



Incendio all'interno di una carrozza ferroviaria. Analisi di un modello di scenario incidentale

Fire inside a passenger car. Analysis of an accidental scenario model

Dott. Ingg. Laura CARUSO^(*) - Andrea NARDI^(**) - Domenico TROIANO^(***)

1. Introduzione

La progettazione e realizzazione dei percorsi in galleria ha subito recentemente un notevole impulso e la sicurezza nella galleria è diventata negli ultimi anni un tema di grande attualità. Il D.M.28/10/2005 "Sicurezza nella galleria ferroviaria" definisce gli standard di sicurezza che devono essere garantiti all'interno di tutte le gallerie ferroviarie, introducendo la necessità di effettuare l'analisi di rischio.

Scopo dell'articolo è l'analisi di *Un modello di scenario incidentale* per lo sviluppo dell'analisi di rischio che può essere di tipo base (ARB) o di tipo estesa ARE.

2. Premessa

L'Italia è particolarmente coinvolta nella sicurezza su strada e in galleria per le caratteristiche geofisiche del suo territorio ricco di aree montuose e collinari che necessitano di lunghi tunnel per attraversarle.

Il patrimonio delle nostre opere ferroviarie in sotterraneo è attualmente rappresentato da oltre 2000 gallerie con uno sviluppo di circa 1050 km. Delle gallerie attualmente in esercizio oltre 300 sono lunghe più di 1000 m.

Al momento sono in fase di realizzazione altre 85 gallerie di cui 36 con una lunghezza maggiore di 1000 m, per uno sviluppo totale di circa 170 km.

Un ulteriore significativo impulso alla realizzazione di gallerie è stato impresso dal primo programma di infrastrutture strategiche di preminente interesse nazionale (Legge Obiettivo) che ha visto il Gruppo Ferrovie dello Stato impegnato nella progettazione di circa 400 km di opere in sotterraneo.

Nel contesto europeo l'Italia è la nazione con la maggiore rete di gallerie con lunghezza superiore al km (fig. 1).

1. Introduction

The design and realisation of the routes in tunnels has recently undergone a major boost and in recent years safety in the tunnel has become a topical theme. Ministerial Decree 28/10/2005 "Safety in railway tunnels" defines the safety standards that must be guaranteed in all railway tunnels, introducing the need to perform risk analysis.

This article is an analysis of *An accidental scenario model* for the development of risk analysis that can be of base type (BRA) or an extended type ERA.

2. Preamble

Italy is particularly involved in road and in tunnel safety for the geophysical characteristics of its territory, rich in mountainous and hilly areas needing long tunnels to pass through.

Over 2000 galleries with a development of about 1050 km currently represent the heritage of our underground railway works. Of the current operating galleries, over 300 are more than 1000 m long.

At the moment another 85 galleries are being implemented of which 36 with a length greater than 1000 m, for a total of approximately 170 km.

A further significant impetus for the construction of tunnels was impressed by the first strategic infrastructure programme of pre-eminent national interest (Legge Obiettivo) that saw the Gruppo Ferrovie dello Stato engaged in the design of approximately 400 km of underground works.

In the European context, Italy is the country with the largest network of tunnels with a length exceeding 1 km (fig. 1).

^(*) Trenitalia Direzione Tecnica – Ingegneria Rotabili e Tecnologie di Base - Materiali e Arredi.

^(**) Scala Virgilio & Figli S.p.A. Costruzioni ferroviarie – edili – stradali.

^(***) Italcertifier SpA – Technical Area and certification – Florence Italy.

^(*) TRENITALIA Direzione Tecnica – Ingegneria Rotabili e Tecnologie di Base - Materiali e Arredi.

^(**) Scala Virgilio & Figli S.p.A. Costruzioni ferroviarie – edili – stradali.

^(***) ITALCERTIFIER SpA – Technical Area and certification – Florence Italy.

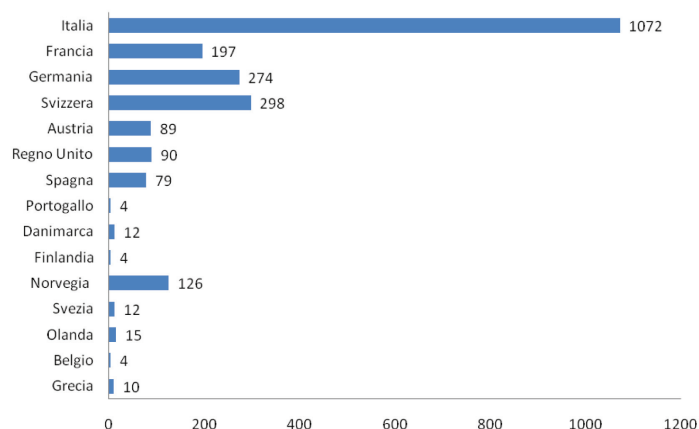


Fig.1 - Distribuzione di gallerie lunghe più di 1000 m in Europa. *Distribution of tunnels over 1000 m long in Europe.*

Considerando la percentuale di gallerie rispetto all'intera rete, l'Italia è al secondo posto preceduta soltanto dalla Svizzera (Svizzera 9,4%, Italia 6,5%, Norvegia 3,2%).

Lo scenario appena tracciato, induce a considerare il tema della sicurezza nelle gallerie di grande attualità. Il rischio di incendi nei tunnel è molto basso anche se taluni di questi incendi hanno dato purtroppo luogo ad eventi catastrofici come l'incidente di Baku in Azerbaijan nel 1995, che causò 289 morti e l'incidente di Daegu in Corea del Sud nel 2003, che ne causò 198.

La possibilità che un incendio dia luogo a conseguenze rilevanti dipende da più fattori tra cui:

- il luogo dell'incidente;
- il numero di passeggeri;
- la possibilità di fuga verso un luogo sicuro;
- il tipo e la grandezza della sorgente del fuoco;
- il tipo e il numero di materiali infiammabili a bordo;
- la ventilazione e la struttura delle carrozze;
- la sezione trasversale, la lunghezza e la ventilazione del tunnel.

Un ruolo determinante nell'evitare che un incendio si trasformi in una catastrofe è ovviamente legato all'organizzazione ed efficienza dei servizi antincendio (es. tempestività di intervento dei VV.FF. procedure antincendio etc.).

3. La sicurezza nelle gallerie ferroviarie

Il potenziamento della rete ferroviaria con la realizzazione di nuove gallerie non può prescindere dall'osservanza di precise e rigorose normative in tema di sicurezza, al fine di evitare o comunque ridurre al minimo i rischi di incidenti, in particolare di incendi.

Considerando la percentuale di tunnel over the entire network, Italy is in second place, preceded only by Switzerland (Switzerland 9.4%, Italy 6.5%, Norway 3.2%).

The scenario just outlined, leads us to consider the very topical issue of safety in tunnels. The risk of fire in tunnels is very low, even though some of these fires have unfortunately given rise to catastrophic events such as the accident in Baku in Azerbaijan in 1995, which killed 289 people and the accident in Daegu in South Korea in 2003, which resulted in 198 deaths.

The possibility that a fire results in significant consequences depends on several factors including:

- the location of the accident;
- the number of passengers;
- the possibility of escaping to a safe place;
- the type and size of the fire source;
- the type and number of flammable materials on board;
- the ventilation and the structure of carriages;
- the cross section, length and tunnel ventilation.

A crucial role in preventing a fire from turning into a catastrophe is obviously linked to the organisation and efficiency of fire fighting services (e.g. timeliness of intervention of the Fire Brigade, fire procedures etc.).

3. Safety in railway tunnels

The expansion of the railway network with the construction of new tunnels cannot disregard the compliance to precise and strict safety regulations in order to avoid or at least minimise the risk of accidents, especially of fires.

Italian and European legislation has recently introduced at an Italian level, for new and operating tunnels, the Legislative Decree of 28/10/2005 by the Ministry of Transport and Infrastructures [1], published with n. 83 in the Official Journal of 08/04/2006, with the aim of:

- defining precise safety levels that must be guaranteed in all newly built tunnels under construction or in operation;
- introducing the need to carry out a risk analysis for each tunnel, in order to assess the necessity and sufficiency of the safety measures taken or their need for integration.

This is an innovative approach compared to previous regulations since the decree dated 28/10/2005 introduces precise optimisation criteria for each single tunnel to a simple list of security requirements.

La legislazione italiana ed europea ha recentemente introdotto a livello italiano, alle gallerie in esercizio e nuove, il decreto 28/10/2005 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti [1], pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 83 del 08/04/2006, con l'obiettivo di:

- definire precisi livelli di sicurezza che devono essere garantiti all'interno di tutte le gallerie di nuova costruzione, in fase di realizzazione o in esercizio;
- introdurre la necessità di effettuare, per ogni galleria, un'analisi di rischio che permetta di valutare la necessità e la sufficienza delle misure di sicurezza adottate o la loro necessità di integrazione.

Si tratta di un approccio innovativo rispetto alle precedenti normative in quanto ad un semplice elenco di prescrizioni di sicurezza il decreto del 28/10/2005 introduce precisi criteri di ottimizzazione per ogni singola galleria.

Per ottenere elevati standard di sicurezza il decreto 28/10/2005 ritiene obbligatoria la combinazione ottimale dei requisiti di sicurezza applicati ai seguenti sottosistemi:

- infrastruttura;
- materiale rotabile;
- misure organizzative ed operative.

I requisiti e le misure di sicurezza non saranno più riferibili alle gallerie come elemento a se stante ma dovranno far riferimento al *Sistema Galleria*.

I requisiti di sicurezza di cui deve essere dotata la galleria sono:

- requisiti minimi;
- requisiti integrativi.

I requisiti di sicurezza minimi devono essere garantiti in tutte le gallerie della rete ferroviaria di lunghezza superiore a 1000 m.

Quelli integrativi rappresentano le predisposizioni di sicurezza che devono essere individuate qualora l'analisi di rischio ne indichi la necessità.

4. D.M. 28/10/2005 – Valutazione del rischio

Il decreto del 28/10/2005 consente di valutare la probabilità di accadimento e la gravità delle conseguenze connesse all'evolversi di eventi incidentali all'interno della galleria.

Qualora i requisiti minimi di sicurezza non garantiscano un adeguato livello di sicurezza si effettuerà l'Analisi del Rischio Base (ARB) o Esteso (ARE).

La scelta del tipo di analisi del rischio si ottiene dal diagramma di flusso (fig. 2).

L'ARE verrà effettuata in base ai risultati non soddisfacenti della ARB oppure nei casi previsti che sono:

- lunghezza galleria superiore a 9000 m;
- lunghezza galleria superiore a 2000 m con volume di

To obtain high safety standards, the Decree dated 28/10/2005 considers mandatory the optimal combination of safety requirements applied to the following subsystems:

- infrastructure;
- rolling stock;
- organisational and operational measures.

Requirements and security measures will no longer be referable to tunnels as a freestanding element but must refer to the *Tunnel System*.

The safety requirements that the tunnel must be equipped with are:

- minimum requirements;
- supplementary requirements.

Minimum safety requirements should be guaranteed in all railway network tunnels with a length exceeding 1000 m.

Supplementary ones represent the safety arrangements that must be identified if the risk analysis shows a need.

4. Ministerial Decree 28/10/2005 – Risk assessment

The Decree of 28/10/2005 evaluates the likelihood of occurrence and the severity of consequences linked to the evolution of accidental events inside the tunnel.

If the minimum safety level does not ensure an adequate level of safety, the Basic Risk Analysis (BRA) or the Extended Risk Analysis (ERA) will be carried out.

The choice of the type of risk analysis is obtained from the flowchart (fig. 2).

The ERA will be made on the basis of unsatisfactory results of the BRA or in the cases provided that are:

- tunnel length exceeding 9000 m;
- tunnel length exceeding 2000 m with a traffic volume over 220 trains/day and altitude profile without gradient reversal;
- simultaneous presence of passenger trains and trains transporting dangerous materials;
- risks near entrances.

Risk Analysis requires the comparison of risk levels obtained using the acceptability thresholds assessed both for Individual Risk (IR) and for Cumulative Risk (CR) (figures 3 and 4).

The measurement of the individual risk level (IR) is obtained by normalising the value of the Total Expected Risk level compared to the exposed population, in a fixed time interval (one year) and per kilometre travelled in the tunnel.

The Decree refers to an individual risk for a year that ranges from 10^{-4} to 10^{-5} for freely taken risks and from 10^{-6} to 10^{-8} for involuntary ones.

traffico superiore a 220 treni/giorno e andamento altimetrico senza inversione di pendenza;

- contemporanea presenza di treni passeggeri e treni con materiale pericolosi trasportati;
- rischi in prossimità di imbocchi.

L'Analisi del Rischio, impone il confronto dei livelli di rischio ottenuti con le soglie di accettabilità valutate sia per il Rischio Individuale (IR) sia per il Rischio Cumulato (CR) (figg. 3 e 4).

La misura del livello di Rischio Individuale (IR) si ottiene normalizzando il valore del livello di Rischio Atteso Totale rispetto alla popolazione esposta, in un intervallo di tempo prefissato (un anno) e per chilometro percorso in galleria.

Nel decreto si fa riferimento ad un rischio individuale per anno compreso tra 10^{-4} e 10^{-5} per i rischi liberamente assunti e compreso tra 10^{-6} e 10^{-8} per quelli involontari.

Il valore di rischio individuale in galleria viene fissato in

$$10^{-9} \frac{\text{fatalità}}{\text{passaggeri} \cdot \text{km} \cdot \text{anno}}$$

ipotizzando che ciascun utente percorra in media 1000 km/anno sul sistema ferroviario.

