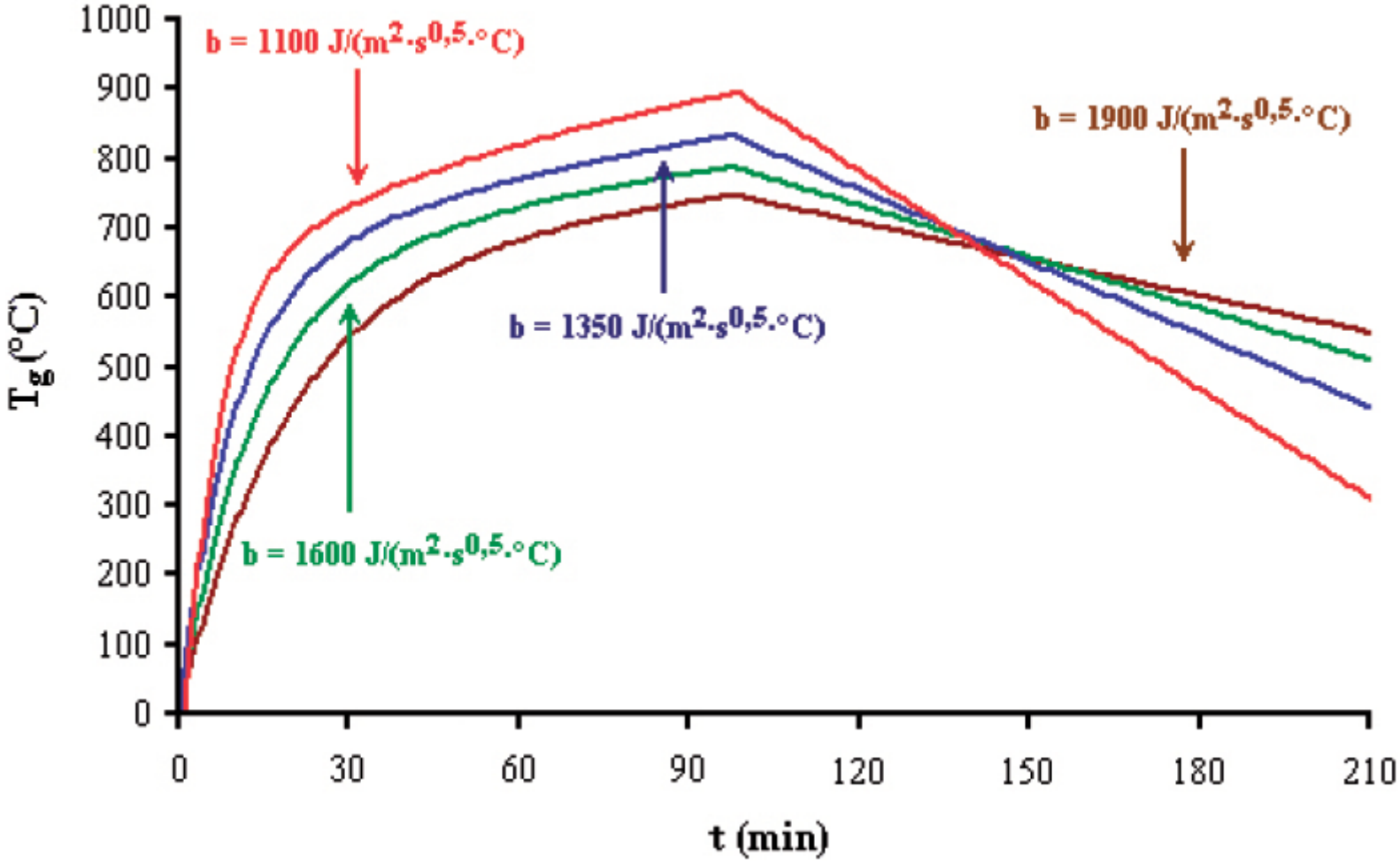
CURVA NATURALE D'INCENDIO PREVISTA NELLA NORMA UNI EN 1991-1-2
EFFETTO DELLA SUPERFICIE DI VENTILAZIONE DEL LOCALE



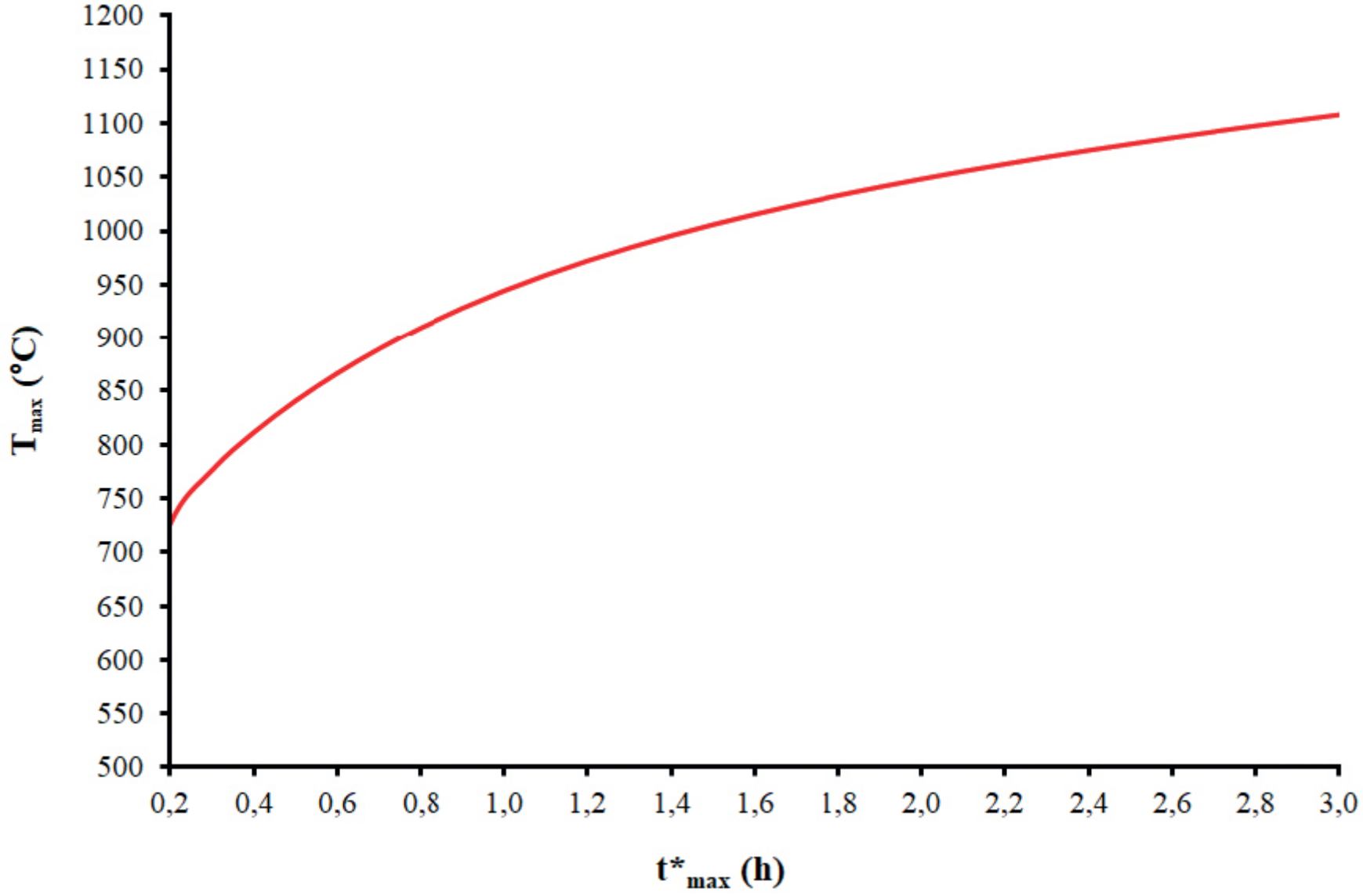
CURVA NATURALE D'INCENDIO PREVISTA NELLA NORMA UNI EN 1991-1-2
EFFETTO DEL CARICO D'INCENDIO PRESENTE NEL LOCALE



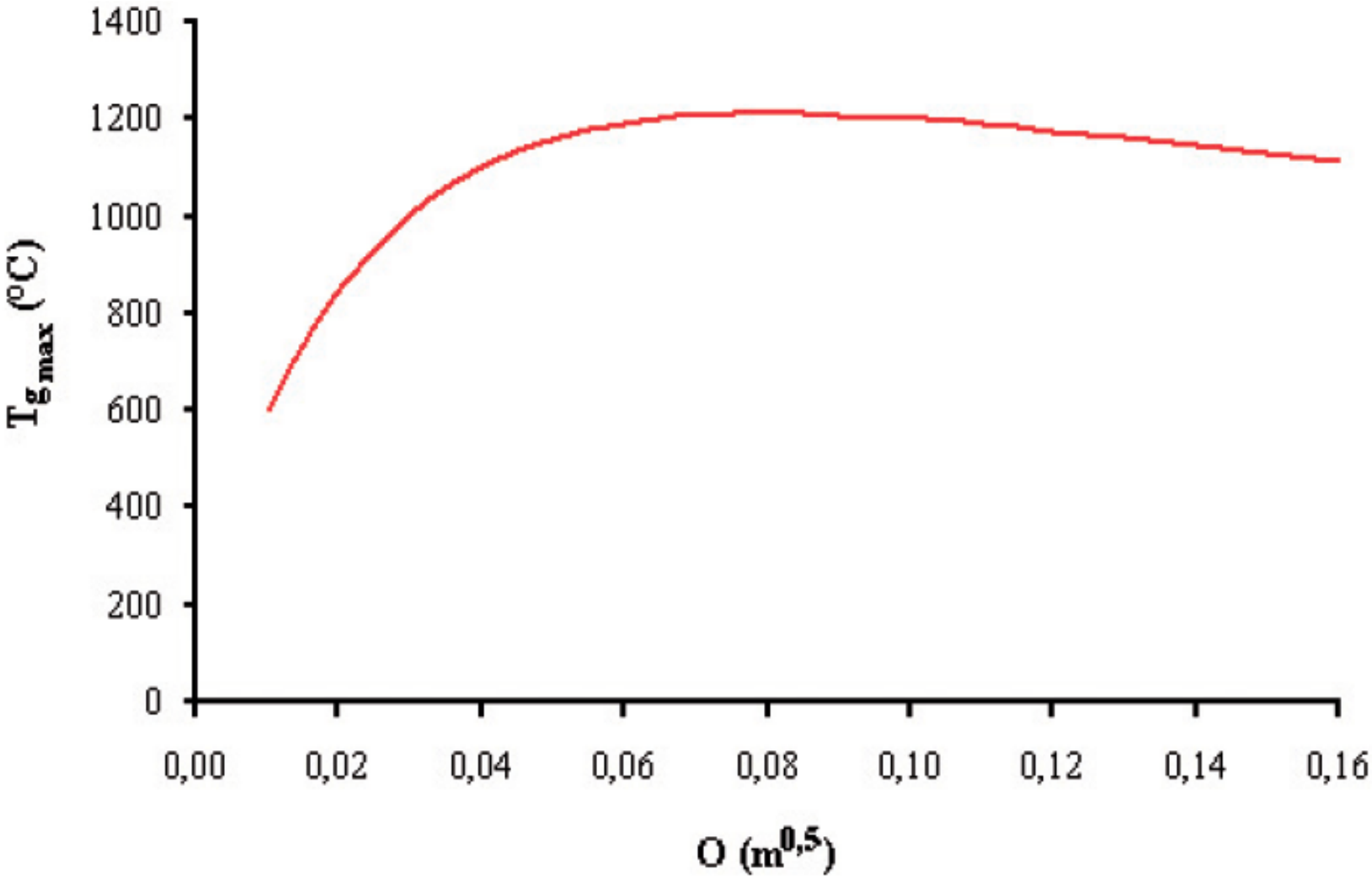
CURVA NATURALE D'INCENDIO PREVISTA NELLA NORMA UNI EN 1991-1-2
EFFETTO DELLE PARETI DI DELIMITAZIONE DEL LOCALE



