

# La tossicità dei prodotti da combustione durante l'investigazione in una scena d'incendio

◉ Ing. **Marcello Mangione**, *Progettista antincendio su strutture a destinazione civile e militare*



### L'abstract

Un incendio è una reazione di combustione incontrollata che produce effetti devastanti sia sull'ambiente che sull'uomo, provocando ansia, paura e panico; esso può essere provocato da diverse cause, sia naturali e sia per mano dell'uomo per motivi casuali, leciti o illeciti. A causa dell'alta frequenza di tali eventi, negli ultimi anni si sta sempre più evolvendo il settore della cosiddetta **Fire Investigation**, ovvero l'indagine a cui va incontro un professionista per poter risalire alle cause di un incendio. Lo scopo di questo articolo è proprio quello di investigare su un incendio di natura dolosa con presenza di vittime e di dimostrare scientificamente i danni da esso prodotto sulle persone avvalendosi anche dell'ausilio di modelli di simulazione, utilizzati a conferma delle evidenze raccolte in fase di indagine (approccio ingegneristico – investigativo, detto anche *Modeling Fire Investigation*). In questo articolo si cerca quindi di fornire un quadro generale sulle cause responsabili della morte delle vittime confrontando ed analizzando le varie teorie interpretative in merito ai tempi di decesso. L'attenzione è stata focalizzata sulla tossicità dei prodotti derivanti dalla combustione dei materiali coinvolti sul rogo, calcolando le dosi nocive ed analizzando i dati *post mortem* al fine di poter delineare con accuratezza i tempi di decesso.

## Analisi della tossicità dei gas

L'inalazione di tali gas tossici è la principale causa di decesso da incendio molto più delle ustioni che invece concorrono insieme alle altre cause in seconda battuta (solo quando il soggetto ha già perso conoscenza).

Conoscere gli effetti generatisi sulle persone in termini di tossicità e riuscire a quantificare la dose assorbita che ha indotto il soggetto alla morte, sono elementi utili per ricostruire anche la dinamica di un incendio. Il parametro che rappresenta la dose di tutti i gas nocivi inalati durante un tempo definito di esposizione è detto FED o *Fatal Effective Dose*, tale parametro tiene in considerazione l'effetto cumulativo dei gas irritanti, tossici (HCN e CO) e asfissianti (CO<sub>2</sub>) e si calcola con il seguente algoritmo:

$$FED = \sum_{i=1}^n \int_0^t \frac{C_i}{(C \cdot t_i)} dt$$

dove:

- ▶ **C<sub>i</sub>**: concentrazione del tossico **i-esimo**, in parti per milione (in seguito ppm);
- ▶ **C t<sub>i</sub>**: dose ovvero la concentrazione × tempo (in minuti) di esposizione al tossico **i-esimo**.

Se la FED è uguale ad 1 la concentrazione dei gas nocivi è letale ed incapacitante per i soggetti esposti.

**Purser** propone un algoritmo per il calcolo della FED impostato nel seguente modo:

$$FED = \left[ \left( \frac{CO_{DOSE}}{171150} + \frac{HCN_{DOSE}}{4920} + \frac{IRR_{DOSE}}{LC_{t_{50}} IRR} \right) \times x VCO_2 \right] + A$$

>

dove:

- ▶  $CO_{dose}$ : dose di esposizione al monossido di carbonio (ppm. × min.);
- ▶  $H_{CN}_{dose}$ : dose di esposizione all'acido cianidrico (ppm × min.);
- ▶  $IRR_{dose}$ : dose di esposizione a sostanze irritanti (ppm × min.);
- ▶  $LCT_{50} IRR$ : dose di esposizione letale ai diversi irritanti considerati;
- ▶  $VCO_2$ : fattore moltiplicativo dovuto alla iperventilazione per la presenza di  $CO_2$ ;
- ▶  $A$  fattore di acidosi nel sangue (A):

questi ultimi due termini sono uguali a:

- ... $VCO_2] + A = 1,5] + 0,25$  per 5% di  $CO_2$
- ... $VCO_2] + A = 1,4] + 0,2$  per 4% di  $CO_2$
- ... $VCO_2] + A = 1,25] + 0,1$  per 3% di  $CO_2$
- ... $VCO_2] + A = 1] + 0$  per < 2,5%  $CO_2$

si possono notare in questo algoritmo le variabili da tenere in considerazione e si evince maggiormente dal calcolo matematico il valore cumulativo della tossicità dei gas tossici, asfissianti (HCN-CO) e irritanti.