Vengono perciò definite:

- Soglia di attenzione:
$$IR = 10^{-11} \frac{\text{fatalità}}{\text{passaggeri} \cdot \text{km} \cdot \text{anno}}$$
- Soglia di inaccettabilità:
$$IR = 10^{-9} \frac{\text{fatalità}}{\text{passaggeri} \cdot \text{km} \cdot \text{anno}}$$

Il livello di Rischio Cumulato (CR) è definito sulla base della distribuzione di probabilità cumulata del livello di danno riferita al periodo di un anno.

Come criterio di accettabilità del rischio cumulato si procede ad un'analisi della probabilità che si verifichino, in un fissato periodo di tempo (es. un anno) e per chilometro di galleria, non più di un predeterminato numero di fatalità.

$$[N / \text{km} \cdot \text{anno}]$$

Al fine di identificare una soglia di accettabilità, il decreto introduce un criterio di valutazione sul piano Probabilità per km e anno - Numero di fattibilità $P([N / \text{km} \cdot \text{anno}] \geq x)$, N], nel quale viene presa in considerazione la probabilità annua che il numero di fatalità per chilometro superi predeterminate soglie di riferimento.

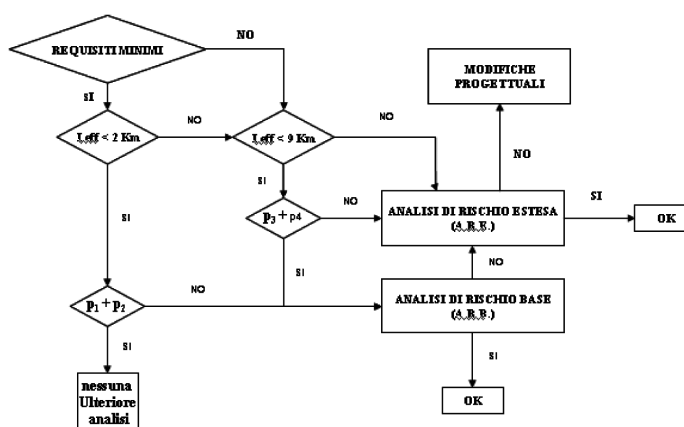


Fig. 2 – Procedimento per la scelta del metodo di Analisi del Rischio. Parametri caratteristici: p_1 : Volume di traffico non superiore a 220 treni/giorno; p_2 : Andamento altimetrico senza inversioni di pendenza; p_3 : Tipologia di traffico senza la contemporanea presenza in galleria di treni passeggeri e treni con merci pericolose; p_4 : Assenza di rischi di area specifici in prossimità degli imbocchi. Le gallerie non caratterizzate dai parametri p_3 e p_4 vanno sottoposte all'Analisi di Rischio estesa dove i SI e i NO dell'ARB e dell'ARE significano rispettivamente: SI: analisi con risultato accettabile e quindi non necessarie ulteriori attività; NO: risultato non accettabile necessità di ulteriori attività. Procedure for the choice of method of Risk Analysis. Characteristic parameters: p_1 : Traffic Volume not exceeding 220 trains/day; p_2 : Altitude trend without gradient reversals; p_3 : type of traffic without the presence in the tunnel of passenger trains and trains with dangerous goods at the same time; p_4 : No specific area risks near the entrances. Tunnels not characterised by p_3 and p_4 parameters shall be subjected to extended Risk Analysis where the YES and the NO of the BRA and ERA respectively mean: YES: analysis with acceptable result and therefore further activities are not needed; NO: unacceptable result, need for additional activities.

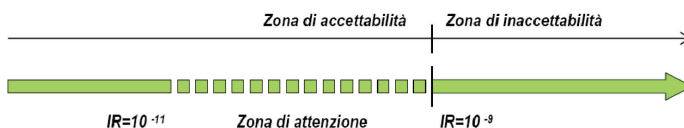


Fig. 3 – Livelli di accettabilità del Rischio Atteso Individuale (IR). Acceptable levels of Expected Individual Risk (IR).

The individual risk value in tunnels is fixed in

$$10^{-9} \frac{\text{fatalità}}{\text{passengers} \cdot \text{km} \cdot \text{year}}$$

assuming that each user runs an average of 1000 km per year on the railway system.

The following is thus defined:

- Warning threshold:
$$IR = 10^{-11} \frac{\text{fatalità}}{\text{passengers} \cdot \text{km} \cdot \text{year}}$$
- Unacceptability thresholds:
$$IR = 10^{-9} \frac{\text{fatalità}}{\text{passengers} \cdot \text{km} \cdot \text{year}}$$

The Cumulative Risk level (CR) is defined on the basis of the cumulative distribution probability of damage level referred to the period of one year.

Il decreto 28/10/2005 prevede, per lo sviluppo dell'ARB, un modello di studio che contempla tre indicatori di danno D_T , D_O , $D_{ch}^{(1)}$ con soglia di accettabilità pari a 0,3 i quali tengono conto degli effetti della temperatura e dell'irraggiamento termico (F_T), della scarsità di ossigeno (F_O), delle caratteristiche della galleria (w , S_g , L_{eff}) e della presenza di prodotti tossici (F_{ch}) sviluppatasi durante l'esodo dalla galleria. Qualora anche uno solo degli indicatori proposti non risulti accettabile rispetto al limite di soglia di cui sopra si procede obbligatoriamente all'ARE.

$$D_T = F_T \cdot \left(\frac{80}{S_g} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{0,8}{w} \right)^2 \quad (1)$$

$$D_O = F_O \cdot \left(\frac{80}{S_g} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{0,8}{w} \right)^2 \quad (2)$$

$$D_{ch} = F_{ch} \cdot \left(\frac{80}{S_g} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{0,8}{w} \right)^2 + 0,03 \cdot \frac{L_{eff}}{1000} \quad (3)$$

Parametri caratteristici: S_g = Sezione della galleria; L_{eff} = lunghezza efficace di una galleria; w = Larghezza dei percorsi di esodo; F_T = Dose frazionale inabilitante (FID) dovuta al rischio termico per la galleria tipo indicato dal DM e pari a 0,08; F_O = Dose frazionale inabilitante (FID) dovuta al rischio di ipossia a causa della scarsità di ossigeno per la galleria tipo indicato dal DM e pari a 0,06; F_{ch} = Dose frazionale inabilitante (FID) dovuta al rischio chimico per la galleria tipo indicato dal DM e pari a 0,05.

5. Modello per l'analisi di rischio estesa (ARE)

L'esecuzione dell'ARE ci permette di valutare l'incidente in termini di numero di fatalità per eventi incidentali all'interno della galleria ma non essendo presente, a differenza dell'ARB, un modello di riferimento ne consegue la necessità di introdurre un *Modello di scenario incidentale*.

In questo modello l'incendio ipotizziamo che intervenga su una carrozza di vecchia generazione con arresto del convoglio in galleria avente sezione di 80 m² (la sezio-

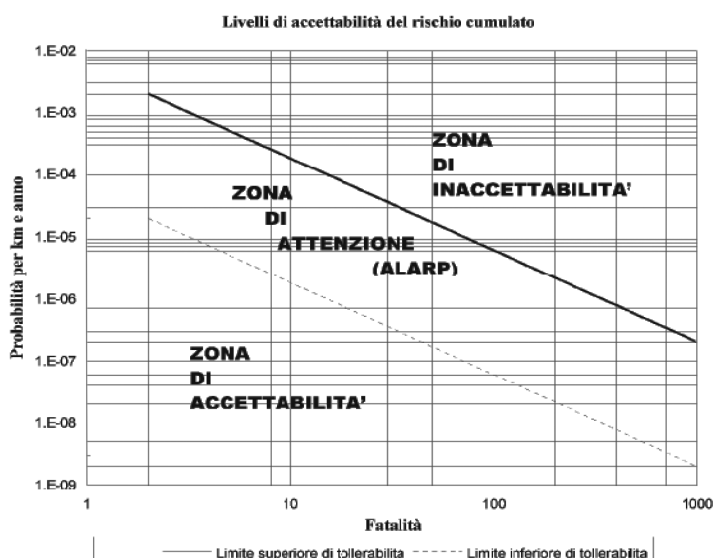


Fig. 4 – Livelli di accettabilità del Rischio Cumulato (CR); $F(x)$ rappresenta il rischio base e $1-F(x)$ rappresenta il rischio cumulato. Acceptance levels of Cumulative Risk (CR); $F(x)$ represents the base risk and $1-F(x)$ represents the cumulative risk.

As cumulative risk acceptability criterion an analysis is done concerning the probability that, in a fixed period of time (e.g. one year) and per tunnel kilometre, no more than a predetermined number of fatalities occur.

$$[N / km \cdot year]$$

In order to identify an acceptability threshold, the decree introduces an evaluation criterion on *Probability per km and year – Feasibility number* $[P([N / km \cdot year] \geq x), N]$ in which the annual probability that the number of fatalities per kilometre exceeds predetermined reference thresholds is taken into account.

The Decree of 28/10/2005, provides a study model that contemplates three indicators of damage D_T , D_O , $D_{ch}^{(1)}$ for the development of the BRA with acceptability threshold equal to 0.3 which take into account the effects of temperature and thermal radiation (F_T), the scarcity of oxygen (F_O), the characteristics of the tunnel (w , S_g , L_{eff}) and the pres-

⁽¹⁾ I tre indicatori di danno definiti per l'analisi di rischio base sono:

- D_T : rappresenta il danno associato agli effetti della temperatura e dell'irraggiamento termico;
- D_O : rappresenta il danno dovuto alla scarsità di ossigeno;
- D_{ch} : rappresenta il danno durante l'esodo in galleria, dovuto alla concentrazione del monossido di carbonio e di altri prodotti tossici, computati conservativamente raddoppiando il contributo dovuto al solo monossido di carbonio.

⁽¹⁾ The three indicators of damage defined for risk analysis are:

- D_T : represents the damage associated with the effects of temperature and thermal radiation;
- D_O : represents the damage due to the lack of oxygen;
- D_{ch} : represents the damage during the escape in the tunnel, due to the concentration of carbon monoxide and other toxic products, calculated conservatively by doubling the contribution due to carbon monoxide.

ne di riferimento è un dato di input previsto dal decreto 28/10/2005 e rappresenta la sezione tipica di una galleria ferroviaria a doppio senso di marcia).

Il modello proposto per lo sviluppo dell'ARE, tiene conto dei seguenti dati di input indispensabili per la valutazione richiesta dall'ARE relativa all'andamento di un incendio in galleria; tale andamento permetterà di valutare le condizioni necessarie per permettere un'evacuazione in sicurezza da parte dei passeggeri di un veicolo ferroviario in caso di incendio in galleria.

Dati di input: Caratteristiche della galleria⁽²⁾, carico di incendio necessario per lo sviluppo del focolaio e tempo di sviluppo, caratteristiche termodinamiche dei materiali, condizioni di ventilazione, condizioni di temperatura prima e durante l'esodo, modalità e velocità dell'esodo delle persone coinvolte.

Dati di output: Curva di rilascio della potenza termica; calore rilasciato per convezione e per irraggiamento dalle fiamme all'interno della galleria nel tempo; massa bruciata all'interno della galleria; massa dei fumi prodotti e velocità dei fumi; concentrazione dei prodotti tossici della combustione all'interno della galleria.

5.1. Dati di input

5.1.1. Carico di incendio

Il carico d'incendio è la quantità totale di calore che può essere prodotto dalla combustione completa di tutto il materiale incendiabile presente all'interno di una carrozza ferroviaria (fig. 5). Il carico d'incendio nello studio del modello è molto importante perché definisce il combustibile essenziale per individuare la durata dell'incendio all'interno del locale.

I materiali maggiormente infiammabili sono i polimeri:

- poliuretano (imbottitura che forma la seduta);
- tessuto (rivestimento seduta);
- laminati melamminici (rivestimento delle pareti);
- gomma navale o tappeto gomma (pavimento carrozza strato esterno, piano di calpestio);
- tavolato multistrato (pavimento carrozza strato intermedio);
- antivibrante pesante (pavimento carrozza strato interno);
- gomma mantici (soffietto tra le varie carrozze);
- plafoniere in policarbonato.

Per calcolare il carico d'incendio occorre conoscere oltre alle masse anche il potere calorifico dei materiali.

⁽²⁾ È stata ipotizzata una galleria a doppio senso di marcia avente una sezione di 80m² con un'altezza di 9,5 m.

ence of toxic products (F_{ch}) developed during the escape from the tunnel. If even one of the indicators proposed is not acceptable compared to the threshold limit referred to above, one must mandatorily proceed with the ERA.

$$D_T = F_T \cdot \left(\frac{80}{S_g} \right)^2 + \frac{I}{2} \cdot \left(\frac{0,8}{w} \right)^2 \quad (1)$$

$$D_O = F_O \cdot \left(\frac{80}{S_g} \right)^2 + \frac{I}{2} \cdot \left(\frac{0,8}{w} \right)^2 \quad (2)$$

$$D_{ch} = F_{ch} \cdot \left(\frac{80}{S_g} \right)^2 + \frac{I}{2} \cdot \left(\frac{0,8}{w} \right)^2 + 0,03 \cdot \frac{L_{eff}}{1000} \quad (3)$$

Characteristic parameters: S_g = Tunnel section; L_{eff} = effective length of a tunnel; w = width of escape routes; F_T = Disabling fractional dose (FID) due to thermal risk for the tunnel type indicated by the Ministerial Decree and equal to 0.08; F_O = Disabling fractional dose (FID) due to the risk of hypoxia caused by the lack of oxygen for the tunnel type indicated by the Ministerial Decree and equal to 0.06; F_{ch} = Disabling fractional dose (FID) due to chemical hazard for the tunnel type indicated by the Ministerial Decree and equal to 0.05.