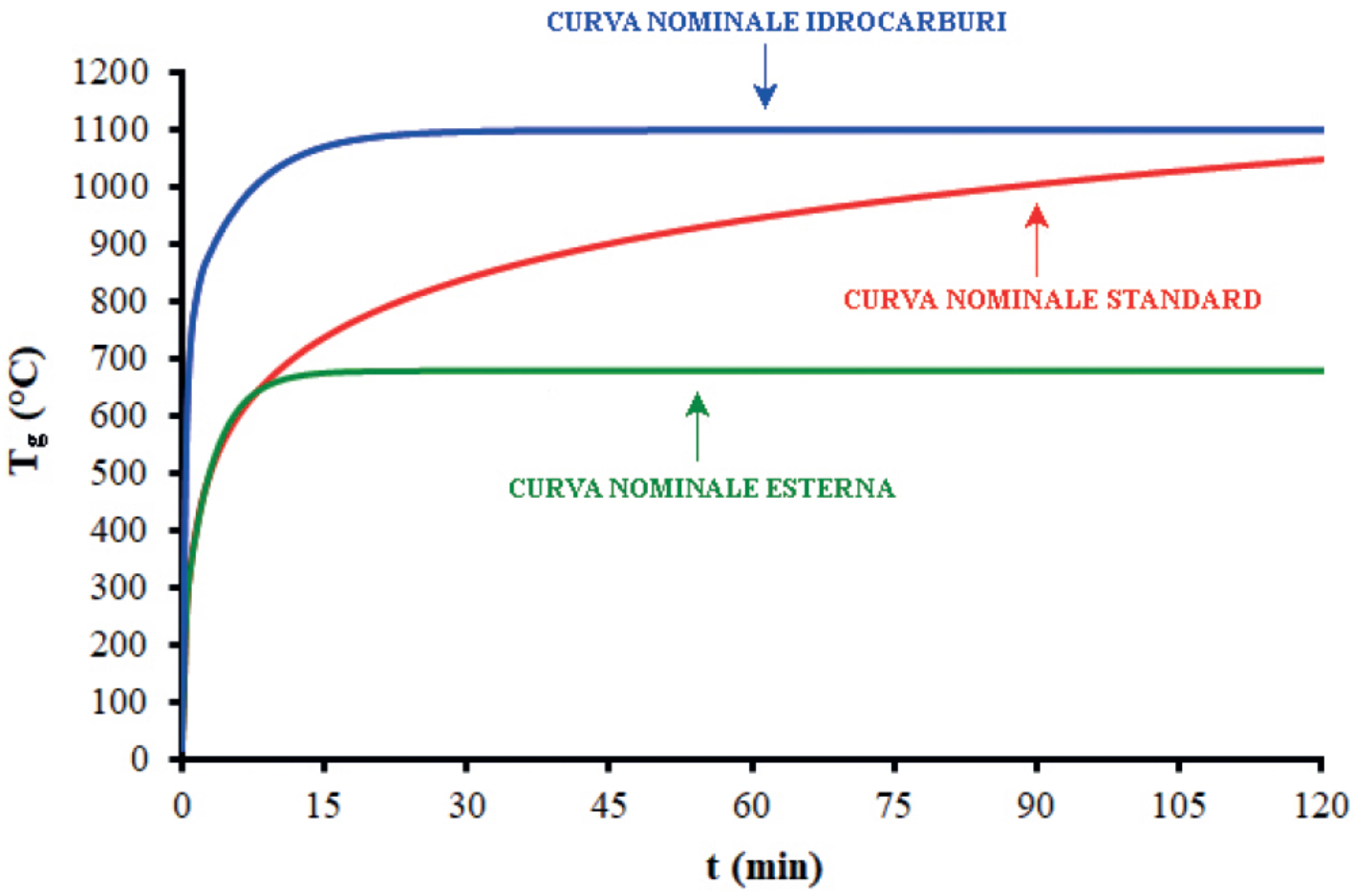
CURVA NATURALE D'INCENDIO PREVISTA NELLA NORMA UNI EN 1991-1-2
VARIAZIONE DELLA TEMPERATURA MASSIMA CON IL TEMPO FITTIZIO t^*_{max}



CURVA NATURALE D'INCENDIO
EFFETTO DELLA SUPERFICIE DI VENTILAZIONE SUL VALORE MASSIMO DELLA TEMPERATURA RAGGIUNTA NEL LOCALE

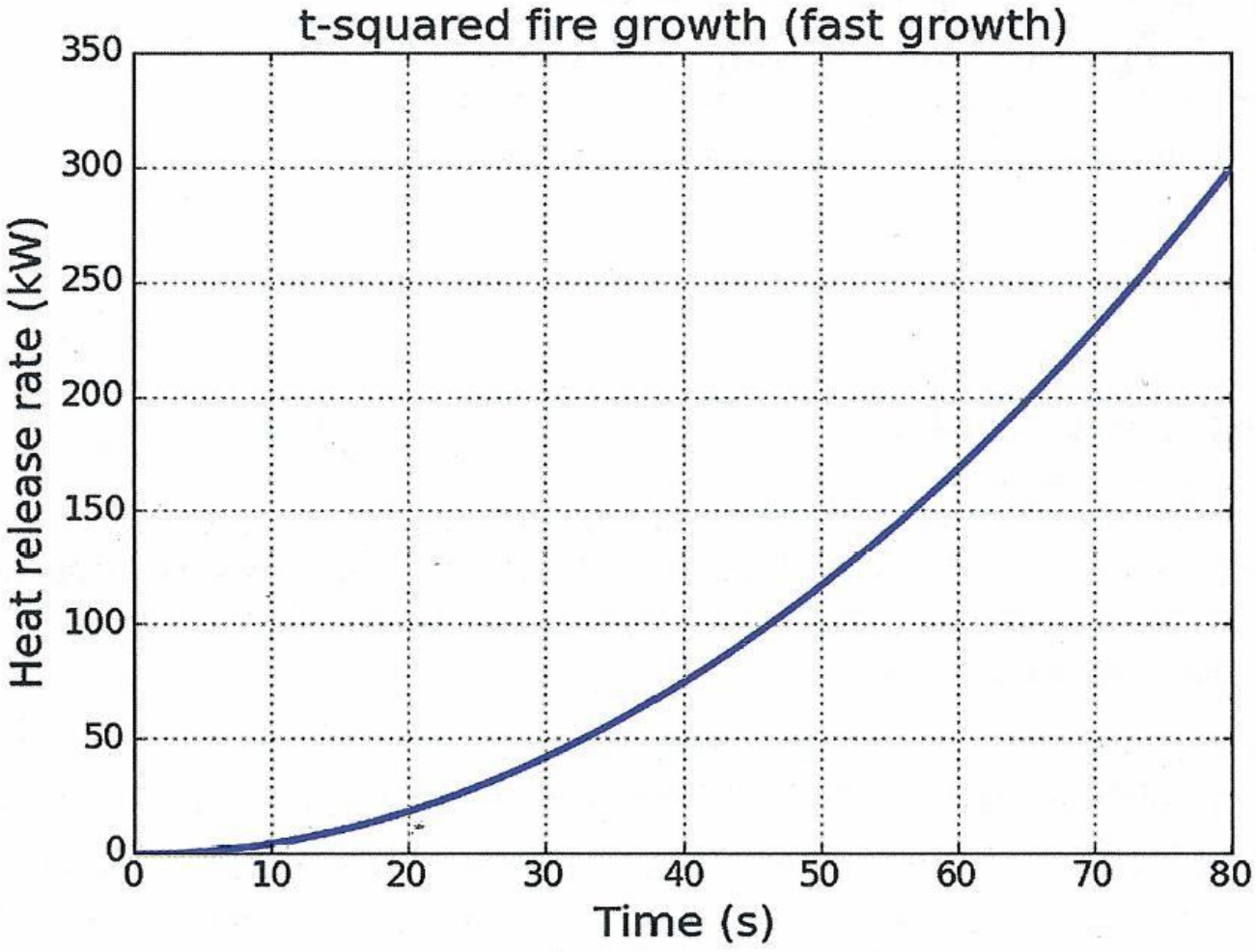


CURVE NOMINALI D'INCENDIO



Le curve nominali sono curve convenzionali ben riproducibili in laboratorio. Manca la fase di raffreddamento.

FOCOLARE PREDEFINITO (ATTIVITÀ CIVILI)



II FASE

Come si è visto, nel Codice il quarto passo della **prima fase** *(procedura di **identificazione**, **selezione** e **quantificazione** degli scenari di incendio di progetto)*, è descritta nel **Capitolo M.2**.

Ultimata la descrizione dei 4 passi della **prima fase**, si passa alla **seconda fase**, trattata al **§ M.1.4** del Codice.

Dopo aver trattato “Metodologie” e “Scenari d’incendio” di cui ai Capitoli M.1 e M.2, si passa ad esaminare l’ultimo Capitolo del Codice:

Capitolo M.3:

Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale

M.3) SALVAGUARDIA DELLA VITA CON LA PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE

Lo studio dell'**esodo** è molto **complesso** in quanto governato **dall'interazione** dell'**occupante** con l'**edificio** e l'**incendio**.

Le specifiche regole tecniche di prevenzione incendi trattano l'esodo in funzione di elementi fisico-geometrici *(layout, moduli d'uscita, …)*, **trascurando le componenti comportamentali** delle persone, ecc.

La FSE può considerare gli aspetti **comportamentali, geometrici** *(layout, sistema d'esodo, ecc.)* e **ambientali** *(presenza degli effetti deleteri dell'incendio sulle persone)*.

PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE PER LA SALVAGUARDIA DELLA VITA

Criterio ideale

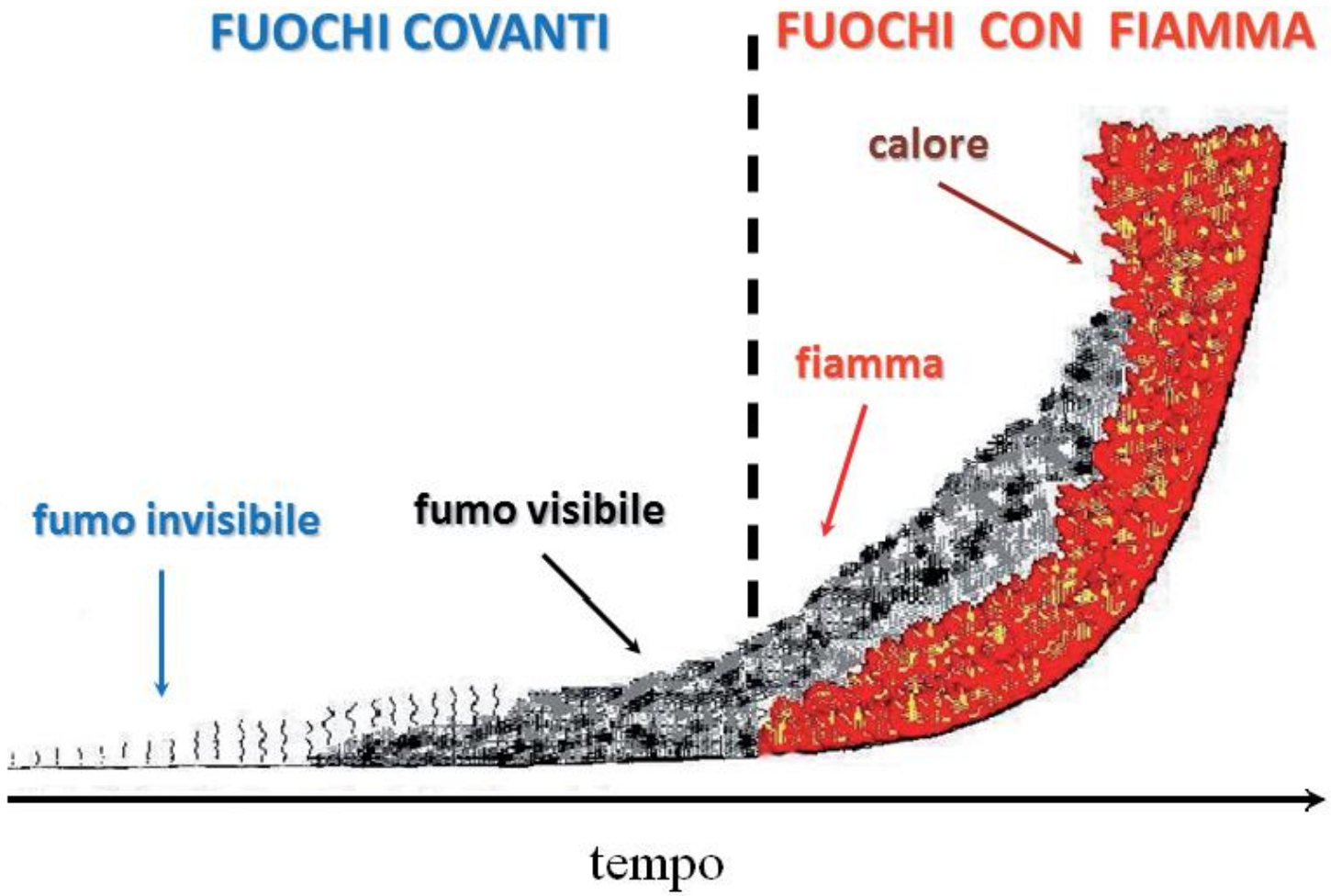
La progettazione ideale dovrebbe assicurare agli occupanti di **raggiungere** un **luogo sicuro** senza neanche accorgersi degli effetti dell'incendio.

Non sempre è applicabile, in particolare per gli occupanti che si trovano nel compartimento di primo innesco dell'incendio.