Va tenuta in considerazione sia l'iperventilazione (come fattore di incremento della tossicità dei medesimi gas) e sia l'acidosi sanguigna correlata alle quantità di  $CO_2$  che aumenta nel sangue.

Altre formule analitiche sono invece utilizzate per calcolare solo gli effetti cumulativi dei gas tossici e non di quelli irritanti, il modello più diffuso prevede la somma degli effetti di ciascuna parte dei singoli componenti, in tal caso una miscela CO-HCN.

L'effetto mortale si raggiunge per il raggiungimento del 50% di dose dei due gas, l'algoritmo è il seguente:

$$X_{FED} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{C_{CO}}{35000} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\exp\left(\frac{C_{HCN}}{43}\right)}{220} \Delta t$$

dove:

- ▶  $C_{CO}$ : concentrazione media del monossido di carbonio CO nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  (ppm)

- ▶  $C_{HCN}$ : concentrazione media dell'acido cianidrico nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  (ppm)
- ▶  $\Delta t$ : intervallo di tempo di esposizione ai gas tossici asfissianti (espresso in sec.)

L'incertezza legata all'uso di tale equazione è del  $\pm 35\%$ .

Il software FDS+Evac permette, invece, il calcolo della FED utilizzando soltanto la concentrazione di gas narcotici come  $CO$ ,  $CO_2$  e  $O_2$ .

$$FED = FED_{CO} \cdot HV_{CO_2} + FED_{O_2}$$

L'equazione sopra riportata non contiene l'effetto del composto HCN, nonostante sia narcotico, e considera che l'effetto della  $CO_2$  sia dovuto soltanto all'iperventilazione, cioè si assume che la concentrazione di  $CO_2$  sia così bassa da non avere effetti narcotici.

L'anidride carbonica non ha effetti tossici fino a concentrazioni del 5%, ma stimola la respirazione che aumenta il tasso di assunzione di altri prodotti. La frazione di dose inabilitante di CO è calcolata nel seguente modo:

$$FED_{CO} = 4.607 \cdot 10^{-7} \cdot C_{CO}^{1.036} \cdot t$$

dove:

- ▶  $t$ : tempo di esposizione (sec);
- ▶  $C_{CO}$ : concentrazione di CO (ppm).

La frazione di dose di incapacità dovuta a insufficiente presenza di ossigeno nei tessuti è calcolata come:

$$FED_{O_2} = \frac{t}{60 \exp[8.13 - (0.54(20.9 - C_{O_2}))]}$$

dove:

- ▶  $t$ : tempo di esposizione (sec);
- ▶  $C_{O_2}$ : concentrazione di  $O_2$  (ppm).

L'anidride carbonica induce un fattore di iperventilazione calcolato nel seguente modo:

$$HV_{CO_2} = \frac{\exp(0.1930 \cdot C_{CO_2} + 2.0004)}{7.1}$$

Per il software un gas verrà considerato inabile quando il valore di FED supera l'unità.

Concludendo possiamo esemplificare il concetto di FED come il rapporto tra la dose di esposizione assorbita da una persona sottoposta ai prodotti della combustione durante la fase di esodo e quella massima ammissibile che non consentirebbe ad un individuo di raggiungere da solo un luogo sicuro; quindi possiamo asserire che:

$$FED = \frac{DOSE\ INALATA}{DOSE\ LETALE}$$

Calcolando quindi la FED si può risalire alle quantità tossiche dei gas responsabili della morte del soggetto.

La causa di decesso più ricorrente nelle vittime da incendio è sicuramente la sindrome asfittica, caratterizzata da uno stato di ipossia cioè una carenza parziale di ossigeno o di anossia acuta cioè da una totale assenza di ossigeno.

Ci sono tre varianti di sindrome asfittica e sono denominate come: anossia anossica, anossia di trasporto ed anossia istotossica.

Esse sono le tre fasi che compongono la catena respiratoria, suddivisa in tre anelli collegati tra loro al fine di completare il processo di respirazione.

Il processo iniziale prevede l'assunzione di ossigeno tramite le vie respiratorie, successivamente il trasporto ai compartimenti cellulari tramite il sangue dell'ossigeno legato all'emoglobina e infine l'utilizzazione dell'ossigeno da parte delle cellule, se si interrompe uno solo di questi processi sopraggiunge la morte.