5. Model for extended risk analysis (ERA)

The execution of the ERA allows us to assess the accident in terms of number of fatalities for any accidental events inside the tunnel but, unlike the BRA, the absence of a reference model results in the need to introduce an *Accidental Scenario Model*.

In this model, we assume that the triggered fire occurs in an old generation passenger car with stopping of the train set in the tunnel with a section of 80 m² (the reference section is an input data envisaged by the Decree of 28/10/2005 and represents the typical section of a railway tunnel with two-way running direction).

The model proposed for the development of the ERA, takes into account the following input data: essential to the assessment required by the ERA related to the trend of a fire in the tunnel; this trend will allow evaluating the conditions needed for safe evacuation of passengers of a railway vehicle in the event of fire in the tunnel.

Input data: Characteristics of the tunnel ⁽²⁾, fire load required for the development of the outbreak and development time, thermodynamic properties of materials, ventilation conditions, and temperature conditions before and during the escape, escape mode and speed of the people involved.

Output data: Thermal power release curve; the heat released by convection and irradiation from flames inside

⁽²⁾ A two-way direction tunnel was suggested with a section of 80 m² with a height of 9.5 m.

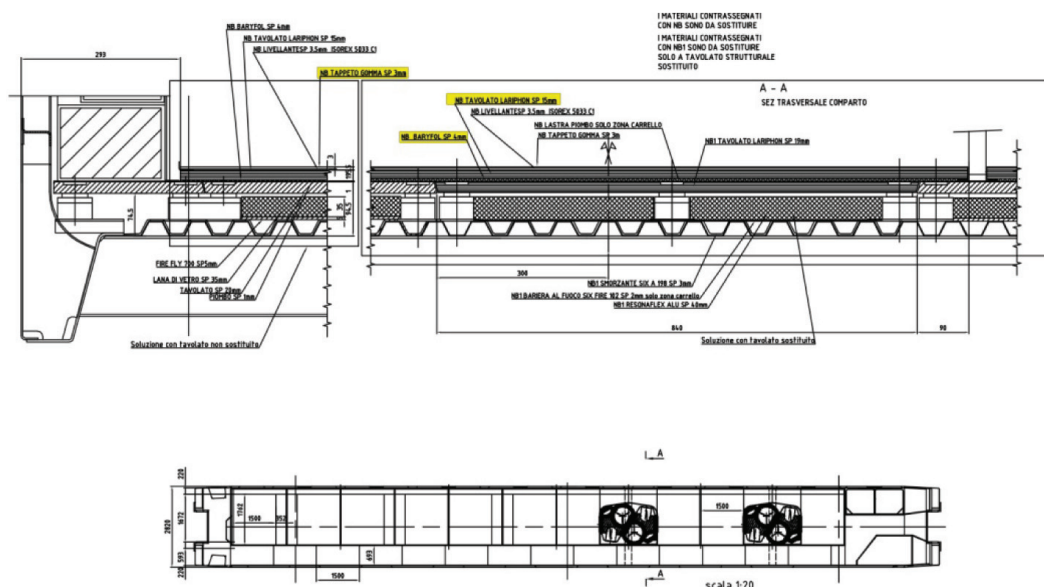


Fig. 5 – Particolari di una carrozza ferroviaria. *Details of a passenger car.*

Per i combustibili contenenti idrogeno, tra i cui prodotti di combustione compare l'acqua, si distinguono due poteri calorifici:

- il potere calorifico superiore (*PCS*) che rappresenta tutto il calore sviluppato;
- il potere calorifico inferiore (*PCI*) che rappresenta il calore totale sviluppato da cui però viene detratto il calore necessario all'evaporazione dell'acqua prodottasi.

Quindi il potere calorifico superiore totale sarà calcolato come media pesata tra i poteri calorifici superiori delle diverse sostanze considerate

$$PCS_{TOT} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \cdot PCS_i}{M} = 21,8 \frac{MJ}{Kg} \quad (4)$$

Convenzionalmente per i calcoli del modello, (massa bruciata) viene utilizzato il potere calorifico inferiore medio (*PCI*) calcolato come

$$PCI = 0,9 \cdot PCS_{TOT} = 19,6 \frac{MJ}{Kg} = 4686,7 \frac{Kcal}{Kg} \quad (5)$$

Nella formula (5) si è considerato un potere calorifico superiore (PCS_{TOT}) ridotto del 10% a causa delle perdite

the tunnel over time; mass burned inside the tunnel; smoke mass produced and speed of fumes; concentration of combustion toxic products inside the tunnel.

5.1. Input data

5.1.1. Fire load

The fire load is the total amount of heat that can be produced by the complete combustion of any combustible material present inside a passenger car (fig. 5). The fire load of the study model is very important because it defines the fuel essential for the identification of the duration of the fire inside the premises.

The most inflammable materials are polymers:

- polyurethane (padding that forms the seat);
- fabric (seat cover);
- melamine laminates (coating of the walls);
- naval rubber or rubber carpet (floor carriage outer layer; walkway);
- multi-layer plank (carriage floor intermediate layer);
- heavy vibration-damper (carriage floor inner layer);
- rubber mantic (bellows between the various carriages);
- polycarbonate ceiling lights.

dovute al calore latente di vaporizzazione dell'acqua durante la combustione⁽³⁾.

I poteri calorifici superiori delle diverse sostanze considerate sono tratte dalla letteratura tecnica.

Inoltre nel seguito per facilitare lo studio del sistema, viene sostituito il carico di incendio dei vari materiali con quello di un unico materiale che è lo stirolo polimero (C_8H_8).

Questa sostituzione è possibile perché il carico d'incendio che riguarda la carrozza è formato da polimeri che hanno caratteristiche termodinamiche simili a quelle dello stirolo polimero.

5.1.2. Energia di innesco e cinetica della reazione

La reazione di combustione è una reazione esotermica. La reazione è caratterizzata da una entità fisica detta *Energia di innesco*⁽⁴⁾.

Secondo la norma UNI 11170-3 [2] la sorgente tipica di innesco è rappresentata da un cuscino di carta da 100g posizionato su un sedile preventivamente vandalizzato (fig. 6).

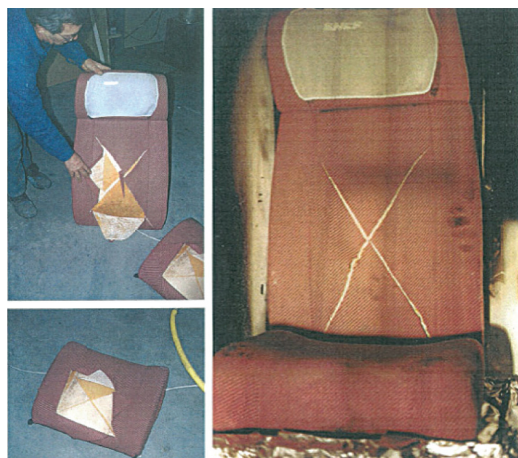


Fig. 6 – Sedile vandalizzato e cuscino Livello 2. Vandalised seat and Level 2 cushion.

Le reazioni, una volta innescate, tendono a progredire (fig. 8).

Nel modello l'energia d'innesco (E_i) è l'energia che il sistema possiede quando inizia la propagazione dell'incendio.

⁽³⁾ Per ogni Kg di acqua evaporata, i fumi avranno 2500KJ di calore di condensazione perso.

⁽⁴⁾ Ogni reazione è caratterizzata da un'entità fisica detta "energia di innesco" la quale rappresenta la quantità di energia che deve essere fornita ai reagenti perché la reazione di combustione abbia inizio.

To calculate the fire load the calorific value of materials besides the masses must be known.

For hydrogen-containing fuels, like water among combustion products, there are two calorific values:

- the top calorific value (PCS) representing all the heat developed;
- the bottom calorific value (PCI) which represents the total heat developed but deducted of the necessary heat for water evaporation produced.

Therefore the total calorific value will be calculated as a weighted average of the top calorific values of the different substances considered

$$PCS_{TOT} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \cdot PCS_i}{M} = 21,8 \frac{MJ}{Kg} \quad (4)$$

Conventionally the average net calorific value (PCI) is used for model calculations (burned mass) calculated as

$$PCI = 0,9 \cdot PCS_{TOT} = 19,6 \frac{MJ}{Kg} = 4686,7 \frac{Kcal}{Kg} \quad (5)$$

In the formula (5) a top calorific value (PCS_{TOT}) was considered reduced by 10 percent because of losses due to the latent water vaporisation heat during combustion⁽³⁾.

The top calorific values of the different substances under consideration are taken from technical literature.

In addition, to facilitate the study of the system, the fire load of various materials is replaced with that of one material that is styrene polymer (C_8H_8).

This substitution is possible because the fire load that relates to the carriage is composed of polymers that have the same thermodynamic characteristics of styrene polymer.

5.1.2. Ignition power and kinetics of the reaction

The combustion reaction is an exothermic reaction. The reaction is characterised by a physical entity called *Ignition energy*⁽⁴⁾.

According to the UNI 11170-3 [2] standard the typical ignition source is represented by a 100 g paper cushion placed on a seat previously vandalized (fig. 6).

Once ignited, the reactions tend to progress (fig. 8).

In the model, the ignition energy (E_i) is the energy that the system has when the fire starts spreading.

⁽³⁾ For each Kg of evaporated water, the fumes will have 2500KJ of lost condensation heat.

⁽⁴⁾ Each reaction is characterised by a physical entity called "ignition energy" which represents the amount of energy that must be supplied to the reagents for the combustion reaction to begin.

In base a prove di laboratorio⁽⁵⁾ eseguite su una seduta vandalizzata il valore dell'energia di innesco rilasciata in funzione del tempo risulta quello illustrato in fig. 7.

Nel modello è stato preso a riferimento il valore di picco pari a $E_i = 238 \text{ kW} = 0,859 \text{ GJ}$ rilasciato in 800 s di combustione (6).

$$E_i = 238 \text{ kW} = 0,859 \text{ GJ} \quad \text{rilasciato in 800 sec.} \quad (6)$$

Il valore ottenuto sperimentalmente è stato confermato anche da calcoli analitici.

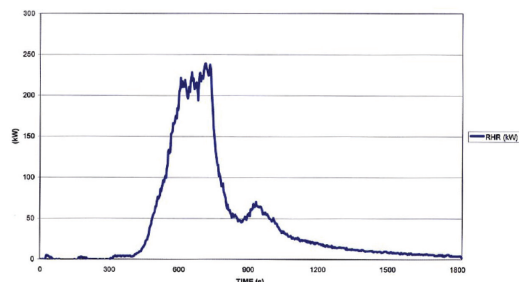


Fig. 7 - Curva reale del rilascio della potenza termica di un sedile vandalizzato - livello 2. *Real thermal power release curve of a vandalised seat - level 2.*

$$E_i = PCS_{TOT} \cdot M_S = 238000 \text{ Kcal} = 0,996 \text{ GJ} \quad (7)$$

dove:

$$PCS_{TOT} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} \right] : \text{È il potere calorifico superiore totale;}$$

$M_S [\text{kg}]$: È la massa di una seduta imbottita di prima classe (45 kg).

Per la reazione di combustione è importante conoscere la *Cinetica della reazione*⁽⁶⁾.

Nel caso di polimeri sottoposti a una reazione di *primo ordine*, avremo:



Fig. 8 - Propagazione dell'incendio nella seduta vandalizzata. *Fire propagation in the vandalised seat.*

According to laboratory tests performed⁽⁵⁾ on a vandalised seat, the value of the ignition energy released according to time is the one shown in fig. 7.

The peak value of $E_i = 238 \text{ kW} = 0,859 \text{ GJ}$, released in 800 s of combustion was taken as reference in the model (6).

$$E_i = 238 \text{ kW} = 0,859 \text{ GJ} \text{ released in 800 sec.} \quad (6)$$

The value obtained experimentally was also confirmed by analytical calculations.

$$E_i = PCS_{TOT} \cdot M_S = 238000 \text{ Kcal} = 0,996 \text{ GJ} \quad (7)$$

where:

$$PCS_{TOT} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} \right] : \text{Is the total top calorific value;}$$

$M_S [\text{kg}]$: is the mass of a first class padded seat (45 kg).

For the combustion reaction, it is important to know the *Kinetics of the reaction*⁽⁶⁾.

In the case of polymers subjected to a *first class reaction*, we have:

– *Power increase Kinetics*:

$$k = 3,2 \frac{\text{MW}}{\text{GJ}} = 3,2_{s-1}; \quad (8)$$

for complete combustion, while we will talk about

⁽⁵⁾ Le prove di laboratorio sono state condotte nell'ambito del progetto di ricerca europeo FIRESTARR attraverso l'ausilio di un'apparecchiatura denominata Forniture calorimeter.

⁽⁶⁾ La cinetica di reazione rappresenta la velocità di sviluppo della reazione di combustione (incremento del rilascio di calore). Siccome le fasi dell'incendio sono influenzate dalla quantità di ossigeno disponibile parleremo di "Cinetica di incremento di potenza" per una combustione completa, mentre per una combustione incompleta parleremo di "Cinetica rallentata di incremento di potenza".

In questo caso parliamo di cinetica rallentata perché i prodotti formatosi reagiranno dando origine a reazioni inverse con velocità non trascurabile che rallentano la reazione complessiva.

⁽⁵⁾ Laboratory tests have been carried out within the FIRESTARR European research project through the use of a device called Forniture calorimeter.

⁽⁶⁾ The reaction kinetics represents the growth speed of the combustion reaction (increase of heat release). Since the phases of the fire are influenced by the amount of oxygen available we will talk about "Kinetics of power increase" for a complete combustion, while for an incomplete combustion will talk about "Slow Kinetic of power increase".