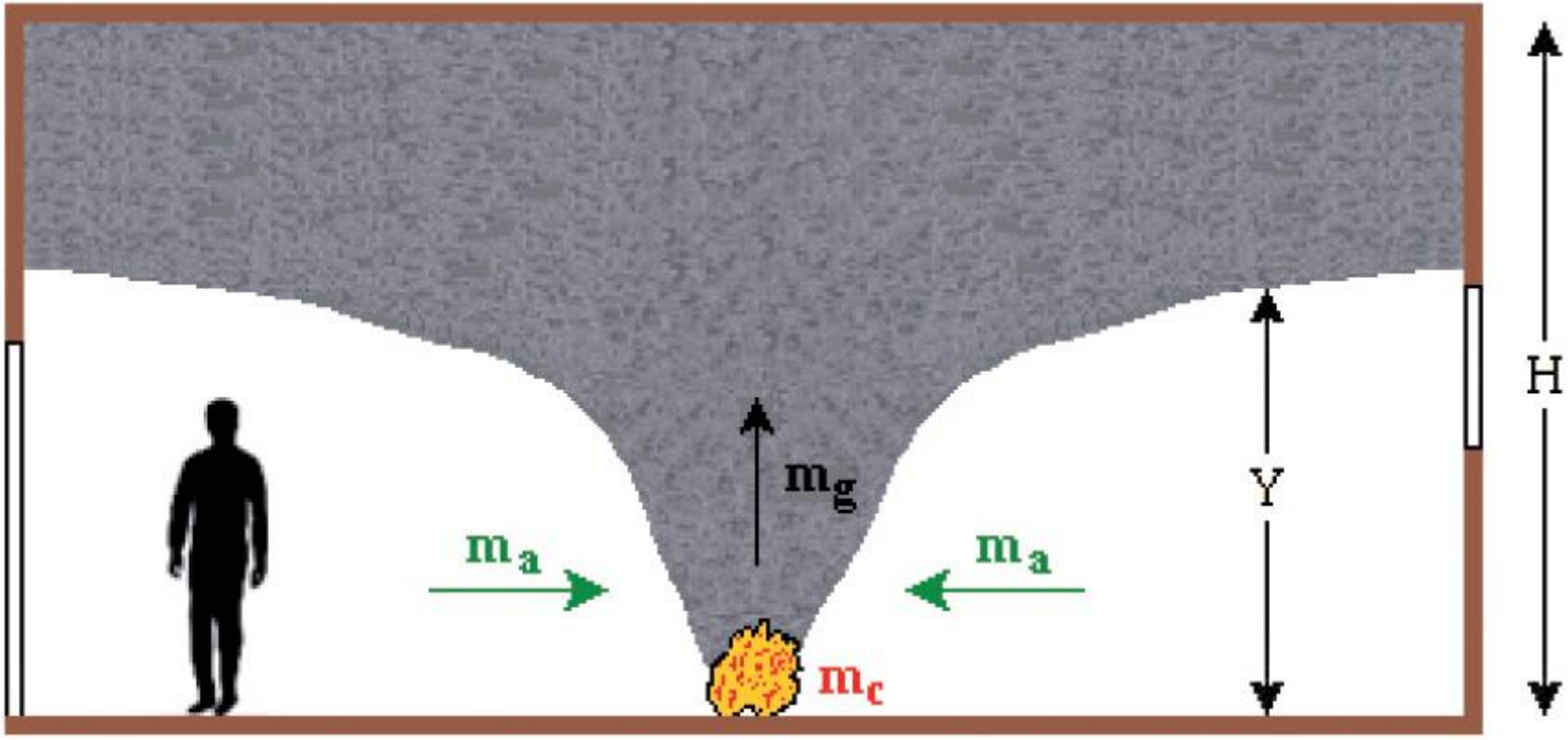
Criterio di ASET > RSET

Il **tempo ASET disponibile** per l'esodo deve essere **maggiore** del **tempo RSET richiesto** per l'esodo.

PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE CHE SI LIBERANO NELL'AMBIENTE CON IL PROGREDIRE DELL'INCENDIO

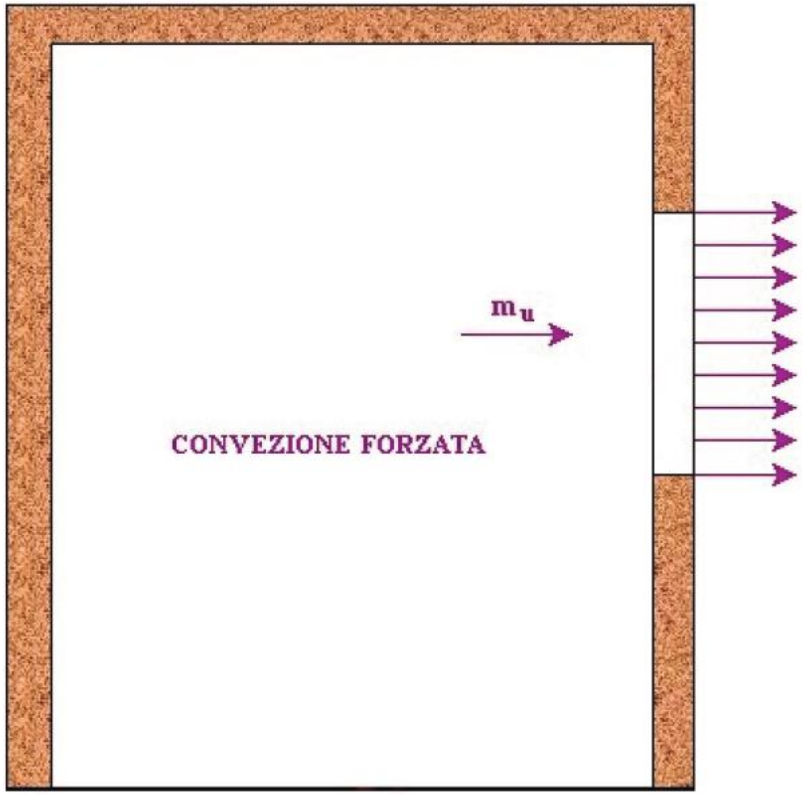


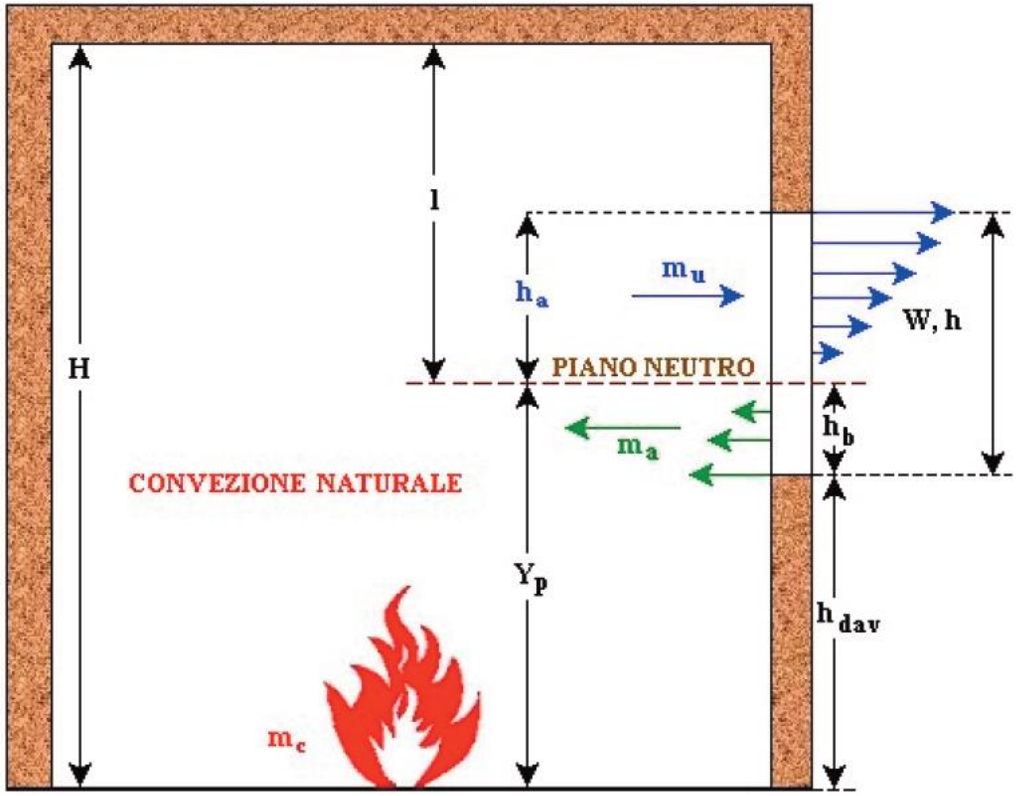
PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE PER LA SALVAGUARDIA DELLA VITA



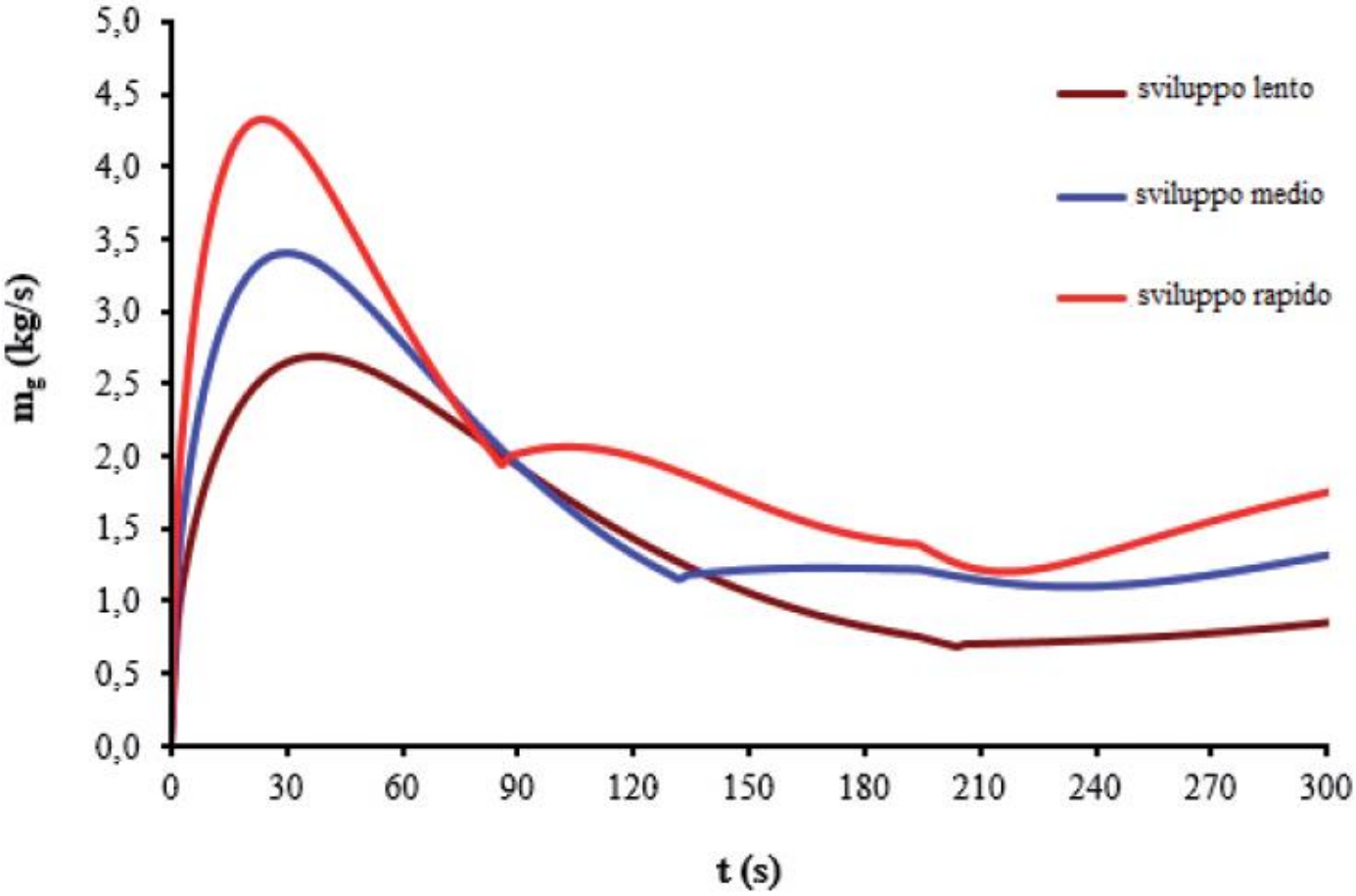
$$m_g \cong m_a$$

PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE PER LA SALVAGUARDIA DELLA VITA





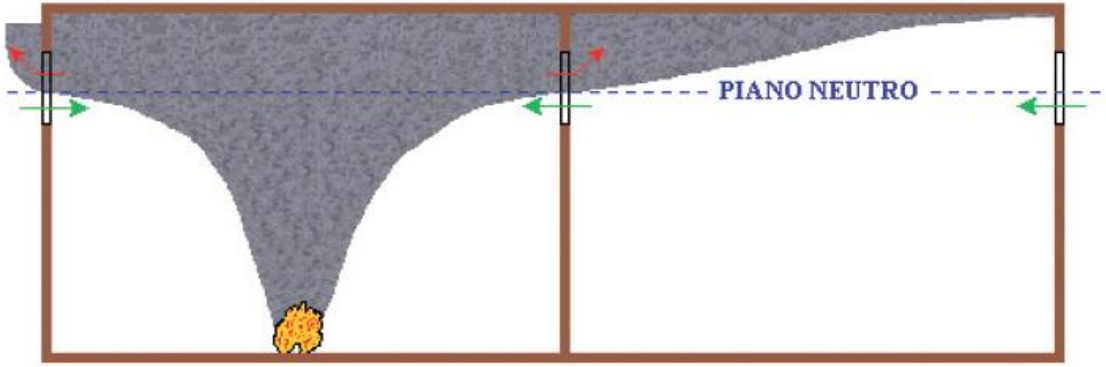
PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE PER LA SALVAGUARDIA DELLA VITA

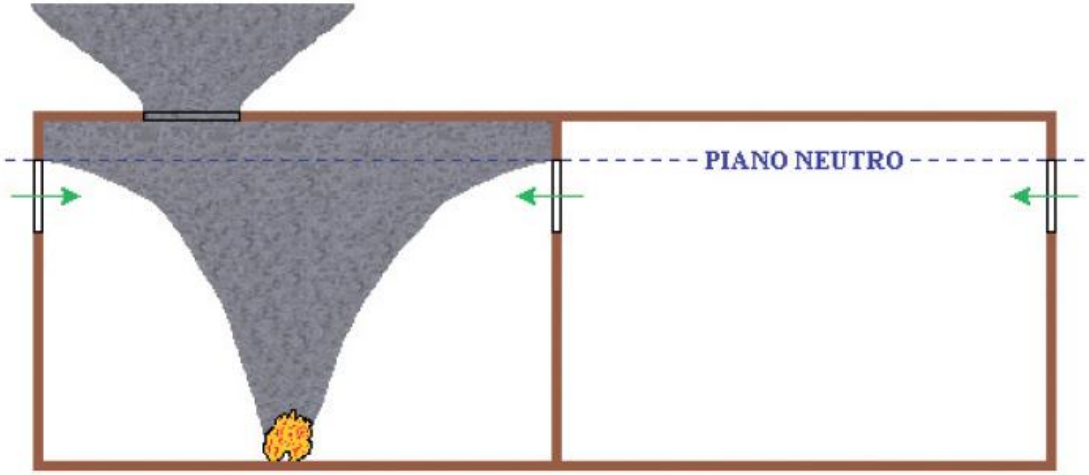


$$m_g = 0{,}071 \cdot RHR_c^{0{,}333} \cdot (Y - z_0)^{1{,}666} + 0{,}0019 \cdot RHR_c$$

