

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Sviluppo di un protocollo di misura per verificare le prestazioni dei sistemi
di ventilazione nei tunnel stradali



Relatore

Prof. Vittorio Verda

Tutor

Ing. Sara Cosentino

Candidato

Gabriele Nicoletti

Indice

1. Introduzione.....	1
1.1 Oggetto della tesi	1
1.2 Controllo degli inquinanti.....	2
1.3 Sicurezza in caso di incendio.....	5
1.4 Analisi di rischio	7
1.4.1 Decreto legislativo 264/06.....	8
2. La ventilazione nelle gallerie stradali.....	19
2.1 Impianti di ventilazione meccanica	19
2.1.1 Impianti di ventilazione longitudinale.....	21
2.2 Progettazione della ventilazione sanitaria	24
2.3 Progettazione della ventilazione di emergenza	29
2.4 Sistema di misura delle prestazioni degli impianti di ventilazione	31
3. Analisi di rischio quantitativa di una galleria.....	36
3.1 Procedimento per la valutazione del rischio.....	36
3.2 Studio del rapporto fra i parametri variabili e il valore del rischio	41
3.3 Analisi di rischio dinamica	45
4. Modelli numerici per la simulazione degli impianti di ventilazione.....	49
4.1 Modello 1D	50

4.2	Modello 3D	51
4.3	Analisi termofluidodinamica di una galleria reale	53
4.3.1	Dati del tunnel	53
4.3.2	Descrizione della simulazione.....	55
4.3.3	Risultati delle simulazioni	56
4.3.3.1	Analisi in caso di incendio mediante FDS	56
4.3.3.2	Analisi in caso di incendio mediante Whitesmoke	77
4.3.3.3	Analisi in condizioni ordinarie mediante FDS.....	80
4.3.3.4	Analisi in condizioni ordinarie mediante Whitesmoke.....	82
4.4	Valutazione del fattore di attrito	83
5.	Sviluppo dei sistemi di misura delle prestazioni dell'impianto di ventilazione ..	87
5.1	Tipo di sensori selezionati	87
5.2	Sistema di acquisizione dati.....	89
5.3	Disposizione della strumentazione per le prove	93
5.4	Procedura per le misurazioni sul campo	95
6.	Conclusioni.....	97
7.	Bibliografia e sitografia.....	101

1. Introduzione

1.1 Oggetto della tesi

La conformazione del territorio in Italia presenta vaste zone montane e collinari che possono essere di ostacolo per le vie di comunicazione, pertanto per agevolare il transito dei mezzi si ricorre solitamente a ponti o gallerie. L'oggetto di questa tesi è la ventilazione nei tunnel stradali, in particolare lo sviluppo di un protocollo che permetta di misurarne le prestazioni in termini di velocità, temperatura e pressione dell'aria. La ventilazione nelle gallerie può essere naturale, trasversale, longitudinale oppure ibrida. Il sistema di ventilazione longitudinale sarà analizzato nel dettaglio in seguito ed è normalmente composto da un certo numero di jet fan che spingono l'aria in una direzione designata grazie alle pale rotanti. Le gallerie autostradali necessitano di questi jet fan per due ragioni: la rimozione degli inquinanti generati dallo scarico degli autoveicoli e la rimozione dei fumi della combustione in caso di incendio.

In condizioni normali i motori a combustione interna generano durante il funzionamento alcune sostanze dannose per la salute, che vanno quindi rimosse qualora si accumulino in ambienti chiusi. Invece, in caso di incidente, alcuni veicoli potrebbero incendiarsi, ma con un sistema di jet fan ben progettato è possibile rimuovere gran parte del fumo che viene generato dalla combustione, che altrimenti darebbe problemi in termini di respirazione e di visibilità (sia per i passeggeri che per i vigili del fuoco). In questa tesi verranno analizzati: i sistemi di ventilazione dei tunnel, gli strumenti necessari per effettuare i rilevamenti; la valutazione del rischio associata al trasporto di merci pericolose; il legame tra la ventilazione e il rischio di incendio ai sensi del D-Lgs 264/06. Viene inoltre sviluppato un protocollo di misura per verificare le prestazioni degli impianti di ventilazione così costituito:

- analisi termofluidodinamica preliminare mediante modelli numerici 1D e 3D;
- scelta del tipo di anemometri da utilizzare per effettuare le misure nel tunnel stradale;
- costruzione del sistema di misura;
- rilevamenti sul campo, in condizioni normali e di incendio;
- analisi dei dati ottenuti;
- comparazione dei valori reali e dei risultati delle simulazioni numeriche.

Le prestazioni dell'impianto di ventilazione sono correlate con il valore atteso del danno, indicatore di rischio atteso in accordo al D.lgs 264/06; il lavoro di tesi ha previsto un'analisi di rischio parametrica che collega il rischio con la velocità dell'aria raggiunta mediante la prestazione dell'impianto di ventilazione. La finalità di tale analisi è la dimostrazione dell'importanza dei test in campo che verificano le reali prestazioni dell'impianto di ventilazione da cui deriva il rischio per gli utenti in galleria.

I test in campo non possono essere effettuati nelle reali condizioni di incendio, pertanto la messa a punto di un modello monodimensionale e tridimensionale, tarato sulla base dei risultati in campo, consente di ricostruire le condizioni di incendio e quindi di determinare la prestazione dell'impianto. La tesi mira a costruire un "digital twin" fluidodinamico della galleria che potrà essere utilizzato sia per la progettazione sia per la verifica dell'impianto nonché per la definizione degli algoritmi di gestione e come ausilio alla definizione delle procedure di gestione dell'emergenza.

Infine, può essere utilizzato in modelli di analisi di rischio dinamica con la finalità di calcolare le prestazioni dell'impianto sulla base delle condizioni locali (meteo e traffico) in termini di velocità dell'aria in galleria raggiunta in condizioni incidentali e, sulla base delle correlazioni, calcolare il livello di rischio.

1.2 Controllo degli inquinanti

Le principali sostanze generate dalla combustione sono: vapore acqueo (H_2O); anidride carbonica (CO_2); monossido di carbonio (CO); ossidi di azoto (NO_x); ossidi di zolfo; particolato (PM_{10} , $PM_{2,5}$ e particelle totali sospese); composti organici volatili (COV, che comprendono il benzene). Di questi vapore acqueo e anidride carbonica non sono degli inquinanti. In condizioni di esercizio ordinario il tunnel deve garantire l'espulsione di queste sostanze mediante ventilazione naturale e/o forzata (la ventilazione forzata è obbligatoria oltre una data lunghezza). Di solito la spinta ricevuta dall'aria grazie all'effetto pistone dei veicoli risulta sufficiente per rimuovere gli agenti inquinanti, però in caso di tunnel molto estesi o con doppio senso di marcia è necessario installare un impianto di ventilazione. Ogni tipo di veicolo ha diversi fattori di emissione per le varie sostanze presenti, pertanto può essere utile analizzare l'inquinamento nelle città anche considerando quali mezzi transitano e con che frequenza. Per dare un'idea quantitativa è riportata di seguito una tabella a titolo di esempio contenente i fattori di emissione medi da traffico per tipo di veicolo (fonte: Inemar ARPA Lombardia, 2017).

Fattori medi di emissione per tipo di veicolo

Tipo di veicolo	Consumo specifico	SO ₂	NO _x	COV	CO	PM2.5	PM10	PTS
	g/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Automobili	57	1	382	69	732	23	34	47
Veicoli leggeri < 3.5 t	79	2	1,041	61	450	50	68	84
Veicoli pesanti > 3.5 t e autobus	221	4	4,391	177	1,132	136	188	249
Ciclomotori (< 50 cm³)	22	0	137	3,872	6,903	75	81	86
Motocicli (> 50 cm³)	32	1	146	1,050	5,269	26	31	37
Veicoli a benzina - Emissioni evaporative				109				

Come mostrato dai dati, le emissioni delle varie sostanze hanno distribuzioni diverse a seconda delle tipologie di veicoli, questo può aiutare nella scelta dei sensori da utilizzare in galleria per il rilevamento degli inquinanti, infatti, se i veicoli più frequenti fossero ad esempio le automobili potrebbe bastare un sensore per il monossido di carbonio (l'inquinante principale per questi veicoli) per decidere quando attivare la ventilazione. Mentre per quanto riguarda veicoli leggeri e pesanti l'emissione principale riguarda gli NO_x, che quindi saranno presenti in misura maggiore.

Nella tabella seguente è riportata un'ulteriore caratterizzazione delle emissioni, eseguita in base al tipo di combustibile utilizzato.

Fattori medi di emissione per tipo di combustibile

Combustibile	Consumo specifico	SO ₂	NO _x	COV	CO	PM2.5	PM10	PTS
	g/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Benzina verde	54	1	126	433	1,886	22	35	51
Diesel	74	1	1,009	29	192	41	55	70
GPL	56	0	77	43	645	17	31	46
Metano	71	0	146	51	641	17	31	46

Infine, sono riportati i valori delle emissioni in base al tipo di strada percorsa, ottenuti considerando il traffico medio reale sulle tratte analizzate.

Fattori medi di emissione per tipo di strada

Tipo di strada	Consumo specifico	SO ₂	NO _x	COV	CO	PM2.5	PM10	PTS
	g/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Autostrade	65	1	692	37	557	29	39	55
Strade extraurbane	57	1	532	45	368	27	40	55
Strade urbane	74	1	731	365	1,562	39	54	70

Come mostrato dai dati dell'ARPA, nelle autostrade gli inquinanti principali per quantità sono ossidi di azoto e monossido di carbonio, nelle aree urbane invece la differenza tra CO e NO_x è più marcata e questo può dipendere sia dal tipo di veicoli presenti (più motocicli e meno mezzi commerciali) che dal punto di funzionamento del motore.

1.3 Sicurezza in caso di incendio

La situazione di emergenza da prendere in considerazione per la ventilazione è quella di un incendio. In questo caso si hanno problemi di incolumità per le persone e potenzialmente rischi strutturali per la galleria e per gli altri autoveicoli. Lo scopo della ventilazione in caso di incendio è di rallentarne gli effetti, in modo da limitare i danni prima dell'arrivo dei vigili del fuoco ovvero quello di rimuovere il più possibile i fumi prodotti dalla zona in cui le persone esodano verso luoghi sicuri. Per controllare i fumi generati dall'incendio il sistema di ventilazione deve innanzitutto prevenire l'effetto “back-layering”, cioè deve impedirne il moto in direzione opposta rispetto a quella dell'aria in galleria.

La differenza principale tra un incendio in galleria e un incendio in ambiente esterno è l'effetto della ventilazione naturale, infatti nei tunnel l'ossigeno necessario per la combustione non è sempre disponibile. Nonostante la geometria dei tunnel, un incendio può comunque essere ben ventilato (quindi sarà del tipo “fuel-controlled”) oppure sotto ventilato (sarà allora del tipo “ventilation-controlled”), generando così fumi tossici dovuti alla combustione incompleta. Per gli incendi che avvengono negli edifici il flusso termico delle fiamme (HRR ovvero “heat release rate”) dipende solitamente dal fattore di ventilazione, cioè un parametro basato sull'area delle aperture e sull'altezza alla quale sono situate. Nei tunnel invece il fenomeno è più complesso, infatti, la potenza e la posizione dell'incendio dipendono da molteplici fattori quali: la forma del tunnel nei pressi delle fiamme; l'area della sezione in cui avviene l'incendio; la lunghezza totale del tunnel; il materiale di cui sono costituite le superfici della galleria; le condizioni meteorologiche ai portali [10].

Il fumo generato dalla combustione si accumula sul soffitto dei tunnel nella zona dell'incendio, a causa della minore densità rispetto all'aria, ma generalmente dopo aver percorso una certa distanza lungo il tunnel tende a scendere verso il piano stradale, miscelandosi così all'aria presente. Nonostante la ricaduta, il fumo tende comunque a stratificarsi in parte, pertanto nello strato inferiore si può avere un flusso d'aria pulita (o solo parzialmente viziata) che scorre in direzione opposta.

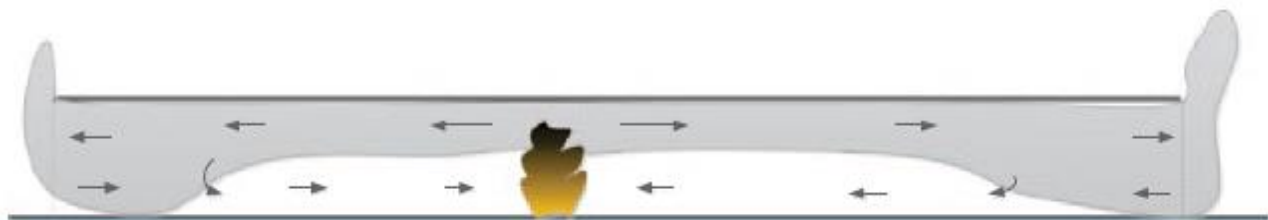


Figura 1.1 Stratificazione dei fumi per incendio in un tunnel poco ventilato [10].

La stratificazione è importante perché, in assenza di essa possono derivare delle difficoltà per l'evacuazione della galleria sia in termini di visibilità che per problemi respiratori degli individui presenti.

Alcuni studi hanno verificato che la presenza di un incendio in un tunnel genera una caduta di pressione che influisce sulle prestazioni della ventilazione longitudinale. Questo fenomeno, detto effetto strozzamento ("throttling effect"), è causato da diversi contributi:

- l'espansione e l'accelerazione dovute all'aumento di temperatura in prossimità delle fiamme;
- l'aumento dell'attrito con le pareti nella zona dopo l'incendio a causa dell'aumento della velocità del flusso d'aria (causata dall'espansione di quest'ultima);
- la compressione e la decelerazione dei fumi della combustione a causa del loro raffreddamento nella zona a valle delle fiamme;
- la resistenza al flusso dovuta alla stratificazione dei fumi (causata dalle differenze di temperatura) a valle delle fiamme.

La stratificazione dei fumi contribuisce alla caduta di pressione ben oltre la zona delle fiamme. Indicativamente, per un incendio da 30 MW, in un tunnel a due corsie, con velocità dell'aria di 3 m/s la caduta di pressione sarà di 30 Pa nei 500 metri a valle delle fiamme; questo può significare la necessità di installare più jet fan del previsto [13]. In particolare, per valutare la caduta di pressione dovuta alle fiamme può essere utilizzata la seguente correlazione (di Riess, Weber, Steck):

$$\Delta p_{fire} = A * Q^B * u_0^C * A_T^D * H_T^E * \frac{L}{500}$$

Dove: Q è la potenza termica dell'incendio; u_0 è la velocità dell'aria a monte dell'incendio; A_T è l'area della sezione trasversale della galleria; H_T è l'altezza del tunnel nel centro della carreggiata; L è la lunghezza della galleria. Mentre i parametri rimanenti corrispondono ai valori indicati nella seguente tabella.

Parametri correlazione (Riess et al.)	
A	1,89399
B	0,314672
C	1,13617
D	-1,29471
E	0,608199

1.4 Analisi di rischio

Un corretto studio dei tunnel e del traffico che li attraversa può aiutare a ridurre la frequenza e la gravità degli incidenti stradali. Per far questo si ricorre sempre più sovente all'analisi di rischio quantitativa, nonostante sia uno strumento complesso, dal momento che i tunnel sono delle strutture particolari. Come definito dal D.lgs 264/06, l'analisi di rischio è una metodologia finalizzata alla valutazione e alla gestione del rischio associato a un determinato sistema, galleria in questo caso, rispetto alle conseguenze sulla popolazione esposta. La valutazione del rischio è un processo che comporta l'individuazione delle sorgenti di pericolo e la determinazione dell'esposizione della popolazione al pericolo e include la stima delle incertezze connesse.

Oltre a considerare i veicoli normali bisogna riporre molta attenzione ai mezzi che trasportano merci pericolose, questi veicoli infatti presentano rischi maggiori per l'incolumità degli utenti della rete autostradale. La sicurezza dei tunnel è definita in termini di protezione delle persone, delle proprietà e delle strutture. Per effettuare una valutazione di rischio bisogna considerare le condizioni strutturali, geometriche, ambientali e di traffico in cui opera la galleria e ipotizzare un evento incidentale iniziale. Un sistema complesso avrà più parametri da considerare, anche legati fra loro eventualmente, che concorrono a determinare il rischio di incidenti nel tunnel e per fare la valutazione potrebbe essere necessario l'utilizzo di un modello che calcoli le probabilità associate ai vari scenari possibili [11].

Dopo aver analizzato il rischio nei vari scenari, se questo dovesse avere valori che eccedono i limiti di legge (che in Italia sono definiti dal D.lgs 264/06), sarà necessario intervenire migliorando i sistemi di sicurezza oppure limitando il traffico di merci pericolose. Il principio applicato per fare queste valutazioni è chiamato ALARP (as low as reasonably practicable). Un rischio è considerato ALARP qualora il beneficio apportato dalle misure di prevenzione superi di molto i costi sostenuti per realizzarle. Di fatto è possibile rappresentare graficamente la sicurezza di un sistema, vengono quindi identificate le seguenti aree:

- Zona di non accettabilità, corrisponde a un rischio talmente elevato che non si è disposti ad accettarlo, dal momento che le perdite superano i benefici;
- Zona di rischio tollerabile (ALARP), è un compromesso tra i costi per la prevenzione e i benefici legati al fatto di accettare il rischio;
- Zona di accettabilità, il rischio è considerato trascurabile dalla maggior parte delle persone.

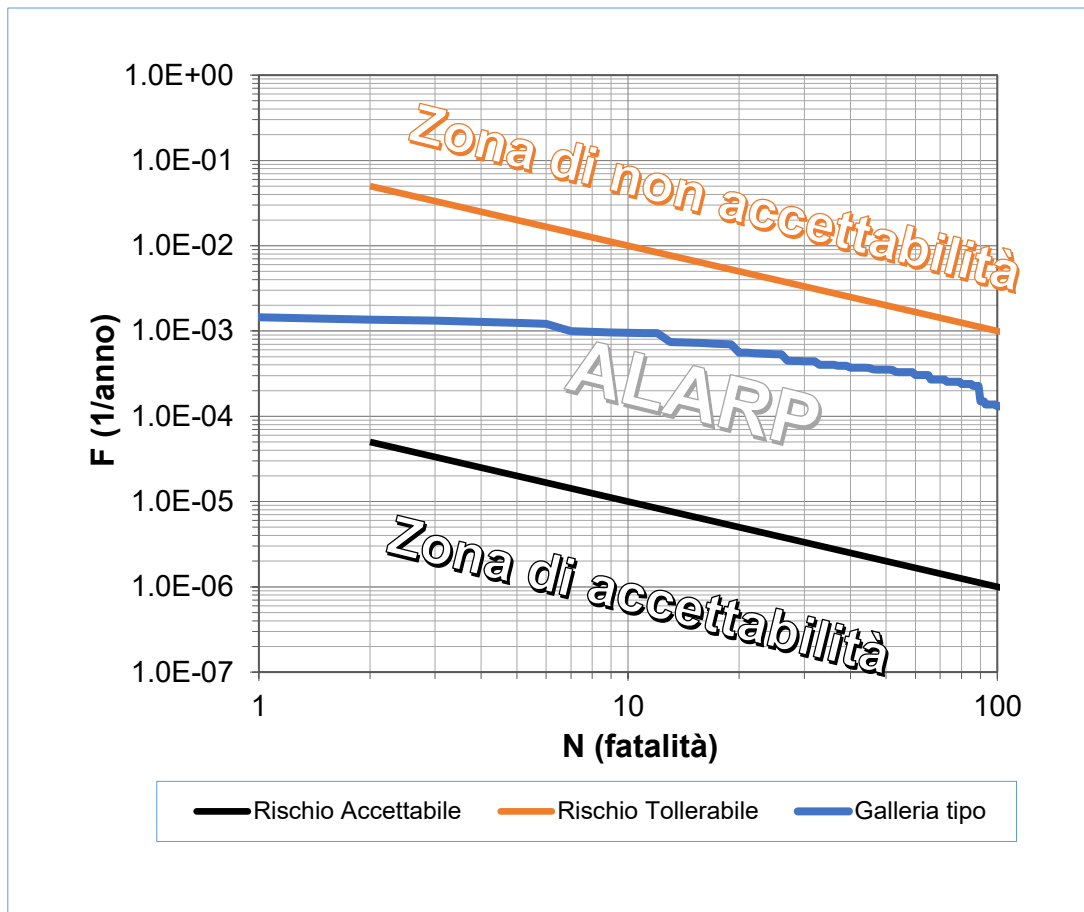


Figura 1.2 Rappresentazione della frequenza con cui possono avvenire N fatalità per un sistema.

In questa tesi è stato valutato il rischio legato al trasporto di merci pericolose tramite il modello di rischio DG-QRAM (Dangerous Goods – Quantitative Risk Assessment Model) sviluppato dal PIARC (Permanent International Association of Road Congresses). I risultati ottenuti verranno utilizzati per la creazione di un software in grado di effettuare un'analisi di rischio dinamica.

1.4.1 Decreto legislativo 264/06

Il Dlgs 264/06 definisce le misure di sicurezza da adottare per le gallerie. I principali articoli concernenti ventilazione e analisi di rischio sono riportati di seguito.

Art. 1 (Oggetto e campo di applicazione)

1. Il presente decreto ha lo scopo di garantire un livello minimo sufficiente di sicurezza agli utenti della strada nelle gallerie della rete stradale transeuropea mediante la progettazione e l'adozione di

misure di prevenzione atte alla riduzione di situazioni critiche che possano mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria, nonché mediante misure di protezione in caso di incidente.

2. Il presente decreto si applica a tutte le gallerie situate nel territorio italiano appartenenti alla rete stradale transeuropea, di lunghezza superiore a cinquecento metri già in esercizio, in fase di costruzione o allo stato di progetto.

3. Sono fatte salve le disposizioni vigenti in materia di valutazione di impatto ambientale in relazione alle nuove strutture ricadenti nell'ambito di applicazione del presente decreto, ovvero alle modifiche eventualmente apportate alle strutture esistenti.

Art. 13 (Analisi di rischio)

1. L'analisi di rischio viene effettuata da un soggetto terzo o funzionalmente indipendente dal gestore della galleria, con oneri a carico del gestore stesso.

2. L'analisi di cui al comma 1 riferita ad una determinata galleria tiene conto di tutti gli elementi inerenti alle sue caratteristiche progettuali e delle condizioni del traffico che incidono sulla sicurezza e segnatamente le caratteristiche ed il tipo di traffico, la lunghezza e la geometria della galleria, nonché il numero previsto di veicoli pesanti in transito giornaliero.

3. L'analisi di rischio deve essere svolta, secondo le modalità previste nell'allegato 3, per le gallerie esistenti che presentano carenze rispetto ai requisiti di sicurezza di tipo strutturale di cui all'allegato 2, ovvero per quelle gallerie che presentano caratteristiche speciali di cui all'articolo 4, comma 8. L'analisi di rischio deve dimostrare che opportune misure di sicurezza alternative o integrative, rispetto a quelle previste dall'allegato 2, siano tali da realizzare condizioni con livello di protezione equivalente o accresciuto rispetto agli obiettivi di sicurezza definiti dall'articolo 3, con particolare riferimento alla sicurezza degli utenti, del personale addetto, dei servizi di soccorso in genere e dei servizi resi dal Corpo nazionale dei vigili del fuoco.

4. Il contenuto ed i risultati dell'analisi di rischio devono essere inseriti nella documentazione di sicurezza trasmessa alla Commissione.