In this case we speak of slow kinetics because the products formed will react causing reverse reactions with non-negligible speed that slow down the overall reaction.

- Cinetica di incremento di potenza:

$$k = 3,2 \frac{MW}{GJ} = 3,2_{s-1}; \quad (8)$$

per una combustione completa, mentre parleremo di

- Cinetica rallentata⁽⁷⁾ di incremento di potenza:

$$k = 2,5 \frac{MW}{GJ} = 2,5_{s-1}; \quad (9)$$

per una combustione non completa.

I valori sopra riportati sono tratti dalla letteratura tecnica dove k è una costante di velocità specifica, che rappresenta la velocità iniziale della reazione quando i reagenti hanno concentrazione unitaria.

5.1.3. Condizioni di ventilazione

Il movimento dei fumi nella galleria è influenzato dall'entità e dalla direzione della velocità dell'aria dovuta alla prevalenza naturale o a sistemi di ventilazione forzata e dall'eventuale presenza di pozzi di aspirazione.

Per questo motivo la condizione della ventilazione all'interno della galleria è assunta secondo il modello sull'avanzamento del fronte dei fumi [3].

Il regime dei fumi dà origine a due scenari incidentali (fig. 9):

- Scenario incidentale n. 1: Condizione di ventilazione all'interno della galleria $U \geq U_c$ per cui i fumi formano una miscela omogenea con l'aria nell'intera sezione del tunnel a valle dell'incendio.
- Scenario incidentale n. 2: Condizione di ventilazione all'interno della galleria $U < U_c$ per cui si ha nelle fasi iniziali una stratificazione dei fumi in entrambe le direzioni, con una successiva occupazione dell'intera sezione a causa della riduzione della velocità di avanzamento.

dove:

U [m/s] = Velocità del flusso longitudinale di aria a monte dell'incendio;

U_c [m/s] = Valore medio della velocità critica ove la velocità critica rappresenta il valore limite che tiene conto della prevalenza naturale (differenza di quota tra gli imbocchi e di temperatura tra l'interno e l'esterno), eventuali effetti pistone di treni in transito all'interno della galleria e alla ventilazione forzata se presente.

- Slow kinetics⁽⁷⁾ of power increase:

$$k = 2,5 \frac{MW}{GJ} = 2,5_{s-1}; \quad (9)$$

for an incomplete combustion.

The values listed above are taken from technical literature where k is a specific speed constant that represents the initial speed of the reaction when reagents have uniform concentration.

5.1.3. Ventilation conditions

The movement of smoke in the tunnel is influenced by the extent and by the direction of the air speed due to natural prevalence or to forced ventilation systems and to the possible presence of ventilation wells.

For this reason, the ventilation condition inside the tunnel is assumed according to the pattern on the advancement of the smoke front [3].

The smoke regime gives rise to two incidental scenarios (fig. 9):

- Accidental Scenario n. 1: Ventilation condition inside the tunnel for which fumes form a homogeneous mixture with the air in the entire section of tunnel downstream of the fire.
- Accidental Scenario n. 2: Ventilation condition inside the tunnel $U < U_c$ whereby there is a smoke stratification in the early phases in both directions, with a subsequent occupation of the entire section due to the reduction in forward speed.

where:

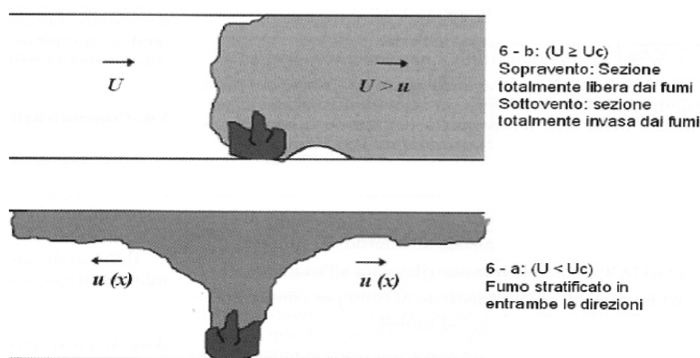


Fig. 9 – Possibili regimi di movimento dei fumi all'interno del tunnel. Possible smoke movement schemes inside the tunnel.

⁽⁷⁾ Si parla di reazione rallentata perché i prodotti reagendo danno origine a reazioni inverse che rallentano la reazione causando una cinetica di reazione minore, rispetto al caso di combustione completa.

⁽⁷⁾ We refer to slow reaction because by reacting, the products give rise to reverse reactions that slow down the reaction causing minor reaction kinetics compared to the case of complete combustion.

Il modello proposto prende in considerazione solo il caso n. 1 cioè quello più gravoso, che si verifica nelle fasi successive all'innescio. La velocità di avanzamento si può ricavare dalla quantità di aria disponibile in galleria.

La massa d'aria longitudinale (m_a) che passa dalle aperture può essere espressa in termini generali dalla relazione riportata dal testo "The Handbook of Tunnel fire safety" [4]:

$$m_a = \rho_a \cdot \delta \cdot \sqrt{g} \cdot A_o \cdot \sqrt{h_o} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (10)$$

dove:

$m_a \left[\frac{kg}{s} \right]$: Massa d'aria longitudinale;

δ : Costante che dipende dalla temperatura durante l'evoluzione dell'incendio; il valore δ può essere stimato 0,08 nel caso di pre-flashover⁽⁸⁾ (incendio con ventilazione controllata) e 0,13 nel caso di post-flashover (incendio non controllato);

$A_o [m^2]$: Area apertura tunnel;

$h_o [m]$: Altezza apertura tunnel;

$g [m / s^2]$: Accelerazione; ($9,81 m/s^2$)

$\rho_a [kg / m^3]$: Densità aria nel tunnel $\left(1,201 \frac{kg}{m^3} \right)$.

La velocità longitudinale dell'aria (U) è stata calcolata dalla formula indicata da "The Handbook of Tunnel Fire Safety":

$$U = \frac{m_a}{\rho_o \cdot A_o} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (11)$$

dove:

$U [m/s]$ = Velocità del flusso longitudinale di aria a monte dell'incendio;

$m_a [kg/s]$ = Massa d'aria longitudinale;

$U [m/s]$ = Speed of longitudinal air flow upstream from the fire;

$U_c [m/s]$ = Average value of critical speed where the critical speed represents the limit value that takes into account the natural prevalence (difference in altitude between the entrances and temperature between the inside and outside), any piston effects of trains in transit inside the tunnel and forced ventilation if present.

The proposed model takes only case n. 1 into account that is the most difficult one that occurs in the phases subsequent to ignition. The progress speed can be derived from the amount of air available in the tunnel.

The longitudinal air mass (m_a) that passes through the openings can be expressed in general terms from the report quoted by the text "The Handbook of Tunnel fire safety" [4]:

$$m_a = \rho_a \cdot \delta \cdot \sqrt{g} \cdot A_o \cdot \sqrt{h_o} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (10)$$

where:

$m_a \left[\frac{kg}{s} \right]$: the longitudinal air mass;

δ : A constant that depends on the temperature during the evolution of fire; the δ value can be estimated at 0.08 in the case of pre-flashover⁽⁸⁾ (fire with controlled ventilation) and 0.13 in case of post-flashover (uncontrolled fire);

$A_o [m^2]$: Tunnel opening area;

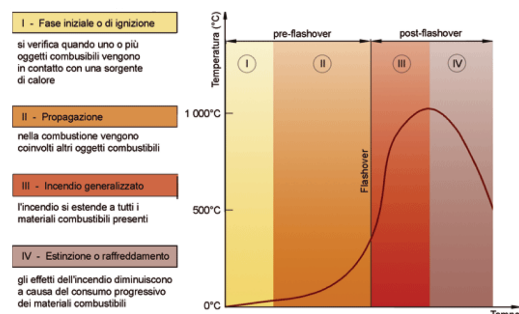
$h_o [m]$: Tunnel opening height;

$g [m / s^2]$: Acceleration; ($9,81 m/s^2$)

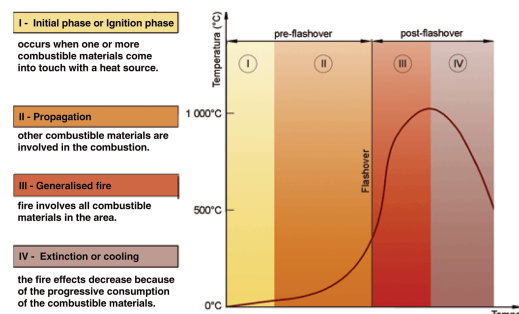
$\rho_a [kg / m^3]$: Air density in the tunnel $\left(1,201 \frac{kg}{m^3} \right)$.

The longitudinal air speed (U) was calculated by the formula indicated by "The Handbook of Tunnel Fire Safety":

⁽⁸⁾ L'evoluzione classica di un incendio in un mezzo ferroviario in esercizio può essere suddivisa schematicamente in quattro principali fasi o periodi:



⁽⁸⁾ The classical evolution of a fire in a railway vehicle in operation can be schematically divided into four main phases or periods:



$\rho_0 = [kg / m^3]$ = densità dell'aria alla temperatura ambiente;

A_0 = Area apertura tunnel.

Il manuale del QRA Model suggerisce la valutazione della velocità critica sopra definita dell'aria come [5]:

$$U_c = K_l \cdot K_g \cdot \left(\frac{g \cdot h_0 \cdot Q_c}{\rho_0 \cdot c_p \cdot A_T \cdot T_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

dove:

U_c [m/s]: Velocità critica;

$K_l = 0,61$;

$Grade$ [%]: Pendenza in discesa;

$K_g = (1 + 0,0374) (Grade) 0,8$ per pendenza < 0

$K_g = 1$ per pendenza ≥ 0

$g = 9,81[m/s^2]$: Accelerazione;

h_0 [m]: Altezza del tunnel;

Q_c [kW]: Quantità di calore rilasciato per convezione;

$\rho_0 = [kg/m^3]$: Densità dell'aria alla temperatura ambiente;

$c_p = [kJ/^\circ C kg]$: Calore specifico dell'aria;

A_T [m²]: Aria interessata dall'incendio;

T_i [°C]: Temperatura media dei gas durante l'incendio.

Nel caso considerato il valore medio della velocità longitudinale dell'aria e il valore medio della velocità critica risultano:

$$U = 1,25 \frac{m}{s} \quad e \quad U_c = 0,94 \frac{m}{s}$$

5.1.4. Variazione della temperatura nel tempo

Nello scenario ipotizzato si considera la curva temperatura-tempo normata secondo la ISO 834 richiamata nella norma UNI EN 1363-1 [6], curva che riproduce sperimentalmente l'evoluzione della temperatura dell'incendio.

Questa è ritenuta una delle curve più rappresentative per lo sviluppo dell'incendio generalizzato all'interno di un tunnel (fig. 10).

È una curva monotona crescente che trascura la fase di innesco di prima propagazione avendo inizio in corrispondenza della fase di flash-over definita nella nota (12).

La temperatura media deve seguire la reazione:

$$T = 345 \cdot \log_{10} ((8 \cdot t + 1) + 20) \quad (13)$$

La curva è stata ricavata in base a dati rilevati durante incendi reali che si sono verificati e dati sperimentali disponibili.

Nella seconda parte del modello (studio della reazione di combustione) la reazione chimica comporta l'ossidazione di un combustibile da parte di un comburente,

$$U = \frac{m_a}{\rho_0 \cdot A_0} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (11)$$

where:

U [m/s] = Speed of longitudinal air flow upstream from the fire;

m_a [kg/s] = longitudinal air mass;

$\rho_0 = [kg / m^3]$ = air density at room temperature;

A_0 = Tunnel opening area.

The QRA Model manual suggests evaluating the above-mentioned critical air speed as [5]:

$$U_c = K_l \cdot K_g \cdot \left(\frac{g \cdot h_0 \cdot Q_c}{\rho_0 \cdot c_p \cdot A_T \cdot T_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

where:

U_c [m/s]: Critical speed;

$K_l = 0.61$;

$Grade$ [%]: downhill gradient;

$K_g = (1 + 0,0374) (Grade) 0,8$ for gradient < 0

$K_g = 1$ for gradient ≥ 0

$g = 9.81[m/s^2]$: Acceleration;

h_0 [m]: Tunnel height;

Q_c [kW]: Amount of heat released by convection;

$\rho_0 = [kg/m^3]$: Air density at room temperature;

$c_p = [kJ/^\circ C kg]$: Specific heat of the air;

A_T [m²]: air affected by fire;

T_i [°C]: Average temperature of gases during a fire.

In the case considered, the average value of longitudinal air speed and the average value of the critical speed are:

$$U = 1,25 \frac{m}{s} \quad e \quad U_c = 0,94 \frac{m}{s}$$

5.1.4. Temperature variation over time

In the suggested scenario, the temperature-time curve defined according to ISO 834 invoked in UNI EN 1363-1 [6] is considered, curve that experimentally reproduces the evolution of the fire temperature.

This is believed to be one of the most representative curves for the development of generalised fire inside a tunnel (fig. 10).

It is a monotonous increasing curve that neglects the first propagation ignition phase having a beginning at the flash-over phase defined in note (12).