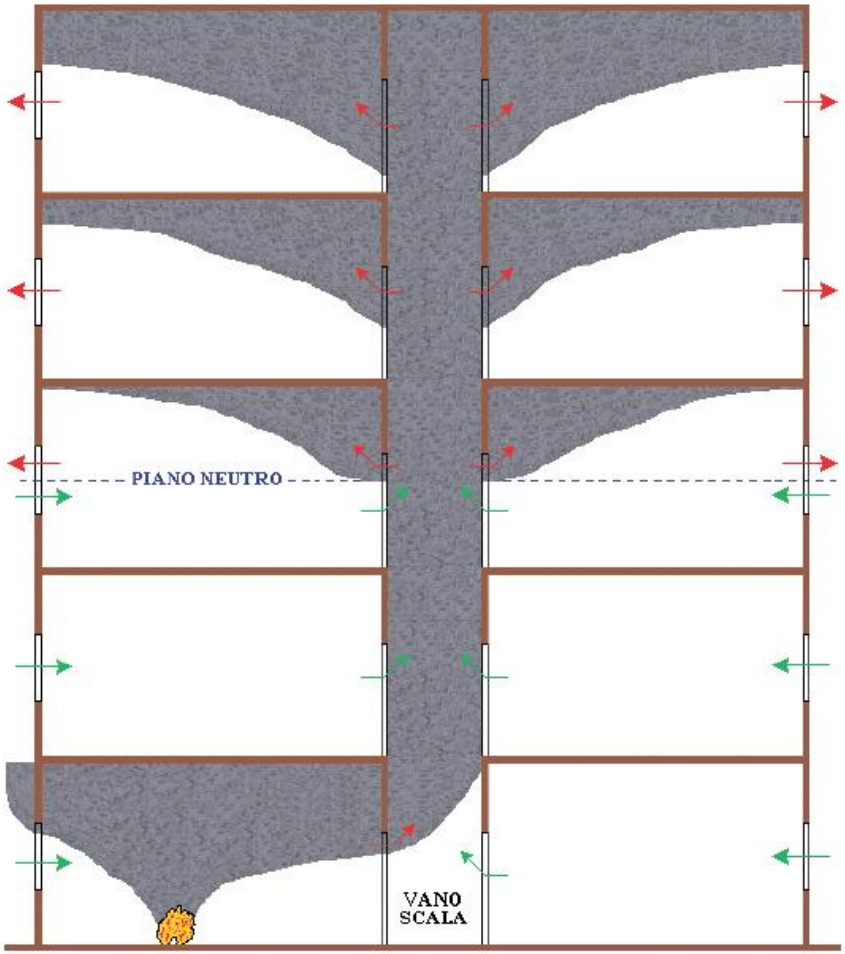
PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE PER LA SALVAGUARDIA DELLA VITA

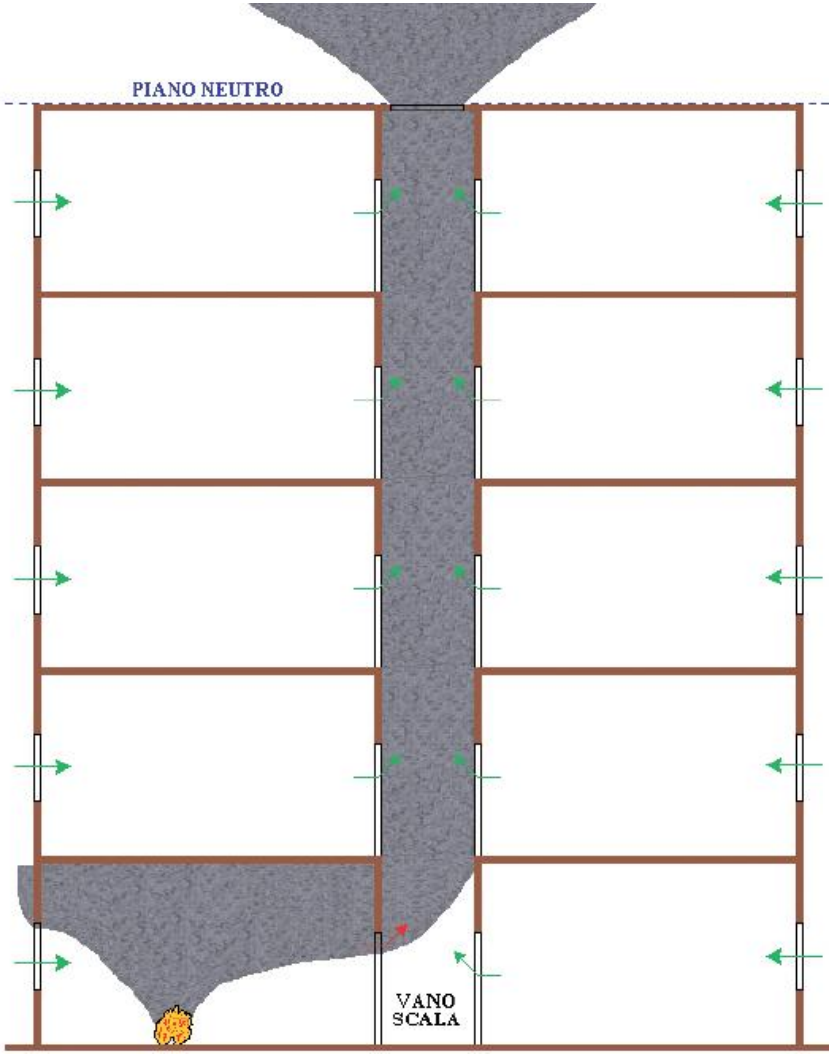
PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE PER LA SALVAGUARDIA DELLA VITA





PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE PER LA SALVAGUARDIA DELLA VITA





Criterio di ASET > RSET

Definizioni

ASET (*available safe escape time*): tempo tra innesco e quando le condizioni diventano tali da rendere occupanti incapaci di salvarsi. Comporta la valutazione quantitativa degli **effetti dell'incendio** *(esposizione a gas tossici asfissianti e irritanti, perdita di visibilità per fumi, esposizione al calore per irraggiamento e convezione)*.

RSET (*required safe escape time):* tempo tra innesco e momento in cui gli occupanti raggiungono un luogo sicuro.

Il **calcolo**, dipendendo dalle interazioni tra incendio, edificio e occupanti, è **complesso** dovendo considerare anche **situazioni comportamentali** degli occupanti, non facilmente quantificabili.

Criterio di ASET > RSET

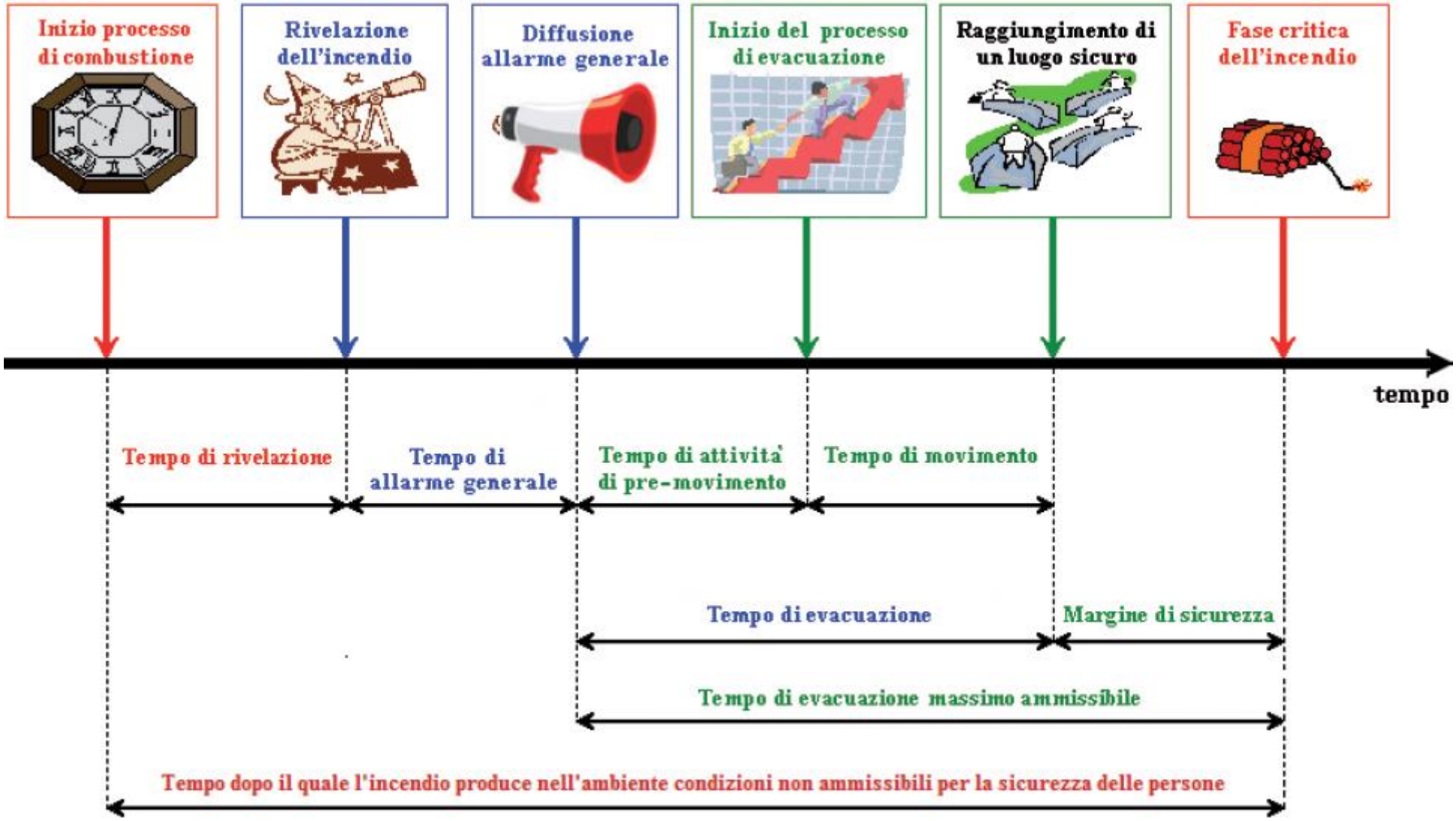
Il tempo in cui permangono condizioni non incapacitanti per occupanti deve essere superiore al tempo necessario perché possano raggiungere luogo sicuro.

La **differenza tra ASET** *(available safe escape time)* **e RSET** *(required safe escape time)* rappresenta il **margine di sicurezza**.

$$t_{marg} = ASET - RSET$$

Tenuto conto dell'incertezza nel calcolo di ASET e RSET, il professionista antincendio renderà **massimo t_{marg}** in relazione alle ipotesi assunte tra varie soluzioni progettuali.

Confronto tra ASET e RSET



Margine di sicurezza

A meno di specifiche valutazioni, si assume **$t_{marg} \geq 100\% \cdot RSET$**.

In caso di specifiche valutazioni sull'affidabilità dei dati di input impiegati nella progettazione prestazionale, che devono essere supportati da letteratura tecnica consolidata, è consentito assumere **$t_{marg} \geq 10\% \cdot RSET$**.

In ogni caso **$t_{marg} \geq 30$ s**.

CALCOLO DI ASET (Avalaible safe escape time)

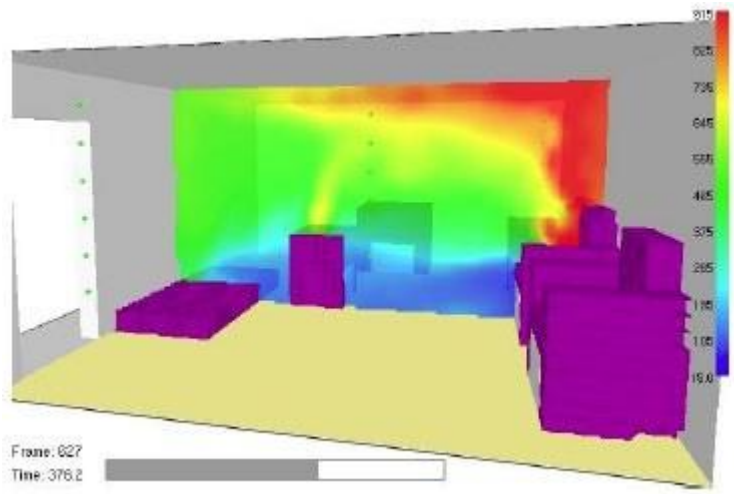
Metodo avanzato

– modello dei gas tossici,

– modello dei gas irritanti,

– modello del calore,

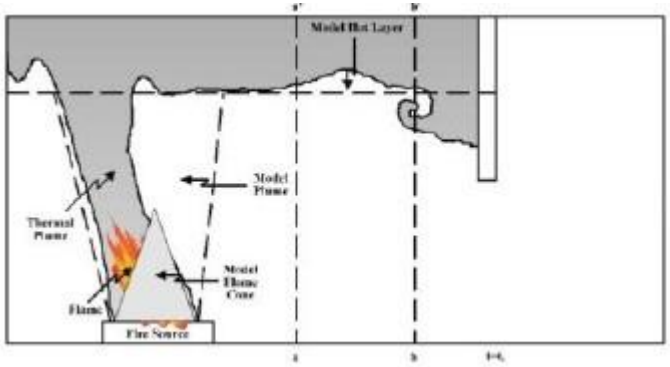
– modello della visibilità.