5. La Commissione provvede a formare ed a tenere aggiornato il catalogo delle analisi di rischio approvate. Il catalogo è composto da due sezioni, una relativa alle verifiche di equivalenza con il criterio comparativo, per le gallerie esistenti che presentano carenze di requisiti di sicurezza di tipo

strutturale e l'altra per le analisi integrative delle misure di sicurezza, per le gallerie che presentano caratteristiche speciali di cui all'articolo 4, comma 8.

6. La Commissione, in assenza di sufficienti e documentate garanzie di livello prestazionale, chiede, ove lo ritenga necessario e con oneri a carico del gestore, il collaudo tecnico dei sottosistemi adottati come misure di sicurezza alternative o integrative nelle analisi di rischio per la compensazione delle carenze di requisiti a carattere strutturale, al fine di accertare l'affidabilità e l'efficienza, che caratterizzano la loro prestazione.

Allegato 2 (misure di sicurezza)

1. Criteri per decidere sulle misure di sicurezza

1.1. Parametri di sicurezza

1.1.1. Le misure di sicurezza da realizzare in una galleria devono basarsi su una considerazione sistematica di tutti gli aspetti del sistema consistenti nell'infrastruttura, l'esercizio, gli utenti e i veicoli.

1.1.2. Si tiene conto dei seguenti parametri quali:

- lunghezza della galleria;
- numero di fornici;
- numero di corsie;
- geometria della sezione trasversale;
- allineamento verticale e orizzontale;
- tipo di costruzione;
- traffico unidirezionale o bidirezionale;
- volume di traffico per fornice (compresa la distribuzione nel tempo);
- rischio di congestione (giornaliero o stagionale);
- tempo di intervento dei servizi di pronto intervento;
- presenza e percentuale di veicoli pesanti;
- presenza, percentuale e tipo di trasporto di merci pericolose;
- caratteristiche delle strade di accesso;
- larghezza delle corsie;
- considerazioni relative alla velocità;
- condizioni geografiche e meteorologiche.

1.1.3. Se una galleria ha una caratteristica speciale riguardante i summenzionati parametri, occorre effettuare un'analisi di rischio conformemente all'articolo 13 del decreto per stabilire se siano

necessari misure di sicurezza integrative e/o un equipaggiamento complementare per garantire un livello elevato di sicurezza della galleria. Questa analisi di rischio deve tener conto di eventuali incidenti, che pregiudicano manifestamente la sicurezza degli utenti della strada nelle gallerie e che possono verificarsi durante la fase di esercizio nonché della natura e dell'ampiezza delle loro possibili conseguenze.

1.2. Requisiti minimi

1.2.1. Devono essere messe in atto almeno le misure di sicurezza prescritte dai seguenti paragrafi per assicurare un livello minimo di sicurezza in tutte le gallerie contemplate nel decreto. Può essere consentito discostarsi in misura limitata da questi requisiti, a condizione che sia stata completata con successo la seguente procedura:

La Commissione permanente per le gallerie trasmette alla Commissione Europea informazioni in merito:

- al discostamento limitato previsto (ai discostamenti limitati previsti);
- alle ragioni imperative alla base del discostamento limitato previsto;
- alle misure alternative di riduzione dei rischi da applicare o rafforzare al fine di garantire un livello di sicurezza almeno equivalente, inclusa la relativa comprova sotto forma di un'analisi di rischio corrispondenti.

La Commissione Europea trasmette la richiesta di discostamento limitato agli altri Stati membri quanto prima e in ogni caso entro un mese dal suo ricevimento.

Se, entro un termine di tre mesi dal ricevimento della richiesta della Commissione, né la Commissione né uno Stato membro hanno formulato obiezioni, il discostamento limitato si considera accettato e la Commissione provvede a informarne tutti gli Stati membri. Se sono espresse obiezioni, la Commissione presenta una proposta secondo la procedura di cui all'articolo 17, paragrafo 2 della Direttiva 2004/54. In caso di decisione negativa, il discostamento limitato non è autorizzato.

1.2.2. Per prevedere un'interfaccia unica in tutte le gallerie a cui si applica il decreto, non è consentito discostarsi dai requisiti dei seguenti paragrafi per quanto concerne la progettazione delle infrastrutture di sicurezza a disposizione degli utenti delle gallerie (stazioni di emergenza, segnaletica, piazzole di sosta, uscite di emergenza, ritrasmissione radio se richiesta).

1.3. Volume di traffico

1.3.1. Quando nel presente Allegato si fa riferimento al "volume di traffico", questo indica la media annua del traffico giornaliero in una galleria, per corsia. Nel calcolo del volume di traffico, ogni veicolo a motore conta per una unità.

1.3.2. Se il numero di veicoli pesanti con stazza maggiore di 3,5 t supera il 15 % della media annua del traffico giornaliero o se il traffico giornaliero stagionale supera significativamente la media annua del traffico giornaliero, devono essere valutati i rischi supplementari e di essi occorre tenere conto aumentando il volume di traffico della galleria ai fini dell'applicazione dei paragrafi che seguono.

2. Misure infrastrutturali

2.1. Numero di fornici e di corsie

2.1.1. I principali criteri per decidere se si debba costruire una galleria a fornice singolo o doppio devono essere il volume di traffico previsto e la sicurezza, prendendo in considerazione aspetti quali la percentuale di automezzi pesanti, il dislivello e la lunghezza.

2.1.2. Le gallerie in fase di progettazione, la cui previsione a 15 anni indica che il volume di traffico supererà i 10.00 veicoli al giorno per corsia, devono essere realizzate a doppio fornice con traffico unidirezionale, fermo restando l'obbligo, stabilito dalle norme emanate ai sensi dell'art. 13 del Decreto Legislativo 30 aprile 1992 n. 285, di realizzare gallerie a doppio foro per i tipi di strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico. La realizzazione dei due fornici può avvenire anche per fasi, previa autorizzazione della Commissione permanente per le gallerie.

2.1.3. Fatta eccezione per la corsia di emergenza, il numero di corsie deve restare lo stesso tanto all'esterno che all'interno della galleria. Ogni cambiamento dell'organizzazione della piattaforma deve intervenire ad una distanza dal portale della galleria almeno pari a quella percorsa in 10 secondi da un veicolo che procede alla velocità di progetto della strada. Se particolari circostanze non consentono di rispettare questa distanza, devono essere adottate misure supplementari e/o rafforzative per aumentare la sicurezza.

2.1.4. Nel caso di gallerie di nuova costruzione, la corsia di emergenza in galleria può essere sostituita da una banchina pavimentata di dimensioni tali da consentire la funzione di franco psicotecnico e, là dove necessario, la funzione di sosta di emergenza, previa analisi di rischio di cui all'art. 13 del decreto.

2.2. Geometria della galleria

2.2. 1. Nella fase di progettazione della geometria della sezione trasversale e del tracciato orizzontale e verticale di una galleria e delle strade di accesso occorre tenere conto particolarmente della

sicurezza, in quanto tali parametri influiscono significativamente sulla probabilità che si verifichino incidenti e sulla gravità di questi.

2.2.2. Nelle gallerie nuove non sono consentite pendenze longitudinali superiori al 5 %, fermo restando, quanto stabilito dalle norme emanate ai sensi dell'art. 13 del Decreto Legislativo 30 aprile 1992 n. 285 per le pendenze massime delle livellette. Il limite della pendenza può essere superato soltanto se le caratteristiche geomorfologiche del territorio non consentano diverse soluzioni progettuali.

2.2.3. Nelle gallerie con dislivelli superiori al 3% devono essere adottate misure supplementari e/o rafforzative per aumentare la sicurezza sulla base di un'analisi di rischio.

2.2.4. Nelle gallerie esistenti, se la larghezza della corsia di destra è inferiore a 3,5 m ed è consentito il transito di veicoli pesanti, devono essere adottate misure supplementari e/o rafforzative per aumentare la sicurezza sulla base di un'analisi di rischio.

2.3. Vie di fuga e uscite di emergenza

2.3.1. Nelle gallerie nuove sprovviste di corsie di emergenza, devono essere previste banchine pedonabili di emergenza, sopraelevate o meno, che gli utenti utilizzano in caso di guasto o incidente.

2.3.2. Nelle gallerie esistenti sprovviste sia di corsie di emergenza sia di banchine pedonabili di emergenza devono essere adottate misure supplementari e/o rafforzative per garantire la sicurezza, tramite apposita analisi di rischio.

2.3.3. Le uscite di emergenza devono consentire agli utenti di abbandonare a piedi la galleria e raggiungere un luogo sicuro in caso di incidente o incendio. Queste uscite devono costituire anche una via di accesso alla galleria, a piedi, per i servizi di pronto intervento. Tali uscite possono consistere in:

- uscite dirette verso l'esterno della galleria,
- gallerie trasversali tra i fornicelli della galleria,
- uscite verso una galleria di emergenza,
- rifugi con vie di fuga separate dal fornice della galleria.

2.3.4. È vietato costruire rifugi privi di uscita collegata a vie di fuga verso l'esterno.

2.3.5. Devono essere previste uscite di emergenza se le analisi dei rischi pertinenti, comprese la diffusione del fumo e la velocità di propagazione alle condizioni locali, rivelano che la ventilazione e le altre misure di sicurezza sono insufficienti a garantire la sicurezza degli utenti.

2.3.6. Nelle gallerie nuove devono esservi in ogni caso uscite di emergenza se il volume di traffico supera i 2000 veicoli per corsia.

2.3.7. Per le gallerie esistenti di lunghezza superiore a 1000 m e con un volume di traffico, superiore a 2000 veicoli per corsia deve essere valutata la fattibilità e l'efficacia della realizzazione delle uscite di emergenza, se mancanti, tramite apposita analisi di rischio.

2.3.8. Quando sono previste uscite di emergenza, la distanza tra due di esse non deve superare i 500 m.

2.3.9. Mezzi appropriati, ad esempio porte, devono impedire la propagazione del fumo e del calore nelle vie di fuga dietro l'uscita di emergenza, consentendo così agli utenti di raggiungere l'esterno in condizioni di sicurezza e ai servizi di pronto intervento di accedere alla galleria.

2.4. Accesso per i servizi di pronto intervento

2.4.1. Nelle gallerie a doppio fornice di lunghezza superiore a 1500 m, se le carreggiate si trovano allo stesso livello, o a quote che ne consentano il collegamento carrabile a costi non sproporzionati, devono essere realizzati passaggi idonei per consentire l'accesso dei veicoli adibiti ai servizi di pronto intervento, con interdistanza non superiore a 1500 m.

2.4.2. Se le caratteristiche geomorfologiche del territorio lo consentono, al di fuori di ciascun portale di una galleria a più fornici devono essere realizzati varchi nello spartitraffico per consentire ai servizi di pronto intervento di accedere immediatamente a ciascuno dei fornici.

2.5. Piazzole di sosta

2.5.1. Nelle nuove gallerie bidirezionali di lunghezza superiore a 1500 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia, qualora non siano previste corsie di emergenza, devono essere previste piazzole di sosta a distanze non superiori a 1000 m, per ogni senso di marcia e tra loro sfalsate.

2.5.2. Nelle gallerie bidirezionali esistenti di lunghezza superiore a 1500 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia, che siano prive di corsie di emergenza, deve essere valutata la fattibilità e l'efficacia della realizzazione di piazzole di sosta, tramite apposita analisi di rischio.

2.5.3. Se le caratteristiche di costruzione della galleria non lo consentono o lo consentono solo a un costo sproporzionato, non è obbligatorio prevedere le piazzole di sosta se la larghezza totale della parte della galleria accessibile ai veicoli, escluse le parti sopraelevate e le corsie normali, è pari almeno alla larghezza di una corsia normale.

2.5.4. Le piazzole di sosta comprendono una stazione di emergenza.

2.6. Drenaggio

2.6.1. Se il trasporto di merci pericolose è autorizzato, il drenaggio di liquidi infiammabili e tossici è effettuato tramite canali di scolo appositamente realizzati o altri dispositivi all'interno delle sezioni trasversali delle gallerie. Tale sistema di drenaggio deve essere progettato e mantenuto in funzione in modo da impedire incendi nonché il propagarsi di liquidi infiammabili e tossici all'interno di un fornice e tra i fornici.

2.6.2. Se nelle gallerie esistenti non è possibile soddisfare tali requisiti, o è possibile soddisfarli solo a un costo sproporzionato, se ne deve tenere conto al fine di decidere se autorizzare il trasporto di merci pericolose, sulla base di un'analisi dei pertinenti rischi.

2.7. Resistenza al fuoco delle strutture

La struttura principale di tutte le gallerie in cui un cedimento locale della struttura possa avere conseguenze catastrofiche, come ad esempio le gallerie sommerse o le gallerie che possono causare il cedimento di importanti strutture adiacenti, deve assicurare un livello sufficiente di resistenza al fuoco.

2.8. Illuminazione

2.8.1. L'illuminazione ordinaria deve essere prevista in modo tale da assicurare una visibilità adeguata ai conducenti nella zona di ingresso e all'interno della galleria, di giorno e di notte, nel rispetto delle norme fissate con D.M. n. 3476 del 14.09.05.

2.8.2. L'illuminazione di sicurezza deve essere prevista in modo tale da fornire un minimo di visibilità agli utenti della galleria, per consentire loro di abbandonare quest'ultima con i loro veicoli in caso di interruzione dell'alimentazione elettrica.

2.8.3. I sistemi di illuminazione finalizzati a consentire l'evacuazione della galleria, quali i segnali luminosi di evacuazione posti a un'altezza non superiore a 1.5 m, devono guidare gli utenti che sgombrano la galleria a piedi in caso di emergenza.

2.9. Ventilazione

2.9.1. Nella progettazione, costruzione e esercizio dell'impianto di ventilazione si deve tenere conto dei seguenti elementi:

- controllo degli inquinanti emessi dagli autoveicoli, nel caso di flussi di traffico normali e nei picchi di traffico,
- controllo degli inquinanti emessi dagli autoveicoli in caso di arresto del traffico per incidenti,
- controllo del calore e del fumo in caso di incendio.

2.9.2. In tutte le gallerie di lunghezza superiore a 1000 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia deve essere installato un impianto di ventilazione meccanica.

2.9.3. Nelle gallerie con traffico bidirezionale e/o unidirezionale congestionato, la ventilazione longitudinale è consentita solo se l'analisi di rischio di cui all'articolo 13 del decreto indica che essa è accettabile e/o sono adottate misure specifiche, come ad esempio un'adeguata gestione del traffico, minori distanze tra le uscite di emergenza, estrazioni intermedie dei fumi

2.9.4. Nelle gallerie in cui è necessario un impianto di ventilazione meccanica e non è consentita la ventilazione longitudinale ai sensi del punto 2.9.3., devono essere utilizzati impianti di ventilazione trasversale o semitrasversale. Tali impianti devono permettere di evacuare i fumi in caso di incendio.

2.9.5. Nelle gallerie di lunghezza superiore a 3000 m con traffico bidirezionale, con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia, con un centro di controllo e con un impianto di ventilazione trasversale o semitrasversale, devono essere adottate le seguenti misure minime per quanto concerne la ventilazione:

- installazione di dispositivi di estrazione dell'aria e del fumo azionabili separatamente o a gruppi;
- controllo costante della velocità longitudinale dell'aria e conseguente regolazione del processo di controllo dell'impianto di ventilazione (estrattori, ventilatori, ecc.).

2.10. Stazioni di emergenza

2.10.1. Le stazioni di emergenza sono progettate per mettere a disposizione diversi strumenti di sicurezza, in particolare telefoni di emergenza ed estintori, ma non per proteggere gli utenti dagli effetti di un incendio.

2.10.2. Le stazioni di emergenza possono essere costituite da un armadio o, preferibilmente, da una nicchia nel piedritto. Devono essere munite come minimo di un telefono di emergenza e di due estintori.

2.10.3. Devono esserci stazioni di emergenza vicino ai portali e all'interno, a intervalli non superiori a 150 m per le gallerie nuove e non superiori a 250 m per le gallerie esistenti.

2.11. Erogazione idrica

Deve essere prevista l'erogazione idrica per tutte le gallerie. Vicino ai portali e all'interno delle gallerie devono essere disponibili idranti a intervalli non superiori a 250 m. Se l'erogazione idrica non è disponibile, è obbligatorio verificare che sia assicurato in altro modo un approvvigionamento idrico sufficiente.

2.12. Segnaletica stradale

Devono essere usati appositi segnali stradali per tutti gli impianti di sicurezza previsti per gli utenti della galleria. I segnali e i pannelli da usare nelle gallerie devono essere conformi al D.P.R. 16 dicembre 1992 n. 495.

2.13. Centro di controllo

2.13.1. Deve essere installato un centro di controllo in tutte le gallerie di lunghezza superiore a 3000 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia.

2.13.2. La sorveglianza di diverse gallerie può essere accentrata in un unico centro di controllo, previa autorizzazione da parte dell'Autorità amministrativa.

2.14. Impianti di sorveglianza

2.14.1. In tutte le gallerie servite da un centro di controllo devono essere installati impianti di sorveglianza con telecamere e un impianto di rilevamento automatico degli incidenti stradali (ad esempio arresto di veicoli) e/o degli incendi.

2.14.2. In tutte le gallerie prive di un centro di controllo devono essere installati impianti di rilevamento automatico degli incendi qualora il funzionamento della ventilazione meccanica per il controllo dei fumi sia diversa dal funzionamento automatico della ventilazione per il controllo degli inquinanti.

2.15. Impianto per chiudere la galleria

2.15.1. Prima degli ingressi di tutte le gallerie di lunghezza superiore a 1000 m, devono essere installati semafori che consentono di impedire l'accesso alla galleria in situazioni di emergenza. Possono essere previste misure supplementari, ad esempio pannelli a messaggio variabile e barriere, per ottenere il rispetto delle istruzioni.

2.15.2. All'interno di tutte le gallerie di lunghezza superiore a 3000 m, con un centro di controllo e un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia, è raccomandata l'adozione di impianti per fermare i veicoli in caso di emergenza, con distanza degli impianti non superiore a 1000 m. Tali impianti sono costituiti da semafori ed eventualmente da dispositivi supplementari, quali altoparlanti, pannelli a messaggio variabile e barriere.

2.16. Sistemi di comunicazione

2.16.1. In tutte le gallerie di lunghezza superiore a 1000 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia devono essere installati impianti per ritrasmissioni radio ad uso dei servizi di pronto intervento.

2.16.2. Se vi è un centro di controllo, deve essere possibile interrompere le ritrasmissioni radio degli eventuali canali destinati agli utenti della galleria, per diffondere messaggi di emergenza.

2.16.3. I rifugi e le altre strutture in cui gli utenti della galleria in fase di evacuazione sono tenuti ad aspettare prima di poter raggiungere l'esterno devono essere dotati di altoparlanti per comunicare informazioni agli stessi utenti.

2.17. Alimentazione elettrica e circuiti elettrici

2.17.1. Tutte le gallerie devono disporre di un'alimentazione elettrica di emergenza per assicurare il funzionamento degli impianti di sicurezza per il tempo necessario a consentire la totale evacuazione degli utenti dalla galleria.

2.17.2.1 circuiti elettrici, di misurazione e di controllo devono essere progettati in modo che un guasto locale, dovuto ad esempio a un incendio, non impedisca il funzionamento dei circuiti non interessati.

2.18. Resistenza e reazione al fuoco degli impianti e sistemi e dei loro componenti

Il livello delle caratteristiche di resistenza e reazione al fuoco dei componenti di tutti gli impianti e sistemi della galleria deve tenere conto della loro strutturazione e grado di esposizione all'incendio e delle possibilità tecnologiche, e deve consentire il mantenimento delle necessarie funzioni di sicurezza in caso di incendio.

Con questo decreto si pone quindi attenzione sui metodi per prevenire incidenti nei tunnel, che si basano appunto su analisi di rischio e ventilazione. Pertanto, la costruzione e la gestione delle gallerie richiederanno analisi più approfondite rispetto al passato, ma garantendo una maggiore sicurezza.

2. La ventilazione nelle gallerie stradali

2.1 Impianti di ventilazione meccanica

Il moto dell'aria nelle gallerie può essere ottenuto mediante ventilazione naturale, dovuta alle condizioni meteorologiche presenti ai portali e all'effetto "pistone" generato dai veicoli in transito, oppure tramite ventilazione meccanica (forzata), indotta grazie a impianti di ventilazione.

La ventilazione meccanica può essere ottenuta mediante diversi sistemi, ovvero:

- ventilazione longitudinale, l'aria è spinta lungo l'asse della galleria in direzione di uno dei due portali, possono essere presenti dei pozzi di estrazione lungo il tunnel;

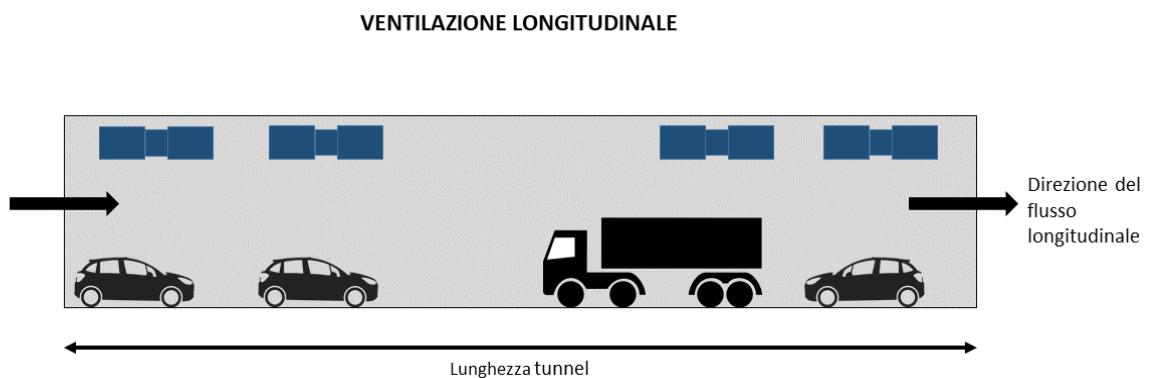


Figura 2.1 Schema di funzionamento della ventilazione longitudinale.

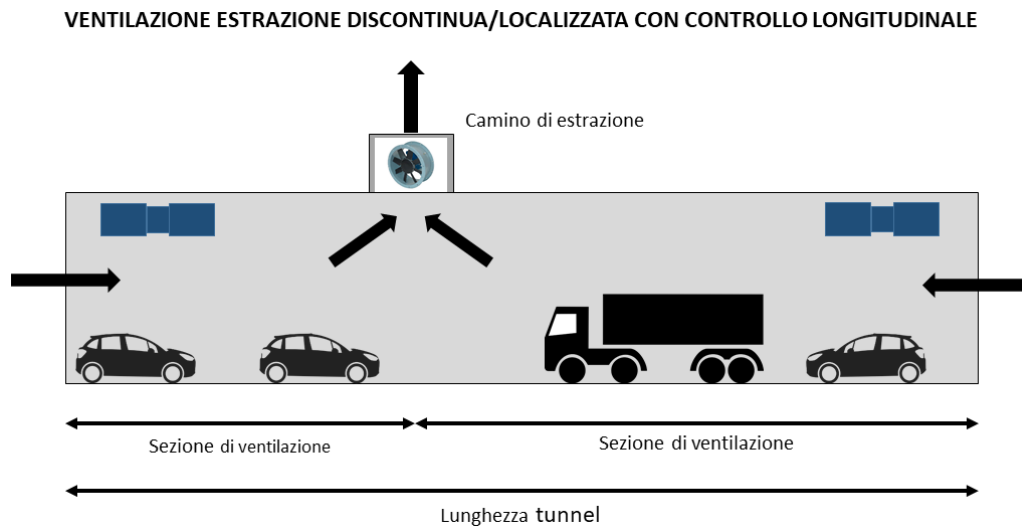


Figura 2.2 Schema di funzionamento della ventilazione longitudinale con camino di estrazione.