The average temperature must follow the reaction:

$$T = 345 \cdot \log_{10} ((8 \cdot t + 1) + 20) \quad (13)$$

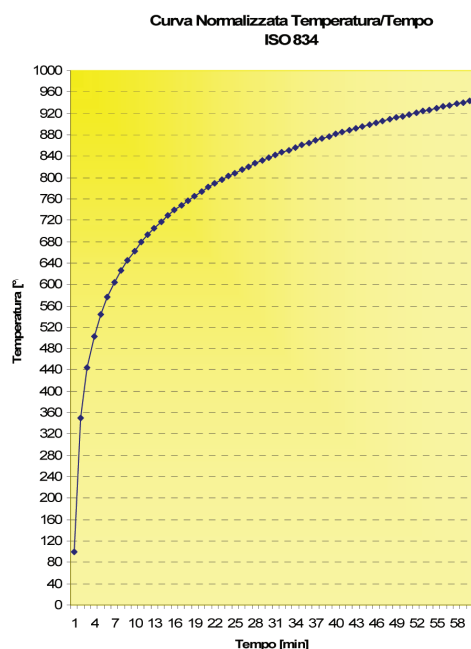


Fig. 10 - Curva normata temperatura-tempo. Defined temperature-time curve.

cioè ossigeno presente nell'aria, con sviluppo di calore e gas di combustione.

Una volta innescata la reazione è necessario conoscere:

- quantità e tipologia dei gas prodotti;
- calore emesso dagli elementi stessi che contribuirà alla formazione di fumi e calore di combustione teorico.

Come anticipato nella prima parte del capitolo, a fini semplificativi nel modello proposto, viene sostituito il carico di incendio dei vari materiali con quello di un unico materiale che è lo *Stirola polimero*⁽⁹⁾.

Questa sostituzione è possibile perché la carrozza è formata da polimeri che hanno caratteristiche termodinamiche simili a quelle dello stirola.

Le fasi dell'incendio sono influenzate dalla quantità di ossigeno disponibile durante la reazione di combustione per cui si possono verificare due situazioni:

The curve was derived on the basis of data collected during actual fires that occurred and experimental data available.

In the second part of the model (the study of combustion reaction) the chemical reaction involves oxidation of a fuel by an oxidizer, i.e. the oxygen present in the air, with the development of heat and combustion gases.

Once the reaction is triggered the following must be known:

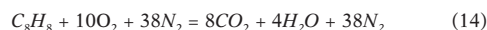
- quantity and type of gases produced;
- the heat output by the same elements that will contribute to the formation of fumes and theoretical combustion heat.

As mentioned in the first part of the chapter, to simplify the proposed model, the fire load of various materials is replaced with that of one material that is *Styrene polymer*⁽⁹⁾.

This replacement is possible because the carriage is composed of polymers that have thermodynamic characteristics similar to those of styrene.

The fire phases are influenced by the amount of available oxygen during the combustion reaction therefore two situations can occur:

Full reaction (ideal reaction). Carbon dioxide and main products are produced in the styrene polymer combustion.



Considering the combustion of 1 kmol (1000 moles) of styrene polymer (C_8H_8) with 10 kmol of oxygen (O_2) contained in a mass of air, the result is 8 kmol of carbon dioxide (CO_2) and 4 kmol of water.

Where:

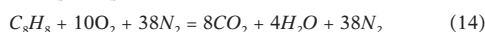
- 10 derives from excess air: percentage of air supplied in excess of the stoichiometric quantity, value listed for total combustion;
- nitrogen (N_2) is an inert gas and therefore does not react with any element or substance during combustion.

Nitrogen occurs both between the reagents and products with the same mass, the value $3,8 \times 10 = 38$ of the number of kmol for nitrogen is given by the ratio of the volumetric composition of oxygen and nitrogen that is

⁽⁹⁾ Con il termine "polimeri" si intendono comunemente le macromolecole di origine sintetica (materie plastiche). Un polimero è una molecola dall'elevata massa molecolare, costituita da un gran numero di piccole molecole unite a catena mediante la ripetizione dello stesso tipo di legame. Un polimero è un idrocarburo costituito prevalentemente da carbonio (C) ed idrogeno (H); questi sono detti elementi utili, in quanto conferiscono alle sostanze i requisiti per sviluppare calore con una combustione.

⁽⁹⁾ The term "polymers" commonly means macromolecules of synthetic origin (plastics). A polymer is a molecule with high molecular mass, consisting of a large number of small molecules chain coupled through the repetition of the same type of bond. A polymer is a hydrocarbon composed predominantly of carbon (C) and hydrogen (H); these are called useful elements, as they give substances the requirements for developing combustion heat.

Reazione completa (reazione ideale). Nella combustione dello stirolo polimerico si produce anidride carbonica e prodotti principali.



Considerando la combustione di 1kmole (1000 moli) di stirolo polimerico (C_8H_8) con 10 kmoli di ossigeno (O_2) contenuti in una massa d'aria, si ottengono 8 kmoli di anidride carbonica (CO_2) e 4 kmoli di acqua.

Dove:

- 10 deriva dall'eccesso d'aria: percentuale di aria alimentata in eccesso rispetto alla quantità stechiometrica, valore tabulato per una combustione totale;
- l'azoto (N_2) è un inerte, pertanto non reagisce con nessun elemento o sostanza durante la combustione.

L'azoto compare sia tra i reagenti che tra i prodotti con la stessa massa, il valore $3,8 \times 10 = 38$ del numero di kmoli per l'azoto è dato dal rapporto tra la composizione volumetrica dell'azoto e quella dell'ossigeno, cioè

$$\frac{79}{21} = 3,8. \text{ Cioè } \frac{1}{3,8} \text{ è il rapporto molare } \frac{O_2}{N_2} \text{ nell'aria}$$

standard (21% O_2 e 79% N_2), per la quale risulta il seguente peso molecolare medio:

$$PM = 28,96 \frac{Kg}{Kmol}$$

Reazione incompleta (reazione reale). Se l'ossigeno non è sufficiente per la combustione di tutto il materiale incendiabile si formeranno prodotti principali e secondari.

L'ossigeno presente consente di ipotizzare una resa del 70%, valore tipico per reazioni incomplete dove per resa si intende il grado di completamento della reazione; essa indica quanto la combustione reale rende rispetto a una combustione ideale e viene calcolata rispetto al prodotto principale (in questo caso anidride carbonica, CO_2).



5.1.5. Aria teorica ed aria effettiva di combustione

Nello studio della reazione di combustione, particolare rilevanza riveste sia l'aria teorica sia quella effettiva di combustione.

L'aria teorica di combustione è la quantità di aria contenente esattamente tutto l'ossigeno necessario per bruciare, in maniera completa, una quantità stabilita di combustibile. Si definisce *indice di aria teorica* (IA_T) (IA air to fuel ratio) il rapporto tra la massa di aria⁽¹⁰⁾ effettivamente utilizzata nella reazione e quella teorica di combustione:

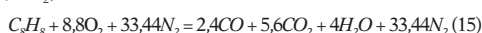
$\frac{79}{21} = 3,8$. That is $\frac{1}{3,8}$ the molar ratio $\frac{O_2}{N_2}$ in standard air in standard air (21% O_2 and 79% N_2), for which the average molecular weight is as follows:

$$PM = 28,96 \frac{Kg}{Kmol}$$

follows:

Incomplete reaction (real reaction). If there is not enough oxygen for the combustion of all combustible material, main and secondary products will form.

The oxygen present allows to suppose a yield of 70%, typical value for incomplete reactions where the meaning of yield is understood as degree of completion of the reaction; it indicates how much the actual combustion yields compared to an ideal combustion and is calculated in relation to the main product (in this case carbon dioxide, CO_2).



5.1.5. Theoretical and actual combustion air

The study of combustion reaction, gives particular importance both to theoretical and actual combustion air.

The theoretical combustion air is the amount of air that contains exactly all the oxygen needed to completely burn a determined amount of fuel. The definition of *theoretical air index* (IA_T) (IA air to fuel ratio) the ratio between the air mass⁽¹⁰⁾ actually used in the reaction and the theoretical combustion one:

$$IA_T = \frac{m_a}{m_c} \left[\frac{kg_a}{kg_c} \right] \quad (16)$$

In the case of incomplete reaction the yield comes into play as the degree of completion of combustion.

To determine the actual combustion air A_e one must introduce the air index (AI) as the ratio of the actual air volume and theoretic air.

A_e and A_t :

$$IA = \frac{A_e}{A_t} \quad (17)$$

In reality, not all the air comes into contact with the surface of the material therefore combustion must occur in excess air (ϵ), amount of air greater than the stoichiometrically one required.

⁽¹⁰⁾ Il comburente più comune è costituito dall'aria, un miscuglio gassoso formato per il 78% in volume da azoto, per 21% da ossigeno, per il 1% da gas rari che si possono inglobare nell'azoto; l'aria è così costituita per il 21% da O_2 e il 79% da N_2 e gas rari che non partecipano alla combustione.

⁽¹⁰⁾ The most common oxidiser consists of air, a gaseous mixture consisting of 78% by nitrogen volume, 21% oxygen, 1% of rare gases that can be incorporated in nitrogen; the air so consists of 21% of O_2 and 79% N_2 and rare gases that do not participate in combustion.

$$IA_T = \frac{m_a}{m_c} \left[\frac{kg_a}{kg_c} \right] \quad (16)$$

Nel caso di reazione incompleta entra in gioco la resa come grado di completamento della combustione.

Per determinare l'aria effettiva di combustione A_e è necessario introdurre l'indice d'aria (IA) come il rapporto tra i volumi di aria effettiva e aria teorica.

A_e e A_t , :

$$IA = \frac{A_e}{A_t} \quad (17)$$

Nella realtà non tutta l'aria viene a contatto con la superficie del materiale quindi la combustione deve avvenire in eccesso d'aria (ϵ), quantità di aria maggiore di quella stechiometricamente necessaria.

Nel caso di combustione completa si ipotizza un eccesso d'aria pari al 10%⁽¹¹⁾ min.

Si può quindi scrivere che l'eccesso d'aria ϵ , espresso in percentuale sarà:

$$\epsilon = (IA - 1) \cdot 100 \Rightarrow A_e = A_t + A_t \cdot \frac{\epsilon}{100} \quad [\text{Kg}] \quad (18)$$

5.1.6. Volume dei fumi e composizione

Vengono definiti fumi, i prodotti gassosi della combustione, con esclusione di eventuali particelle solide sospese. A seconda del tipo di combustione potremo avere:

- a) *Combustione completa* - Gli elementi ossidabili presenti nel materiale combustibile (C, H) si trasformano in anidride carbonica CO_2 , e in acqua H_2O (tabella 1). È una reazione dove non abbiamo la formazione di combustibili.

La combustione si realizza con quantità di aria superiori a quelle strettamente necessarie.

Come si osserva dalla tabella 1 tra i prodotti è presente anche l'ossigeno, poiché l'eccesso di aria fa sì che non tutto l'ossigeno bruci con l'idrogeno ed il carbonio contenuto nello stirolo polimero (C_8H_8).

Infatti dopo aver definito l'indice d'aria IA come rapporto tra volume d'aria effettiva e aria teorica, sfruttando il principio che il numero di molecole contenuto in una grammomolecola di un aeriforme è sempre lo stesso, considerando un eccesso di aria pari al 10% avremo:

In the case of complete combustion an excess of air equal to minimum 10% is assumed⁽¹¹⁾.

Therefore one can write that the excess air ϵ , expressed as a percentage will be:

$$\epsilon = (IA - 1) \cdot 100 \Rightarrow A_e = A_t + A_t \cdot \frac{\epsilon}{100} \quad [\text{Kg}] \quad (18)$$

5.1.6. Smoke volume and composition

One refers to as smokes, gaseous combustion products, with the exclusion of any solid suspended particles. Depending on the type of combustion we will have:

Complete combustion - Oxidisable elements present in combustible material (C, H) are transformed into carbon dioxide CO_2 and in water and H_2O (table 1). It is a reaction where we do not have the formation of combustion gases.

Combustion takes place with an amount of air greater than that strictly necessary.

As we can see from table 1, oxygen is also present among the products, because the excess air makes sure that not all the oxygen burns with the hydrogen and the carbon contained in styrene polymer (C_8H_8).

In fact, after defining the air index AI as the ratio between the actual air volume and theoretic air, taking ad-

TABELLA 1 – TABLE 1
COMPOSIZIONE FUMI, COMBUSTIONE COMPLETA
DI 1KMOLE DI STIROLO POLIMERO
SMOKE COMPOSITION, COMPLETE COMBUSTION OF
1 KMOL OF STYRENE POLYMER

Composizione fumi Smoke composition	n° moli n. of moles [kmoli]	PM [kg/moli]	Massa Mass [kg]	Volume [%]
Ossigeno Oxygen	1,00	32	32	1,82
Azoto Nitrogen	41,80	28	1170,4	76,28
Anidride carbonica Carbon dioxide	8,00	44	352	14,60
Vapore d'acqua Water vapour	4,00	18	72	7,30
TOTALE TOTAL	54,80	29,68	1626,4	100

⁽¹¹⁾ Questa quantità è considerata adeguata ad ossidare completamente il combustibile in tutto il volume di combustione mentre nel caso di una combustione incompleta sarà pari a 0% perché la reazione non si completa perfettamente, finisce l'ossigeno e la reazione comincia a bruciare i sottoprodotti.

⁽¹¹⁾ This amount is considered adequate to fully oxidise the fuel in the entire combustion volume while in the case of an incomplete combustion, it will be equal to 0% because the reaction is not completed perfectly, the oxygen finishes and the reaction starts burning by-products.

$$1,1 = \frac{O_{2,EFF}}{O_{2,TEOR}} = \frac{N_{2,EFF}}{N_{2,TEOR}} \quad (19)$$

Dalla stechiometria (formula 14) avremo che

$$O_{2,TEOR} = 10 \text{ moli quindi } O_{2,EFF} = 1,1 \cdot O_{2,TEOR} = 11 \text{ moli} \quad (20)$$

Di queste 10 moli reagiscono con il combustibile, le altre non reagiscono e passano direttamente nei fumi:

$$O_{2,EFF} - O_{2,TEOR} = 11 - 10 = 1 \text{ mole} \quad (21)$$

Quindi nei fumi avremo 1 mole di ossigeno (O_2).