Metodo semplificato

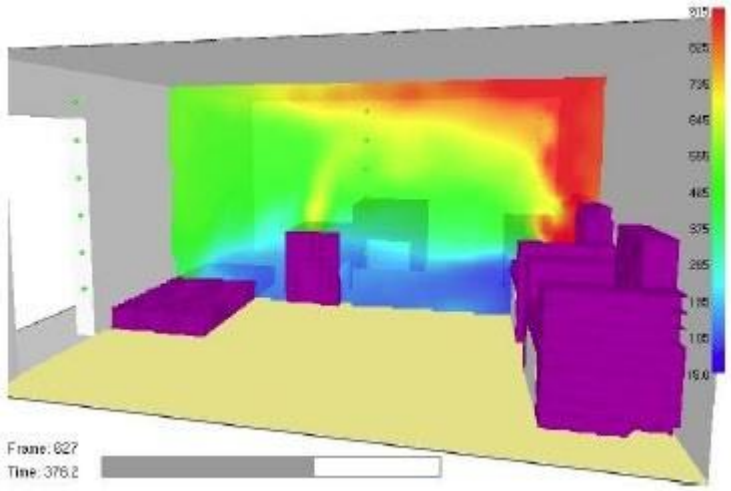
– altezza fumi > 2 m

– temperatura fumi < 200 °C



Metodo di calcolo avanzato per ASET

Il calcolo richiede la stima delle concentrazioni di prodotti **tossici**, **temperature**, densità **fumo** e loro variazione nel tempo *(poiché gli occupanti possono muoversi)*, in genere elaborata con modelli di calcolo fluidodinamici.

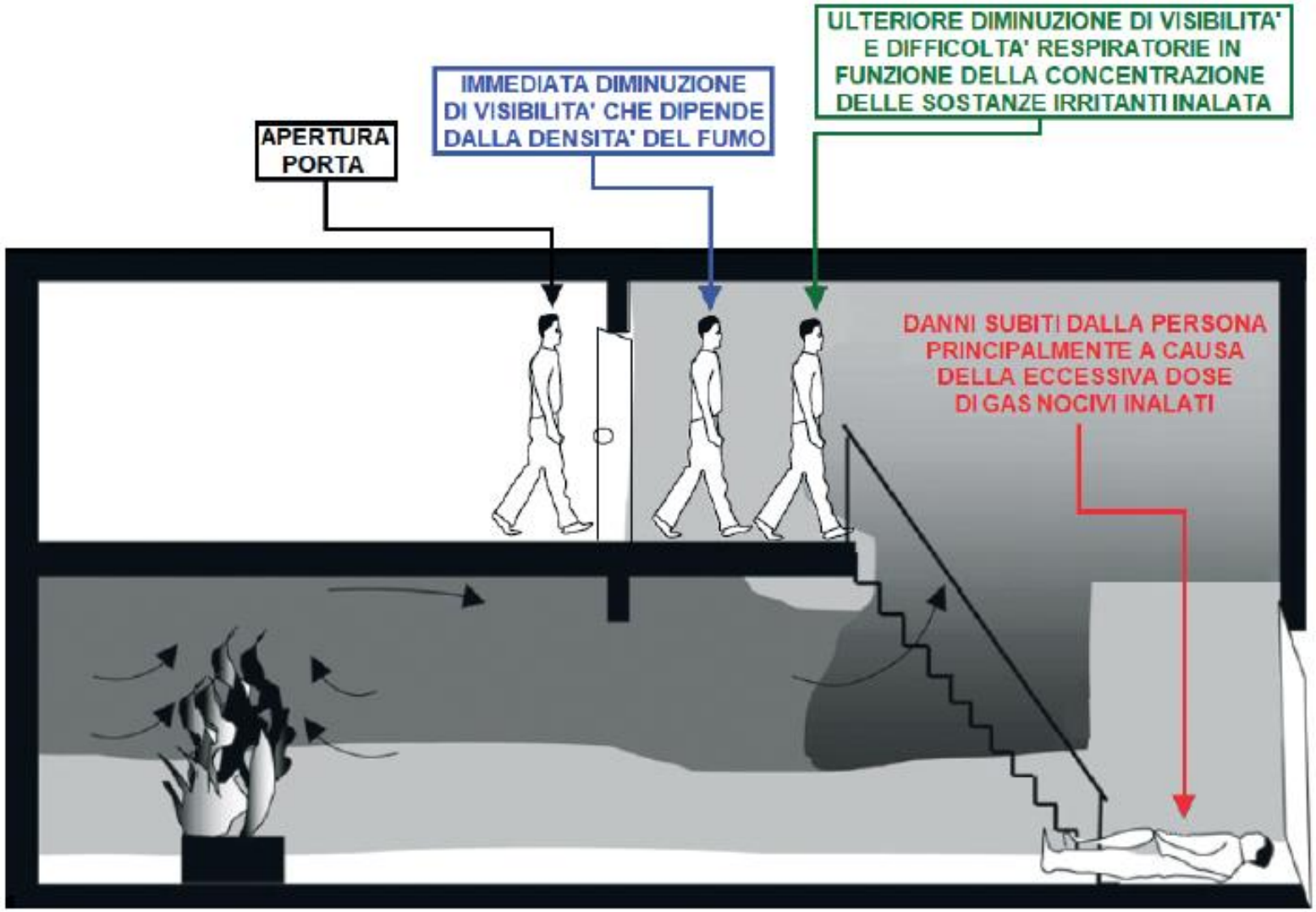


La **norma ISO 13571** è il riferimento più autorevole.

ASET globale è definito come il **minore tra quelli calcolati** secondo i **4 modelli** *(gas tossici, gas irritanti, calore, visibilità)*.

Il Codice fornisce indicazioni sull'applicazione di tali modelli.

Effetti ai quali può essere sottoposta una persona durante un incendio



METODI DI CALCOLO DI ASET

CALCOLO ASET

metodo di calcolo **avanzato**

ISO 13571

- **Modello gas tossici**
- **Modello gas irritanti**
- **Modello del calore**
- **Modello della visibilità**

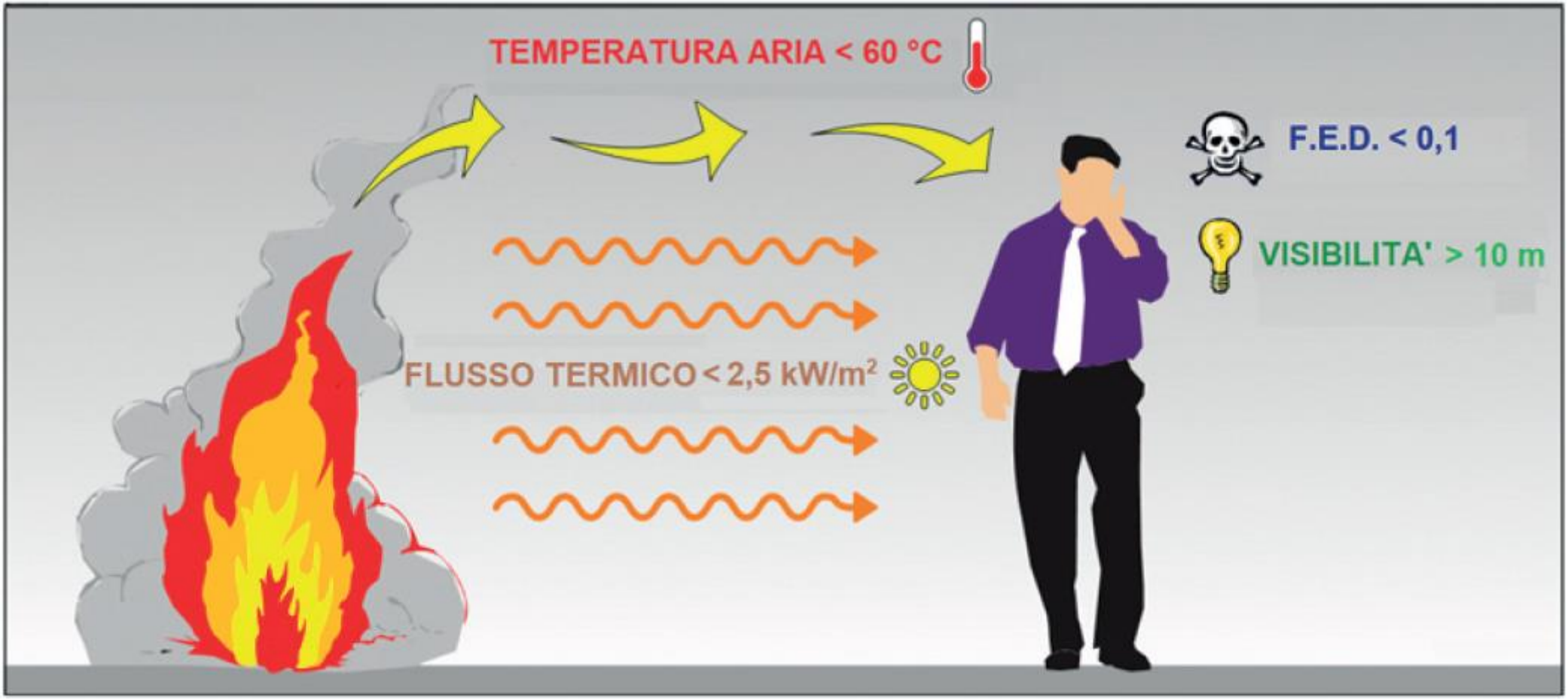
ASET globale è definito come il più piccolo tra gli ASET calcolati secondo i quattro modelli

metodo di calcolo **semplificato**

ISO/TR 16738

Esposizione zero

Metodo di calcolo avanzato per ASET



Modello gas tossici

Il modello impiega il concetto di **dose inalata** (*exposure dose*) e di **FED** *(fractional effective dose)*.

exposure dose: dose di un gas tossico presente nell'aria inspirata.

FED: rapporto tra *exposure dose* e *dose incapacitante* del gas tossico (determina effetti incapacitanti su soggetto medio esposto).

Per FED = 1 ⇨ il soggetto medio è incapacitato.

Es. dose incapacitante CO = 35000 ppm · min.

Soggetto medio esposto a concentraz. 3500 ppm per 10 min. è incapacitato.

In tal caso FED = 1 e ASET per CO = 10 min.

Modello gas tossici

$$FED = \sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{T} \frac{C_i\,(t)}{(C \cdot t)_i} \cdot V_{CO_2}\,(t) \cdot dt = \left(\frac{C_{CO}}{35000} + \frac{C_{HCN}^{2,36}}{2,43 \cdot 10^7} \cdot V \right) \cdot V_{CO_2} \cdot T$$

Modello gas irritanti

Il modello gas irritanti impiega il concetto di **FEC** *(fractional effective concentration).*

***FEC**:* rapporto tra concentrazione di un gas irritante disponibile per inalazione e quella che determina effetti incapacitanti sul soggetto medio esposto.

La verifica del modello gas irritanti **può essere omessa**, se negli scenari di incendio di progetto non siano identificati nel focolare materiali combustibili suscettibili di costituire specifica sorgente di gas irritanti *(es. sostanze o miscele pericolose, cavi elettrici in quantità significative...)*.

Modello calore

Per il modello calore irraggiato e convettivo è proposto un approccio, basato sulla FED, simile a quello dei gas tossici.

$$X_{FED} = \sum_{t1}^{t2} \left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \Delta t$$

t_{Irad} e t_{Iconv} : tempi di incapacitazione per calore radiante e calore convettivo calcolati con altre relazioni in funzione della condizione di abbigliamento dei soggetti (norma ISO 13571).

Assumendo conservativamente le seguenti soglie di prestazione:

- *irraggiamento sugli occupanti ≤ 2,5 kW/m²;*
- *temperatura ambiente sugli occupanti ≤ 60°C.*

si ha ASET > 30 min per qualsiasi condizione di abbigliamento.

MODELLO DEL CALORE

La norma ISO 13571 consente di stimare il tempo t di esposizione al flusso termico convettivo mediamente necessario per provocare l'incapacità di agire in una persona nuda, o vestita con abiti leggeri, a riposo; in tale caso nella norma viene indicata, in funzione della temperatura T dell'aria inalata, la seguente espressione che è valida per esposizioni inferiori a 2 h e nel caso che l'aria abbia una umidità relativa minore del 10%:

$$t = 5 \cdot 10^{7} \cdot T^{-3,4}$$

dove la temperatura dell'aria è espressa in °C ed il tempo è valutato in min; invece, se la persona è normalmente vestita, il suddetto tempo aumenta ed è pari a:

$$t = 4,1 \cdot 10^{8} \cdot T^{-3,61}$$

MODELLO DEL CALORE

Valori di flusso termico radiante inferiori a 2,5 kW/m^2 possono essere sopportati da una persona per almeno 30 min e non ne pregiudicano la capacità di svolgere la fase di esodo.
Per valori maggiori di 2,5 kW/m^2, il tempo dopo il quale si producono sulla pelle ustioni di secondo grado può ricavarsi, in prima approssimazione, dalla seguente espressione:

$$t = 6{,}9 \cdot q^{-1{,}56}$$

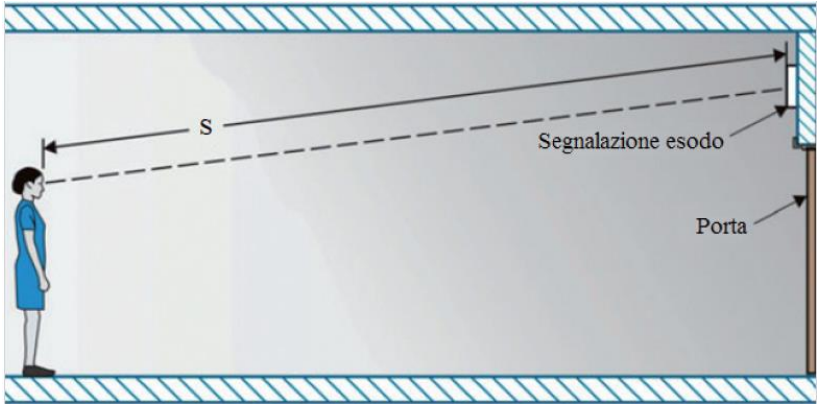
dove il tempo t è espresso in min e il flusso termico radiante q in kW/m^2.