---

**Fractional Effective Dose, FED,** ovvero la dose di gas assorbita da una persona durante l'esodo (in un tempo T definito di esposizione) rapportata alla dose dello stesso gas che provoca uno specifico effetto sulla persona esposta tale da non consentire l'esodo in sicurezza

**L'anossia anossica** si ha quando la quantità di ossigeno inalata è insufficiente a causa di un arresto respiratorio o per via delle lesioni gravi dell'apparato respiratorio che compromettono la ventilazione polmonare, di conseguenza i livelli di ossigeno scendono al di sotto dei livelli fisiologici, per cui c'è una caduta della pressione parziale di ossigeno nel sangue arterioso e una insaturazione dell'emoglobina.

La mancanza di ossigeno può essere dovuta a gas come l'anidride carbonica che si sostituiscono parzialmente all'ossigeno nell'aria in occasione di un incendio.

**L'anossia di trasporto** ha come causa principale l'intossicazione da monossido di carbonio (CO), un'emotossina che si lega saldamente allo ione ferro dell'emoglobina formando un complesso detto carbossiemoglobina (HbCO), ben 250 volte più

stabile di quello formato con l'ossigeno ovvero l'ossiemoglobina (HbO<sub>2</sub>), il quale per via delle sue proprietà allosteriche rilascia più difficilmente l'O<sub>2</sub> ai tessuti.

L'intossicazione conduce ad uno stato di incoscienza (il cervello riceve via via meno ossigeno), che termina con la morte; la cute del cadavere si presenta con un tipico colore rosso ciliegia, tanto da farlo sembrare ancora vitale.

La seguente immagine illustra gli effetti tossici del CO sulla salute dell'uomo.

**L'anossia istotossica** è causata da inalazione di cianuri ed acido cianidrico che hanno la caratteristica di bloccare la citocromo ossidasi a livello tissutale. Non dovrebbe essere annoverata tra le anossie poiché i valori di saturazione dell'ossigeno nel sangue arterioso sono normali ma non può essere utilizzato dalle cellule. >

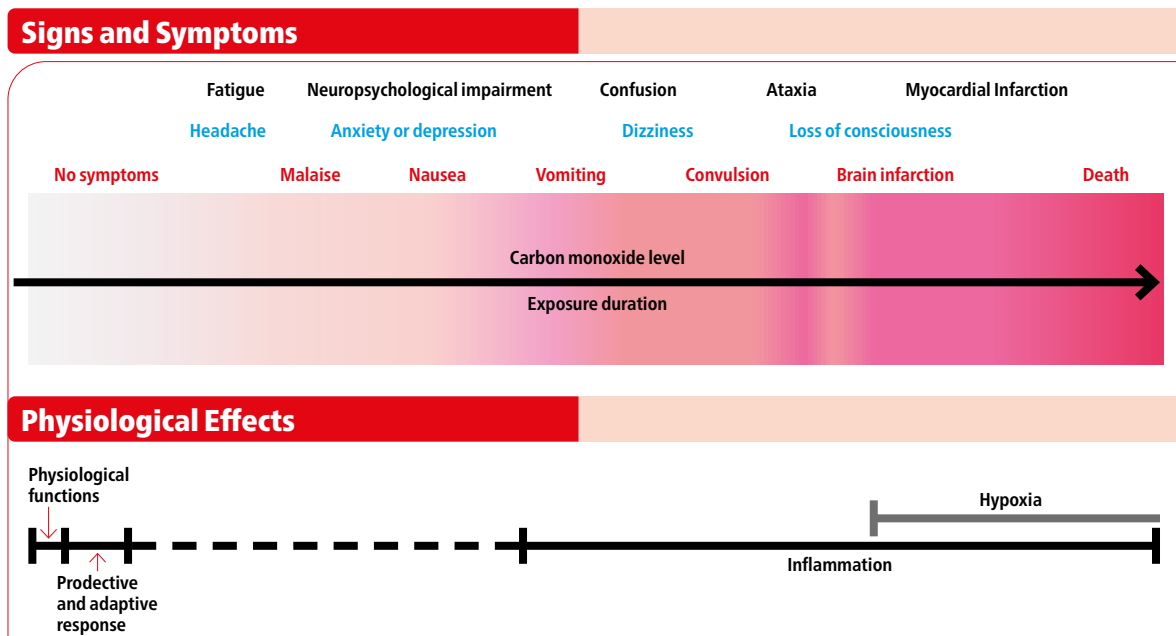


Figura 1 | Effetti del monossido di carbonio sull'uomo

Il cianuro complessandosi stabilmente nel mitocondrio con l'enzima ferritocromo – ossidasi impedisce a tale enzima di legarsi all'ossigeno trasportato dall'emoglobina, sovrappiunge così una rapida depressione dell'attività cerebrale, la frequenza cardiaca dapprima aumenta per poi diminuire progressivamente e la morte avviene per collasso cardiovascolare e per anossia cerebrale.