Inoltre, l'azoto che accompagna l'ossigeno dell'aria passa completamente nei fumi infatti:

$$\frac{N_{2,EFF}}{N_{2,TEOR}} = 1,1 \quad (22)$$

Dalla stechiometria (formula 14) avremo $N_{2,TEOR} = 38$ moli quindi

$$N_{2,EFF} = 1,1 \cdot N_{2,TEOR} = 41,8 \text{ moli} \quad (23)$$

Nei fumi avremo quindi 41,8 moli effettivi di azoto (N_2).

Infine dal bilanciamento della reazione (formula 14) si ottiene che nei fumi avremo anche anidride carbonica e vapore d'acqua.

Ricordando che la massa della sostanza trattata non è altro che il prodotto tra la massa molecolare e il numero di moli della sostanza è possibile calcolare la composizione percentuale dei fumi e il loro volume.

b) *Combustione incompleta* - In una combustione reale abbiamo molecole prodotte da reazioni chimiche secondarie, come il monossido di carbonio (CO).

Questo perché nella reazione esistono reazioni intermedie (tabella 2).

Nella composizione dei fumi non c'è ossigeno; le restanti composizioni coincidono con il numero di moli calcolate nel bilanciamento di reazione (formula 15).

Nel processo di combustione con l'aria come comburente entra in gioco anche l'azoto come reagente inerte.

5.1.7. Calore emesso dalla reazione

Il potere calorifero viene rilevato sperimentalmente in base all'analisi elementare della reazione di combustione.

L'analisi chimica ci consente di valutare l'apporto di calore fornito da ciascun prodotto (tabella 3).

a) *Combustione completa*: è calcolata grazie all'analisi chimica elementare, basata sul bilanciamento della reazione (formula 14).

Sommando i risultati dall'analisi chimica, basata sul bilanciamento della reazione si ottiene la quantità di calore che emette una combustione completa, un kg di stiro polimero pari a $PCI_{TOT}^{c.t.} = -9457,85 \text{ kcal/kg}$.

vantage of the principle that the number of molecules in a gram-molecule of an aeriform is always the same, with an excess of air equal to 10% we will have:

$$1,1 = \frac{O_{2,EFF}}{O_{2,TEOR}} = \frac{N_{2,EFF}}{N_{2,TEOR}} \quad (19)$$

From the stoichiometry (formula 14) we will have that

$$O_{2,TEOR} = 10 \text{ moles therefore } O_{2,EFF} = 1,1 \cdot O_{2,TEOR} = 11 \text{ moles} \quad (20)$$

Of these 10 moles react with the fuel, the others do not react and pass directly in the smokes:

$$O_{2,EFF} - O_{2,TEOR} = 11 - 10 = 1 \text{ mole} \quad (21)$$

Therefore we will have 1 mole of oxygen (O_2) in the fumes.

In addition, the nitrogen that accompanies the oxygen in the air goes completely in the smokes in fact:

$$\frac{N_{2,EFF}}{N_{2,TEOR}} = 1,1 \quad (22)$$

From the stoichiometry (formula 14) we will have $N_{2,TEOR} = 38$ moles therefore

$$N_{2,EFF} = 1,1 \cdot N_{2,TEOR} = 41.8 \text{ moles} \quad (23)$$

In the smokes we will therefore have 41.8 actual moles of nitrogen (N_2).

Finally, from the balance of the reaction (formula 14) we also have carbon dioxide and water vapour in the fumes.

Recalling that the mass of the treated substance is nothing more than the product of the molecular mass and the number of moles of the substance, the percentage composition of fumes and their volume can be calculated.

b) *Incomplete combustion* - In a real combustion we have molecules produced by secondary chemical reactions, such as carbon monoxide (CO).

This is because there are intermediate reactions in the reaction (table 2).

There is no oxygen in the composition of the smoke; the remaining compositions coincide with the number of moles calculated in the reaction balance (formula 15).

In the combustion process with air as oxidiser, nitrogen also comes into play as inert reagent.

5.1.7. Reaction heat output

Heating power is detected experimentally based on the elementary analysis of the combustion reaction.

Chemical analysis allows us to evaluate the heat contribution supplied from each product (table 3).

TABELLA 2 – TABLE 2

COMPOSIZIONE FUMI, COMBUSTIONE INCOMPLETA
DI 1 KMOL DI STIROLO POLIMERO
SMOKE COMPOSITION, INCOMPLETE COMBUSTION
OF 1 KMOL OF STYRENE POLYMER

Composizione fumi Smoke composition	n° moli n. of moles [kmoli]	PM [kg/moli]	Massa ⁽¹⁾ Mass ⁽¹⁾ [kg]	Volume [%]
Ossigeno Oxygen	0,00	32	0	0
Azoto Nitrogen	33,44	28	936,32	73,59
Monossido di carbonio Carbon monoxide	2,40	28	67,20	5,28
Anidride carbonica Carbon dioxide	5,60	44	246,40	12,32
Vapore d'acqua Water vapour	4,00	18	72,00	8,80
TOTALE TOTAL	45,44	29,68	1626,40	100

⁽¹⁾ Si ricorda che la massa e la mole di una sostanza sono legati (vedi punti precedenti).

$$m = PM \cdot n$$

dove:

- m [kg]: Massa della sostanza trattata;
- n : Numero di moli, ricavabili dal bilancio stechiometrico sulla reazione;

$PM \left[\frac{kg}{moli} \right]$: Massa molecolare, massa di una mole di materia.

One must remember that the mass and the volume of a substance are bound (see above).

$$m = PM \cdot n$$

where:

- m [kg] mass of the test substance treated;
- n : Number of moles, obtained by stoichiometric balance on the reaction;

$PM \left[\frac{kg}{moli} \right]$: Molecular mass, mass of a mole of matter.

- b) *Combustione incompleta* - Nel caso di combustione parziale la reazione si arresterà a uno stadio intermedio, dando origine a una limitata quantità di calore e a composti chimici intermedi (formula 15) (tabella 4).

La quantità di calore che emette la combustione di un 1kg di stirolo polimero è $PCI_{TOT}^{c.p.} = -7287,45 \text{ kcal/kg}$ (24)

Si nota che nella produzione di calore non compare l'azoto (N_2) perché essendo un gas inerte non produce calore.

Sia nella tabella 3 sia nella tabella 4, L1 quantità di calore emessa è accompagnata da un segno positivo (+) o negativo (-) potendo il materiale sviluppare o assorbire calore, reazione rispettivamente esotermica ed endotermica.

Dallo studio del calore emesso è possibile ricavare il *Calore di combustione teorico* (PCI_{TEOR}) che rappresenta la quantità di calore (percentuale) che sprigiona una combustione parziale rispetto a una totale.

TABELLA 3 – TABLE 3

CALORE DI COMBUSTIONE OTTENUTO IN UNA
COMBUSTIONE COMPLETA - COMBUSTION HEAT
OBTAINED IN A COMPLETE COMBUSTION

Prodotti combustione Combustion products	n° moli n. of moles [kmoli]	PM [kg/moli]	Massa ⁽¹⁾ Mass ⁽¹⁾ [kg]	Volume [%]
Anidride carbonica Carbon dioxide	8	-94051	-752408	-7234,69
Vapore d'acqua Water vapour	4	-57796	-231184	-2222,92
Stirolo polimero Styrene polymer	1	24,72	25	0,2377

TABELLA 4 – TABLE 4

CALORE DI COMBUSTIONE OTTENUTO IN UNA
COMBUSTIONE INCOMPLETA - COMBUSTION HEAT
OBTAINED IN A INCOMPLETE COMBUSTION

Prodotti combustione Combustion products	n° moli n. of moles [kmoli]	PM [kg/moli]	Massa ⁽¹⁾ Mass ⁽¹⁾ [kg]	Volume [%]
Anidride carbonica Carbon dioxide	5,6	-94051	-526686	-5064,28
Vapore d'acqua Water vapour	4	-57796	-231184	-2222,92
Monossido di carbonio Carbon monoxide	12,4	-26416	-63398	-609,60
Stirolo polimero Styrene polymer	1	24,72	25	0,2377

- a) *Complete combustion*: it is calculated through elementary chemical analysis, based on the balance of the reaction (formula 14).

Summing the results of chemical analysis that is based on balancing of the reaction, the amount of heat emitted by a complete combustion is obtained, one kg of styrene polymer equal to $PCI_{TOT}^{c.p.} = -9457,85 \text{ kcal/kg}$.

- b) *Incomplete combustion* - In the case of partial combustion, reaction will stop at an intermediate stage, giving rise to a limited amount of heat and to intermediate chemical compounds (formula 15) (table 4).

The amount of heat emitted by the combustion of 1 kg of styrene polymer is $PCI_{TOT}^{c.p.} = -7287,45 \text{ kcal/kg}$ (24)

It is noticed that nitrogen (N_2) does not appear in the heat production because, being it an inert gas, it does not produce heat.

Both in table 3 and table 4, the L1 amount of heat emitted is accompanied by a positive sign (+) or negative one (-) being the material capable of developing or absorbing heat, an exothermic and endothermic reaction respectively.

Nel caso in esame si ottiene $PCI_{TEOR} = 77.05\%$ (da una combustione reale ho una resa del 77,05% rispetto a una combustione ideale)

$$PCI_{TEOR} = \frac{PCI_{TOT}^{c.p.}}{PCI_{TOT}^{c.l.}} [\%] \quad (25)$$

5.2. Dati di output

5.2.1. Curva di rilascio della potenza

Per lo studio della curva della potenza termica è stato necessario un paragone con le altre curve sperimentali europee.

Le curve treni tedeschi *IC* e *ICE* possono essere considerate come validi riferimenti per i treni italiani anche perché il tasso di rilascio calore è stato misurato su molti tipi di vettura sia in acciaio che in alluminio

Nel modello trattato la curva della potenza termica è proporzionale alla cinetica di reazione (rappresentata dal parametro (k) sopra definito). N primo tratto, secondo la legge:

$$Q(t) = k \cdot E_c \leq Q_{max} \quad (26)$$

dove:

$k[1/s = [MW/GJ]$: Rappresenta la cinetica della reazione e vale $k=3,2$ per una combustione completa e $k=2,5$ per una combustione incompleta.

$Q_{max} [W]$: Picco di potenza termica (Heat Release Rate HRR);

$Ec[J]$: Quantità di energia scambiata nel tempo considerato

e successivamente assume un andamento secondo quanto indicato dal D.M. 28/10/2005. Si ipotizza che il picco di potenza termica Q_{max} rimanga costante per tutta la durata dell'incendio Δt , ($20 \leq t \leq 40min$) dopo di che decrescerà secondo l'equazione:

$$Q(t) = Q_{max} \cdot e^{-0,0007 \cdot (t-t_2)} \quad (27)$$

dove $t_2 = t_1 + \Delta t$ è l'istante da cui comincia il decadimento della potenza termica e t_1 è il tempo complessivo di sviluppo.

La curva è stata calcolata nelle due tipologie di reazione (figg. 11 e 12).

5.2.2. Energia emessa dal sistema

Il modello distingue l'incremento di energia (E_c), quantità di energia scambiata nell'unità di tempo (considerato pari min un minuto primo) ed energia cumulata cioè calore prodotto dall'incendio.

L'energia trasformata durante un processo di combustione, si ottiene dalla potenza sviluppata moltiplicandola per la sua durata.

The *Theoretical combustion heat* (PCI_{TEOR}) can be derived from the study of heat, the former representing the amount of heat (percentage) that a partial combustion emits compared to a total one.

In this case one obtains $PCI_{TEOR} = 77.05\%$ (from a real combustion there is a yield of 77.05% compared to an ideal combustion)

$$PCI_{TEOR} = \frac{PCI_{TOT}^{c.p.}}{PCI_{TOT}^{c.l.}} [\%] \quad (25)$$

5.2. Output data

5.2.1. Thermal power release curve

For the study of the thermal power curve it was necessary to make a comparison with other European experimental curves.

The German *IC* and *ICE* train curves can be considered as valid references for Italian trains also because the heat release rate was measured on many types of vehicle in both steel and aluminium.

In the studied model, the thermal power curve is proportional to the kinetics reaction (represented by the parameter (k) defined above). In the first stretch, according to the law:

$$Q(t) = k \cdot E_c \leq Q_{max} \quad (26)$$

where:

$k[1/s = [MW/GJ]$: Represents the reaction kinetics and $k=3.2$ for a complete combustion and $k=2.5$ for an incomplete combustion.

$Q_{max} [W]$: Thermal power peak (Heat Release Rate HRR);

$Ec [J]$: Amount of energy exchanged in the considered time and later takes on a trend as indicated by Ministerial Decree of 28/10/2005. It is assumed that the thermal power peak Q_{max} remains constant for the entire duration of the fire Δt , ($20 \leq t \leq 40min$) after which it will decrease according to the equation:

$$Q(t) = Q_{max} \cdot e^{-0,0007 \cdot (t-t_2)} \quad (27)$$

where $t_2 = t_1 + \Delta t$ is the moment from which thermal power starts dropping and t_1 is the total development time.

The curve was calculated in the two types of reaction (figures 11 and 12).

5.2.2. System power output

The model distinguishes the energy increase (E_c), the amount of energy exchanged in the unit of time (considered equal to min one minute) and *cumulative energy* i.e. the heat produced by the fire.

The energy transformed during a combustion process, is obtained by multiplying the output by its duration.