Il tempo t, espresso in min, dopo il quale una persona esposta a un flusso termico radiante q, valutato in kW/m^2, avverte una sensazione di dolore è:

$$t = 4{,}2 \cdot q^{-1{,}9}$$

Modello visibilità

Il modello oscuramento visibilità da fumo è basato sul concetto del **minimo contrasto percettibile** *(minima differenza di luminosità visibile oggetto-sfondo).*



Correlazione tra visibilità (L) e massa volumica fumi (ρ_{smoke}):

$$C = \sigma \cdot \rho_{smoke} \cdot S$$

- S visibilità [m]
- C costante adimensionale *(3 per cartellonistica esodo semplicemente riflettente non illuminata, 8 per cartellonistica retroilluminata);*
- σ coefficiente massico di estinzione luce (= 8,7 m^2/g_{fumo});
- ρ_{smoke} massa volumica fumi *(smoke aerosol mass concentration)*[g/m^3].

Soglia di prestazione per FED e FEC

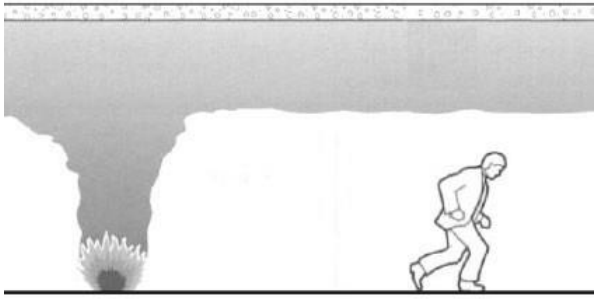
FED e FEC = 1 sono associati a effetti incapacitanti dell'esodo su occupanti di media sensibilità agli effetti dell'incendio.

Per **tenere conto delle categorie più deboli** o più sensibili della popolazione, che risulterebbero incapacitate ben prima, si considera ragionevole impiegare il valore **0,1** come *soglia di prestazione* per **FED** e **FEC** *(limitando a 1,1% gli occupanti incapacitati al raggiungimento della soglia secondo ISO 13571)*.

Il professionista antincendio dovrà selezionare e giustificare il valore più adatto alla tipologia di popolazione coinvolta.

Metodo di calcolo semplificato per ASET

Il rapporto tecnico ISO/TR 16738 consente di utilizzare l'ipotesi semplificativa della **"esposizione zero"**, impiegando seguenti **soglie di prestazione**, molto **conservative**:



– altezza fumi > 2 m

– temperatura fumi < 200 °C

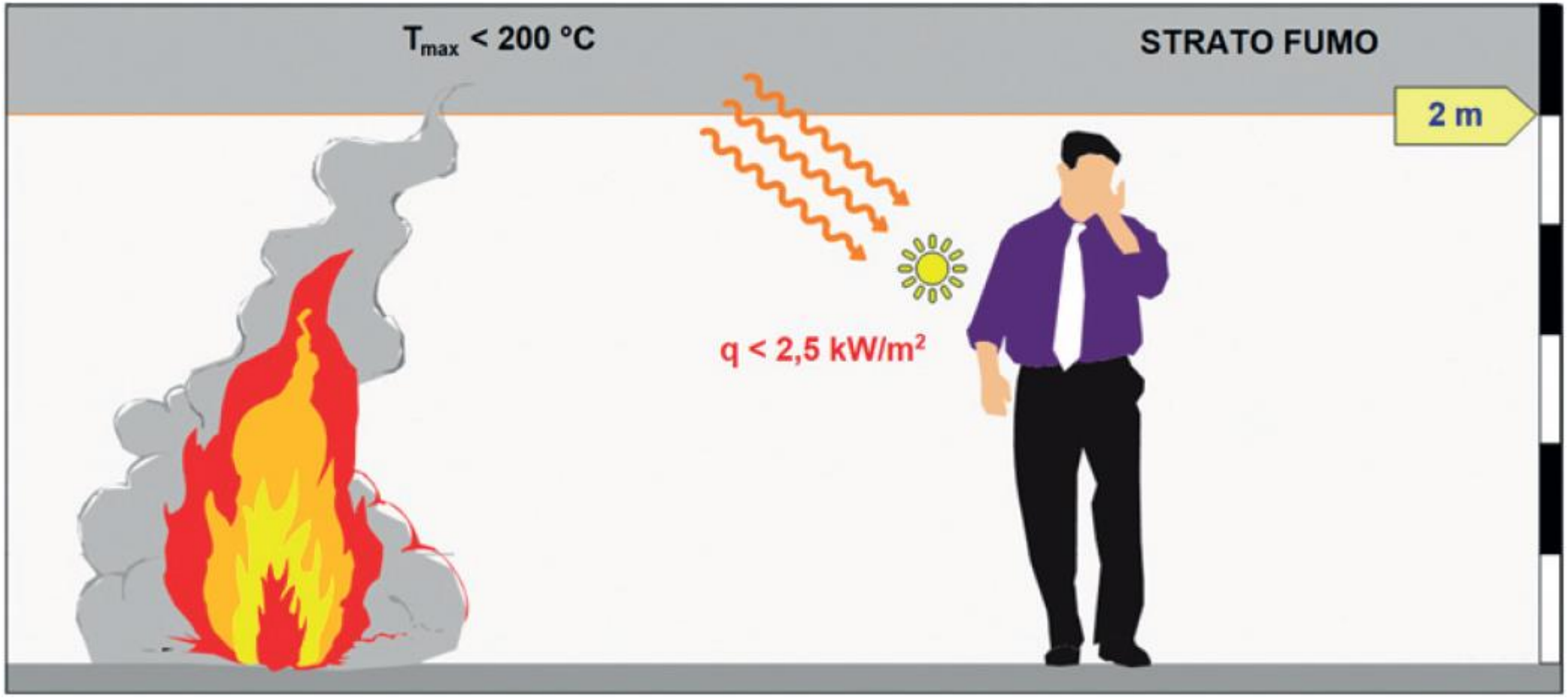
Ciò consente l'**esodo in ambiente non inquinato** dai fumi, e un valore dell'**irraggiamento dai fumi** < 2,5 kW/m^2.

Sono **automaticamente soddisfatti** tutti i **modelli**.

È sufficiente valutare analiticamente o con modelli numerici a zone o di campo l'**altezza dello strato dei fumi** *pre-flashover* nell'edificio.

Il professionista antincendio deve **accertare il campo di applicabilità**, cioè che si verifichi la **formazione dello strato di fumi caldi superiore**.

Metodo di calcolo semplificato per ASET



CALCOLO DI RSET (Required safe escape time)

Nell'analisi prestazionale dell'esodo **non è facile** valutare l'interazione tra occupante, edificio e incendio, a causa degli **aspetti comportamentali** delle persone.

In genere gli occupanti, anche a seguito di allarmi, percezione di fumo, comunicazioni di altre persone, ecc., impiegano parte del **tempo in attività non** immediatamente **rivolte all'evacuazione**;

Si attiva un processo di validazione continuo di ricezione, riconoscimento, interpretazione e di decisione in risposta agli indizi.

Ciò può costituire una **parte non trascurabile del tempo** impiegato per raggiungere un luogo sicuro.

CALCOLO DI RSET

È calcolato **tra l'innesco** dell'incendio e il momento in cui gli occupanti dell'edificio raggiungono un **luogo sicuro**.

RSET è determinato da varie componenti:

- t_{det} : tempo di rivelazione *(detection)*
- t_a : tempo di allarme generale
- t_{pre} : tempo di attività pre-movimento *(pre-travel activity time)*
- t_{tra} : tempo di movimento *(travel)*

$$\mathbf{RSET = \Delta t_{det} + \Delta t_a + \Delta t_{pre} + \Delta t_{tra}}$$

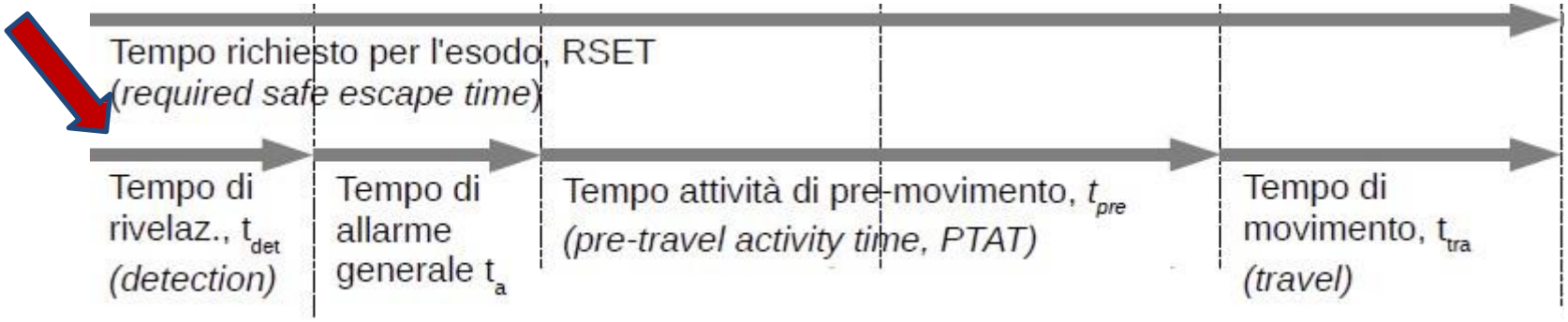
I parametri variano molto se gli occupanti sono svegli e hanno familiarità con l'edificio, o dormono e non conoscono la struttura.

Tempo di rivelazione (t_{det})

Tempo **necessario al sistema di rivelazione automatico per rilevare l'incendio**.

Dipende dal tipo di sistema di rivelazione e dallo scenario d'incendio.

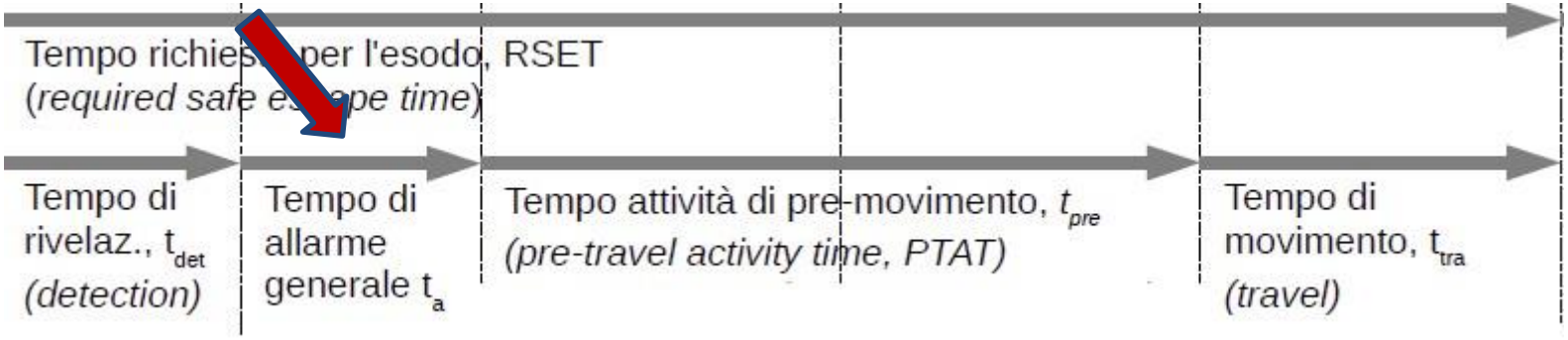
È **calcolato analiticamente** o con **apposita modellizzazione** numerica degli scenari d'incendio e del sistema di rivelazione.



Tempo di allarme generale (t_a)

Tempo che intercorre **tra la rivelazione dell'incendio e la diffusione dell'informazione** agli occupanti.

- È pari a zero, se la rivelazione attiva direttamente l'allarme.
- È pari al ritardo valutato dal professionista antincendio, se la rivelazione allerta una centrale di gestione dell'emergenza che verifica l'evento ed attiva poi l'allarme manuale.