- ventilazione trasversale, il moto indotto sull'aria è verticale, infatti l'aria è immessa dal basso ed è estratta dal soffitto del tunnel;

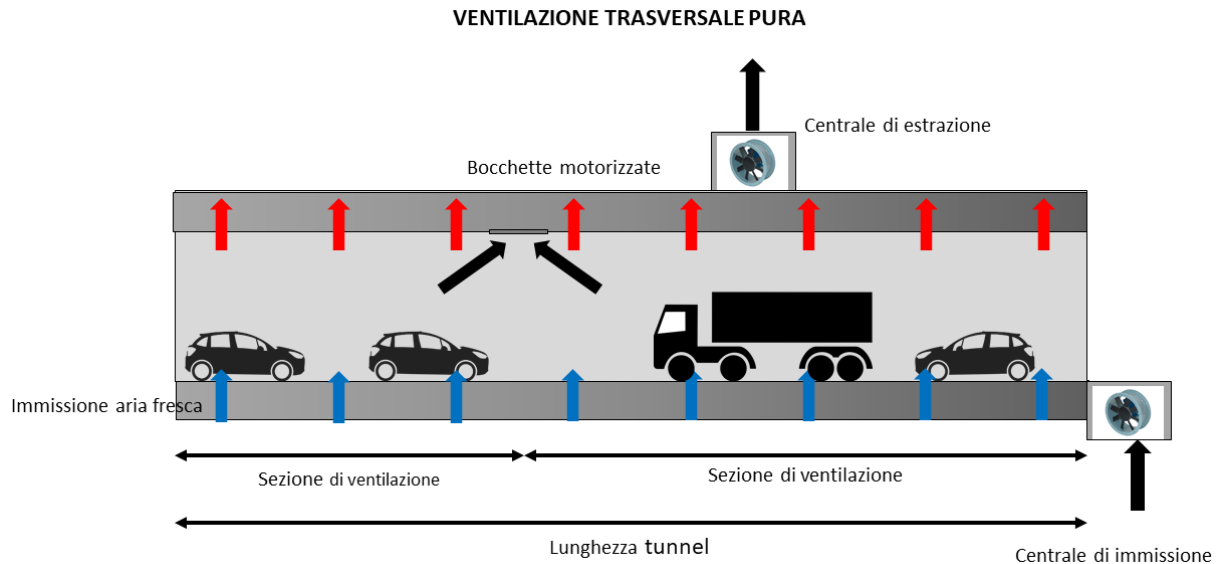


Figura 2.3 Schema di funzionamento della ventilazione trasversale.

- ventilazione semitrasversale, con la quale l'aria è immessa oppure estratta dal soffitto della galleria, con alcuni impianti è possibile operare alternativamente estrazione e immissione, in questi casi si parla di ventilazione semitrasversale reversibile;

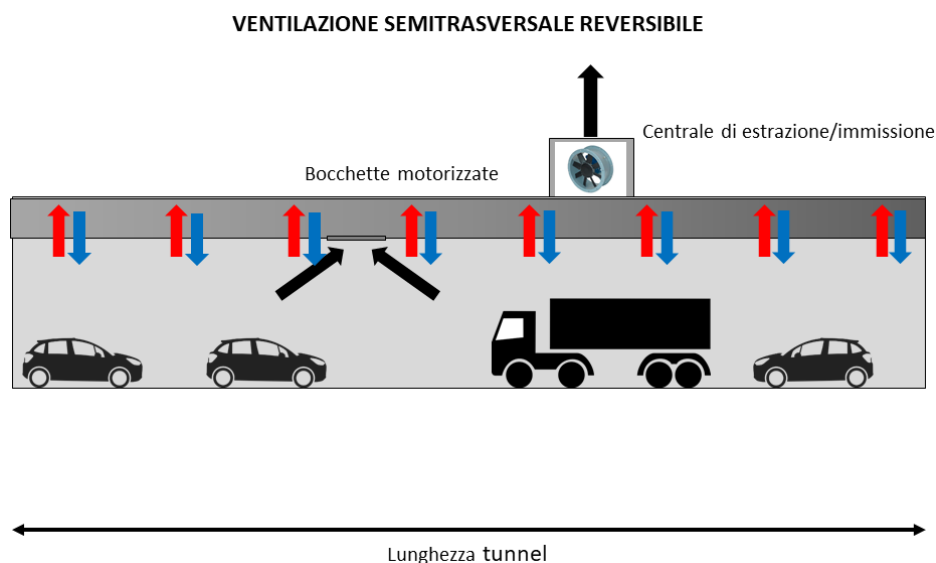


Figura 2.4 Schema di funzionamento della ventilazione semitrasversale reversibile.

- ventilazione ibrida, viene ottenuta coniugando i vari sistemi.

2.1.1 Impianti di ventilazione longitudinale

Per effettuare una ventilazione longitudinale vengono disposti in galleria (solitamente sulla volta) dei jet fan, che sono di fatto delle macchine composte da una girante, avviata tramite motore elettrico, al quale sono collegate delle pale che ruotando spingono il flusso d'aria; a differenza dei ventilatori questi non sono canalizzati.

La disposizione dei ventilatori e il loro funzionamento sono fortemente influenzati da caratteristiche come la pendenza del tunnel (che può dar luogo al fenomeno del galleggiamento), e fenomeni come vento e differenza di pressione tra i portali. Una differenza di pressione barometrica rilevante si ha in caso di lunghe gallerie che connettono zone con differenti condizioni meteorologiche. In questo caso si può avere quindi un tiraggio che influenza lo spostamento d'aria, infatti, la pressione potrebbe spingere l'aria nella stessa direzione dei ventilatori oppure in quella opposta (contrastando il sistema di ventilazione) [3].

La pendenza del tunnel ha effetti sulla velocità e la temperatura del flusso d'aria. Negli stadi iniziali di un incendio, a causa della pendenza, i fumi potrebbero muoversi in verso contrario a quello di spinta delle pale rotanti secondo il cosiddetto effetto camino (o anche “back-layering effect”). La

velocità critica è definita come il valore limite che assicuri che il fumo (in caso di incendio) fluisca nella direzione designata (ventilazione longitudinale), normalmente ha un valore di 3-3,5 m/s e può essere ricavata dalla formula seguente:

$$V_c = K_1 * K_g * \left[\frac{g * H * \dot{Q}}{\rho * C_p * A * T_f} \right]^{(1/3)}$$

con: $K_1 = 0.606$ (fattore del numero di Froude); K_g = fattore del grado di inclinazione (dipende dall'inclinazione del tunnel); g = accelerazione di gravità; H = altezza del tunnel nel punto dove avviene l'incendio; $\dot{Q}$ = calore che l'incendio sta cedendo all'aria nel luogo dell'ignizione; ρ densità dell'aria; C_p calore specifico dell'aria a pressione costante; A area perpendicolare al flusso; T_f temperatura media dei gas nel luogo dell'incendio.

Se il fumo scorre in direzione opposta a quella prestabilita si parla di effetto “back-layering”, che può portare a un accumulo di fumo in galleria riducendo molto la visibilità (“fogging”) [1]. Nel caso in cui l'impianto di ventilazione non riesca a garantire una velocità sufficiente al flusso d'aria i fumi sarebbero liberi di propagarsi in entrambe le direzioni creando maggiori rischi per l'evacuazione degli utenti e rendendo più difficili i soccorsi. Solitamente, in caso d'incendio, i vigili del fuoco raggiungono la fonte dal lato dove sono assenti i fumi, ma se questi dovessero propagarsi uniformemente darebbero problemi in termini di visibilità e incolumità anche a coloro che dovrebbero estinguere l'incendio; pertanto è fondamentale che il sistema di ventilazione sia progettato correttamente.

$$\Delta p_{mt} = \Delta p_{12} + \left(\frac{\lambda * L_{12}}{d_t} + \zeta_{12} \right) * \frac{\rho}{2} * u_t^2$$

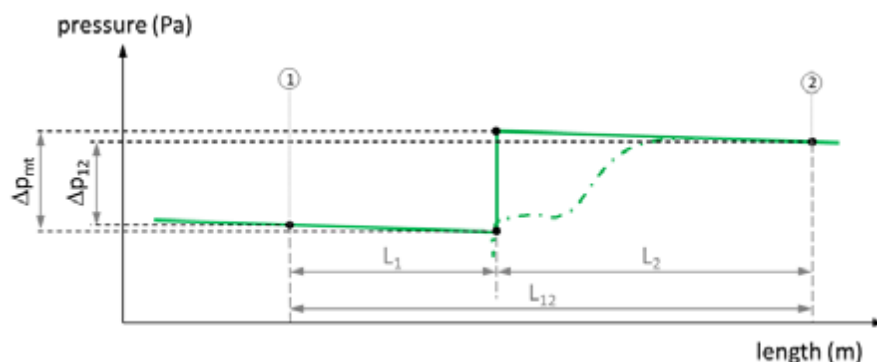


Figura 2.4 Differenza tra aumento di pressione teorico e reale a causa di un jet fan in un tunnel.

I ventilatori impiegati nelle gallerie sono comunemente installati vicino al soffitto a causa della mancanza di spazio; questo porta ad un incremento dell'attrito tra il flusso d'aria e il muro [4]. Pertanto, a causa di queste perdite, la spinta effettivamente ricevuta dall'aria è inferiore a quella nominale dei ventilatori (indicata dal costruttore). Viene quindi definito un coefficiente di rendimento che tenga conto di queste perdite, esso rappresenta il rapporto tra l'aumento di pressione teoricamente ottenibile (con jet fan attivi) e l'effettivo incremento di pressione, ovvero:

$$\eta = 100 * \frac{\Delta p_{12} + \left(\frac{\lambda * L_{12}}{D} + \zeta_{12} \right) * u_t^2 * \frac{\rho}{2}}{n * \rho * u_s^2 * \frac{A_s}{A_t} * \left(1 - \frac{u_t}{u_s} \right)}$$

con: Δp_{12} = aumento di pressione misurato (o simulato) nel tunnel dovuto ai jet fan; λ = fattore d'attrito del tunnel; L_{12} = lunghezza su cui è misurata la differenza di pressione; D = diametro idraulico del tunnel; ζ_{12} = coefficiente di resistenza; u_t = velocità dell'aria nel tunnel; n = numero di jet fan in funzione; u_s = velocità del getto d'aria all'uscita del ventilatore; A_s = area della sezione del ventilatore; A_t = area della sezione del tunnel.

Normalmente la spinta statica di un jet fan può diminuire o aumentare per la semplice installazione, che infatti ne modifica il punto di funzionamento. Per tenere conto dell'impatto di questo cambiamento viene quindi introdotto un fattore di rendimento η_{op} . Questo coefficiente può essere inferiore o superiore a 1, infatti, se ad esempio vengono installati due o più jet fan vicini la spinta del singolo macchinario può aumentare grazie al mutuo supporto con gli altri ventilatori. Inoltre, il fattore di rendimento dipende dal numero di jet fan attivi e tende ad aumentare se cresce il numero di ventilatori. La spinta statica si può ricavare dalla formula seguente:

$$F_s = \rho * u_s^2 * A_s = \frac{\rho}{\rho_0} * \frac{\eta_{op}}{100} * F_0$$

Mentre la spinta effettiva nel tunnel si può calcolare nel modo seguente:

$$F_{mt} = \frac{\Delta p_{mt} * A_t}{n} = F_s * \frac{\eta}{100} * \left(1 - \frac{u_t}{u_s} \right)$$

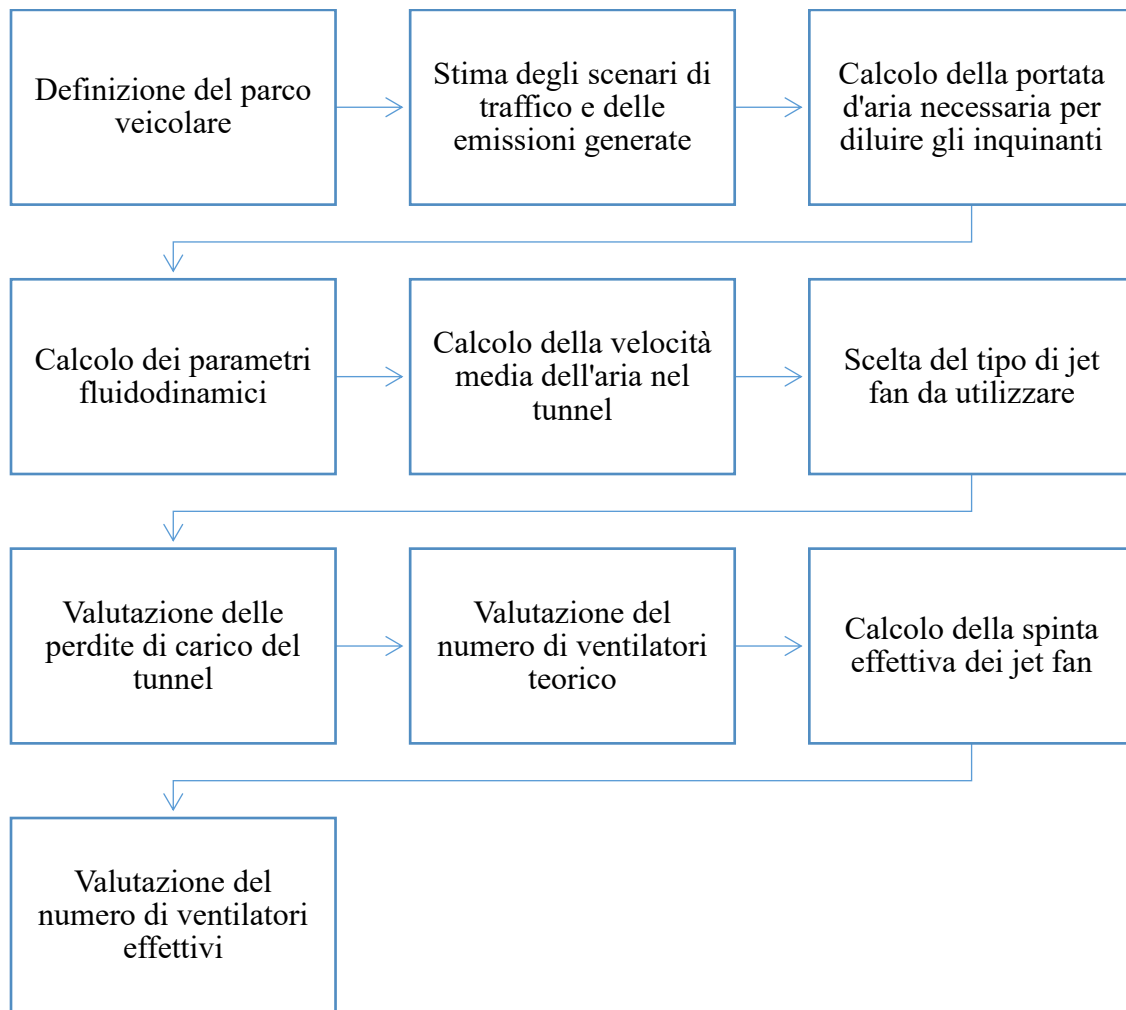
I flussi d'aria sviluppano degli sforzi di taglio sulle pareti e sulla volta del tunnel generando così delle perdite energetiche; per migliorare le performance dei jet fan è possibile defletterne il getto in uscita verso il pavimento con un determinato angolo che ottimizzi la ventilazione.

Per quanto riguarda i tunnel che presentano una o più curve il moto del flusso d'aria è più complicato da analizzare. A causa dell'influenza della curva il flusso d'aria forma uno strato limite a contatto con la parete che determina un oscillamento della pressione longitudinale lungo la curva. Conseguentemente l'aumento di pressione generato dai jet fan è minore rispetto al caso di tunnel lineare. In questo caso le prestazioni della ventilazione possono essere migliorate ruotando di pochi gradi i ventilatori vicini alla curva (se presenti) nella direzione di quest'ultima [9].

2.2 Progettazione della ventilazione sanitaria

Progettare il sistema di ventilazione longitudinale per rimuovere gli inquinanti significa scegliere i jet fan in modo che garantiscano una certa spinta statica, valutata in termini di pressione. È importante a questo fine valutare tutti gli apporti positivi e negativi al moto dell'aria, inoltre bisogna anche specificare se la galleria sia mono o bi-direzionale. Le emissioni di cui si tiene solitamente conto sono monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x) e particolato (PM). Le condizioni di sicurezza da garantire sono due: una concentrazione di inquinanti inferiore alle soglie respirabili imposte per legge; una concentrazione di particelle che garantisca una determinata visibilità (anche questa specificata da un'apposita norma). La quantità e il tipo di inquinanti immessi nel tunnel dipende da: numero di veicoli presenti, velocità di percorrenza e composizione del traffico. I dati corrispondenti ai vari scenari possibili possono essere ottenuti dal sito del PIARC. Nell'eseguire questi calcoli è importante tenere presente in che periodo dovrà operare la galleria, infatti, se ad esempio dovesse entrare in attività nel 2030, le emissioni dei veicoli da considerare non sarebbero quelle attuali (2020), ma quelle stimate dal PIARC per quel determinato periodo, che saranno minori in una certa misura.

Il processo per la scelta dei ventilatori può pertanto essere suddiviso nei seguenti step:



Il procedimento per scegliere il tipo e la quantità dei jet fan incomincia con la definizione del parco veicolare in termini di tipo di veicoli (leggeri, commerciali e pesanti), combustibile utilizzato e classe di emissioni (euro 1, euro 2 ...). Si prosegue quindi effettuando una stima degli scenari di traffico e delle conseguenti emissioni generate, tenendo in considerazione che l'impianto deve essere progettato secondo le condizioni più avverse. In particolare, il traffico dei veicoli può essere: fluido, congestionato, bloccato oppure si può avere una corsia in manutenzione. Dopodiché per ognuno dei tre inquinanti principali bisogna calcolare la portata d'aria che garantisca di diluirne a sufficienza la concentrazione per rientrare nei limiti di legge, mediante la formula seguente:

$$\dot{V}_i = \sum_0^j (n_{veh} * Q)_j * \frac{1}{C_{adm} - C_{amb}}$$

La sommatoria tiene conto di ogni j-esimo tipo di veicolo (leggero, commerciale LCV e pesante HGV), ognuno caratterizzato da una certa quantità (n_{veh}) e una certa portata di emissioni (Q); mentre il calcolo va effettuato per ogni i-esimo inquinante (CO , NO_x e PM). I parametri C_{adm} e C_{amb} rappresentano la concentrazione ammissibile (che cambia in base allo scenario di traffico) e quella ambientale (che di solito si considera pari a zero). Inoltre, bisogna calcolare la portata d'aria necessaria a garantire la visibilità minima nella galleria (riferita al CO) mediante la formula seguente:

$$\dot{V} = \sum_0^j (n_{veh} * Q)_j * \frac{1}{K_{adm} - K_{amb}}$$

K è la concentrazione dell'inquinante riferita alla visibilità (espressa in m^{-1}), mentre C è la concentrazione riferita alla respirabilità (espressa in g/m^3). Questi calcoli vanno effettuati per ogni scenario di traffico preso in considerazione in sede di progetto. La maggiore portata d'aria richiesta potrebbe non essere quella relativa allo scenario con le maggiori emissioni, questo perché in alcuni casi, come ad esempio la manutenzione (con operatori che lavorano in strada), i livelli ammissibili di inquinanti sono più bassi e per raggiungere tali valori la velocità dell'aria necessaria potrebbe essere elevata.

Dopo aver trovato lo scenario che richiede la portata d'aria maggiore si può quindi procedere con la valutazione del numero di jet fan necessari per garantirla. Innanzitutto, si calcolano il numero di Reynolds e il fattore di attrito sulla base della geometria della galleria. A questo punto si valuta la velocità media dell'aria nel tunnel in base alla portata considerata e all'area della sezione del tunnel. In seguito, si ipotizza un tipo di jet fan da utilizzare in termini di spinta e portata (questi valori serviranno anche a calcolare le perdite).

La progettazione prosegue con il calcolo delle perdite di carico del sistema, ovvero: perdite nel tunnel (sia distribuite che concentrate, come ad esempio delle curve), perdite concentrate all'entrata e all'uscita, contributo dovuto ai veicoli leggeri e pesanti (che ha una componente negativa dovuta all'intralcio e una componente dovuta all'effetto pistone che può essere positiva o negativa), cadute di pressione per effetto atmosferico e per il vento.

Differenza di pressione per condizioni atmosferiche e vento:

$$\Delta p_{meteo} = \Delta p_{amb} + \frac{\rho_{amb} * v_v^2}{2}$$

Perdite di pressione nel tunnel:

$$\Delta p_{tunnel} = \left(\beta + f * \frac{L}{D_e} \right) * \frac{\rho_a * v_0^2}{2}$$

Perdite di pressione concentrate all'ingresso:

$$\Delta p_{in} = \zeta_{in} * \frac{\rho_a * v_0^2}{2}$$

Perdite di pressione concentrate all'uscita:

$$\Delta p_{out} = \zeta_{out} * \frac{\rho_a * v_0^2}{2}$$

Variazione della pressione dovuta ai veicoli:

$$\begin{aligned} \Delta p_{veh} = & \frac{(c_w * A)_{veh}}{A_t} * \frac{\rho_a * \left(v_0 + \frac{v_{veh}}{3,6} \right)^2}{2} * G_{veh} * L_{veh} * \%_{veh} * C_{veh} * \%_{dirA} \\ & - \frac{(c_w * A)_{veh}}{A_t} * \frac{\rho_a * \left(v_0 - \frac{v_{veh}}{3,6} \right)^2}{2} * G_{veh} * L_{veh} * \%_{veh} * C_{veh} \\ & * \%_{dirB} \end{aligned}$$

I parametri riportati indicano le seguenti grandezze: v_v è la velocità del vento; Δp_{amb} è la pressione ambiente; ρ_{amb} è la densità dell'aria ambiente; β è il fattore per le perdite concentrate in galleria; f è il fattore di attrito distribuito; L è la lunghezza del tunnel; D_e è il diametro equivalente della galleria; ζ_{in} è il fattore per le perdite concentrate all'ingresso della galleria; ζ_{out} è il fattore per le perdite concentrate all'uscita della galleria; ρ_a è la densità dell'aria all'interno del tunnel; v_0 è la velocità dell'aria nella galleria; v_{veh} è la velocità media dei veicoli; G_{veh} densità dei veicoli in galleria (veicoli/km); L_{veh} è lo spazio occupato da veicoli all'interno della galleria (m); $\%_{veh}$ è la quantità di veicoli leggeri (o pesanti) in rapporto al totale; C_{veh} fattore di distanziamento tra i veicoli; $\%_{dir}$ è la quantità di veicoli che si muovono in una direzione in rapporto al totale (questo fattore è utile solo nel caso di gallerie bi-direzionali, altrimenti quello concorde al flusso d'aria vale 0).