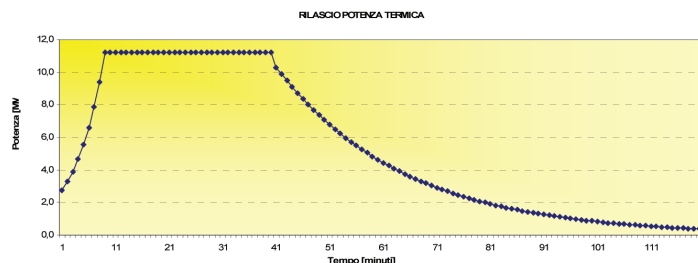


Fig. 11 – Curva di rilascio della potenza termica per combustione completa. *Thermal power release curve for complete combustion.*

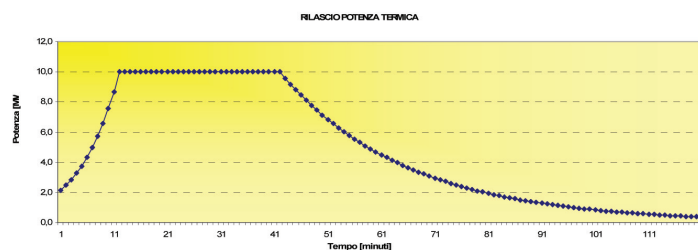


Fig. 12 – Curva di rilascio della potenza termica per combustione incompleta. *Thermal power release curve for incomplete combustion.*

$$E = Q \cdot t \text{ [J]} \quad (28)$$

dove:

E [J]: Energia del sistema; all'istante iniziale ($t = 0$) è l'energia che il corpo possiede all'innesco, $E_i = 0,8589\text{GJ}$;

Q [W]: Potenza sviluppata dalla combustione;

t [min]: Tempo necessario per la trasformazione.

L'energia emessa dal sistema comprende sia il calore trasmesso⁽¹²⁾ per convezione attraverso i fumi prodotti dall'incendio che si diffondono nel tunnel, sia il calore direttamente irradiato dalle fiamme.

5.2.3. Massa bruciata

La quantità di sostanza combusta ($M_{comb}[\text{Kg}]$) si ricava dalla termodinamica secondo la seguente relazione:

$$PCI = \frac{E}{M_{comb}} \Rightarrow M_{comb} = \frac{E}{PCI} \quad (29)$$

dove:

$M_{comb}[\text{Kg}]$: Corrisponde alla frazione di carico che viene combusto in un minuto d'incendio;

⁽¹²⁾ I processi di scambio termico sono generalmente classificati in tre categorie. Nella pratica non avremo una sola modalità, ma solitamente si ha la combinazione di almeno due di esse. Si tende però ad individuare il tipo di scambio predominante, trascurando a seconda di vari fattori, le altre modalità di trasmissione del calore presente. Le suddette tre categorie sono: conduzione, convezione e irraggiamento.

$$E = Q \cdot t \text{ [J]} \quad (28)$$

where:

E [J]: System energy; at the first moment ($t = 0$) it is the energy that the system has at ignition, $E_i = 0,8589\text{GJ}$;

Q [W]: Power developed by combustion;

t [min]: Time needed for transformation.

The energy released by the system includes both the heat transmitted⁽¹²⁾ by convection through the smoke produced by the fire that spreads in the tunnel, and the heat radiated directly from the flames.

5.2.3. Burned mass

The amount of burned substance ($M_{comb}[\text{Kg}]$) is derived from thermodynamics according to the following ratio:

$$PCI = \frac{E}{M_{comb}} \Rightarrow M_{comb} = \frac{E}{PCI} \quad (29)$$

where:

$M_{comb}[\text{Kg}]$: Corresponds to the fraction of load burned in one minute of fire;

$E[\text{J}]$: Energy released over time from the system;

$PCI \left[\frac{\text{J}}{\text{Kg}} \right]$: Average lower heating power of the passenger car.

In determining the mass burned, it is important to distinguish the type of combustion (complete - incomplete combustion).

In the case of *incomplete combustion*, the heat emitted from the carriage will be 77.05% of the heat developed by excess air combustion, *complete combustion*.

We will have:

$$M_{comb} = \frac{E}{PCI \cdot PCI_{Teorico}} \quad (30)$$

It should be noted that at the time the model begins working, the burned mass is equal to that of a first-class seat.

⁽¹²⁾ Heat exchange processes are generally classified in three categories. In practice, we will not have a single mode, but there is usually a combination of at least two of them. We tend, however, to identify the type of prevailing exchange, neglecting depending on various factors, other heat transfer modes. These three categories are: conduction, convection and radiation.

$E[J]$: Energia liberata nel tempo considerato dal sistema;

$PCI \left[\frac{J}{Kg} \right]$: Potere calorifero inferiore medio, della carrozza.

Nella determinazione della massa bruciata è importante distinguere il tipo di combustione (combustione completa – incompleta).

Nel caso di *combustione incompleta* avremo, che il calore emesso dalla carrozza sarà il 77,05% del calore sviluppato da una combustione in eccesso d'aria, *combustione completa*.

Avremo:

$$M_{comb} = \frac{E}{PCI \cdot PCI_{Teorico}} \quad (30)$$

Da notare che al momento dell'entrata in funzione del modello la massa bruciata è pari a quella di una seduta di prima classe.

La quantità di massa combustibile che brucia al variare del tempo avrà l'avanzamento riportato nelle figg. 13 e 14 rispettivamente relativi ad una combustione completa e ad una combustione incompleta.

5.2.4. Massa fumi prodotti

Dal principio della conservazione della massa per fluidi comprimibili avremo la formazione di una miscela omogenea di aria e prodotti della combustione.

$$m_f = m_a + m_c \quad (31)$$

dove:

- m_f [Kg]: Massa dei fumi prodotti durante la combustione dei reagenti nel tempo considerato;
- m_a [Kg]: Massa dell'aria necessaria per fare ossidare il combustibile durante la reazione nell'istante considerato.
- m_c [Kg]: Massa combustibile che partecipa alla reazione nel tempo considerato.

La massa dei fumi prodotti al variare del tempo è riportata nelle fig. 15 e 16.

5.2.5. Volume dei fumi prodotti

Per la determinazione del volume dei fumi prodotti, è

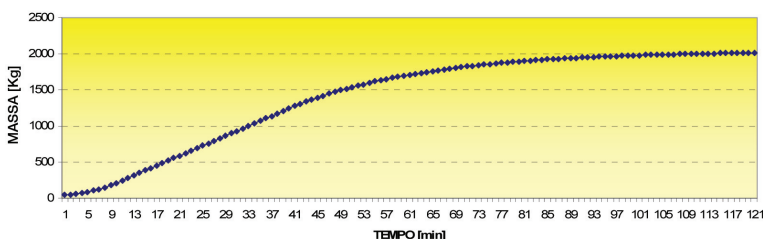


Fig. 13 – Curva massa combustibile-tempo per combustione completa. Combustible mass-time curve for complete combustion.

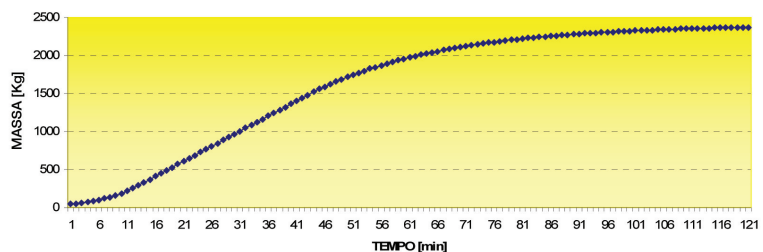


Fig. 14 – Curva massa combustibile-tempo per combustione incompleta. Combustible mass-time curve for incomplete combustion.

The amount of combustible mass burning as time varies will progress as shown in figures 13 and 14, respectively for complete combustion and incomplete combustion.

5.2.4. Smoke mass produced

From the principle of mass conservation for condensable fluids, we will have the formation of a homogeneous mixture of air and combustion products.

$$m_f = m_a + m_c \quad (31)$$

where:

- m_f [Kg]: Smoke mass produced during the combustion of reagents in the time considered;
- m_a [Kg]: Air mass required to oxidise the fuel during the reaction at the moment considered.
- m_c [Kg]: Combustible mass that participates in the reaction in the considered time.

The mass of fumes produced as time varies is shown in figures 15 and 16.

5.2.5. Volume of produced smokes

For the determination of the volume of produced

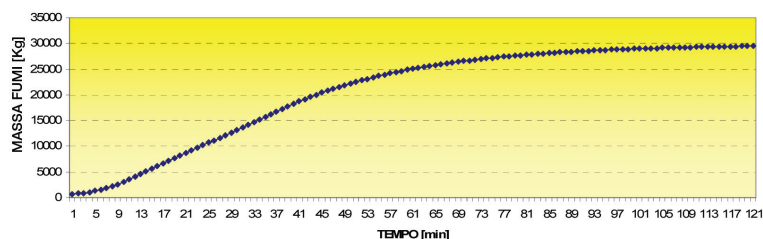


Fig. 15 – Curva massa fumi prodotti-tempo per combustione completa. *Produced smokes mass - time curve for complete combustion.*

stata utilizzata la legge di Avogadro⁽¹³⁾ per i gas nelle stesse condizioni di normalità:

$$V_f^0 = 22,414 \cdot \left(\frac{m_f}{PM_{TOT}} \right) \quad (32)$$

dove:

- $V_f^0 [m^3]$: Volume dei fumi in condizioni standard⁽¹⁴⁾;
- $PM_{TOT} \left[\frac{kg}{moli} \right]$: Somma dei Pesì Molecolari dei gas che formano la composizione dei fumi;
- $m_f [kg]$: Massa dei fumi prodotti.

mentre il calcolo del volume dei fumi al variare della temperatura viene effettuato secondo la legge di Gay-Lussac⁽¹⁵⁾,

$$V_f = V_f^0 + \left(\frac{T - 273}{273} \right) \cdot V_f^0 \quad (33)$$

dove:

- $V_f [m^3]$: È il volume dei fumi alla generica temperatura T;
- $V_f^0 [m^3]$: È il volume dei fumi alle condizioni standard;
- $T [°C]$: Temperatura del sistema.

Il volume dei fumi prodotti al variare del tempo è riportato nelle figg. 17 e 18.

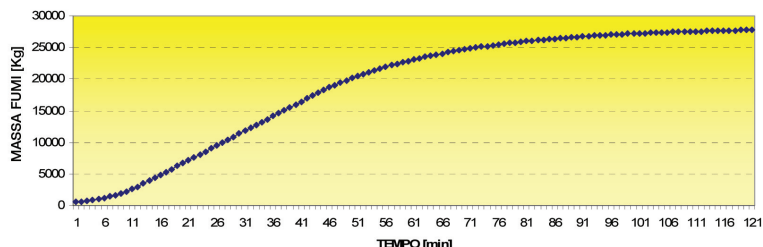


Fig. 16 – Curva massa fumi prodotti-tempo per combustione incompleta. *Produced smokes mass - time curve for incomplete combustion.*

smokes, Avogadro's law⁽¹³⁾ has been used for gases under the same conditions of normality:

$$V_f^0 = 22,414 \cdot \left(\frac{m_f}{PM_{TOT}} \right) \quad (32)$$

where:

- $V_f^0 [m^3]$: smoke volume under standard conditions⁽¹⁴⁾;
- $PM_{TOT} \left[\frac{kg}{moli} \right]$: Sum of molecular weights of gases that form the smoke composition;

– $m_f [kg]$: Mass of produced smoke.

while the calculation of smoke volume as temperature varies is done according to the law of Gay-Lussac⁽¹⁵⁾.

$$V_f = V_f^0 + \left(\frac{T - 273}{273} \right) \cdot V_f^0 \quad (33)$$

where:

- $V_f [m^3]$: It is the smoke volume at generic T temperature;
- $V_f^0 [m^3]$: It is the smoke volume at standard conditions;
- $T [°C]$: System temperature.

The volume of fumes produced as time varies is shown in figures 17 and 18.

⁽¹³⁾ Legge di Avogadro: Poiché uguali volume di gas diversi nella stessa condizione di pressione e temperatura contengono lo stesso numero di molecole, si deduce che una mole di gas occupa sempre lo stesso volume, qualunque sia il gas che si prende in considerazione.

⁽¹⁴⁾ Per condizione standard si intendono condizione di pressione pari a 1atm e di temperatura pari a 0 °C.

⁽¹⁵⁾ Legge di Gay-Lussac: La variazione di volume in un gas per ogni grado di temperatura (aumento se la temperatura aumenta, diminuisce se la temperatura diminuisce) è pari ad 1/273 del volume occupato dal gas alla temperatura di 0°C.

⁽¹³⁾ Avogadro's Law: Since equal volumes of different gases in the same temperature and pressure conditions contain the same number of molecules, we can deduce that a mole of gas occupies the same volume, whatever the gas that is taken into consideration.

⁽¹⁴⁾ Standard conditions means condition of pressure equal to 1 atm and temperature equal to 0°C.

⁽¹⁵⁾ Gay-Lussac's Law: The change in volume in a gas for each degree of temperature (increase if the temperature increases, decrease if the temperature decreases) is equal to 1/273 of the volume occupied by the gas at a temperature of 0°C.