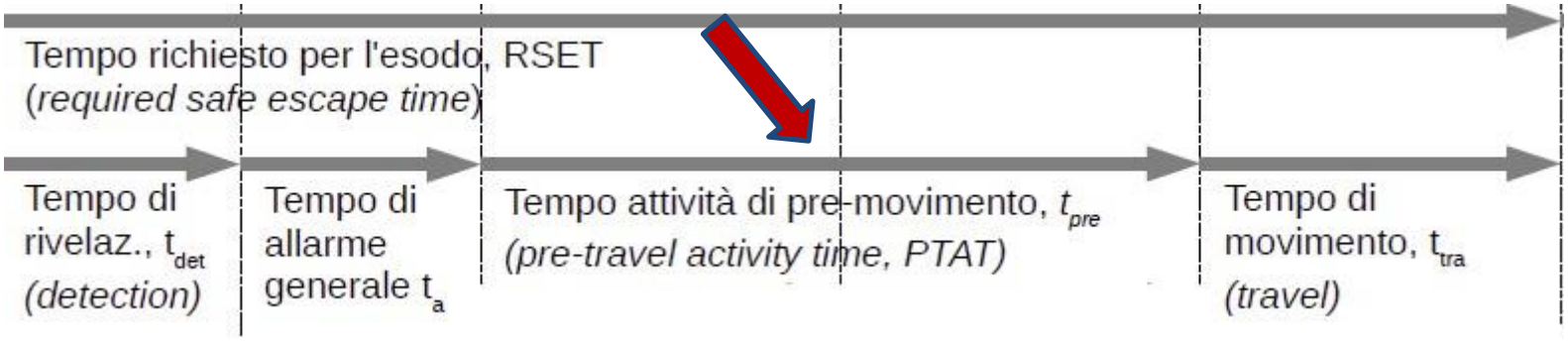
Tempo rivelazione e di allarme generale (t_{det} + t_a)

R_{vita}	t_{det} + t_a (s)	Descrizione
A1	360	Attività a basso rischio, probabilmente sprovviste di IRAI, basso livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio
A2	180	Attività probabilmente provviste di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio
A3	120	Attività dotate di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio-elevato, addetti formati al rischio antincendio, compartimenti di ridotte dimensioni
A4	120	Attività dotate di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio elevato, addetti formati al rischio antincendio, compartimenti di ridotte dimensioni
B1	360	Attività a basso rischio, probabilmente sprovviste di IRAI, basso livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio, presenza di pubblico non specificamente formato
B2	180	Attività dotate di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio, addetti formati al rischio antincendio, presenza di pubblico non specificamente formato
B3	180	Attività dotate di IRAI e probabilmente di sistema EVAC, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio-elevato, addetti formati al rischio antincendio, presenza di pubblico non specificamente formato, compartimenti di ridotte dimensioni
Ciii1	360	Attività a basso rischio probabilmente sprovviste di IRAI, basso livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio, presenza di pubblico non specificamente formato
Ciii2	180	Attività dotate di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio, addetti formati al rischio antincendio, presenza di pubblico non specificamente formato
Ciii3	180	Attività dotate di IRAI e probabilmente di sistema EVAC, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio-elevato, addetti formati al rischio antincendio, presenza di pubblico non specificamente formato, compartimenti di ridotte dimensioni
D1	240	Attività dotate di IRAI e di sistema EVAC, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio-elevato, addetti formati al rischio antincendio, presenza di occupanti non autosufficienti, presenza di pubblico non specificamente formato, compartimenti di ridotte dimensioni
D2	180	Attività dotate di IRAI e di sistema EVAC, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio elevato, addetti formati al rischio antincendio, presenza di occupanti non autosufficienti, presenza di pubblico non specificamente formato, compartimenti di ridotte dimensioni
E1	600	Attività probabilmente dotate di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio-basso, elevata complessità geometrica
E2	360	Attività probabilmente dotate di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio, elevata complessità geometrica
E3	180	Attività dotate di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio-elevato, elevata complessità geometrica

Tempo di attività pre-movimento (t_{pre})

È composto dal tempo di *riconoscimento (recognition)* e di *risposta (response)*.

- Durante il **tempo di riconoscimento** gli occupanti continuano le attività che stavano svolgendo, finché riconoscono l'esigenza di rispondere all'allarme.
- Nel **tempo di risposta** gli occupanti cessano le loro attività normali e si dedicano ad attività legate all'emergenza.



Tempo di attività pre-movimento (t_{pre}) – Scenario comportamentale di progetto

Tipologia sistema di allarme	**Livello A1**	Rivelazione automatica estesa a tutto l'edificio in grado di attivare un immediato allarme generale in ogni parte dell'edifico (t_a = 0). Se viene utilizzato un sistema di segnalazione verbale il tempo del messaggio dovrà essere aggiunto al tempo di allarme.
	Livello A2	Il sistema di rivelazione è collegato con un pre-allarme indirizzato in un luogo presidiato, che può quindi attivare l'allarme generale; t_a ha un certo ritardo (2 - 5 min). Se viene utilizzato un sistema di segnalazione verbale il tempo del messaggio dovrà essere aggiunto al tempo di allarme.
	Livello A3	Sistema di rivelazione ed allarme solo nelle vicinanze del luogo in cui si è verificato l'incendio, con attivazione manuale dell'allarme; t_a risulta difficilmente stimabile.
Complessità edificio	**Livello B1**	Edificio a pianta semplice ed un solo piano, semplice layout ed un buon accesso visivo alle condizioni interne, moderate distanze per raggiungere uscite di emergenza che conducono direttamente all'esterno.
	Livello B2	Semplice edificio in cui sono presenti più ambienti su piani diversi, con caratteristiche rispondenti alle indicazioni prescrittive e semplice layout interno.
	Livello B3	Rappresenta un edificio complesso. Questa tipologia considera complessi costituiti da più edifici tra loro integrati (centri commerciali, aeroporti, ecc.). Per la complessità e le dimensioni possono presentare difficoltà nel *wayfinding* durante una evacuazione e la gestione dell'emergenza presenta comunque particolari necessità.
Efficacia gestione sicurezza	**Livello M1**	Gli occupanti sono normalmente addestrati ad un buon livello di gestione della sicurezza antincendi e nella gestione della prevenzione e manutenzione. Il piano di emergenza è ben strutturato con prove effettuate regolarmente. Qualora siano presenti persone che non hanno familiarità con l'ambiente, esiste un buon rapporto tra il personale addestrato ed i visitatori.
	Livello M2	Come il livello M1 ma con uno staff meno articolato e personale di vigilanza non sempre presente.
	Livello M3	Rappresenta standard con un livello minimo di gestione della sicurezza. Non viene effettuato alcun audit. Non è disponibile alcun progetto ingegneristico relativamente al rischio incendio e vengono attuate misure di prevenzione incendi derivanti da altre considerazioni. Alto livello di protezione attiva e/o passiva antincendio.

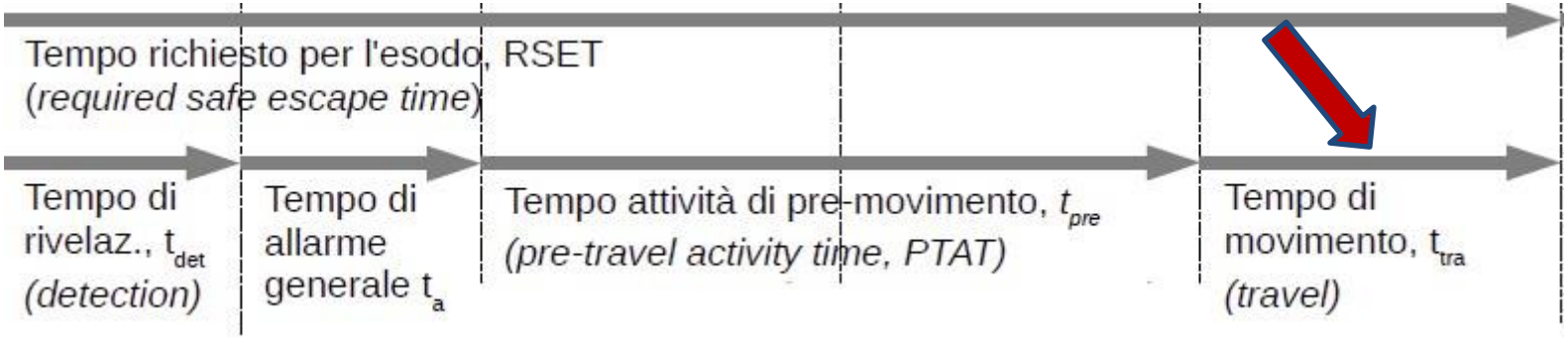
Tempo di attività pre-movimento (t_{pre})

R_{vita}	$\Delta t_{pre\ (1st)}$	$\Delta t_{pre\ (99th)}$	Descrizione (tabella E.2 - ISO/TR 16738)
A1	60	180	A: Awake and familiar, M2 B1-B2 A1-A2
A2	60	180	A: Awake and familiar, M2 B1-B2 A1-A2
A3	30	90	A: Awake and familiar, M1 B1-B2 A1-A2
A4	30	90	A: Awake and familiar, M1 B1-B2 A1-A2
B1	60	240	B: Awake and unfamiliar, M2 B1 A1-A2
B2	60	240	B: Awake and unfamiliar, M2 B1 A1-A2
B3	30	150	B: Awake and unfamiliar, M1 B1 A1-A2
Ciii1	1200	2400	C: Sleeping and unfamiliar, M2 B2 A1-A2
Ciii2	900	1800	C: Sleeping and unfamiliar, M1 B2 A1-A2
Ciii3	900	1800	C: Sleeping and unfamiliar, M1 B2 A1-A2
D1	600	1200	D: Medical care: Sleeping and unfamiliar, M2 B2 A1-A2
D2	300	600	D: Medical care: Sleeping and unfamiliar, M1 B2 A1-A2
E1	120	300	E: Awake and unfamiliar, M2 B3 A1-A3
E2	90	240	E: Awake and unfamiliar, M1 B3 A1-A3
E3	90	240	E: Awake and unfamiliar, M1 B3 A1-A3

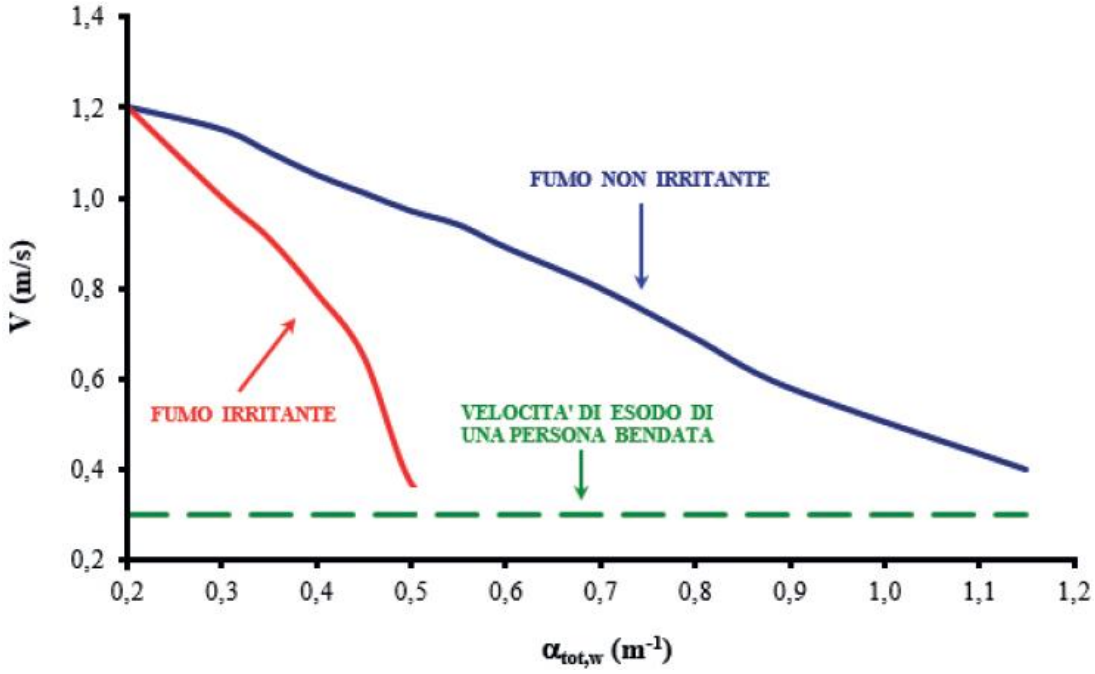
Tempo di movimento (t_{tra})

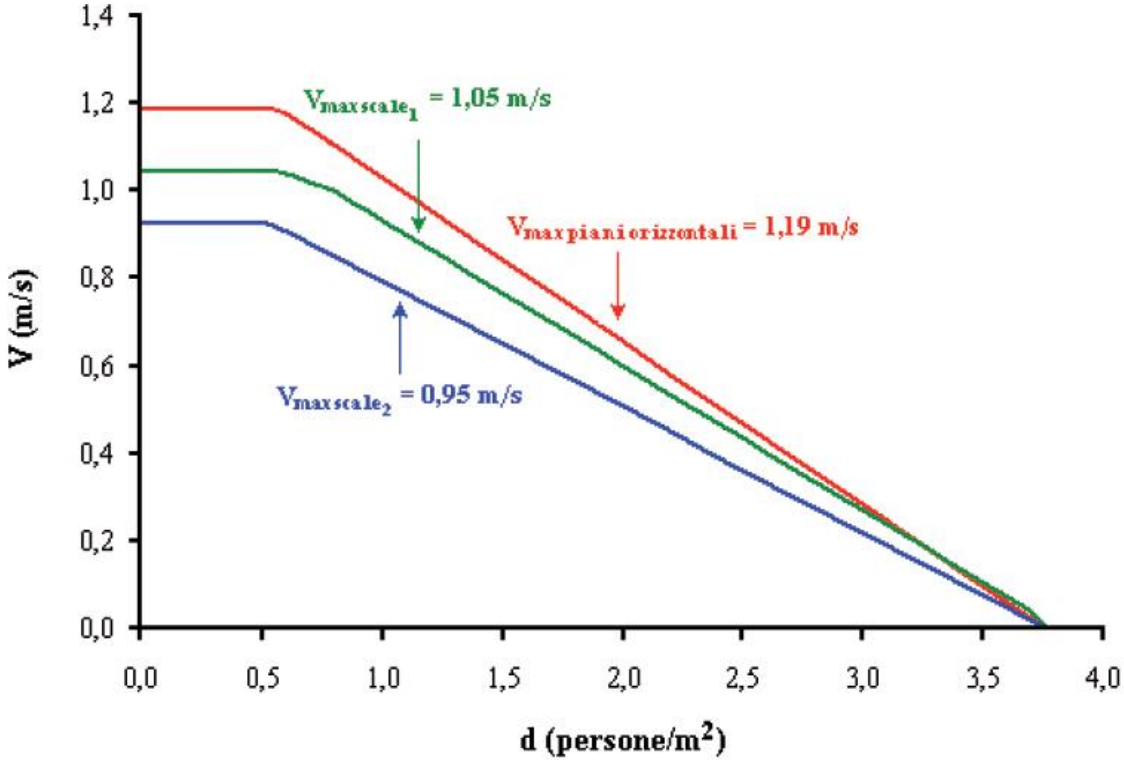
Tempo **impiegato dagli occupanti per raggiungere un luogo sicuro** dal termine delle attività di pre-movimento. Dipende da:

- Distanza degli occupanti o gruppi di essi dalle vie d'esodo;
- Velocità d'esodo, che dipendono dalla tipologia degli occupanti e loro interazioni con ambiente e effetti dell'incendio;
- Vie d'esodo (geometria, dimensioni, dislivelli, ostacoli).