Nelle sindromi asfittiche di soggetti coinvolti negli incendi sono di norma presenti tutti e tre i meccanismi anossici e se ciò non avviene si può ritenere che la morte sia sopraggiunta fin dai primissimi momenti di un rogo, quando ancora le concentrazioni dei gas non erano apprezzabili.

In sintesi se la morte non è ascrivibile ad altre cause come l'infarto o collasso cardiocircolatorio ma è confermata per sindrome asfittica, essa verrà ricondotta alla sola anossia anossica, in altre parole al soffocamento dell'individuo in conseguenza delle gravi lesioni a carico delle vie respiratorie dovute

Per ricostruire la sequenza temporale dell'incidente è utile l'esito degli esami tossicologici post mortem forniti dal medico legale per conoscere il tasso di carbosiemoglobina e dei cianuri presente nel sangue della vittima

all'inalazione di aria ad elevate temperature che hanno impedito al soggetto di respirare. Poi per ricostruire la sequenza incidentale sarà utile l'esito degli esami tossicologici post mortem del medico legale come la conoscenza del tasso di carbosiemoglobina (%HbCO) e dei cianuri (HCN) nel sangue delle vittime. Infatti il tempo richiesto ad un soggetto per raggiungere una data

concentrazione di entrambe le sostanze tossiche può fornire indicazioni utili sui fenomeni connessi alla prima fase di un incendio, quella di ignizione.

## Investigazione su una scena con vittime: aspetti teorici

L'esame tossicologico per risalire al tasso di carbosiemoglobina viene eseguito *post mortem* e ci sono diversi algoritmi che consentono di calcolare la percentuale di carbosiemoglobina inalata (%HbCO) e il tempo durante il quale la vittima ha respirato in presenza di CO.

Ricordiamone di seguito alcuni:

### Stewart-Peterson

$$\%HbCO = (3,317 \cdot 10^{-5}) \cdot (\text{ppmCO})^{1,036} \cdot (V_p) \cdot t$$

dove:

- ▶ **ppmCO** = concentrazione monossido di carbonio espressa in parti per milione (ppm);
- ▶ **Vp** = ventilazione polmonare pari a:
  - 6 l/min. (posizione di riposo);
  - 9 l/min. (attività fisica leggera);
  - 18 l/min. (attività fisica media);
  - 30 l/min. (attività fisica rilevante);
- ▶ **t** = tempo di respirazione in presenza di CO alla concentrazione di riferimento.

### Pace

$$\%HbCO = \frac{\text{ppdCO} \cdot V_p \cdot t}{46,5 \cdot V_b}$$

dove:

- ▶ **ppdCO** = concentrazione monossido di carbonio espressa in parti per diecimila (ppd);
- ▶ **Vb** = massa sanguigna in litri (dipende dal peso, mediamente 5-6 litri).
- ▶ **t** = tempo di respirazione in presenza di CO alla concentrazione di riferimento

### Forbes:

$$HbCO = K \cdot \%CO \cdot t$$

dove:

- ▶ **k = 3** per  $V_p = 6$  l/min. (riposo);
- ▶ **k = 5** per  $V_p = 9$  l/min. (attività leggera);
- ▶ **k = 8** per  $V_p = 18$  l/min. (attività fisica media);
- ▶ **k = 11** per  $V_p = 30$  l/min. (attività fisica pesante);
- ▶ **%CO** = concentrazione monossido di carbonio espressa in percentuale;
- ▶ **t** = tempo di respirazione in minuti in presenza di CO alla concentrazione di riferimento.

La tossicità del monossido di carbonio (CO) segue la regola di **Haber** che in sostanza afferma che gli

effetti tossici del CO sono proporzionali alla dose (concentrazione × tempo) accumulata e non solo alla concentrazione della sostanza tossica considerata.

Tale regola indica che l'effetto prodotto da una concentrazione  $C_1$  per un tempo  $t_1$  equivale a quello prodotto da una concentrazione  $C_2$  per un tempo  $t_2$ . Quindi si ha:

$$C_1 \cdot t_1 = C_2 \cdot t_2$$

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{t_2}{t_1}$$

La produzione di acido cianidrico (HCN) dipende dalla natura della sostanza combusta e dalla temperatura di combustione, ma non è correlata alla disponibilità di ossigeno.

In particolare producono HCN le sostanze combustibili che contengono azoto (N) quando bruciano ad elevate temperature.

L'acido cianidrico (HCN) è circa 25 volte più tossico del monossido di carbonio (CO) ed ha una azione molto rapida, la morte del soggetto avviene di norma per arresto respiratorio di origine centrale.