Note le perdite di carico del sistema si può applicare un coefficiente di sicurezza (di solito 1,05) per aumentare le cadute di pressione, in modo da tenere conto di eventuali variazioni rispetto ai calcoli teorici. Si calcola quindi il numero di ventilatori necessari teorici:

$$n_j = \frac{\Delta p_{tot} * A_g}{F_j}$$

I parametri riportati indicano le seguenti grandezze: n_j indica il numero di jet fan; Δp_{tot} sono le cadute di pressione totali; A_g è l'area della sezione della galleria; F_j è la spinta di un singolo jet fan (ottenuta dalla scheda tecnica del modello scelto). Si procede con il calcolo della spinta effettiva (F_{jreal}):

$$F_{jreal} = (\eta_1 * \eta_2 * \eta_3) * F_j * (1 - \frac{v_0}{v_j})$$

I parametri riportati indicano le seguenti grandezze: η_1 è il rendimento del jet fan, η_2 è il fattore relativo all'attrito, η_3 è l'influenza tra più jet fan, v_j è la velocità dell'aria allo sbocco del jet fan.

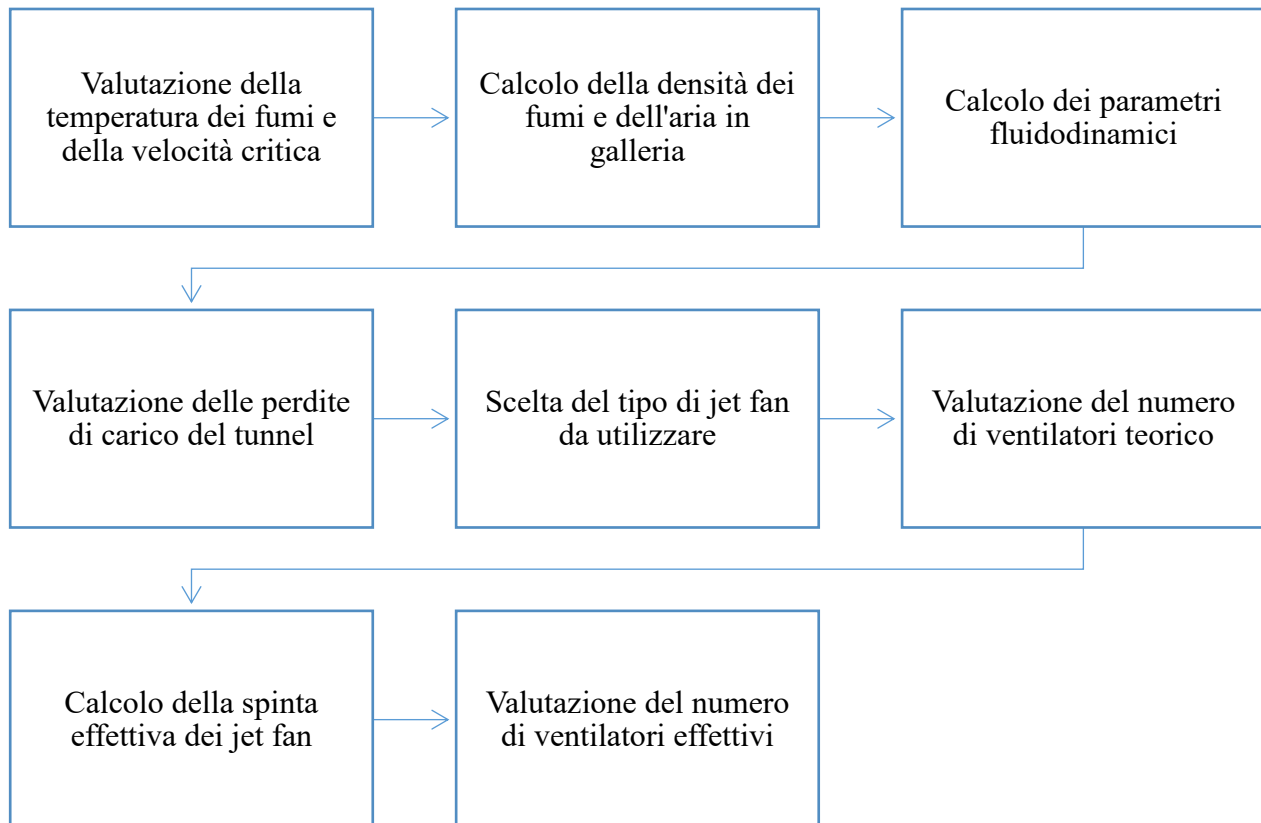
Infine si effettua il calcolo dei ventilatori reali (n_{jreal}):

$$n_{jreal} = \frac{\Delta p_{tot} * A_g}{F_{jreal}}$$

2.3 Progettazione della ventilazione di emergenza

Per progettare il sistema di ventilazione longitudinale riguardo al caso di emergenza si considerano solitamente incendi da 50 e 100 MW le cui curve sono ottenibili dal PIARC.

Il processo per la scelta dei ventilatori è suddiviso nei seguenti step:



Il primo step è stabilire la temperatura dei fumi e la velocità che l'aria deve avere per rimuoverli (velocità critica), questi due valori sono interdipendenti, pertanto vanno ottenuti mediante metodo iterativo impostando l'aria a un valore iniziale di 3 m/s.

$$V_c = K_1 * K_g * \left[\frac{g * H * \dot{Q}}{\rho * C_p * A * T_f} \right]^{(1/3)}$$

$$T_f = \frac{\dot{Q}}{\rho * C_p * A * V_c} + T_a$$

Dopo alcuni tentativi si giungerà ai valori di T_f e V_c . Si prosegue con il calcolo della densità dell'aria all'interno della galleria (che dipenderà dalla temperatura media dell'aria). La densità media dei fumi si valuta con la formula seguente:

$$\rho_f = \frac{p_{amb}}{T_{mf} * R}$$

Il parametro R indica la costante dell'aria, mentre T_{mf} è la temperatura media dei fumi (inferiore a T_f , e pari alla media tra la temperatura dei fumi e quella dell'aria).

Successivamente si calcolano le cadute di pressione come per la ventilazione sanitaria, ma con una formula differente riguardo i veicoli, perché sono fermi, e considerando anche le perdite per l'incendio (che per un incendio da 100 MW sono pari a 40 Pa) e l'effetto camino (naturale e in caso di incendio).

Caduta di pressione nel tunnel:

$$\Delta p_{tunnel} = \left(\beta + f * \frac{L}{D_e} \right) * \frac{\rho_a * v_0^2}{2}$$

Perdite concentrate all'ingresso:

$$\Delta p_{in} = \zeta_{in} * \frac{\rho_a * v_0^2}{2}$$

Perdite concentrate all'uscita:

$$\Delta p_{out} = \zeta_{out} * \frac{\rho_a * v_0^2}{2}$$

Caduta di pressione dovuta ai veicoli:

$$\Delta p_{veh} = n * \frac{(c_w * A)_{veh}}{A_t} * \frac{\rho_a * v_0^2}{2}$$

Effetto camino naturale:

$$\Delta p_{c,i} = (\rho_{amb} - \rho_{a,g}) * g * \Delta H_{im,u}$$

Effetto camino dovuto all'incendio:

$$\Delta p_{c,i} = (\rho_{a,g} - \rho_f) * g * \Delta H_{i,u}$$

I parametri presenti nelle equazioni indicano le seguenti grandezze: $\rho_{a,g}$ è la densità dell'aria all'interno della galleria, ρ_f è la densità dei fumi, $\Delta H_{i,u}$ è l'altezza a cui si trova l'incendio rispetto all'uscita del tunnel, mentre $\Delta H_{im,u}$ rappresenta l'altezza dell'imbocco rispetto all'uscita; c_w è il coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli (per i veicoli pesanti è maggiore rispetto a quelli leggeri a causa di una forma meno aerodinamica del veicolo). Il calcolo del numero di jet fan necessari e della spinta effettiva di questi si esegue allo stesso modo della ventilazione sanitaria.

Normalmente la condizione che richiede la spinta maggiore da parte del sistema di ventilazione è quella di emergenza (incendio da 100 MW), mentre l'aria richiesta per rimuovere le sostanze inquinanti è minore, pertanto la progettazione in caso di incendio è più rilevante.

2.4 Sistema di misura delle prestazioni degli impianti di ventilazione

Nelle gallerie è importante verificare che gli impianti di ventilazione funzionino come stimato in fase di progettazione. Il moto dell'aria in un ambiente del genere è un problema complesso e pertanto anche con l'uso di fattori di correzione vi è una differenza tra quanto atteso da calcoli analitici e da simulazioni CFD e quanto effettivamente si può osservare sul campo. Per verificare le prestazioni dei ventilatori si effettuano misurazioni che riguardano: temperatura, velocità dell'aria, pressione, differenza di pressione indotta dai ventilatori e condizioni atmosferiche. In zone marittime è importante considerare anche l'umidità e la salsedine presenti nell'aria, specialmente nel caso di tunnel al di sotto del livello del mare [5]. Per la misura della temperatura in galleria solitamente vengono usate delle termocoppie. Il controllo delle condizioni meteorologiche è effettuato mediante stazioni metrologiche posizionate in corrispondenza dei portali della galleria, l'obiettivo è di tener conto delle condizioni al di fuori della galleria che possono influire sulla misura della velocità dell'aria. La differenza di pressione in galleria viene misurata tramite dei trasduttori di pressione e serve a verificare l'effettiva spinta fornita dai ventilatori. La misura della velocità dell'aria è effettuata tramite anemometri che possono presentare diversi metodi di rilevazione.

Le tipologie principali di sonde anemometriche sono:

- anemometro a coppe;
- anemometro a filo caldo;
- sensore a filo caldo con testa omnidirezionale;
- tubo di pitot;
- sonda di Kiel;
- anemometro sonico, a due o tre assi;
- anemometro laser-Doppler;
- anemometro a ventolina.

L'anemometro a coppe è lo strumento più comune per la misurazione della velocità del vento, si tratta di un meccanismo semplice e il costo è solitamente contenuto. È composto da un corpo centrale sul quale è montato un rotore alle cui estremità sono fissate delle coppette che vengono spinte dall'aria. È un sensore omnidirezionale, pertanto per effettuare le misurazioni non è necessario dargli un preciso orientamento sul piano orizzontale. La precisione di questo strumento è inferiore rispetto ai sensori sonici a causa dell'inerzia e dell'attrito delle coppe rotanti.



Figura 2.5 Anemometro a coppe [6].

L'anemometro a filo caldo utilizza un filo molto sottile (spesso alcuni micron), costituito solitamente da tungsteno, che viene riscaldato elettricamente fino a una temperatura superiore a quella ambiente di alcuni gradi. Il flusso d'aria che investe il cavo lo raffredda per convezione modificandone la resistenza elettrica e conoscendo la relazione tra variazione di temperatura e resistenza elettrica, è possibile ricavare la velocità dell'aria. È uno strumento molto preciso ma è anche estremamente delicato, è sufficiente infatti la deposizione di polvere perché lo strumento rilevi valori errati.



Figura 2.6 Anemometro a filo caldo [6].

Una variante dell'anemometro a filo caldo è il sensore a testa omnidirezionale, che presenta il vantaggio di poter analizzare correttamente il flusso d'aria anche in condizioni di forte turbolenza.



Figura 2.7 Sensore omnidirezionale [1].

Il tubo di Pitot è uno strumento usato per velocità dell'aria elevate quindi non viene sfruttato per test in galleria. La sonda di Kiel è di fatto un tubo di Pitot modificato il cui ingresso è protetto da una sorta di “scudo”, è possibile usarla per applicazioni a basse velocità. Questo dispositivo è meno sensibile alle variazioni dell'angolo di imbardata rispetto al tubo di Pitot, ciò è dovuto all'apertura dell'ingresso.



Figura 2.8 Sonda di Kiel [7].

L'anemometro sonico si basa sul principio che la velocità del suono dipende dalla velocità del vento. È composto da un emettitore di ultrasuoni e misura il tempo che un'onda sonora impiega per spostarsi tra due trasduttori, ricavandone quindi la velocità dell'aria.



Figura 2.9 Anemometro sonico a due assi [8].

L'anemometro laser-Doppler è uno strumento molto preciso e dal costo particolarmente alto, pertanto è utilizzato per lo più in applicazioni da laboratorio.

L'anemometro a ventolina è il sensore più semplice per misurare la velocità dell'aria e grazie alle sue dimensioni ridotte è usato come strumento portatile. È composto da una ventola che ruota sotto l'effetto di un flusso d'aria. È uno strumento abbastanza impreciso e pertanto è usato solo per ottenere valori indicativi. Nella tabella sottostante sono stati riassunti i principali punti di forza e le carenze dei vari tipi di anemometri al fine di effettuare una comparazione.

Nella tabella sottostante sono rappresentati i fattori principali da prendere in considerazione nella scelta di un anemometro. Il numero di cerchi in ogni campo indica il valore di quel parametro che può essere basso, medio o alto.

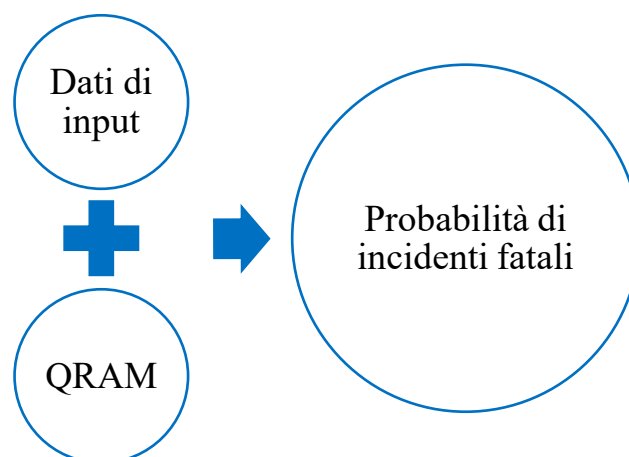
Tipi di anemometri	Grandezze misurate	Campo di misura della velocità	Precisione strumento	Facilità di utilizzo	Costo
Coppe	Velocità	• •	•	• •	•
Ventolina	Velocità	•	•	• • •	•
Filo caldo	Velocità	• • •	• •	• •	• •
Filo caldo omnidirezionale	Velocità	• • •	• •	• • •	• •
Sonda di Kiel	Velocità	• •	•	• • •	•
Sonico a 2 assi	Velocità e direzione 2D	• • •	• • •	• •	• •
Sonico a 3 assi	Velocità e direzione 3D	• • •	• • •	•	• • •

3. Analisi di rischio quantitativa di una galleria

Progettare correttamente il sistema di ventilazione di una galleria è fondamentale per garantirne la sicurezza, tuttavia anche i migliori impianti non garantiscono un rischio nullo ma con il corretto dimensionamento e gestione dell'impianto è comunque possibile minimizzare la frequenza degli incidenti ma soprattutto i danni da essi risultanti. Effettuando un'analisi di rischio è possibile comprendere quali siano gli accorgimenti, in termini di sistemi installati, che a parità di costo permettono di ridurre maggiormente i danni causati dagli incidenti. Verrà di seguito illustrato un progetto di analisi di rischio di una galleria reale, volto a fornire le basi per un tool di analisi di rischio dinamica il cui obiettivo sarà quello di calcolare istante per istante la probabilità di avere incidenti fatali in galleria in base ai mezzi pesanti che la attraversano.

3.1 Procedimento per la valutazione del rischio

L'analisi di rischio quantitativa è stata effettuata tramite il modello del PIARC QRAM, con lo scopo di capire quale sia il rischio di incidenti fatali (cioè il valore atteso del danno riferito all'anno). Il risultato del lavoro svolto è una matrice che associa a ogni tipo di merce pericolosa trasportata la probabilità che vi sia un incidente fatale in un tempo pari a un anno. Per effettuare l'analisi bisogna inserire determinati parametri (che verranno spiegati in seguito) che descrivono le caratteristiche della galleria e del tipo di traffico, successivamente il software del PIARC fornirà come risultato la probabilità che possa morire un certo numero di persone nell'arco di 1 anno.



La galleria per cui si è svolta questa analisi è la Bricco, situata sulla A6 Torino-Savona.

Il modello considera diversi scenari possibili in termini di incidente in galleria, come ad esempio incendi, esplosioni e rilascio di sostanze tossiche. Gli scenari considerati dal modello sono associati a un codice numerico e sono riportati nella tabella sottostante.

Legenda scenari ADR	Codice
HGV fire 100 MW	2
BLEVE of LPG in cylinder	3
Motor spirit pool fire	4
VCE of motor spirit	5
Chlorine release	6
BLEVE of LPG in bulk	7
VCE of LPG in bulk	8
Torch fire of LPG in bulk	9
Ammonia release	10
Acrolein in bulk release	11
Acrolein in cylinder release	12
BLEVE of liquefied CO2 in bulk	13

Nei casi reali i veicoli pesanti che trasportano merci pericolose presentano delle targhe per il riconoscimento del tipo di merce pericolosa trasportata; è stato associato a ogni targa (cioè a ogni tipo di merce trasportata) il rischio che possa morire una persona nell'arco di un anno, corrispondente alla combinazione degli scenari del modello in base a quanto riportato dal PIARC. La differenza tra le classi ADR (cioè le targhe) e gli scenari ADR consiste nel fatto che, mentre le classi si riferiscono a un tipo di sostanza trasportata in un determinato modo, gli scenari si riferiscono a un tipo di incidente. Per esempio, la classe benzina potrebbe portare a uno scenario di incendio oppure di esplosione, inoltre gli stessi incendi possono svilupparsi in maniere diverse e portare quindi a diversi scenari. Per tenere conto di queste considerazioni sono state correlate le classi agli scenari secondo quanto riportato dal PIARC, come mostrato nella tabella sottostante.

Legame tra classi e scenari ADR

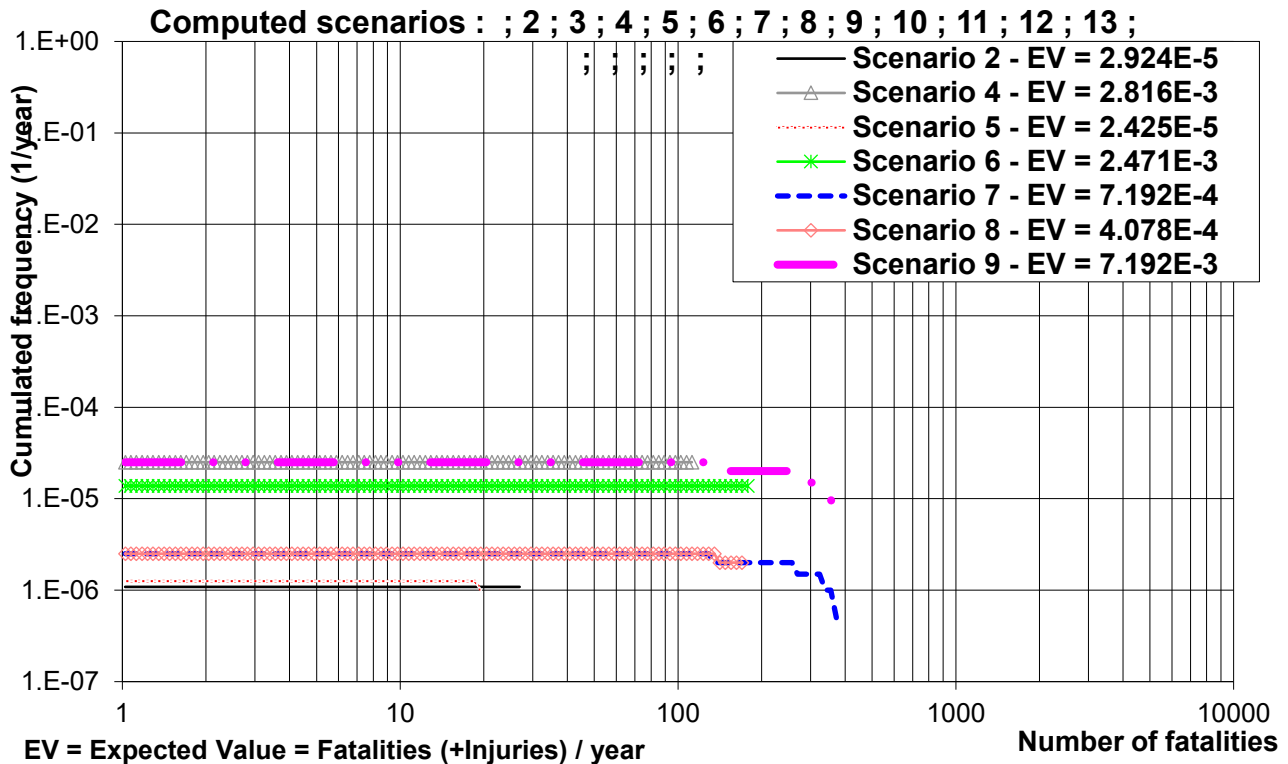
Scenario #	Description	Mass concerned	Breach diameter (mm)	Release rate (kg/s)	DG Class	Danger Code	Classification code	N° ONU
1	HGV fire 20 MW (no DG)	-	-	-	-	-		
2	HGV fire 100 MW (no DG)	-	-	-	-	-		
4	Motor spirit pool fire	28 tonnes	100	20.6	3	33 & 30	F1 - II F1 - III	1203 & 1202
5	VCE of motor spirit	28 tonnes	100	20.6	3	33	F1 - II	1203
3	BLEVE of a 50kg LPG cylinder	50 kg	-	-	2	23	2F (flammable)	1965, 1978, 1011
7	BLEVE of an 18 tons LPG tank	18 tonnes	-	-	2	23	2F (flammable)	1965, 1978, 1011
8	VCE from an 18 tons LPG tank	18 tonnes	50	36	2	23	2F (flammable)	1965, 1978, 1011
9	Torch fire from an 18 tons LPG tank	18 tonnes	50	36	2	23	2F (flammable)	1965, 1978, 1011
6	Chlorine release from a 20 tons tank	20 tonnes	50	45	2	268	2TC (toxic corrosive)	1017
10	Ammonia release from an 18 tons tank	20 tonnes	50	36	2	268	2TC (toxic corrosive)	1005
11	Acrolein in bulk	25 tonnes	100	24.8	6.1	663	TF1 - I	1092
12	Acrolein in cylinder	100 litres	4	0.02	6.1	663	TF1 - I	1092
13	Liquefied CO2 in bulk	20 tonnes	-	-	2	22 (toxic aspect not taken into account)		1003, 1977

I parametri di input descrivono la galleria in esame, questi parametri possono essere fissi, come ad esempio la lunghezza della galleria, oppure variabili, come ad esempio il funzionamento della ventilazione. I parametri fissi si riferiscono alle seguenti voci: dati geometrici della galleria; tipo di sistemi d'allarme; distanza tra le vie di fuga, se presenti; inclinazione della galleria (sia longitudinale che trasversale); numero medio di persone all'interno di un veicolo leggero; numero medio di persone all'interno di un veicolo pesante; traffico di veicoli pesanti che trasportano merci pericolose (HDGV), impostato pari a 1. Un altro parametro importante è la frequenza dei vari scenari ADR considerati, è possibile infatti selezionare singoli scenari da considerare e associare ad ognuno di essi una probabilità che questo si verifichi. Gli scenari considerati vanno dal 2 al 13 e apparentemente sembrano 12 casi distinti, ma non è così perché i casi 4 e 5 rappresentano due possibili sviluppi della stessa situazione e il software li tratta come due sotto-casi, il medesimo discorso si applica ai casi 7, 8 e 9, che sono tre sviluppi simili di un incidente con GPL. Pertanto, i casi distinti considerati dal

software sono in realtà 9 ed è stata impostata una frequenza del 11,111% per ciascuno di essi cosicché gli scenari fossero tutti equiprobabili. I parametri di input variabili sono:

- ventilazione, se presente la velocità dell'aria impostata sul QRAM è di 3 m/s, se invece è spenta la velocità dell'aria è di 1,5 m/s (il valore di 1,5 è stato ipotizzato come dovuto a differenze di pressione);
- rilevazione, se presente il tempo di risposta del sistema di rilevazione impostato sul QRAM è di 3 minuti, se invece non è presente il tempo di risposta impostato è di 8 minuti;
- traffico, rappresenta il numero di veicoli totali (sia veicoli leggeri che veicoli pesanti) che transitano ogni ora, nei casi considerati abbiamo impostato 10, 500, 1000, 1500, 2000 veic/h;
- percentuale di veicoli pesanti (VP%), rappresenta il rapporto tra i veicoli pesanti (bus esclusi) e il totale dei veicoli transitanti in galleria, nei casi analizzati si è considerato 5,10,15,30,40%.