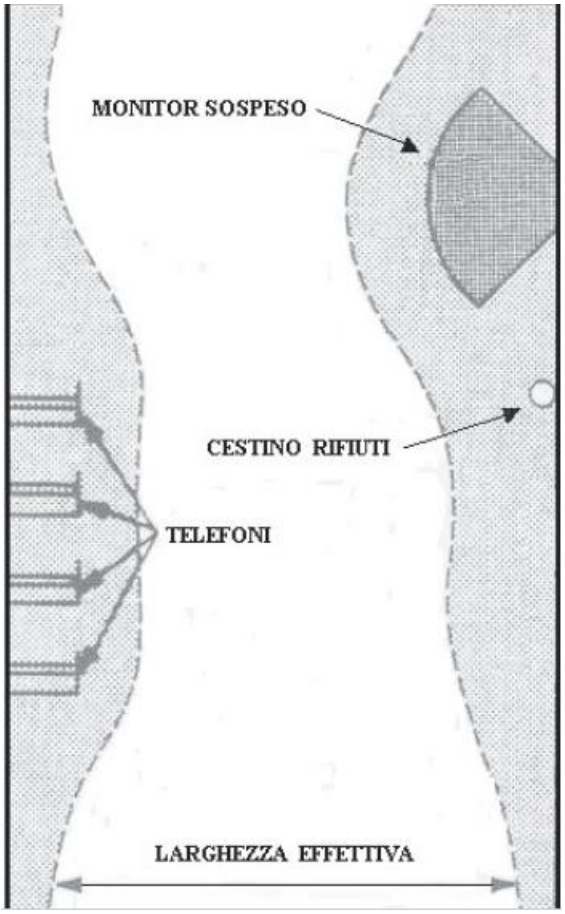


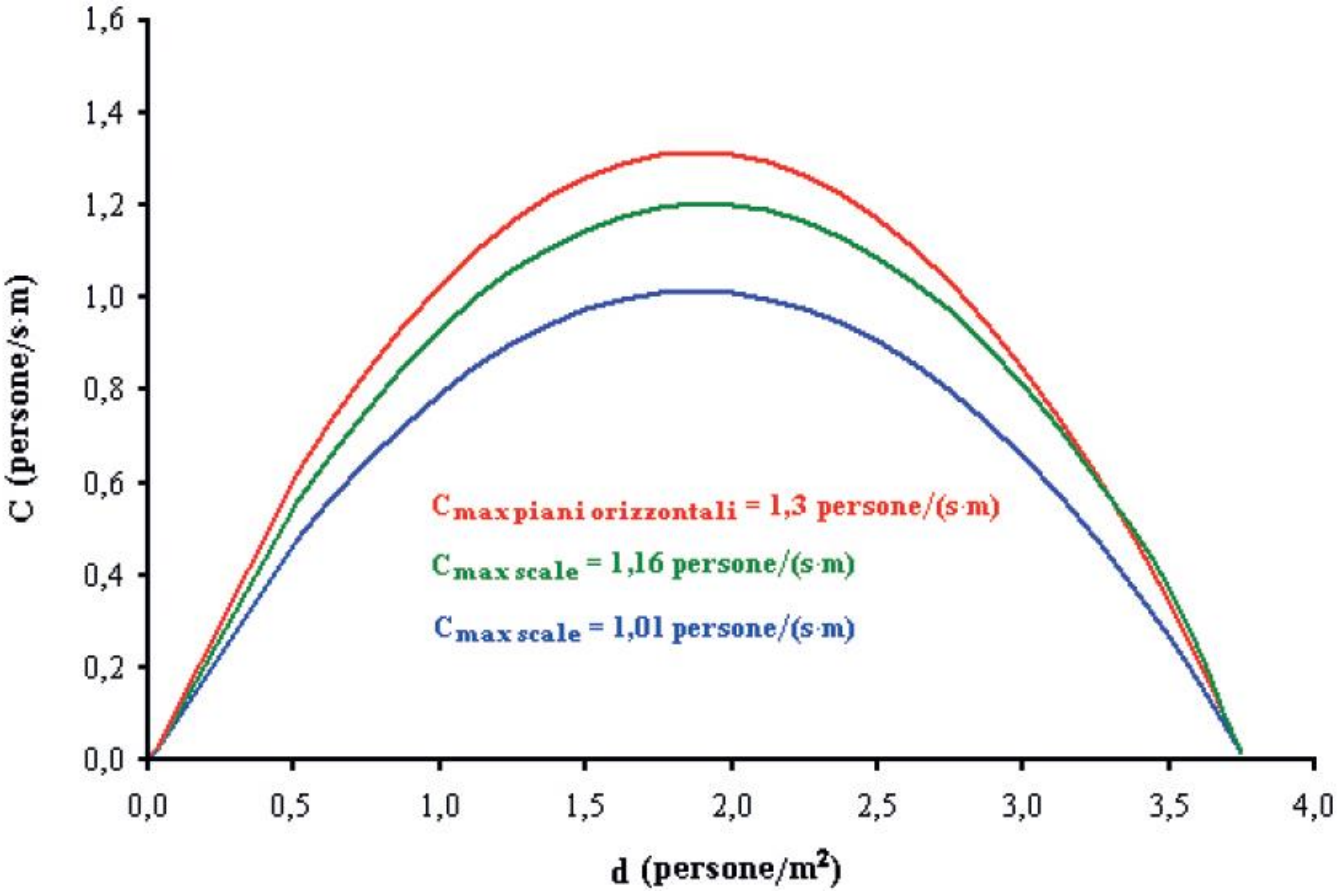
MDELLO IDRAULICO DI ESODO



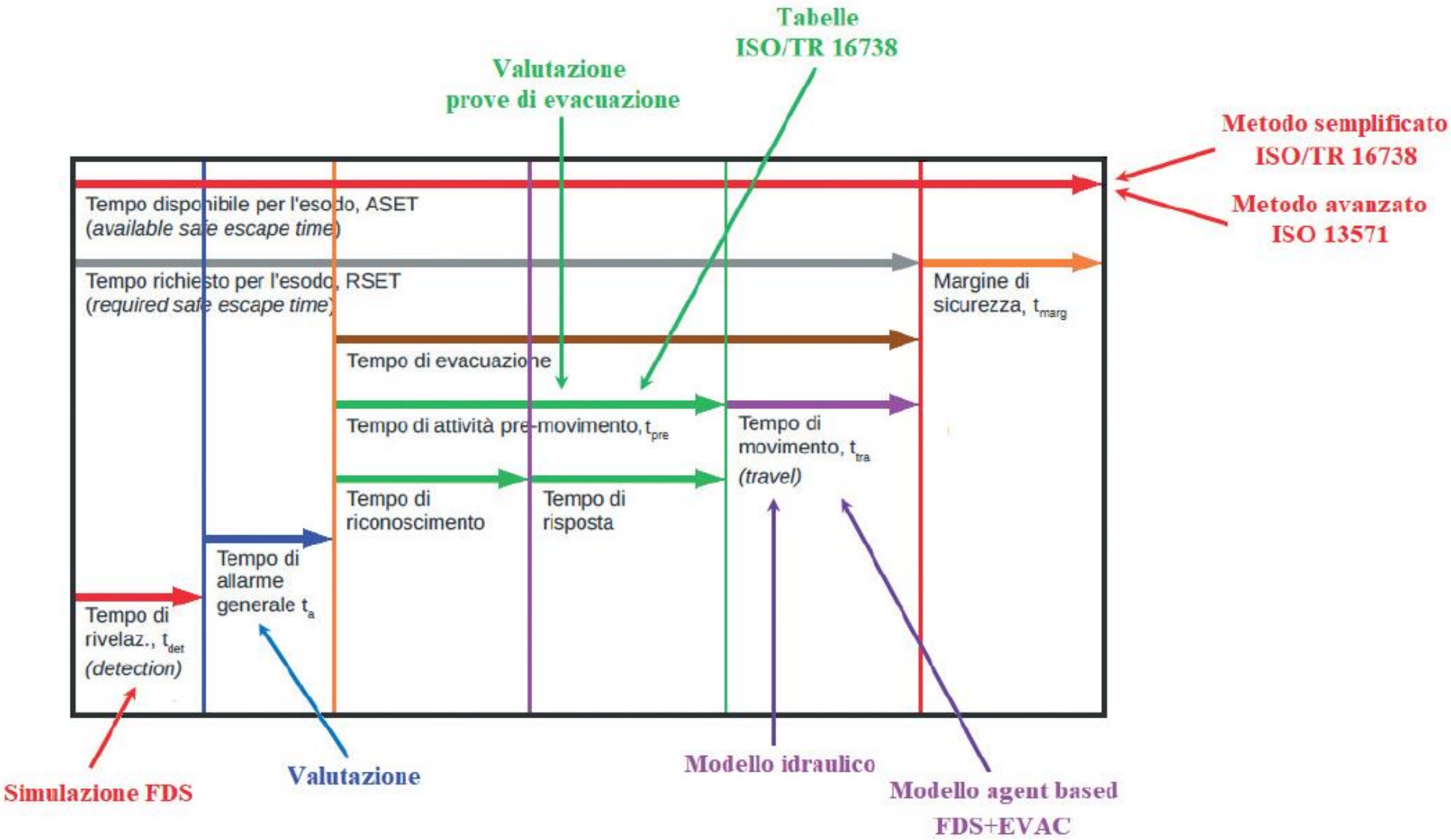
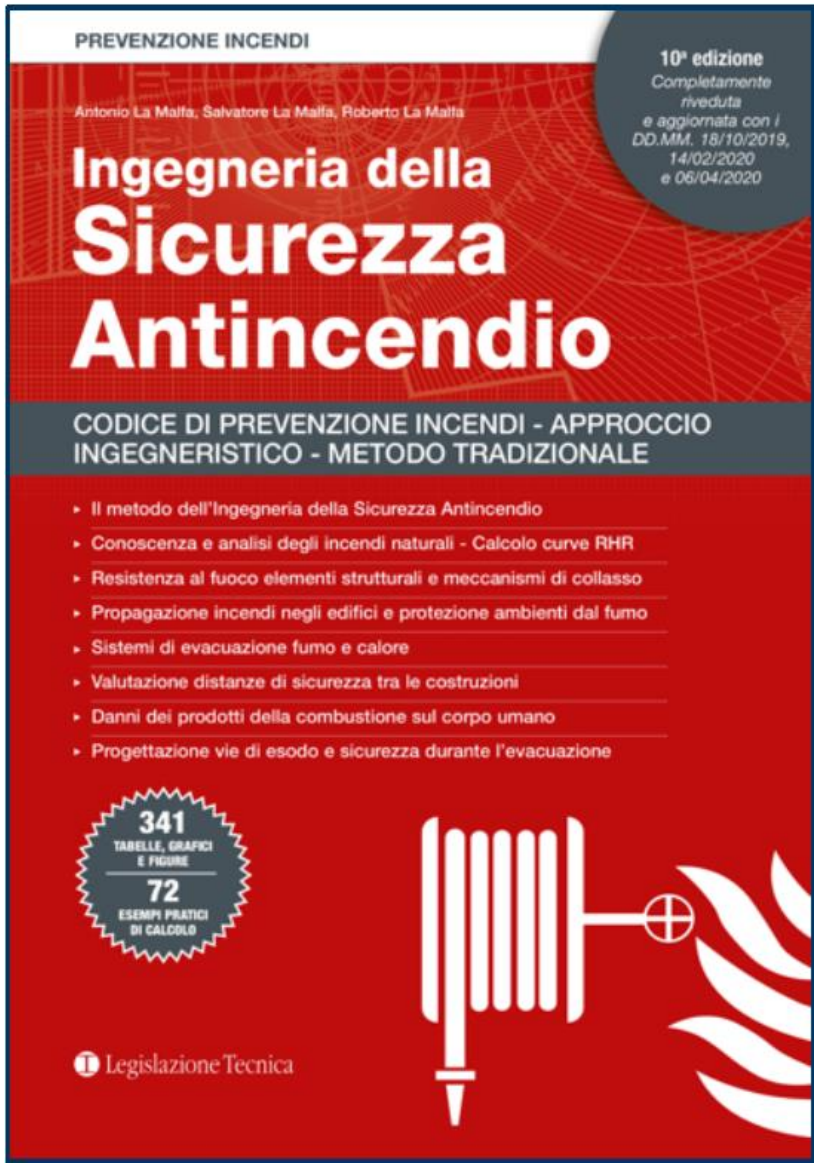


MDELLO IDRAULICO DI ESODO





CALCOLO DEI PARAMETRI PER LA VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI DI SICUREZZA DELLE PERSONE DURANTE LA FASE DI ESODO



PER APPROFONDIMENTI TEORICI ED ESEMPI PRATICI