L'acido cianidrico non segue la regola di Haber ed a parità di dose accumulata l'effetto tossico dipende fortemente dalla concentrazione del gas inalato. Infatti brevi esposizioni ad alte concentrazioni di HCN sono maggiormente suscettibili di gravi danni rispetto ad esposizioni a minori concentrazioni per un tempo più lungo.

In particolare è stato rilevato che per una concentrazione di HCN pari a 100 ppm l'incapacitazione interviene in circa 20 minuti (dose eguale a 2000 ppm × min.), mentre per una concentrazione di 200 ppm, l'incapacitazione interviene solo dopo 2 minuti (dose eguale a 400 ppm × min.).

Di norma gli algoritmi sopra riportati si utilizzano prevalentemente per calcolare il tempo "t" durante il quale il soggetto ha continuato a respirare a partire dall'inizio della combustione.

Ma la concentrazione degli inquinanti non è in genere nota, pertanto è necessario procedere per ipotesi credibili. >

Durante un incendio, le concentrazioni delle sostanze tossiche non sono costanti, poiché partendo da valori iniziali pari a "0" e assumono valori crescenti che dipendono dal modo in cui si sviluppa l'incendio.

Per una stima quantitativa delle concentrazioni medie degli inquinanti determinatesi nel corso dell'incendio è necessario definire in via preliminare diversi parametri, alcuni dei quali possono essere valutati solo per via indiretta e talvolta con grande approssimazione.

Limitando l'analisi alle sostanze più significative dal punto di vista tossicologico, faremo riferimento soltanto all'ossido di carbonio (CO) e all'acido cianidrico (HCN).

Per entrambe queste sostanze, dalla letteratura, si possono trarre utili informazioni, anche di carattere quantitativo dei ratei di emissione alle varie temperature ("fattore sorgente"), dei più comuni materiali di sintesi.

Naturalmente questi dati sono solo orientativi e soggetti a tutte le limitazioni e riserve inerenti alle modalità di stima.

Ciò premesso si può procedere nel modo seguente:

- ▶ si calcola il volume del contenitore della combustione;
- ▶ in ragione delle reali condizioni di ventilazione si assume un ricambio di aria nella unità di tempo considerata. In un volume con porte e finestre chiuse si stima che il ricambio orario di atmosfera nell'ambiente sia pari a ½ volume considerato;
- ▶ si stima, tenendo conto dei riferimenti oggettivi e testimoniali, il tempo di combustione del materiale che è bruciato;
- ▶ si valuta la natura ed il quantitativo di materiale combusto, assumendo una progressione del quantitativo coinvolto nel tempo considerato (propagazione dell'incendio);
- ▶ si calcolano, in detto periodo di tempo, le emissioni di inquinanti, assumendo i corrispondenti ratei di rilascio in ambiente.

Nei calcoli eseguiti nelle varie investigazioni forensi si è tenuto conto, ad esempio, di quanto appresso specificato:

- ▶ Volume del contenitore della combustione pari a  $V = 50 \text{ m}^3$ ;
- ▶ Portata ricambio aria, a porte e finestre chiuse, pari a ½ volume ogni ora. La portata d'aria  $Q_a$  che affluisce nel locale nella unità di tempo considerata risulta essere pari a  $0,42 \text{ m}^3/\text{min}$ .
- ▶ Tempo di combustione:  $t = 10 \text{ min}$
- ▶ Quantitativo di materiale combusto: 10 kg assumendo una progressione del quantitativo coinvolto nel tempo considerato.

### Analisi di casi studio

Negli esempi a seguire si assume una combustione di 10 kg di materiale poliuretano con una velocità di 1 kg/minuto con rateo di rilascio di:

- ▶ monossido di carbonio (CO) pari a 10 g/kg;
- ▶ acido cianidrico (HCN) pari a 1 g/kg;

#### Primo caso:

##### calcolo della % di carbossiemoglobina (secondo la formula di Pace)

Il primo referto riguarda un uomo adulto di 40 anni senza patologie pregresse. Possiamo supporre una ventilazione polmonare "Vp" pari a 18 l/min e un volume di sangue standard "Vb" di 5 litri.

La concentrazione totale di CO è pari a 3 ppd (parti per diecimila) e il tempo di esposizione totale è di 60 minuti.