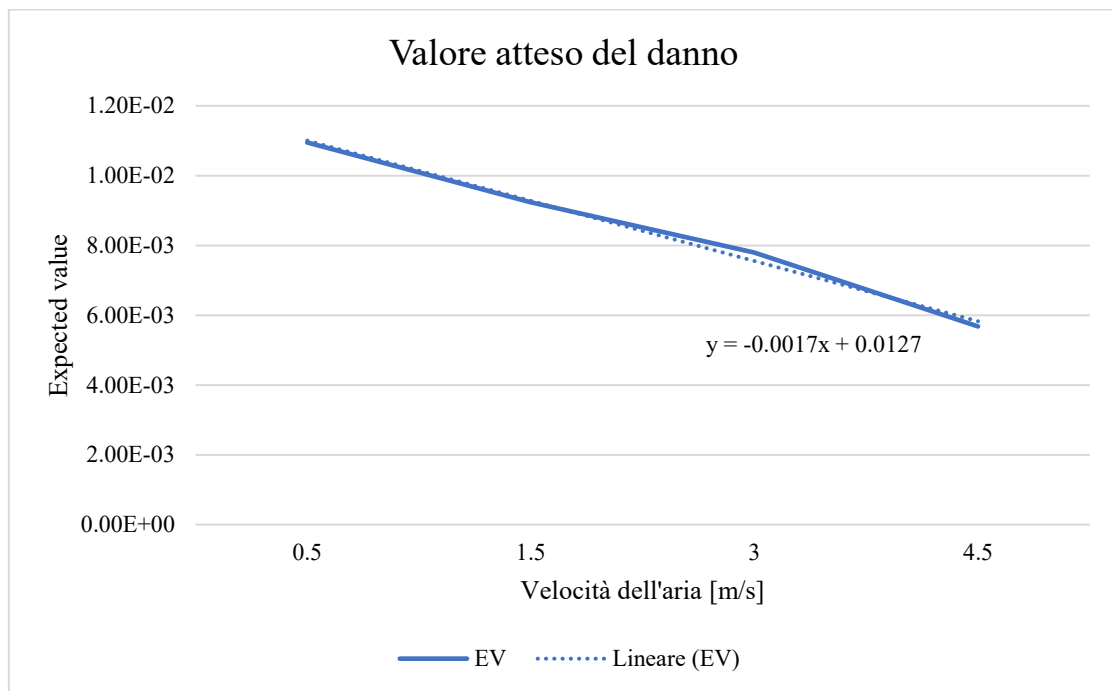
Per ogni combinazione di questi quattro parametri è stata eseguita una simulazione e sono stati registrati i valori calcolati. I risultati delle simulazioni sono espressi in termini di numero di fatalità rispetto alla frequenza degli incidenti fatali, come per il caso mostrato nel grafico seguente (a titolo di esempio), riferito a un caso con ventilazione (quindi velocità media dell'aria in galleria pari a 3m/s), rilevazione attiva, 2000 veicoli all'ora, di cui il 40% sono veicoli pesanti.



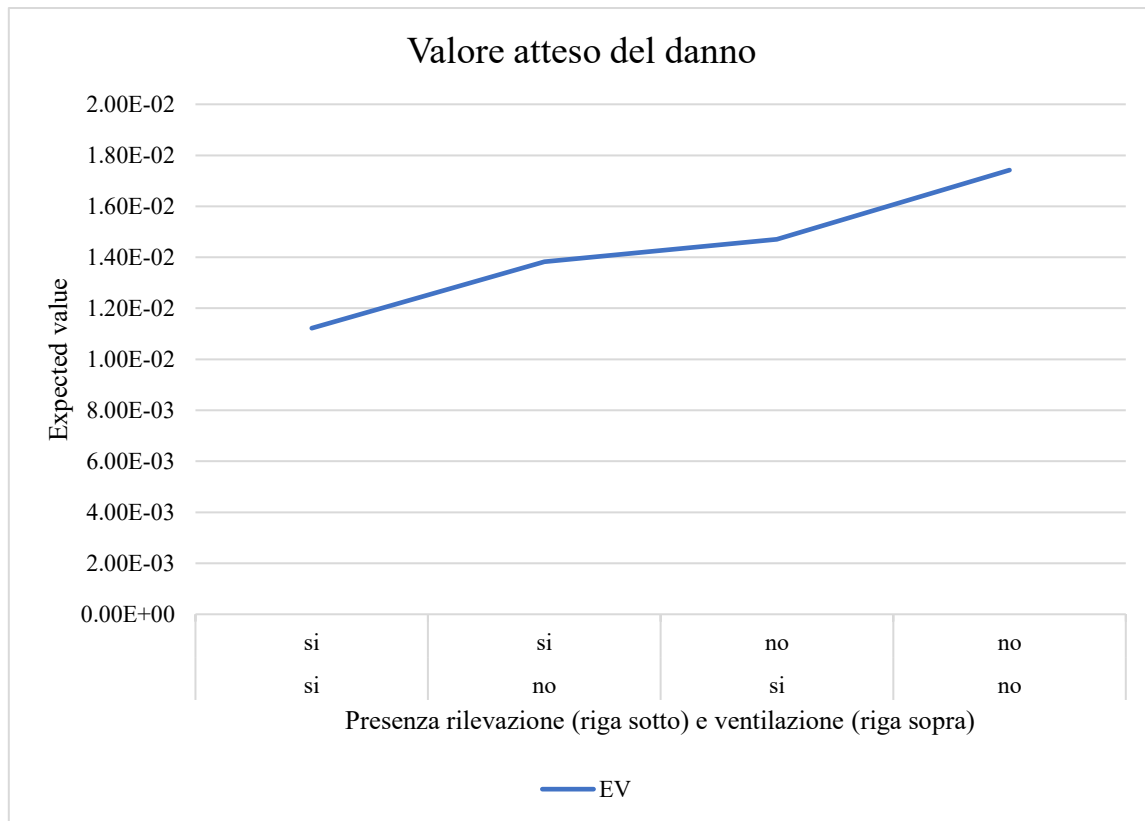
Sull'asse delle ascisse è rappresentato il numero di fatalità che possono avvenire, mentre sull'asse delle ordinate è rappresentata la frequenza degli incidenti che possono portare a un certo numero di morti. Come mostra il grafico, la probabilità che in un anno si possano avere ad esempio 300 incidenti fatali è minore rispetto alla possibilità di averne 100. L'integrale delle curve (graficamente rappresentato dall'area sottesa da ogni curva) dei vari scenari ADR rappresenta l'expected value, EV, (anche detto valore atteso del danno, VAD); la somma dei singoli expected values equivale al rischio totale. L'expected value rappresenta di fatto le fatalità che possono avvenire nell'arco di un anno. Avendo impostato il traffico di veicoli pesanti che trasportano merci pericolose (HDGV) pari a 1, qualora 2 o più mezzi transitassero in galleria contemporaneamente il valore dell'EV corrispondente andrebbe moltiplicato per il numero di mezzi effettivi.

3.2 Studio del rapporto fra i parametri variabili e il valore del rischio

All'aumentare della velocità dell'aria in galleria invece il rischio di incidente diminuisce, come mostrato nel grafico seguente ottenuto per 1000 veicoli all'ora, con rilevazione e con percentuale di veicoli pesanti pari al 15% dei veicoli totali.

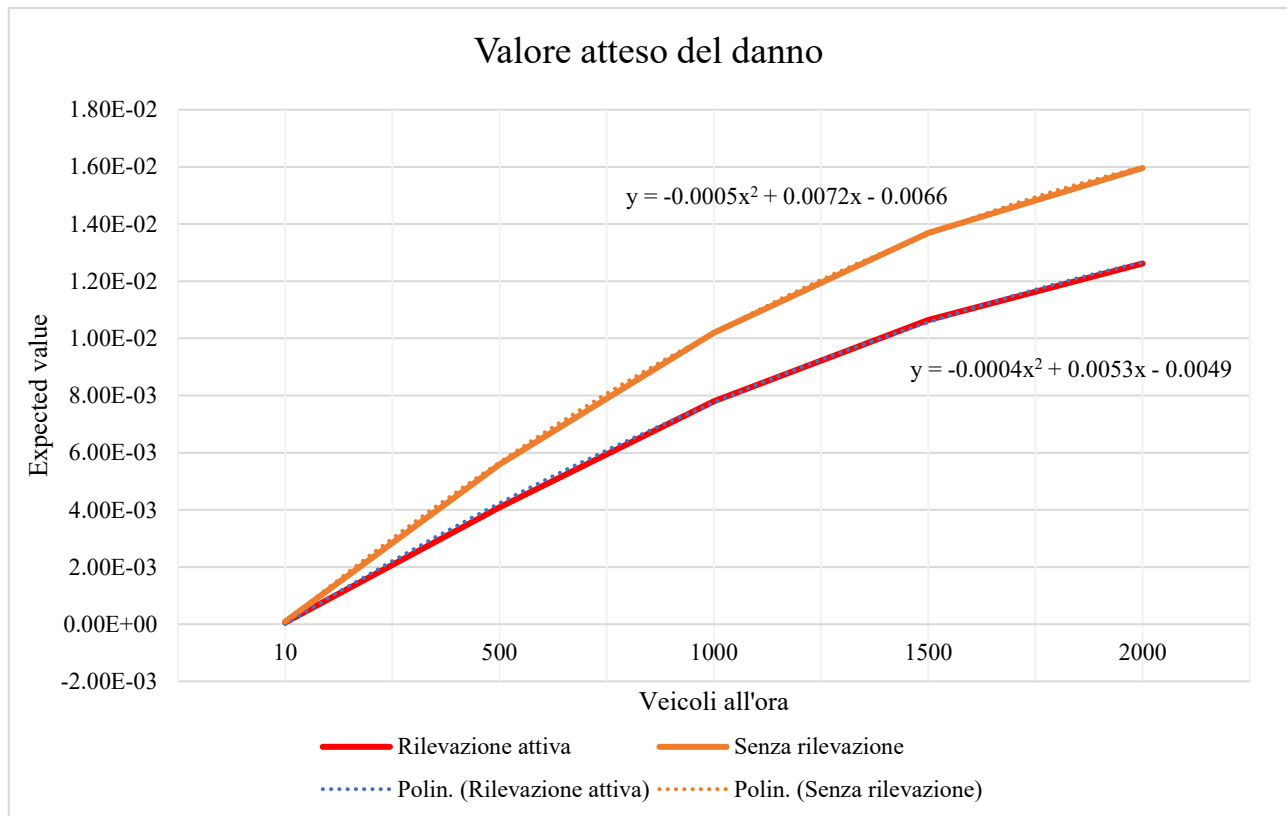


La diminuzione del rischio è pressoché lineare all'aumentare della velocità dell'aria in galleria, secondo l'equazione mostrata nel grafico. La presenza della ventilazione e dei sistemi di rilevazione influiscono sul rischio come mostrato nel grafico seguente, ottenuto per 2000 veicoli all'ora e il 30% di veicoli pesanti.



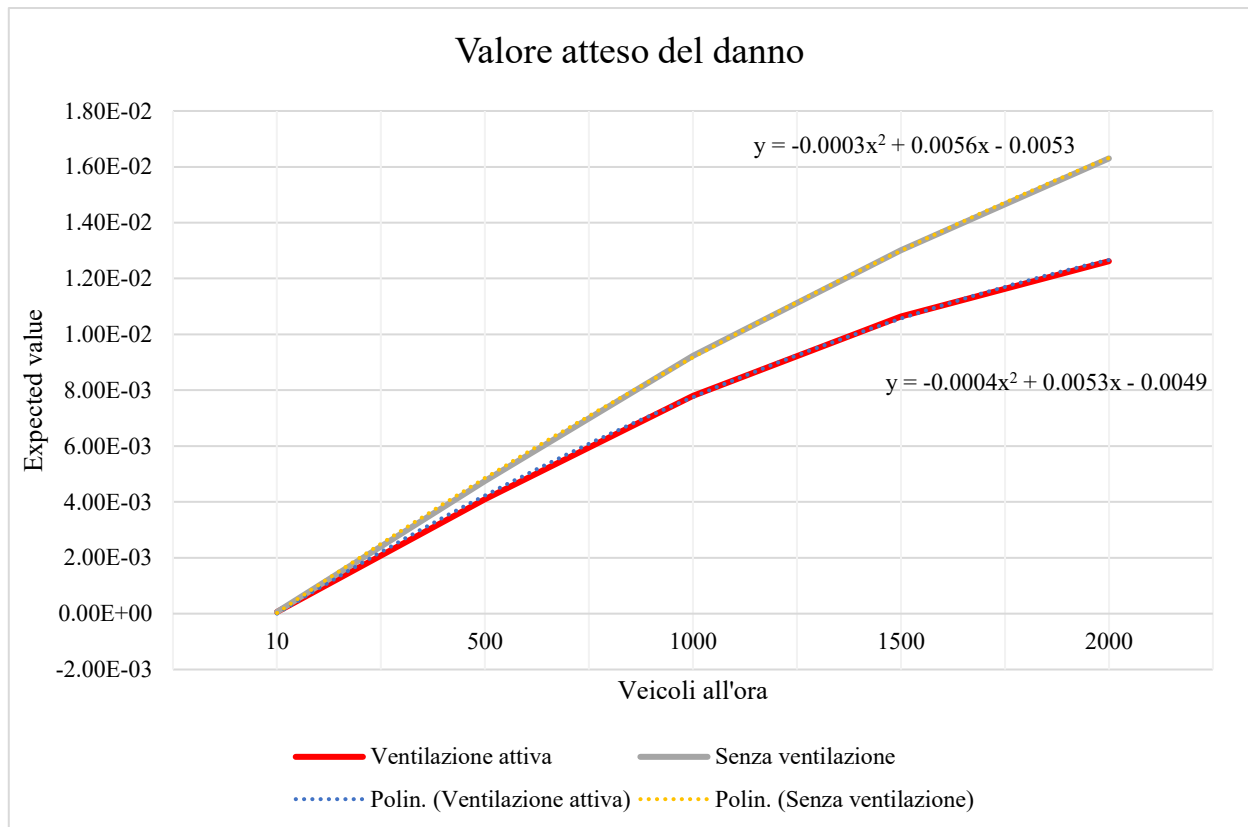
Come si osserva la ventilazione influisce maggiormente sul valore del rischio, infatti, passando da una velocità dell'aria di 3 m/s a 1,5 m/s con rilevazione attiva il rischio aumenta circa del 31%, contro il 26% in caso di mancato rilevazione, mentre la presenza o meno della rilevazione influisce per circa il 23% con ventilazione attiva e per il 18% senza ventilazione.

Il rischio di incidenti fatali varia sensibilmente al variare del traffico presente nel tunnel, nel grafico seguente è mostrato l'andamento del rischio calcolato nel caso si abbia ventilazione attiva con velocità dell'aria di 3 m/s e una presenza di veicoli pesanti del 15%.



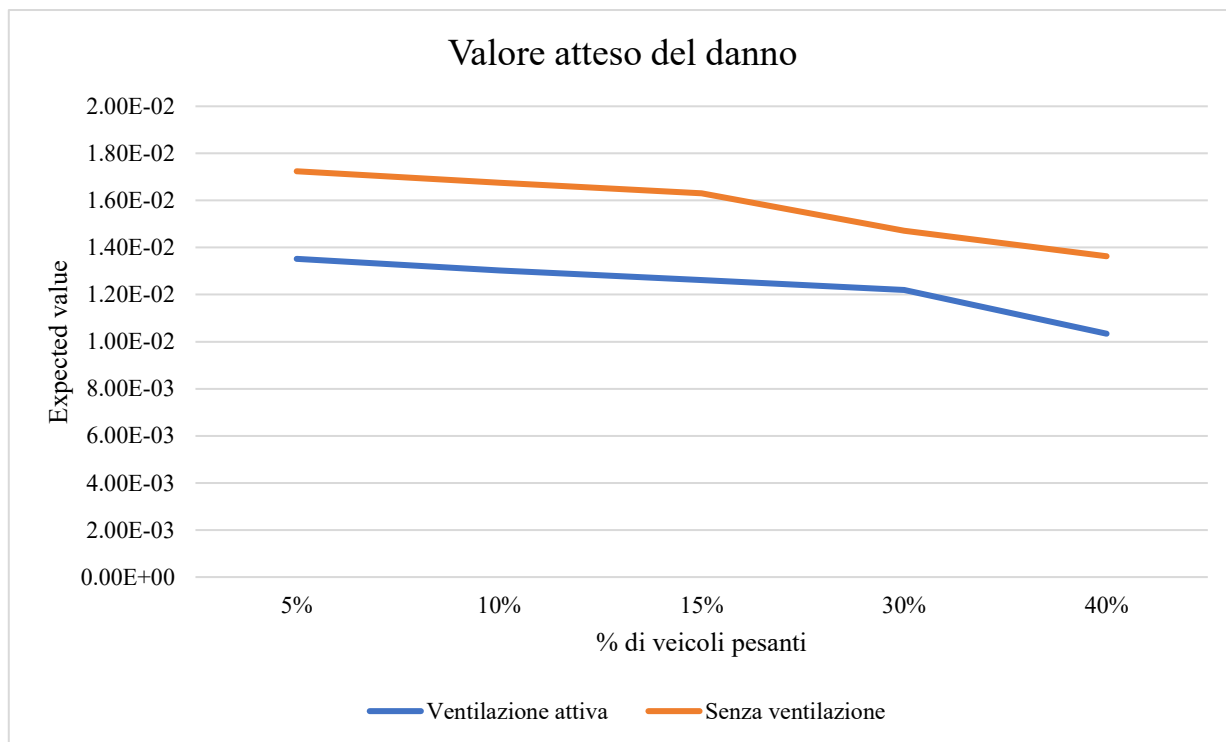
L'aumento del numero di veicoli in transito influisce sul rischio per circa tre ordini di grandezza (passando da 10^{-5} per 10 veicoli all'ora a 10^{-2} per 2000). L'andamento della curva dell'expected value rispetto al traffico è simile anche per le altre percentuali di veicoli pesanti, inoltre la curva presenta differenze minime nei casi senza rilevazione o ventilazione (cambiano invece i valori assoluti).

Di seguito viene riportato un grafico che paragona il livello di rischio con e senza ventilazione, ottenuto per una presenza di veicoli pesanti del 15% con rilevazione attiva.



Le due curve mostrano l'importanza del sistema di ventilazione nella riduzione del rischio, infatti, per 2000 veicoli all'ora l'expected value può essere maggiore del 33% nel caso il sistema non sia attivo. L'andamento delle curve è espresso dai polinomi di secondo grado mostrati.

Nel grafico sottostante è rappresentato l'andamento del valore del rischio ottenuto nel caso di rilevazione attiva, con 2000 veicoli all'ora e percentuale di veicoli pesanti che varia dal 5% al 40%.



Le due curve mostrate hanno un andamento decrescente all'aumentare della percentuale di veicoli pesanti, passando dal 40% al 5% il rischio aumenta di un terzo. Questo comportamento può essere spiegato dalla minore velocità di transito consentita ai mezzi pesanti rispetto alle normali autovetture, che evidentemente porta a una minore probabilità di danni fatali.

3.3 Analisi di rischio dinamica

Il progetto per l'analisi di rischio dinamica è composto da tre elementi fondamentali: le telecamere che contano il numero di veicoli presenti, rilevano il numero di veicoli pesanti ed il tipo di veicoli che trasportano merci pericolose in base alla targa; la matrice contenente i valori di rischio corrispondenti alle varie classi ADR, sviluppata in questa tesi; il software che riconosce le targhe relative a merci pericolose ed associa il rischio corrispondente ai valori della matrice. Questa analisi viene fatta istante per istante e confronta il valore atteso del danno (che è riferito all'anno) ottenuto dai dati nella matrice con le soglie tollerabili (ALARP). Qualora il rischio fosse troppo elevato l'informazione dovrà essere comunicata ai gestori del tunnel in esame per garantirne la sicurezza.

La matrice elaborata mostra per ogni classe ADR il rischio relativo a un veicolo di quella tipologia, per cui qualora transitassero più veicoli con la medesima targa il valore atteso del danno (VAD o EV) totale sarà uguale al valore del singolo caso moltiplicato per il numero di veicoli. Nel caso in

cui siano presenti veicoli diversi invece andranno sommati tra loro i valori di rischio relativi alle varie targhe per ottenere il VAD totale.

Le classi ADR per le merci pericolose sono le seguenti:

- Class 1 Explosive substances and articles
- Class 2 Gases
- Class 3 Flammable liquids
- Class 4.1 Flammable solids, self-reactive substances, polymerizing substances and solid desensitized explosives
- Class 4.2 Substances liable to spontaneous combustion
- Class 4.3 Substances which, in contact with water, emit flammable gases
- Class 5.1 Oxidizing substances
- Class 5.2 Organic peroxides
- Class 6.1 Toxic substances
- Class 6.2 Infectious substances
- Class 7 Radioactive material
- Class 8 Corrosive substances
- Class 9 Miscellaneous dangerous substances and articles

La matrice dei risultati è così organizzata:

- le prime quattro colonne mostrano i vari casi ottenibili combinando i parametri di input variabili, ovvero ventilazione, rilevazione, traffico e percentuale di veicoli pesanti;
- le colonne successive mostrano il valore atteso del danno (cioè il numero di incidenti fatali che si possono verificare in un anno) per ogni singola targa e sono così organizzate:
 - la prima riga riporta la cifra che apparirà per prima nel primo numero della targa (composto da 2 o 3 cifre);
 - la seconda riga riporta i possibili numeri che compariranno per primi nella targa (composti da 2 o 3 cifre), per ogni classe è stato aggiunto un caso x-esimo da considerare qualora il sistema di riconoscimento delle targhe riesca a vedere solamente la prima cifra mentre la seconda ed eventualmente la terza resterebbero ignote;

- la terza riga riporta i numeri che compariranno in basso nella targa, composti da 4 cifre, anche in questo caso sono presenti i casi x-esimi da applicare qualora i numeri non siano ben visibili;
- inoltre è stata creata una classe x-esima da utilizzare qualora non sia visibile la prima cifra della targa.