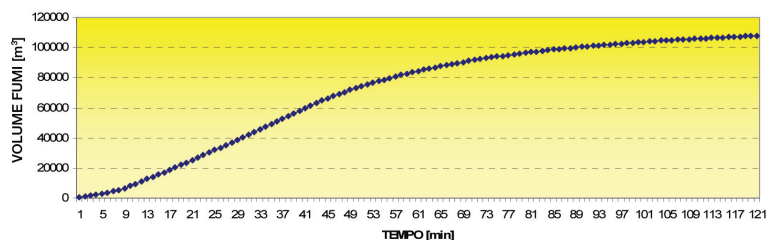


Fig. 17 – Curva volume fumi-tempo per combustione completa. *Smoke volume - time curve for complete combustion.*

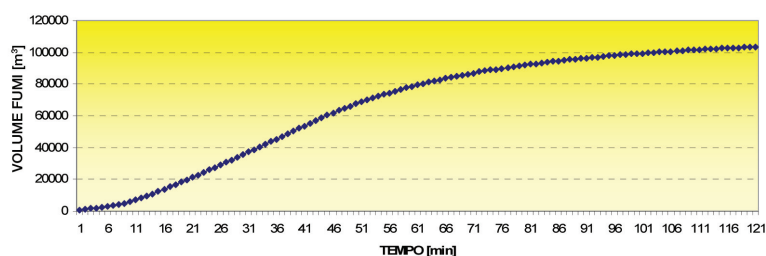


Fig. 18 – Curva volume fumi-tempo per combustione incompleta. *Smoke volume - time curve for incomplete combustion.*

5.2.6. Velocità dei fumi

Nota la portata volumetrica dei fumi (V_f) formula 33, la loro velocità sarà:

$$v = \frac{V_f}{A} \quad (34)$$

La velocità di avanzamento del fronte dei fumi al variare della tempo è riportata nelle figg. 19 e 20.

6. Concentrazioni dei prodotti tossici

I risultati del modello⁽¹⁶⁾ sono stati usati per calcolare la concentrazione dei prodotti tossici della combustione all'interno della galleria.

Si considera la formazione di una miscela omogenea tra aria e fumi nell'intera sezione della galleria immediatamente a valle dell'incendio.

Nel modello messo a punto si valutano le concentrazioni dei prodotti tossici della combustione: monossido di car-

5.2.6. Speed of fumes

Given the volumetric capacity of smoke (V_f), formula 33, their speed is:

$$v = \frac{V_f}{A} \quad (34)$$

The progress speed of the smokes front as time varies is shown in figures 19 and 20.

6. Concentrations of toxic products

The results of the model⁽¹⁶⁾ were used to calculate the concentration of toxic combustion products inside the tunnel.

The formation of a homogeneous mixture between air and fumes in the entire section of the tunnel immediately downstream of the fire is considered.

In the model developed, the concentrations of toxic combustion products are evaluated:

carbon monoxide [$X_{CO}(x,t)$], carbon dioxide [$X_{CO_2}(x,t)$] and oxygen [$X_{O_2}(x,t)$], in the sense of oxygen lack.

It is necessary to distinguish different situations according to the presence or absence of oxygen available and depending on the distance from the point of ignition of the fire (X).

Ingason's reports were used for the calculation of such concentrations in the model as specified in "The Handbook of Tunnel Fire Safety" manual.

The calculation of the concentration of hydrogen cyanide [$X_{HCN}(x,t)$] was not envisaged in the model.

To calculate the effects of hydrocyanic acid, the concentration will be calculated using a formula similar to that used for carbon monoxide.

The concentration trend over time inside the tunnel as time and space (x) vary is shown in figures 21 and 22.

⁽¹⁶⁾ L'andamento nel tempo della concentrazione dei prodotti tossici della combustione nella sezione è funzione della potenza termica rilasciata dall'incendio, della velocità di avanzamento del fronte dei fumi, del volume entro il quale questi si distribuiscono e delle caratteristiche dei materiali coinvolti nell'incendio.

⁽¹⁶⁾ The trend over time of the concentration of toxic products of combustion in the section is the function of thermal power released by the fire, the progress speed of the smoke front, of the volume within which these are distributed and of the characteristics of the materials involved in the fire.

bonio $[X_{CO}(x,t)]$, anidride carbonica $[X_{CO_2}(x,t)]$ e dell'ossigeno $[X_{O_2}(x,t)]$, nel senso di carenza.

È doveroso distinguere situazioni diverse in base alla presenza o meno di ossigeno a disposizione e in funzione della distanza dal punto di innesco dell'incendio (x).

Per il calcolo di tali concentrazioni nel modello sono state utilizzate le relazioni di Ingason come precisato nel manuale "The Handbook of Tunnel Fire Safety".

Nel modello non è stato previsto il calcolo della concentrazione di acido cianidrico $[X_{HCN}(x,t)]$.

Per il calcolo degli effetti dell'acido cianidrico verrà calcolata la concentrazione adottando una formula analoga a quella utilizzata per il monossido di carbonio.

L'andamento nel tempo delle concentrazioni all'interno della galleria al variare del tempo e dello spazio (x) sono riportate nelle figg. 21 e 22).

Il monossido di carbonio e l'acido cianidrico, essendo diversamente all'anidride carbonica, dei sottoprodotti, non sono presenti in una combustione completa (figg. 23 e 24).

In entrambe le situazioni l'ossigeno risulta sempre con una concentrazione maggiore del valore minimo per garantire la sopravvivenza %.

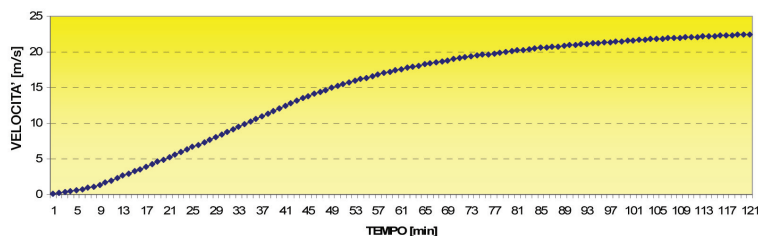


Fig. 19 – Curva velocità di avanzamento del fronte dei fumi per combustione completa.
"Progress speed of the smoke front" curve for complete combustion.

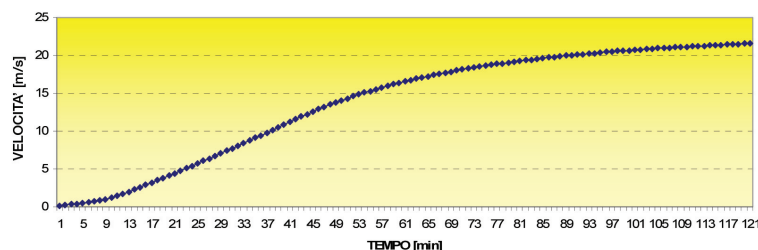


Fig. 20 – Curva velocità di avanzamento del fronte dei fumi per combustione incompleta.
"Progress speed of the smoke front" curve for incomplete combustion.

Carbon monoxide and hydrogen cyanide, as opposed to carbon dioxide, of by-products, cannot be found in a complete combustion (figures 23 and 24).

In both situations oxygen concentration is always greater than the minimum value to ensure survival %.

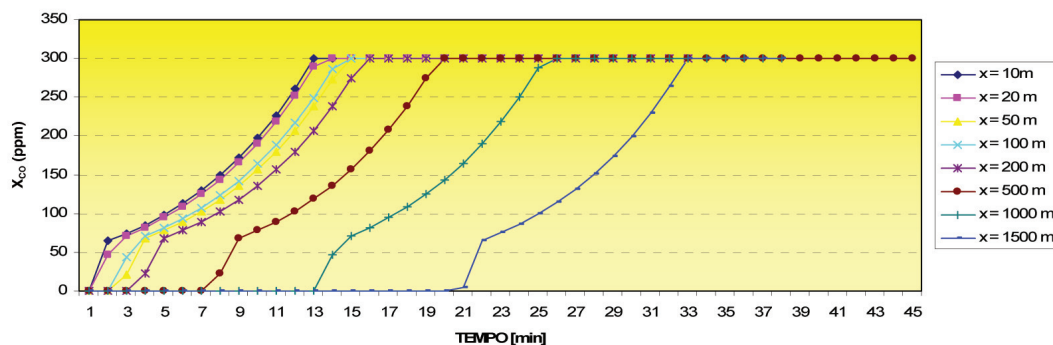


Fig. 21 - Curva concentrazione di CO all'interno della galleria per combustione incompleta. CO concentration curve inside the tunnel for incomplete combustion.

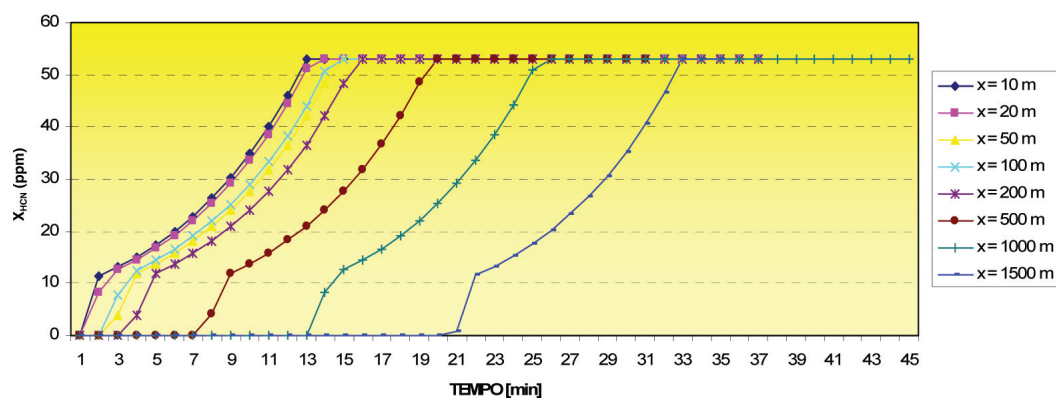


Fig. 22 - Curva concentrazione di HCN all'interno della galleria per combustione incompleta. *HCN concentration curve inside the tunnel for incomplete combustion.*

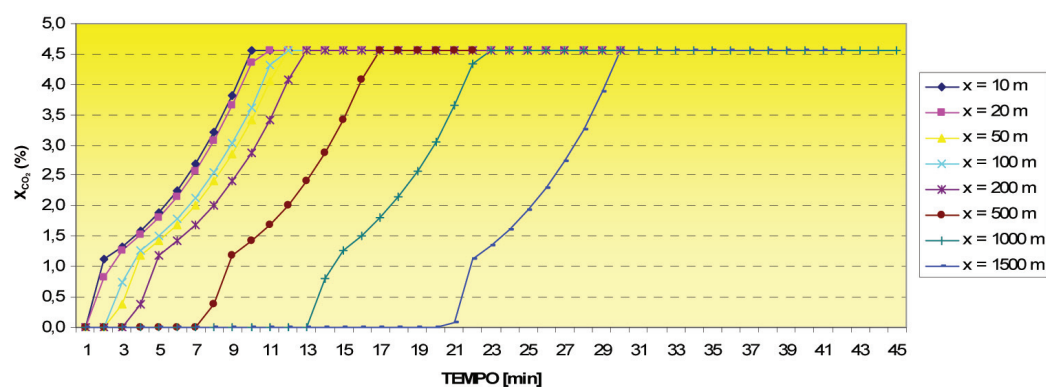


Fig. 23 - Curva concentrazione di CO₂ all'interno della galleria per combustione completa. *CO₂ concentration curve inside the tunnel for complete combustion.*

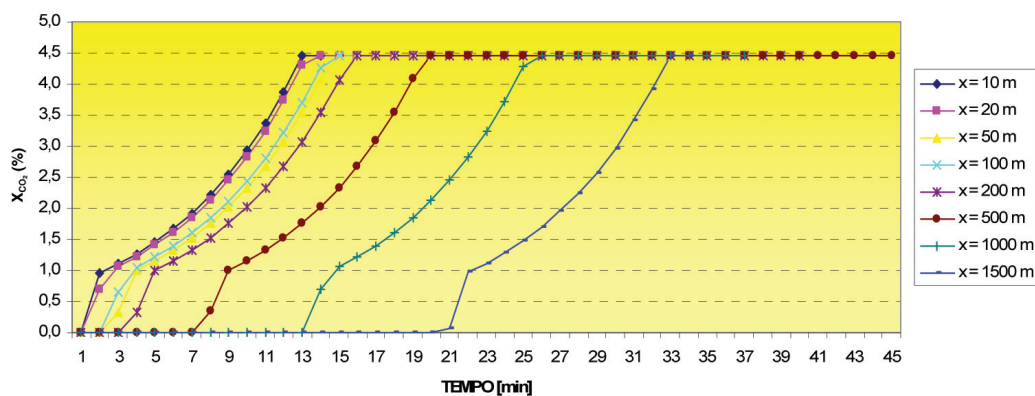


Fig. 24 - Curva concentrazione di CO₂ all'interno della galleria per combustione incompleta. *CO₂ concentration curve inside the tunnel for incomplete combustion.*

OSSERVATORIO

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Decreto 28/10/2005 del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale N.83 del 08/04/2006 e relativi allegati.
- [2] UNI-CEI 11170, Linee guida per la protezione al fuoco dei veicoli ferroviari ed a via guidata – Part. 1, 2, 3.
- [3] Transport of Dangerous Goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Model – Versione 3.6 – OECD/PIARC/EU – P. CASSINI, R. Hall, P. PONS.
- [4] ALAN B. and RICHARD C. “*The handbook of tunnel fire safety*”.
- [5] KENNEDY W.D., GONZALES J.A., SANCHEZ J.G., “*Derivation and application of the SES critical velocity equations*”, ASHRAE Trans: Research 1996.
- [6] UNI-EN 1363 Prove di resistenza al fuoco – Parte.1.



Pantecnica[®] SPA
www.pantecnica.it

DIVISIONE
GMT[®]

AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE
PER LA QUALITÀ CERTIFICATO DA DNV
= **UNI EN ISO 9001:2008** =

IRIS[®]
Certification

**MOLLE AD ARIA
per
SOSPENSIONI SECONDARIE**
**COMFORT IN SICUREZZA
e
ALTA AFFIDABILITA'**

Via Magenta, 77/14A - 20017 Rho (MI) Tel. 02.93.26.10.20 - Fax 02.93.26.10.90 E-mail: info@pantecnica.it