Sostituendo i seguenti dati nella formula di Pace calcoliamo la percentuale di carbossiemoglobina:

$$\% \text{HbCO} = \frac{\text{ppdCO} \cdot V_p \cdot t}{46,5 \cdot V_b}$$
$$\% \text{HbCO} = \frac{3 \cdot 18 \cdot 60}{46,5 \cdot 5} = 13,94$$

#### Secondo caso:

##### calcolo della FED in uno scenario d'incendio

Adesso calcoliamo la FED tenendo in considerazione solo la concentrazione dei gas narcotici come CO

e CO<sub>2</sub> e trascurando la presenza nella scena d'incendio di HCN. Il primo step è il **calcolo della dose inabilitante di CO**:

$$FED_{CO} = 4.607 \cdot 10^{-7} \cdot C_{CO}^{1,036} \cdot t$$

Tenendo conto che il tempo di esposizione nella scena è stato di 5 minuti pari quindi a **300 secondi** e la concentrazione di CO (calcolata anche con FDS) è pari a **1000 ppm**; sostituendo i dati nell'equazione si ha che la FED<sub>CO</sub> è pari a 0,178.

Successivamente si **calcola l'incapacità indotta dall'insufficiente presenza di ossigeno** nel sangue con la seguente formula:

$$FED_{O_2} = \frac{t}{60 \exp[8.13 - (0.54(20.9 - C_{O_2}))]}$$

Dove la concentrazione di O<sub>2</sub> è pari a **10 ppm** e il tempo di esposizione è sempre di **300 secondi**, sostituendo entrambi i dati si avrà che il valore della FED<sub>O<sub>2</sub></sub> è di 0,527.

Infine l'ultimo dato che dobbiamo calcolare è il fattore di iperventilazione indotto dalla presenza di anidride carbonica calcolato come:

$$HV_{CO_2} = \frac{\exp(0.1930 \cdot C_{CO_2} + 2.0004)}{7.1}$$

Con la concentrazione misurata di CO<sub>2</sub> pari al **5 ppm** il valore di HV<sub>CO<sub>2</sub></sub> è di 2,73.

Ottenuti i tre dati possiamo calcolarci la FED con la seguente formula:

$$FED = FED_{CO} \cdot HV_{CO_2} + FED_{O_2}$$

Sostituendo i numeri ottenuti nell'equazione si otterrà una **FED > 1** e quindi possiamo dedurre che le sostanze inalate in tale concentrazione sono state sufficienti a provocare nel soggetto la morte.

$$FED = 0,178 \cdot 2,73 + 0,527 = 1,01$$

### **Terzo caso:** **calcolo della % di carbossiemoglobina** **(secondo la formula di Forbes)**

Un'altra formula è stata applicata ad un **terzo caso riguardante una vittima adolescente di anni**

**18**, il calcolo della percentuale di carbossiemoglobina viene effettuato con la formula di **Forbes**:

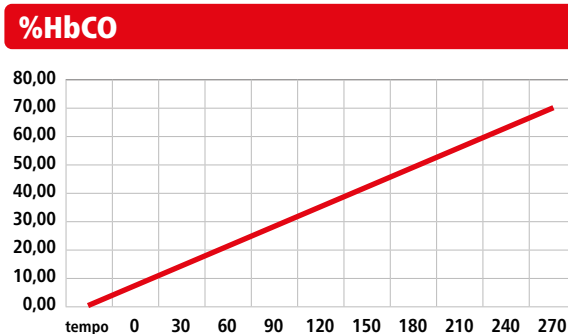
$$HbCO = K \cdot \%CO \cdot t$$

dove:

- ▶ **%CO è 0,03** in ambiente;
- ▶ il tempo di esposizione è di **60 minuti**;
- ▶ la costante K per una ventilazione polmonare di 18 l/min ha un valore pari ad **8**.

Sostituendo i seguenti dati nella formula abbiamo che la percentuale di carbossiemoglobina nel sangue della vittima è di 14,4 %.

Il grafico sottostante raffigura una relazione diretta che c'è tra la %HbCO ed il tempo di esposizione al monossido di carbonio, se aumentano i minuti di esposizione al gas tossico di conseguenza sale la percentuale di carbossiemoglobina nel sangue causando più velocemente l'incapacitazione e successivamente la morte.



**Tabella 1** | Relazione tra tempo di esposizione (min) e la %HbCO

### **Quarto caso:** **alcòlo del tempo di decesso di un soggetto** **in una scena d'incendio**

Nel quarto caso è stato eseguito un prelievo arterioso sulla vittima rinvenuta su una scena d'incendio. Conoscendo il sesso della vittima (maschio) e la sua età (50 anni) il referto ha evidenziato i seguenti dati:

- ▶ **%HbCO= 14,5** presente nel sangue;
- ▶ concentrazione di CO è di **3.000 ppm**;

>



► ventilazione polmonare (Vp) è di **18 l/min.** trascurando l'iperventilazione polmonare causata dall'anidride carbonica e la mancanza di ossigeno.