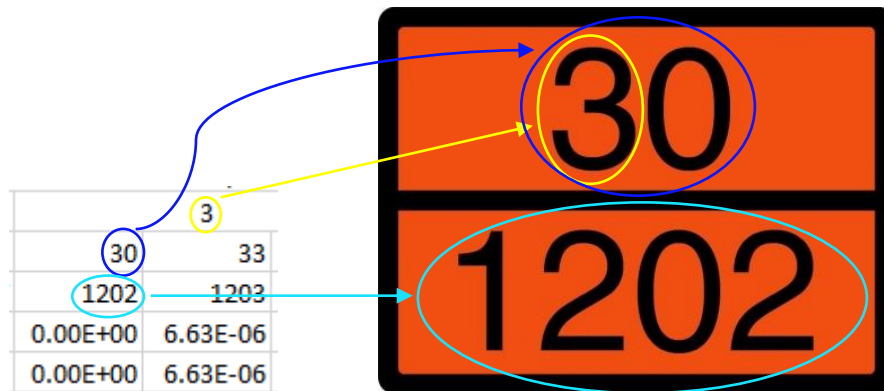
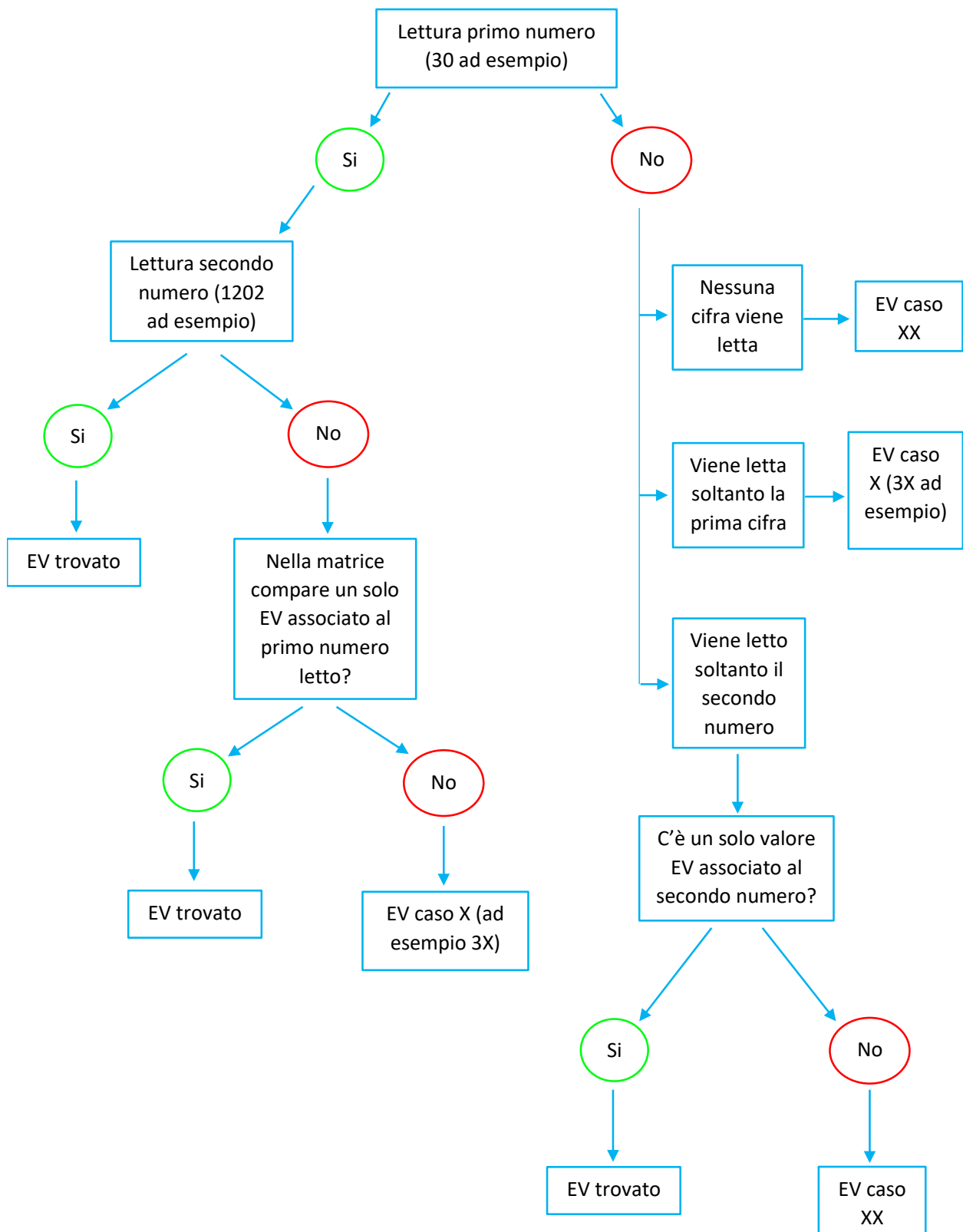


Figura 3.1 Significato dei numeri della matrice.

Schema dell'utilizzo della matrice da implementare nel software



4. Modelli numerici per la simulazione degli impianti di ventilazione

I modelli numerici di fluidodinamica computazionale (CFD) servono per stimare le condizioni dei flussi dei gas presenti nel tunnel. Nello specifico permettono di simulare i moti dei fluidi e gli scambi termici che si verificano in condizioni normali e in caso di incendio. Per effettuare l'analisi di un modello CFD è necessario utilizzare un software che risolva le equazioni che descrivono il fenomeno in studio. L'analisi delle simulazioni derivanti dal modello permette di valutare le prestazioni dell'impianto anche in condizioni diverse da quelle presenti al momento dei test. In particolare, l'impianto di ventilazione potrebbe trovarsi a lavorare in diverse condizioni meteorologiche o di traffico stradale, non valutabili al momento delle misurazioni. Nella prima formulazione del modello questo può fornirci previsioni indicative del flusso dell'aria, in caso di incendio e non, permettendo così di individuare le zone più critiche della galleria che saranno quindi oggetto delle misurazioni. Dopo aver rilevato i dati sul campo questi possono essere confrontati con i valori attesi dal modello CFD, che quindi potrà essere modificato di conseguenza in caso di divergenze. Successivamente sarà possibile utilizzare il modello calibrato per prevedere il funzionamento del sistema di ventilazione in condizioni non misurabili.

L'applicazione del metodo termofluidodinamico consente di:

- progettare sistemi di ventilazione complessi e innovativi per le gallerie e per le vie di fuga;
- progettare materiali, strutture e componenti che soddisfino particolari requisiti di resistenza e reazione al fuoco;
- progettare sistemi di mitigazione o spegnimento di focolai costituiti da combustibili di tipologie diverse;
- progettare modelli in scala nei quali visualizzare i flussi dell'aria e dei prodotti della combustione in galleria al variare delle condizioni di ventilazione, nonché effettuare misure controllate e relativamente poco costose delle principali variabili termofluidodinamiche che caratterizzano un evento di incendio;
- progettare prove a fuoco su scala reale realizzando eventi di incendio controllati per magnitudo e tasso di generazione dei fumi;

- progettare dispositivi sperimentali mirati alla quantificazione delle caratteristiche di resistenza e reazione al fuoco dei materiali con i quali sono realizzati gli elementi strutturali e i componenti degli impianti;
- progettare algoritmi di controllo della ventilazione in condizioni di emergenza;
- definire procedure di gestione dell'emergenza per la specifica galleria.

4.1 Modello 1D

Un modello 1D fornisce come risultati i valori delle grandezze richieste, non comprende quindi alcuna rappresentazione grafica ed è basato su un set di equazioni. Per tenere conto delle interazioni delle varie grandezze ha bisogno di fattori correttivi, come ad esempio il coefficiente delle perdite concentrate o il fattore di attrito. Il modello 1D è pertanto uno strumento semplice che non permette di avere risultati precisi, ma è proprio la semplicità a essere il suo vantaggio, infatti, l'esecuzione di una simulazione può richiedere un tempo di alcuni secondi (o al più minuti), mentre per una simulazione 3D possono essere necessari diversi giorni per l'analisi della medesima galleria. Questi modelli fluidodinamici solitamente sono basati su una rete di nodi e rami che definiscono la geometria del sistema in esame. Ogni ramo (cioè un tratto di galleria) è connesso al successivo mediante i punti di congiunzione chiamati nodi. Con questo metodo è possibile simulare sia sistemi semplici, come un unico tunnel dritto, che complessi, come una rete di tunnel sotterranei (per esempio per le metropolitane).

Per questa tesi è stato utilizzato il software Whitesmoke, con il quale sono state eseguiti due casi, ovvero quello di incendio e di condizioni ordinarie. Per creare il sistema bisogna definire le grandezze relative ai nodi e ai rami che ne fanno parte, in particolare per i nodi bisogna indicare:

- quota altimetrica;
- pressione;
- temperatura;
- densità dell'aria.

Invece per quanto riguarda i rami bisogna definire le seguenti grandezze:

- nodo iniziale e nodo finale del ramo;
- sezione;
- perimetro;
- lunghezza;

- temperatura media lungo il ramo;
- fattore d'attrito, da valutare precedentemente tramite grafici o correlazioni;
- perdite concentrate;
- trasmittanza delle pareti;
- densità dell'aria;
- portata di tentativo per dare inizio alle iterazioni.

Bisogna inoltre imporre le condizioni al contorno in termini di pressione e temperatura dei nodi estremi. Infine, bisogna definire le caratteristiche dei jet fan e dell'incendio che si vuole analizzare.

4.2 Modello 3D

Le misure delle prestazioni degli impianti di ventilazione vengono solitamente comparate con i modelli CFD, al fine di comprenderne meglio il funzionamento. Un modello 3D è uno strumento complesso che oltre a fornire risultati numerici permette di visualizzare l'oggetto in esame (un tunnel ad esempio). Per effettuare le simulazioni bisogna innanzitutto costruire la geometria del sistema che si intende analizzare, impostando le proprietà dei materiali e dei fluidi in gioco. Esistono diversi software con cui è possibile realizzare un modello CFD come Ansys fluent e FDS, quest'ultimo è stato utilizzato in questa tesi per analizzare una galleria reale.

Nella verifica degli impianti di ventilazione mediante simulazioni numeriche è importante tenere conto della rugosità, infatti, gallerie con sezioni simili per forma e area possono presentare notevoli differenze nel moto dell'aria in base al materiale che le costituisce [2]. La rugosità delle pareti dipende innanzitutto dal tipo di materiale da cui sono composte, ma per analizzare il flusso d'aria nei tunnel bisogna prendere in considerazione l'ulteriore resistenza al moto dovuta a infrastrutture e oggetti presenti (come segnali stradali, sensori, luci e cavi). Dal momento che risulta complicato riprodurre tutti questi elementi solitamente si introduce una rugosità equivalente della galleria che abbia lo stesso effetto sull'aria degli oggetti reali [1].

Per valutare la rugosità equivalente del tunnel bisogna innanzitutto creare il modello 3D del tunnel, usando ad esempio il software FDS (Fire Dynamic Simulator), assegnando alle pareti la rugosità del materiale. Dopodiché si genera un secondo modello 3D, anch'esso con assegnata la rugosità del materiale delle pareti, contenente anche gli ostacoli presenti della galleria reale. Quindi si analizza il moto dell'aria nei due casi in termini di velocità media sulla sezione e si procede iterativamente ipotizzando una rugosità equivalente da applicare al modello 3D senza ostacoli; il processo termina

quando il campo di velocità è simile nei due modelli. Per fare questo confronto è sufficiente considerare una porzione relativamente piccola del tunnel (circa 200 metri).

Per costruire una galleria 3D con FDS bisogna innanzitutto definire la quantità e le dimensioni delle “mesh” che rappresentano gli spazi entro cui vengono computate le grandezze e permettono di suddividere le operazioni tra i vari processori della macchina, pertanto più “mesh” possono essere aggregate in una singola simulazione. Quindi vengono descritti i materiali, che andranno a costituire gli oggetti presenti nel tunnel, in termini di: conducibilità, emissività, calore specifico e densità. Vengono poi definite le superfici degli oggetti, il cui parametro principale è la rugosità, composte dai materiali già dichiarati. Successivamente si passa alla costituzione degli oggetti veri e propri che richiamano le superfici descritte precedentemente.

I jet fan vengono caratterizzati in termini di dimensioni e portata volumetrica. È possibile stabilire il transitorio dell'accensione e dello spegnimento dei ventilatori. Bisogna infine descrivere l'incendio tramite i seguenti parametri: tipo di combustibile utilizzato, di cui vanno definiti il monossido di carbonio e le ceneri che vengono prodotte nella combustione (eventualmente anche altri inquinanti come ad esempio gli ossidi di azoto); la potenza per unità di superficie prodotta dalle fiamme (ovvero “heat release rate per unit area”); il transitorio di accensione ed eventualmente di spegnimento dell'incendio. Infine, bisogna definire le caratteristiche da osservare nell'output, infatti, per visualizzare il campo di velocità e le temperature bisogna dichiarare delle “SLICE” nel file di input specificando lungo che asse ottenerle e in che punto vadano posizionate. Inoltre, vanno inseriti tutti punti di misura delle grandezze di cui si vuole avere il valore specifico in una tabella riassuntiva, per far questo si utilizza la variabile “DEVC”.

I risultati delle simulazioni sono visualizzabili tramite il software SmokeView (SMV) con cui è possibile visualizzare le seguenti grandezze: velocità e direzione dei gas (aria e fumi); temperatura dei gas; HRR; flusso dei fumi; flusso dell'anidride carbonica e del monossido di carbonio prodotti; temperatura delle pareti della struttura; scambio termico con le pareti.

4.3 Analisi termofluidodinamica di una galleria reale

4.3.1 Dati del tunnel

È stata eseguita un'analisi termofluidodinamica di un tunnel per valutare il funzionamento dell'impianto di ventilazione in condizioni normali e in caso di incendio da 30 MW. Sono stati sviluppati un modello 1D e un modello 3D (a sezione semicircolare). L'analisi del modello 1D è stata effettuata tramite il software Whitesmoke. La galleria analizzata è la Ramat (sulla A32) situata a 700 metri di quota e lunga circa 1400 metri.

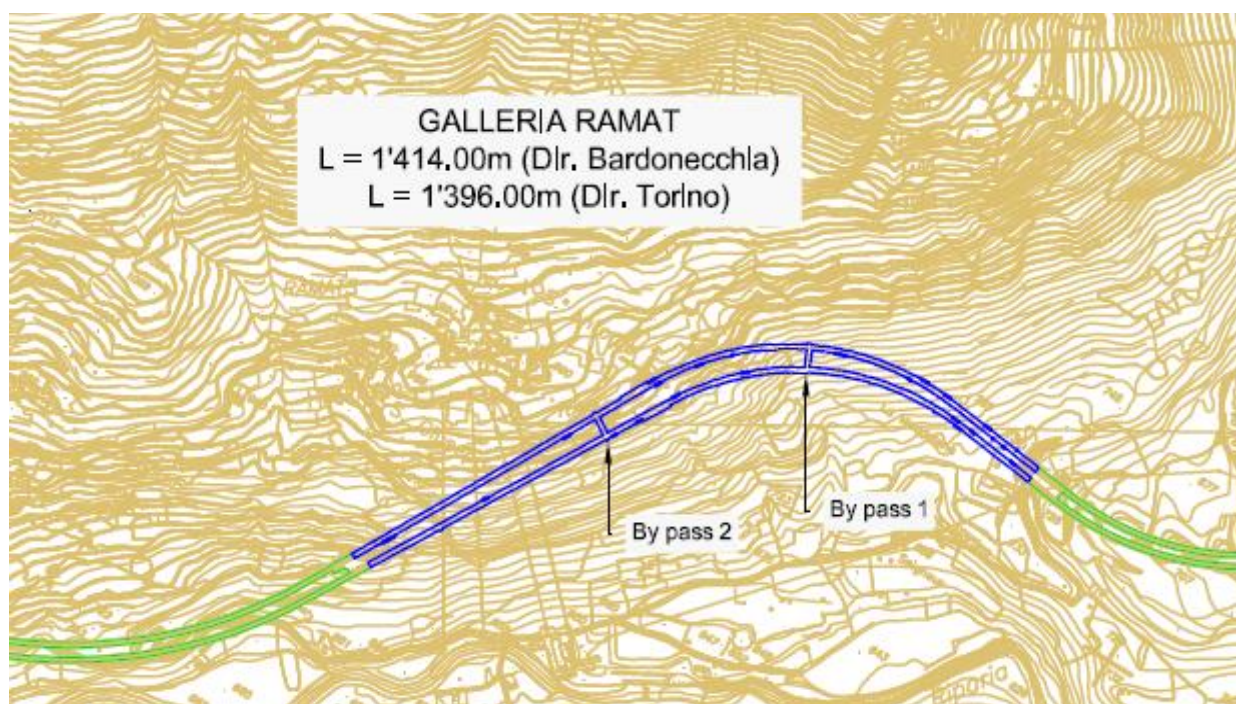


Figura 4.1 Planimetria di inquadramento della galleria Ramat.

È stato analizzato il fornice in direzione Torino perché è in discesa e quindi può ostacolare il sistema di ventilazione nella rimozione dei fumi. In caso di incendio i fumi della combustione tendono a salire verso l'alto, a causa della minore densità rispetto all'aria, pertanto se la ventilazione è orientata verso la discesa sarà ostacolata dal moto dei fumi che tenderanno di risalire.

Nello specifico la galleria presenta le seguenti caratteristiche geometriche:

- lunghezza di 1396 m;

- larghezza sagoma limite di 7 m;
- altezza sagoma limite di 4.75 m;
- quota s.l.m. di 715,66 m a valle e 762,92 m a monte;
- pendenza costante del 3,35 %;
- forma della sezione semicircolare con area di 54 m²;
- perimetro sezione di 33m.

Di seguito è riportata una sezione della sagoma della galleria, che come mostrato, presenta due corsie per senso di marcia.

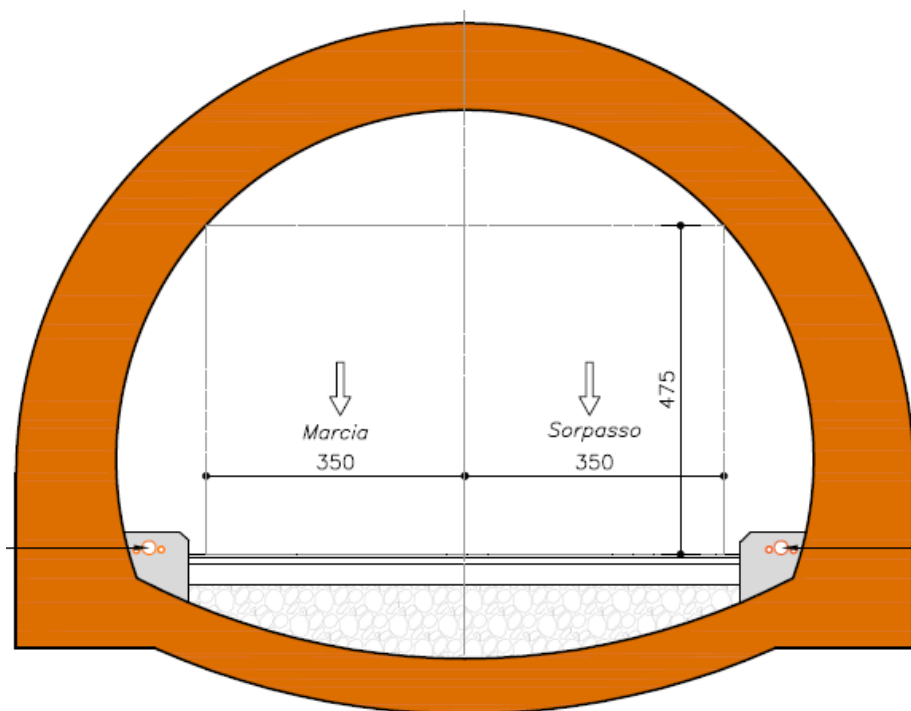


Figura 4.2 Sezione galleria.

Prima di effettuare le simulazioni sono stati eseguiti dei calcoli preliminari per la ventilazione di emergenza della galleria Ramat, applicando il metodo descritto al capitolo 2.3. I risultati hanno mostrato che per garantire la corretta rimozione dei fumi della combustione dovrebbero essere necessari 18 jet fan. Per il calcolo della caduta di pressione dovuta all'incendio è stata utilizzata la correlazione di Riess et al. descritta nel capitolo 1.3.

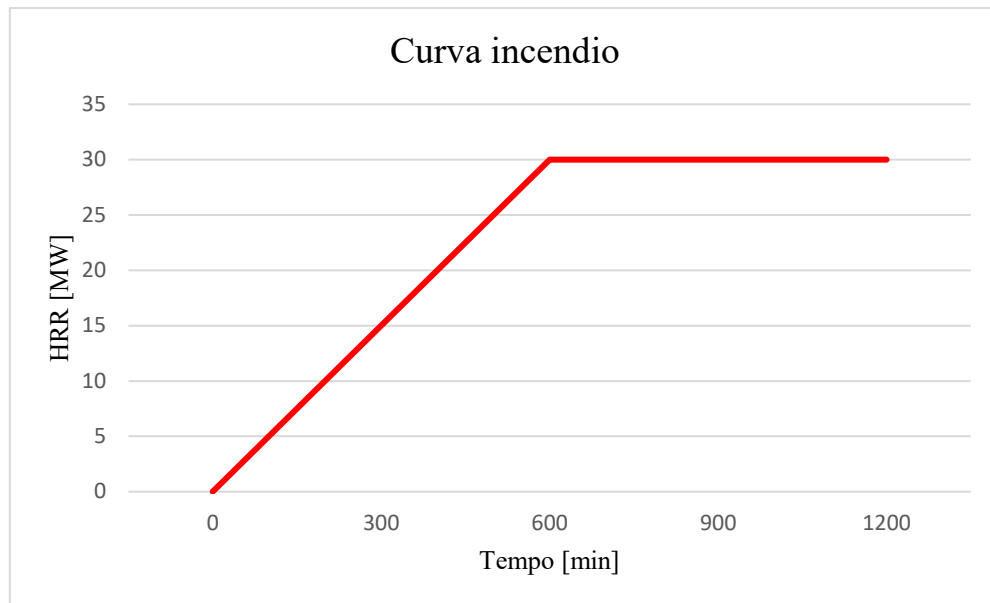
4.3.2 Descrizione della simulazione

Per progettare e analizzare i modelli 3D della galleria è stato usato il software FDS (del NIST) che permette di costruire solamente oggetti composti da linee rette, pertanto la sezione semicircolare è stata ottenuta tramite molteplici segmenti rettilinei. Inoltre, non è stato possibile modellare la curva della galleria che risulta quindi diritta e per considerare le maggiori perdite si è impostata una rugosità più alta sul lato interno della curva (in accordo con dati sperimentali). I jet fan normalmente non sono continuamente in funzione, bensì vengono accesi a intermittenza nell'arco della giornata per rimuovere gli agenti inquinanti. In caso di incendio il sistema può impiegare fino a 3 minuti per il rilevamento delle fiamme, dopodiché vengono accesi i jet fan.

Il modello CFD sviluppato è relativo al caso di incendio in galleria e la durata della simulazione è di 20 minuti.

I dati relativi alla galleria e all'incendio sono stati così impostati:

- il materiale considerato per la struttura del tunnel è cemento, con una rugosità di 0,03 m;
- non essendo possibile la costruzione di un tunnel inclinato si è imposta una differente forza di gravità lungo il tunnel in modo che l'effetto camino dei fumi avesse la stessa intensità del caso reale;
- l'incendio ha un "heat release rate per unit area" (HRRPUA) di 1000 W/m^2 e si estende per una superficie di 30 m^2 corrispondente allo sversamento di liquido combustibile proveniente da un mezzo pesante;
- l'ignizione del combustibile (eptano) incomincia nell'istante iniziale e la potenza rilasciata arriva a regime secondo l'andamento mostrato nel grafico seguente;



- i jet fan (di colore rosso nelle simulazioni) iniziano ad accendersi dopo 3 minuti con un tempo di avvio di 30 secondi ciascuno, inoltre viene azionata una coppia di jet fan ogni 10 secondi, pertanto in 2 minuti sono tutti funzionanti in condizioni di regime;
- i jet fan sono disposti a coppie e sono divisi in due gruppi, il primo da 12 ed il secondo da 8, la distanza tra coppie di ventilatori dello stesso gruppo è 80 metri;
- il diametro dei ventilatori è di 1 metro, a cui corrisponde un'area di $0,7854 \text{ m}^2$;
- la portata elaborata da un singolo jet fan è di $24 \text{ m}^3/\text{s}$;
- i ventilatori sono installati ad un'altezza di 5 metri;
- l'incendio è stato collocato verso l'uscita per Torino, in una posizione lontana dai portali (a 895 metri dal portale di monte e 401 metri da quello di valle), che essendo in un tratto in discesa presenta un effetto camino che si oppone al moto del flusso d'aria imposto dai jet fan.