Applicando la formula di **Stewart** utile per il calcolo della percentuale di **carbossiemoglobina** ma invertendo l'incognita possiamo individuare il tempo di respirazione in presenza di CO.

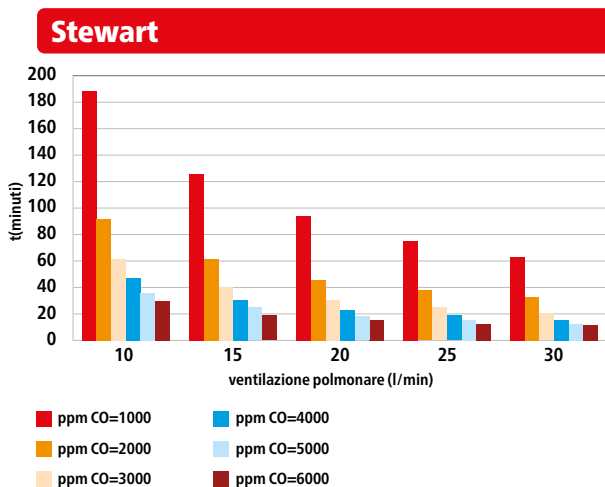
$$\%HbCO = (3,317 \cdot 10^{-5}) \cdot (\text{ppmCO})^{1,036} \cdot (Vp) \cdot t$$

$$t = \frac{\%HbCO}{[3,31710^{-5} \cdot (\text{ppmCO})^{1,036} \cdot (Vp)]}$$

$$t = \frac{14,5}{[3,31710^{-5} \cdot (3000)^{1,036} \cdot (18)]} = 8,10\text{min}$$

Il tempo di respirazione della vittima in presenza di CO ad una concentrazione costante di 3.000 ppm è stato di **circa 8 minuti**.

Il grafico sottostante mette in relazione tutti e tre i fattori: ventilazione polmonare, concentrazione di CO e tempo di esposizione.



**Tabella 2** | Tossicità del monossido di carbonio in funzione del tempo e della ventilazione polmonare

La vittima ha però inalato anche una concentrazione di HCN elevata e con i valori assunti dai calcoli sulle concentrazioni corrispondenti al 6° ed al 7° minuto di combustione si possono calcolare i relativi FED che hanno riguardato la persona presente in ambiente.

Utilizzando la formula di **Purser** si ha:

$$FED = \left[ \left( \frac{CO_{DOSE}}{171150} + \frac{HCN_{DOSE}}{4920} + \frac{IRR_{DOSE}}{LCt_{50} IRR} \right) \times xVCO_2 \right] + A$$

trascurando il termine con  $IRR_{DOSE} \dots xVCO_2] + A$  e stimando ai tempi considerati una concentrazione media di HCN pari a **700 ppm**, si ha:

**al 6° minuto:**

$$FED = \left( \frac{3000 \cdot 6}{171150} + \frac{700 \cdot 6}{4920} \right) = 0,10 + 0,85 < 1$$

**al 7° minuto:**

$$FED = \left( \frac{3000 \cdot 7}{171150} + \frac{700 \cdot 7}{4920} \right) = 0,12 + 0,99 > 1$$

Quindi si può concludere che la persona presente nella scena d'incendio **ha cessato di vivere tra il 6° ed il 7° minuto di combustione**.

Trascurando il contributo della iperventilazione dovuto alla presenza della anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e/o alla carenza di ossigeno, **lo stesso soggetto ha perso conoscenza (FED incapacitazione), già tra il secondo ed il terzo minuto**.

Infatti al predetto tempo per **CO = 3.000 ppm** e **HCN = 230 ppm**, sostituendo si ha:

$$F_{ICO} = \frac{8,292510^{-4} \text{ ppmCO}^{1,036}}{30} = 0,110627$$

$$F_{HCN} = \frac{1}{\exp(5,396 - 0,023 \cdot \text{ppmHCN})} = 0,899425$$

$$FED_{INC} = (F_{ICO} + F_{HCN}) > 1$$

dove:

►  $F_{ICO}$  è il fattore incapacitante per presenza di monossido di carbonio;

►  $F_{HCN}$  rappresenta il fattore incapacitante per la presenza di acido cianidrico.