4.3.3 Risultati delle simulazioni

4.3.3.1 Analisi in caso di incendio mediante FDS

All'inizio della simulazione i prodotti della combustione sono liberi di muoversi in entrambe le direzioni, in caso di forte pendenza andranno prevalentemente verso il portale più in alto. Nei primi minuti il fumo che tocca il soffitto tende a cadere lungo le pareti perché inizialmente la superficie è fredda, per cui il gas cede calore alla struttura e raffreddandosi diventa più denso.

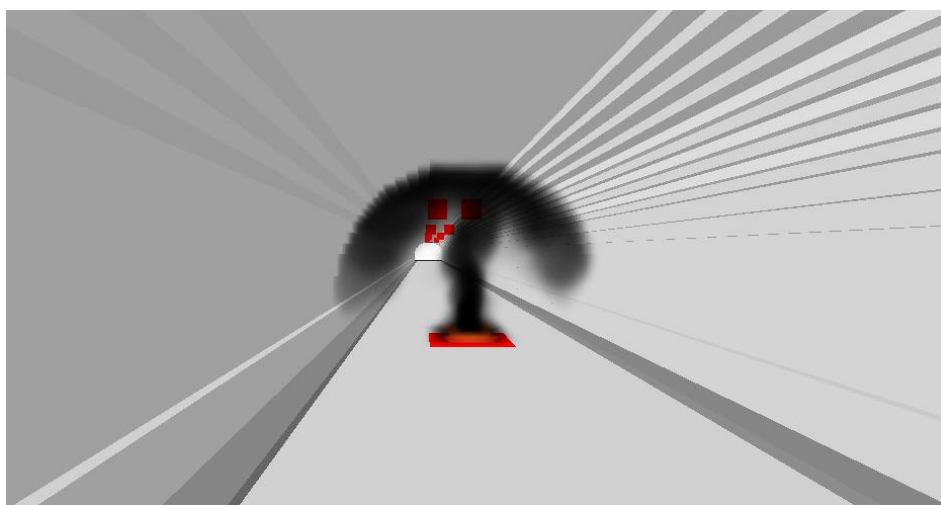


Figura 4.3 Inizio dell'incendio e diffusione dei fumi sulla volta.

Come si vede nell'immagini riportata di seguito il fumo tende a stratificarsi e ad accumularsi nella parte più alta della volta, surriscaldando sempre più le pareti della galleria.

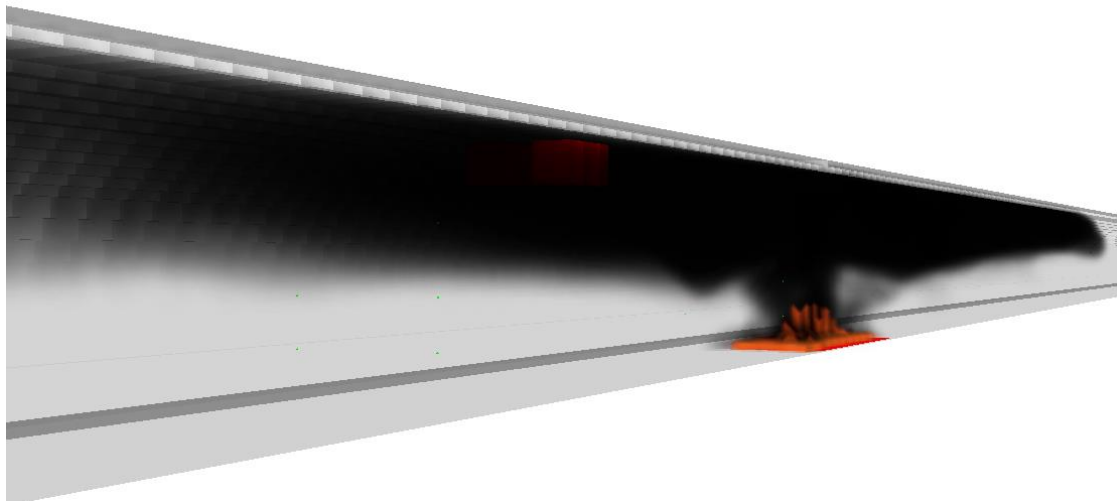


Figura 4.4 Diffusione dei fumi verso i portali.

Come mostrato nella sequenza di immagini seguente, i fumi dopo essersi accumulati sulla volta tendono a defluire verso i portali. Nelle immagini seguenti il lato sinistro è quello del portale verso Torino (in discesa), mentre il lato destro è quello verso Bardonecchia (in salita). Le dimensioni del tratto mostrato sono di 200 metri per il lato a sinistra dell'incendio e 250 metri per quello a destra.

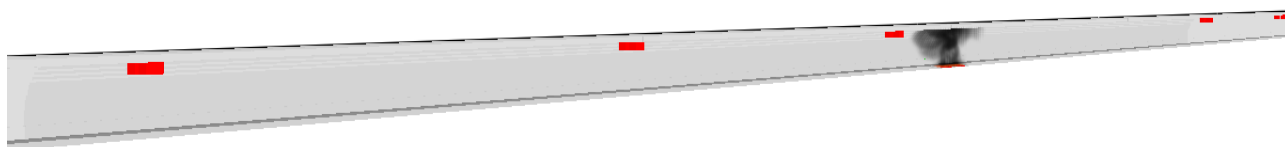


Figura 4.5 Sviluppo incendio a 24 secondi.

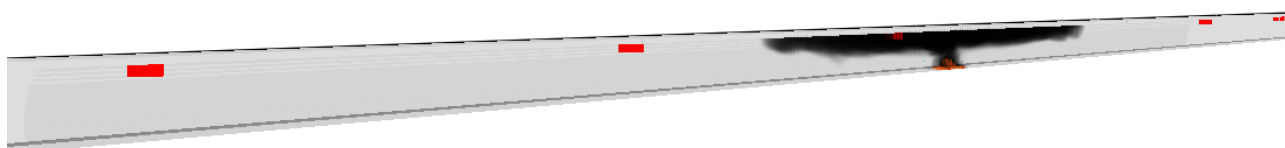


Figura 4.6 Sviluppo incendio a 75 secondi.



Figura 4.7 Sviluppo incendio a 115 secondi.



Figura 4.8 Sviluppo incendio a 160 secondi.

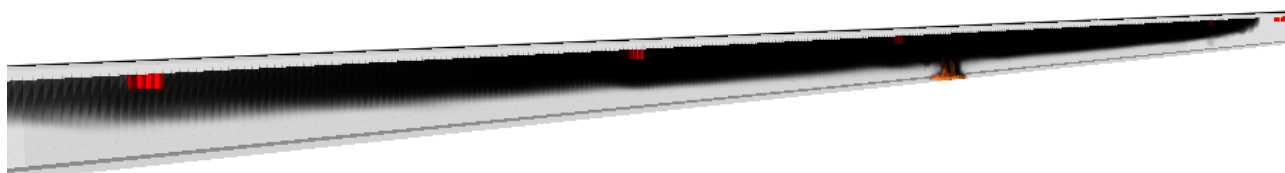


Figura 4.9 Sviluppo incendio a 216 secondi.

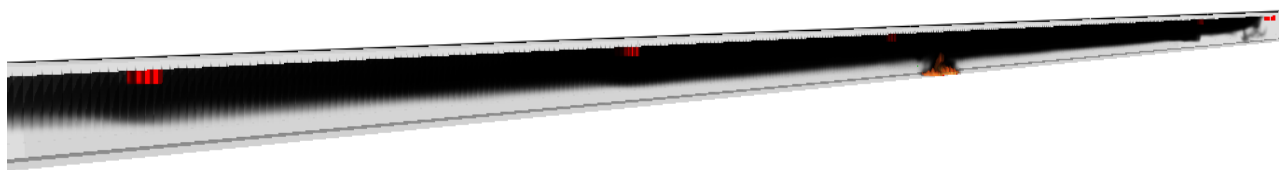


Figura 4.10 Sviluppo incendio a 242 secondi.



Figura 4.11 Sviluppo incendio a 324 secondi.

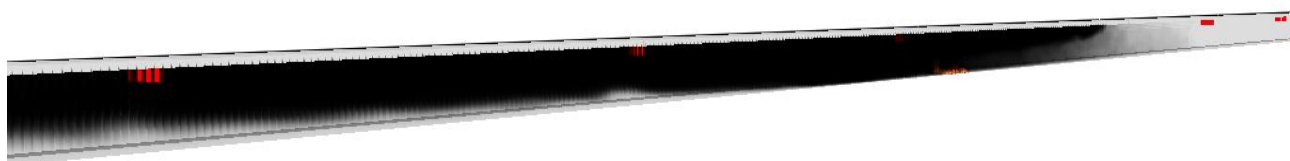


Figura 4.12 Sviluppo incendio a 366 secondi.

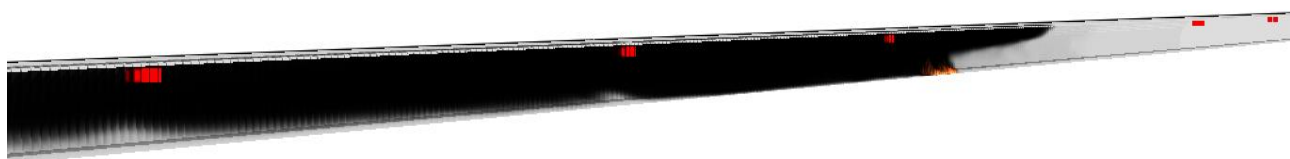


Figura 4.13 Sviluppo incendio a 400 secondi.

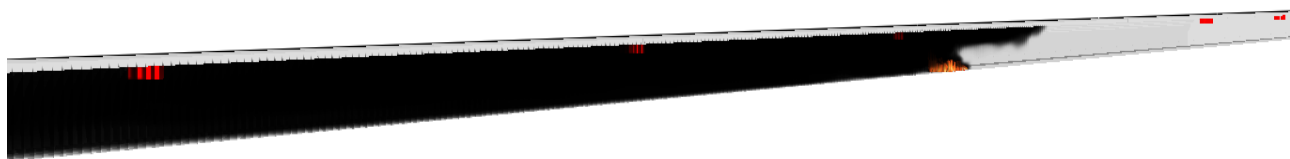


Figura 4.14 Sviluppo incendio a 619 secondi.

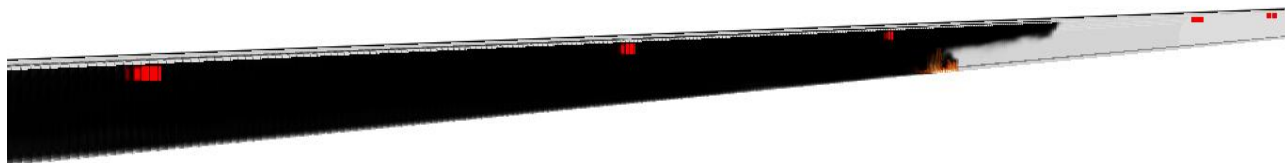


Figura 4.15 Sviluppo incendio a 800 secondi.



Figura 4.16 Sviluppo incendio a 1200 secondi.

Dopo 3 minuti, i ventilatori vengono accesi, infatti, nella figura 4.10 (a 242 secondi) si può vedere che il moto dei fumi cambia e nell'immagine successiva si sono già ritirati di alcune decine di metri. Il fatto che il fumo venga spinto in una direzione prestabilita fa sì che esso si distribuisca su tutta la sezione e non solo sulla volta, dove non è più in grado di accumularsi per mancanza di spazio.

Dopo 10 minuti, la condizione fluidodinamica della galleria rimane pressoché stazionaria perché l'incendio è completamente sviluppato e i ventilatori sono tutti in funzione da diversi minuti. Si può notare che per qualche decina di metri il fumo riesce a muoversi in verso contrario a quello di spinta (un leggero effetto “backlayering”), seppur solo nella parte superiore della volta.

Nel tunnel si è considerata una velocità di fondo dell'aria nulla, pertanto all'inizio della simulazione l'unico gas in movimento è il fumo generato dalle fiamme che prima sale verso l'alto e poi si espande verso i due portali. I jet fan incominciano ad accendersi dopo 3 minuti, ma in modo sequenziale, infatti, i due ventilatori posizionati prima dell'incendio si accendono intorno a 4 minuti dall'avvio. A lato delle immagini è mostrata la scala di velocità dei gas in m/s. Come per la sequenza precedente, nel tratto mostrato di seguito le dimensioni sono di 200 metri a sinistra dell'incendio e 250 metri a destra.



Figura 4.17 Campo di velocità dei gas sul piano XZ a 28 secondi.

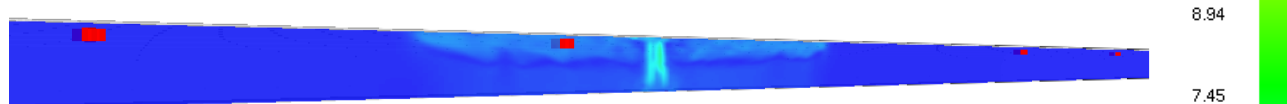


Figura 4.18 Campo di velocità dei gas sul piano XZ a 68 secondi.

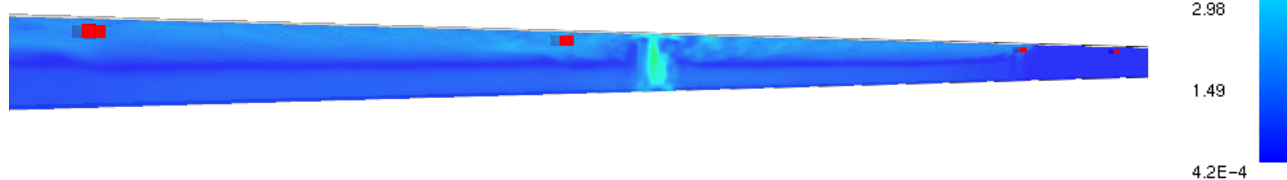


Figura 4.19 Campo di velocità dei gas sul piano XZ a 170 secondi.

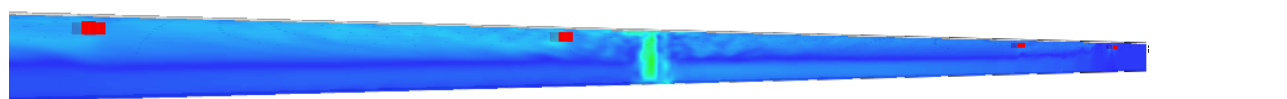


Figura 4.20 Campo di velocità dei gas sul piano XZ a 230 secondi.

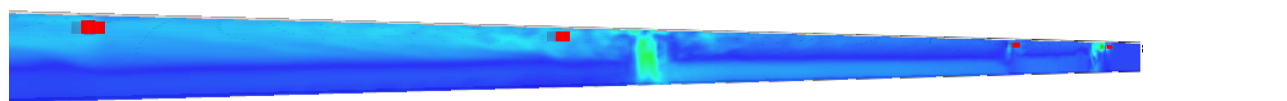


Figura 4.21 Campo di velocità dei gas sul piano XZ a 243 secondi.

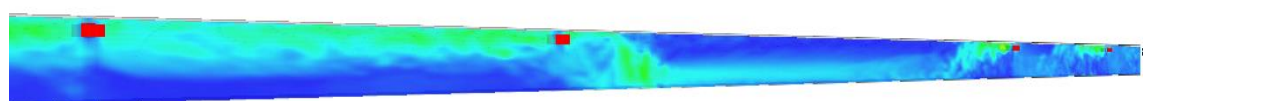


Figura 4.22 Campo di velocità dei gas sul piano XZ a 300 secondi.

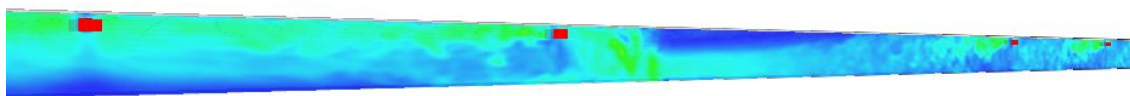


Figura 4.23 Campo di velocità dei gas sul piano XZ a 375 secondi.

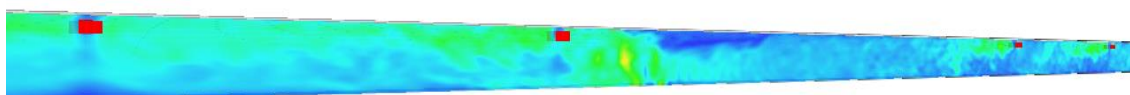


Figura 4.24 Campo di velocità dei gas sul piano XZ a 470 secondi.

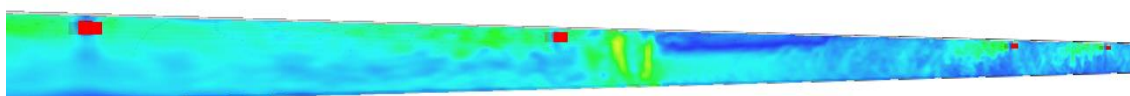


Figura 4.25 Campo di velocità dei gas sul piano XZ a 1183 secondi.

Quando il fumo, accumulatosi nella parte superiore della galleria, inizia a espandersi verso i portali l'aria incomincia a fluire verso il punto dell'incendio muovendosi nella parte inferiore della galleria, si può notare questo comportamento nelle immagini dalla 4.15 alla 4.18. Tra lo strato di fumo che si sposta lontano dal fuoco e lo strato d'aria che va in direzione opposta si forma una zona in cui la velocità media è pressoché nulla a causa della collisione tra i due flussi. Dopo l'accensione dei jet fan il fumo viene progressivamente spinto verso il portale in direzione Torino, tuttavia, dopo aver raggiunto un minimo intorno agli 8 minuti (come si vede nell'immagine 4.21) il fumo guadagna una ventina di metri in direzione opposta a quella di spinta; ciò è dovuto al fatto che l'incendio raggiunge il picco dopo 10 minuti.

Nelle immagini seguenti è mostrato il campo di velocità sul piano YZ, a pochi metri dal luogo dell'incendio. A lato delle immagini è mostrata la scala di velocità dei gas in m/s.

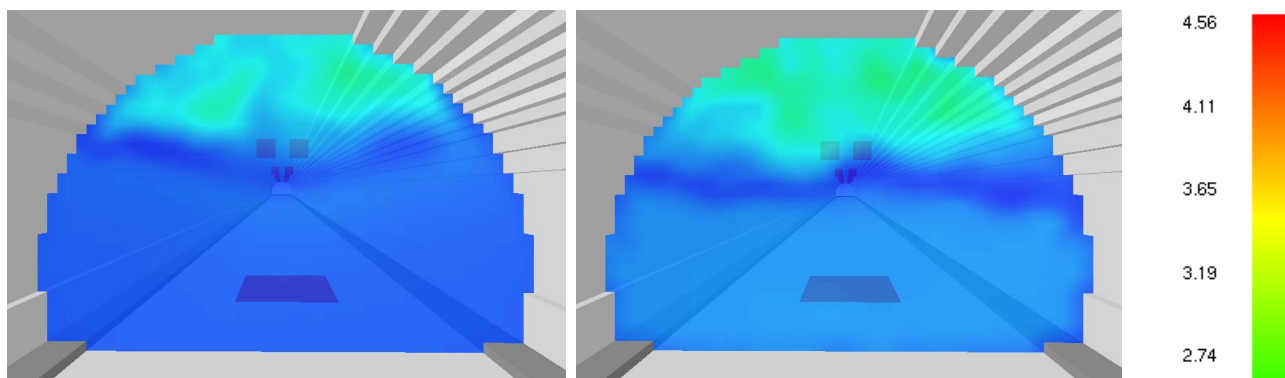


Figura 4.26 Campo di velocità dei gas sul piano YZ a 33 (sx) e 54 (dx) secondi.

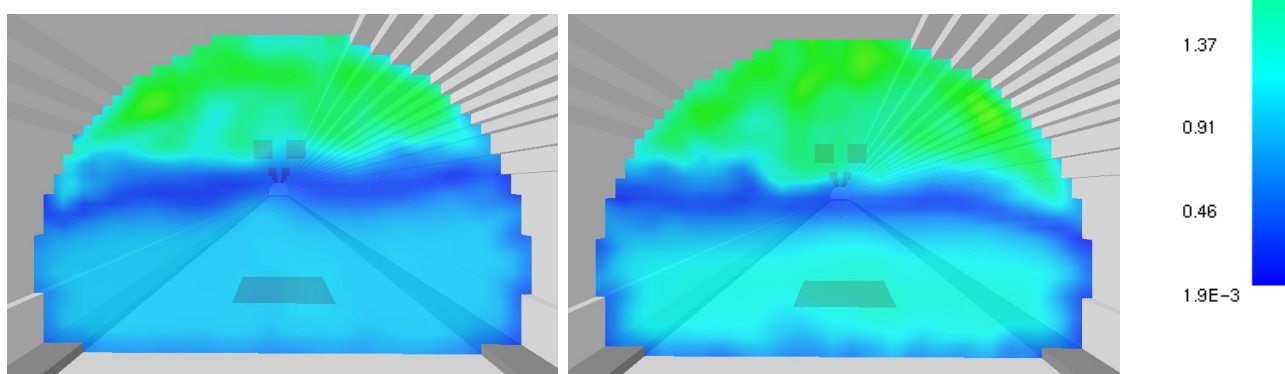


Figura 4.27 Campo di velocità dei gas sul piano YZ a 98 (sx) e 177 (dx) secondi.

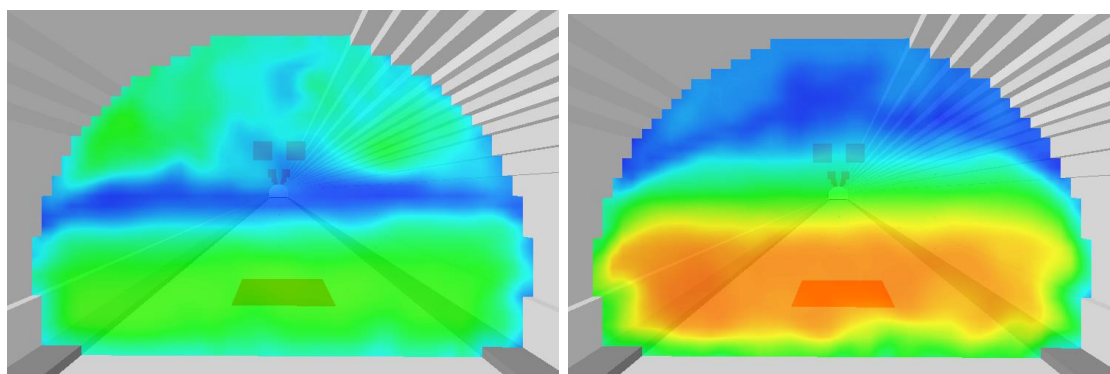


Figura 4.28 Campo di velocità dei gas sul piano YZ a 249 (sx) e 343 (dx) secondi.