## Conclusioni

L'obiettivo di questo articolo è stato quello di far conoscere, in maniera sommaria, gli effetti lesivi dei prodotti da combustione generati da un incendio

## Domiamo il fuoco, con eleganza.

30 anni di innovazione e design Made in Italy.  
Sofisticate tecnologie antincendio  
per la protezione degli spazi, anche i più ricercati.

sui soggetti presenti nella scena. Il calcolo è possibile grazie sia all'applicazione di teoremi e formule matematiche e sia per merito della conoscenza della tossicità che i singoli gas nocivi hanno sulla salute. Questo lavoro ha messo quindi in evidenza la concreta possibilità di poter quantificare sia le dosi assorbite che hanno indotto alla morte e sia in quanto tempo hanno indotto al decesso quest'ultime. L'importanza di poter determinare con un minimo margine di errore il tempo in cui la vittima è deceduta, consente di poter tracciare una ipotetica "timeline" più affidabile utile per l'Autorità giudiziaria.

**Teoremi, formule e la conoscenza della tossicità dei gas nocivi sulla salute, aiutano a spiegare quali sono gli effetti lesivi dei prodotti da combustione generati da un incendio sui soggetti presenti nella scena**

Questa linea del tempo rappresenta lo sviluppo cronologico di tutto l'evento che va dalle prime segnalazioni, all'arrivo dei soccorritori fino alla completa estinzione dell'incendio, il tutto arricchito da un dato certo ed inconfutabile, il tempo di decesso.

Tali informazioni hanno un ruolo chiave nella ricostruzione delle dinamiche di episodi di incendi che

siano essi di natura dolosa, colposa o casuale e sono di fondamentale aiuto nelle attività investigative perché forniscono anche una panoramica ben definita sulle veridicità delle testimonianze. ♦

### Bibliografia

- Attanasio F. (tesista) e Mangione M. (Correlatore alla tesi del Master II livello, Metodologie Analitiche Forensi) (2018): *Aspetti tossicologici in uno scenario d'incendio* – Università La Sapienza, Roma.
- Beard A. e Carvel R. (2005), *Handbook of Tunnel Fire Safety*, Ice publishing, Seconda edizione.
- Bontempi F. (2017): Volume *Ingegneria forense in campo strutturale* - edito dalla Dario Flaccovio Editore.
- Bontempi F.: *corso di Progettazione Strutturale Antincendio*- Università La Sapienza, Roma.
- C. Barbera, A. Bascià, G. Di Salvo, A. Galfo, R. Lala, S. Lucidi, D. Maisano, G. Mancini, V. Puccia, F. Vorraro: *Fire Safety Engineering: una applicazione*.
- Caira L., Mangione M., Bontempi F. (2017), *Comportamento umano in caso di incendio: modelli di evacuazione*, Rivista Ingenio n° 52, Dossier fuoco.
- Cascioli V. (2016), *Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale*.
- Christopher L. Mealy, Matthew E. Benfer, Daniel T. Gottuk, *Fire Dynamics and Forensic Analysis of Liquid Fuel Fires*.
- Kose, S. (1999), *Emergence of aged populace: who is at higher risk in fires?* Fire and Materials.
- La Malfa A. (1999), *Analisi e valutazione della pericolosità dei prodotti della combustione. Le caratteristiche e gli effetti che essi provocano sull'organismo umano nella prima fase di sviluppo dell'incendio*".



# FLAME

Il software per la valutazione del rischio incendio degli occupanti e dei beni e proprietà conforme al D.M. 3/8/2015

» scarica la demo su [www.progetto-sicurezza-lavoro.it](http://www.progetto-sicurezza-lavoro.it)

Consente di produrre una valutazione dei rischi di incendio in ottemperanza ai disposti di cui al D.M. 10 marzo 1998 e D.Lgs. 81/2008 per l'inclusione nel DVR aziendale; in ottemperanza ai nuovi criteri di cui al D.M. 3 agosto 2015 (Regola Tecnica Orizzontale) per il supporto alle attività di prevenzione incendi.

Il metodo risulta essere estremamente flessibile e permette di considerare tutti gli aspetti che concorrono ad individuare il livello di rischio incendio:

- carico di incendio;
- tipologia di incendio;
- vulnerabilità e grado di esposizione degli occupanti;
- caratteristiche dell'edificio;
- presidi fissi e mobili antincendio;
- sistema delle vie di esodo;
- organizzazione;
- rispetto dei criteri minimi di sicurezza antincendio.

È possibile acquistare il software a **€ 250,00 + IVA** e consente di misurare la prestazione e valutare il rischio incendio per gli **occupanti + proprietà**.



**Per info contatta 06 33245271**  
**[software@progetto-sicurezza-lavoro.it](mailto:software@progetto-sicurezza-lavoro.it)**