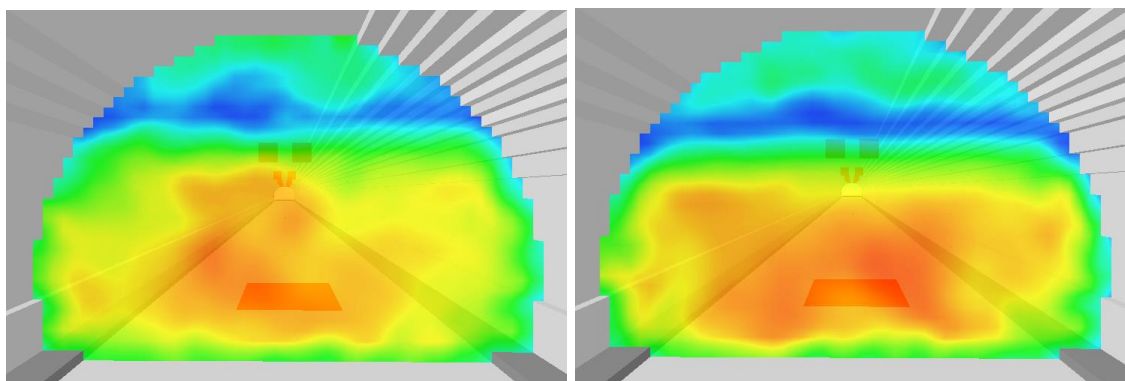


Figura 4.29 Campo di velocità dei gas sul piano YZ a 501 (sx) e 1180 (dx) secondi.

In queste immagini è possibile notare distintamente la zona a velocità nulla posizionata tra i due flussi (inferiore che si muove verso il piano e superiore che esce dal piano). Come mostrato dalla scala dei colori quando il sistema è a regime (figura 4.26) la velocità dell'aria nella parte inferiore della sezione supera i 4 m/s mentre il fumo nella parte superiore (che si muove in direzione opposta) non raggiunge i 3 m/s.

Lontano dalla zona delle fiamme il moto dei fluidi appare differente, come mostrato nella sequenza di immagini successiva ottenuta sul piano YZ a 1250 metri dal portale di monte (ovvero a 350 metri dall'incendio). A lato delle immagini è mostrata la scala di velocità dei gas in m/s.

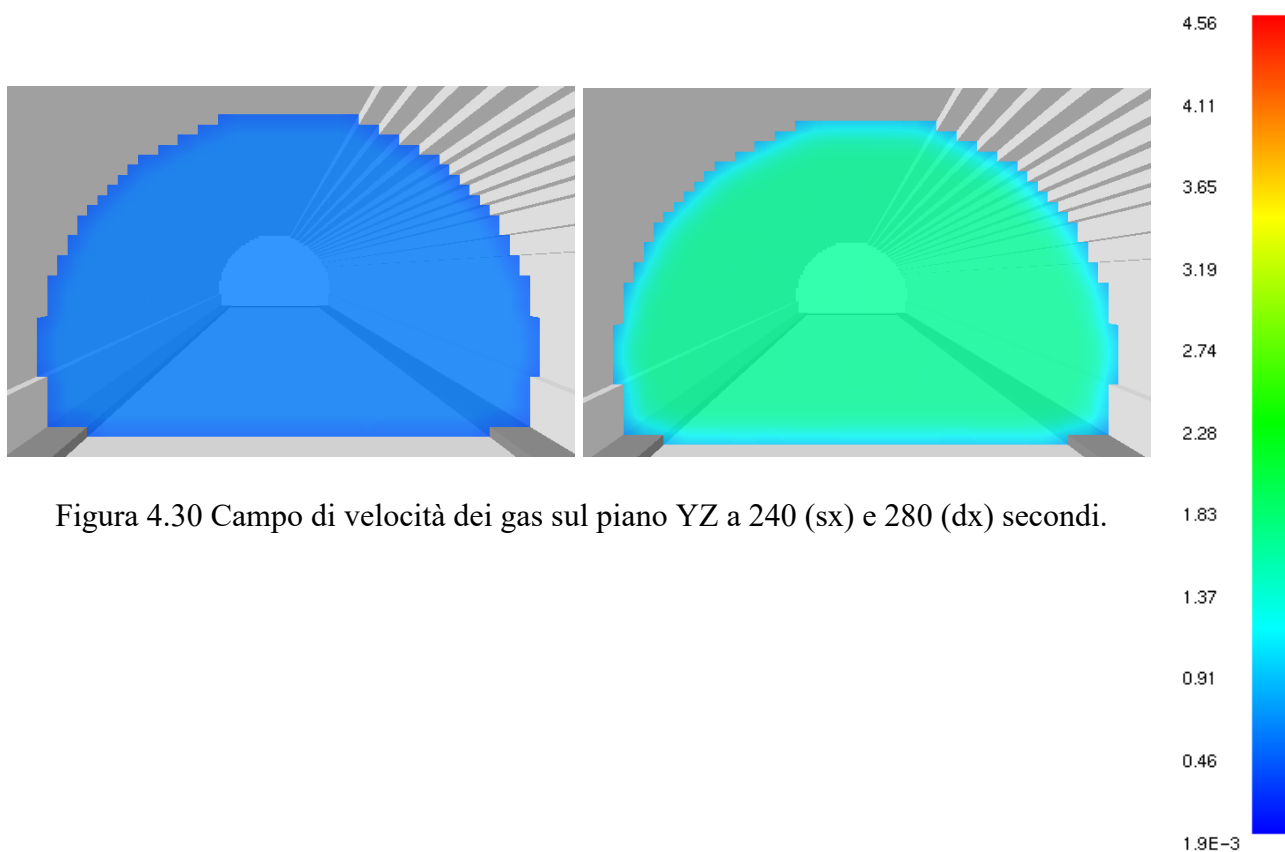


Figura 4.30 Campo di velocità dei gas sul piano YZ a 240 (sx) e 280 (dx) secondi.

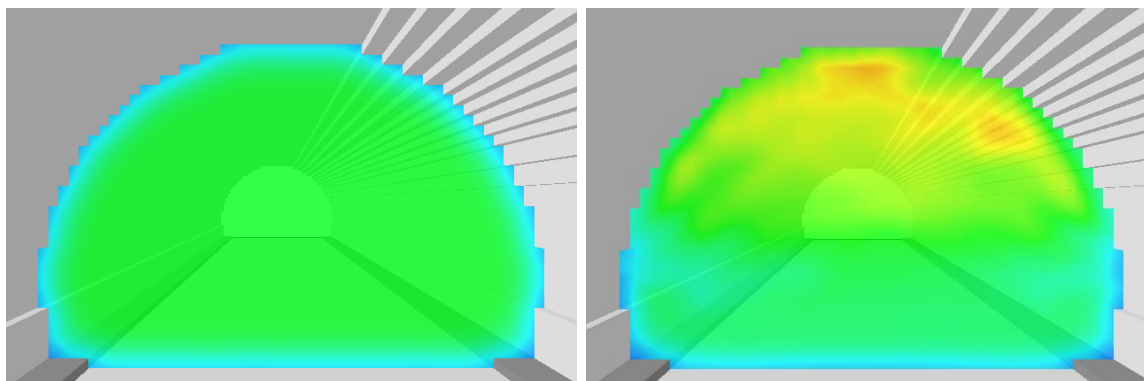


Figura 4.31 Campo di velocità dei gas sul piano YZ a 310 (sx) e 336 (dx) secondi.

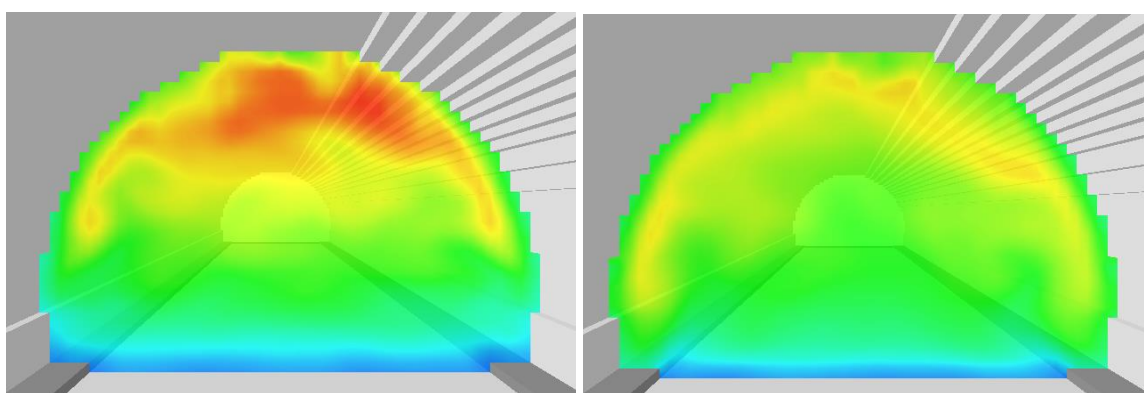


Figura 4.32 Campo di velocità dei gas sul piano YZ a 385 (sx) e 775 (dx) secondi.

Nell'immagine 4.27 si può notare che dopo 4 minuti la velocità è pressoché nulla e si aggira sugli 0,5 m/s; a differenza della sezione vicina all'incendio la distribuzione della velocità è omogenea con valori più bassi vicino alle pareti, a causa dell'attrito, e più alti al centro. Dopo 5 minuti e 10 secondi il campo di velocità appare ancora omogeneo sulla sezione e si è arrivati a 2,4 m/s. Dopo 5 minuti e 36 secondi invece il campo di velocità non è più omogeneo e il flusso nella parte superiore della galleria scorre a velocità maggiore, questa condizione permarrà anche nel resto della simulazione seppur con valori assoluti variabili nel tempo. Questo comportamento è dovuto essenzialmente al fumo che è presente in misura maggiore nella volta.

Nelle immagini seguenti è mostrato l'andamento della temperatura, sul piano YZ, nel punto esatto dell'incendio (di tipo "pool fire"). A lato delle immagini è mostrata la scala di temperatura dei gas in gradi centigradi.

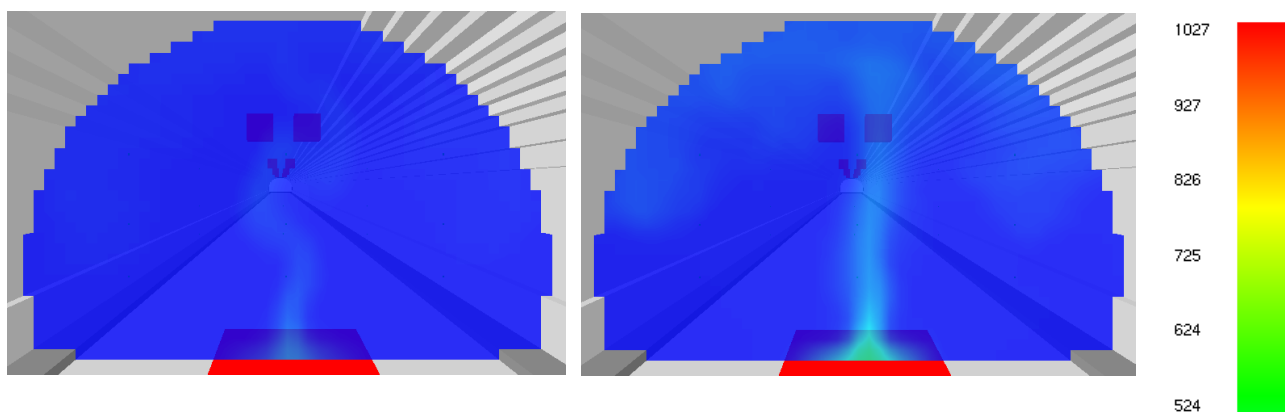


Figura 4.33 Temperatura dei gas sul piano YZ a 20 e 60 secondi.

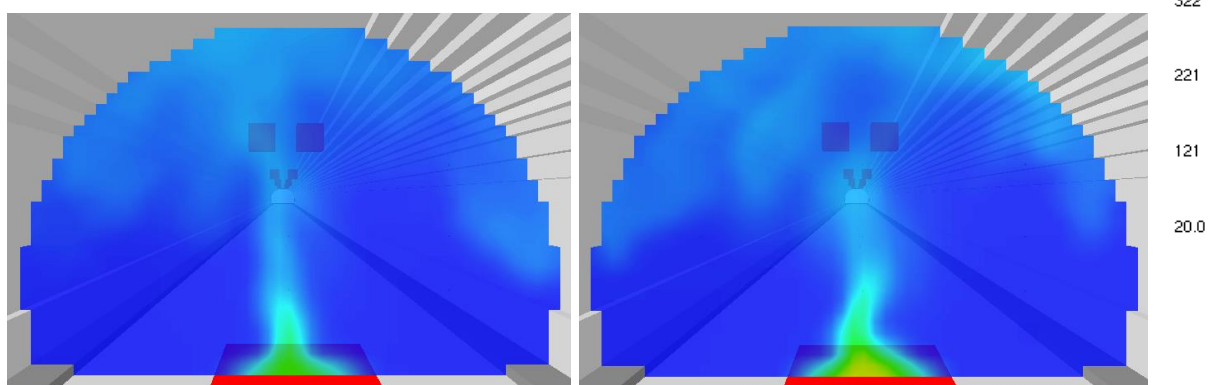


Figura 4.34 Temperatura dei gas sul piano YZ a 120 e 180 secondi.

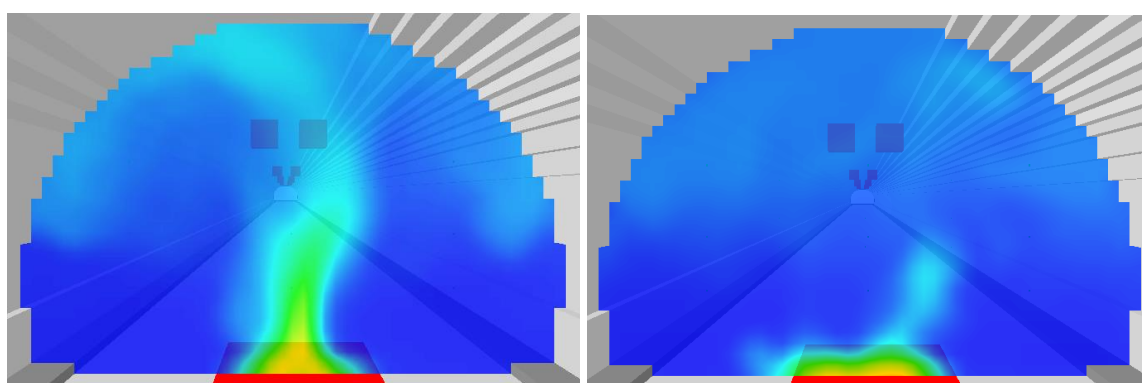


Figura 4.35 Temperatura dei gas sul piano YZ a 240 e 300 secondi.

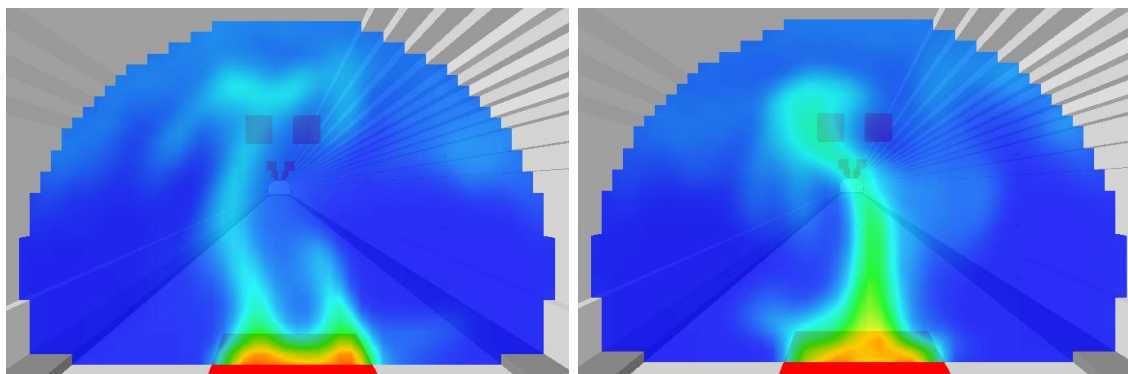


Figura 4.36 Temperatura dei gas sul piano YZ a 420 e 480 secondi.

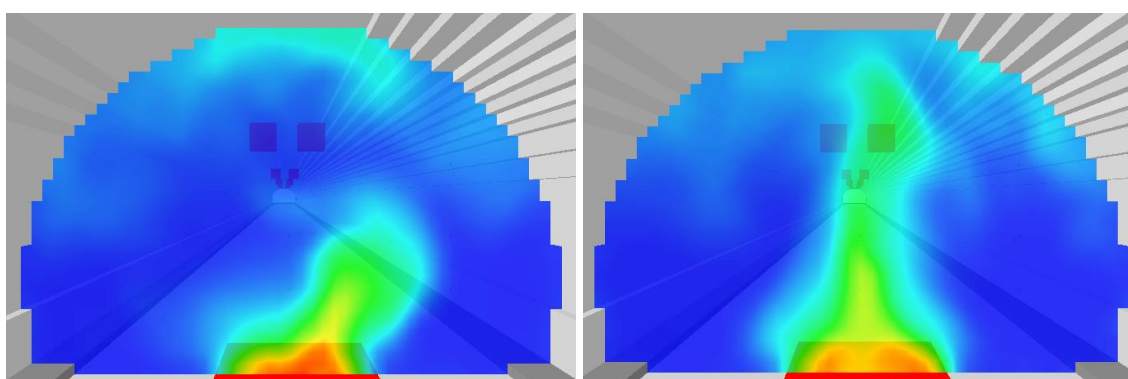


Figura 4.37 Temperatura dei gas sul piano YZ a 1000 e 1200 secondi.

Dalle figure si osserva che la temperatura è maggiore sulla volta, questo perché il fumo sale rapidamente verso l'alto. A regime si hanno delle temperature di circa 300°C sul soffitto, mentre negli angoli della sezione si raggiungono circa 90°C .

Per una migliore comprensione del transitorio è mostrato l'andamento della temperatura nella zona adiacente l'incendio anche sulla sezione longitudinale. A lato delle immagini è mostrata la scala di temperatura dei gas in gradi centigradi. Come per la sequenza precedente, nel tratto mostrato di seguito le dimensioni sono di 120 metri a sinistra dell'incendio e 150 metri a destra. A lato delle immagini è mostrata la scala di temperatura dei gas in gradi centigradi.



Figura 4.38 Temperatura dei gas sul piano XZ a 60 secondi.

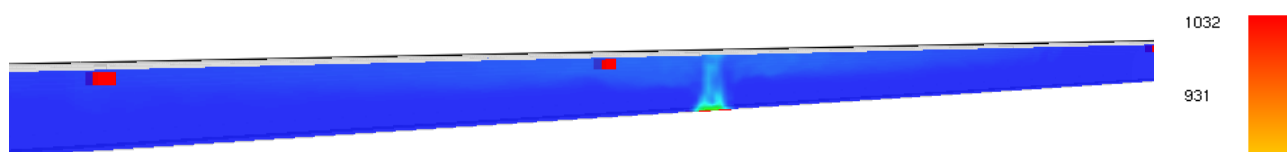


Figura 4.39 Temperatura dei gas sul piano XZ a 120 secondi.

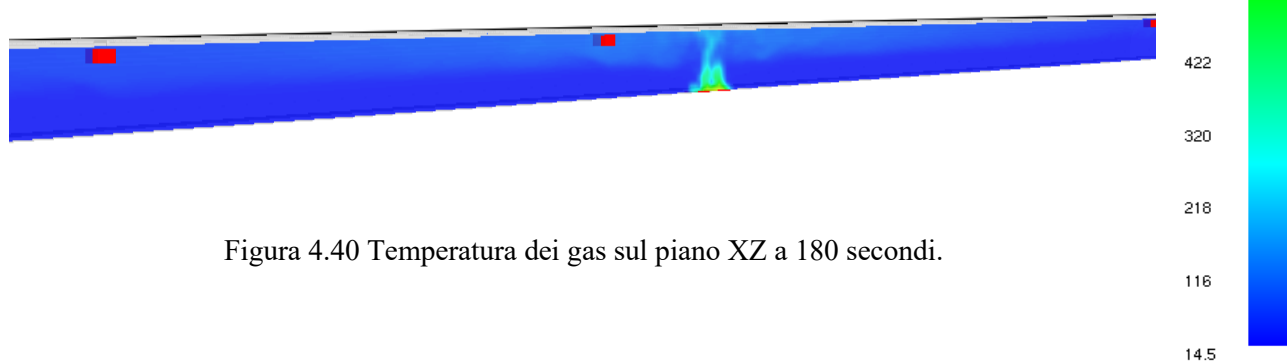


Figura 4.40 Temperatura dei gas sul piano XZ a 180 secondi.



Figura 4.41 Temperatura dei gas sul piano XZ a 240 secondi.

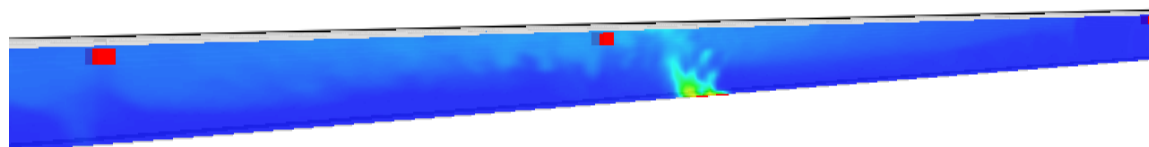


Figura 4.42 Temperatura dei gas sul piano XZ a 300 secondi.



Figura 4.43 Temperatura dei gas sul piano XZ a 360 secondi.

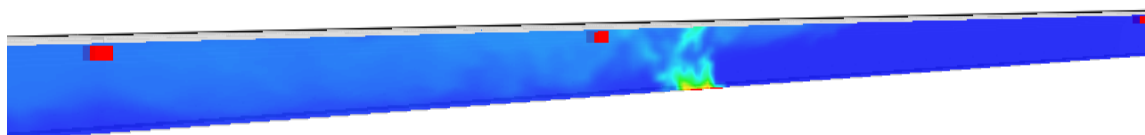


Figura 4.44 Temperatura dei gas sul piano XZ a 420 secondi.

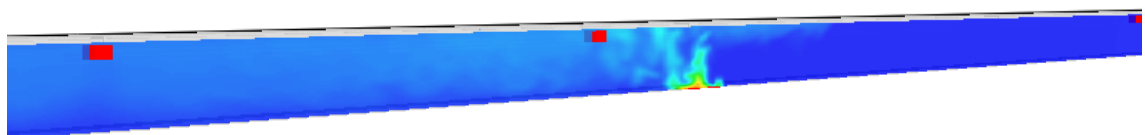


Figura 4.45 Temperatura dei gas sul piano XZ a 480 secondi.

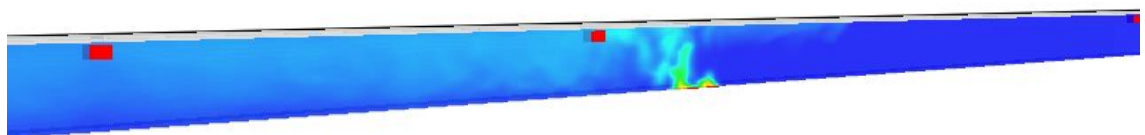


Figura 4.46 Temperatura dei gas sul piano XZ a 600 secondi.

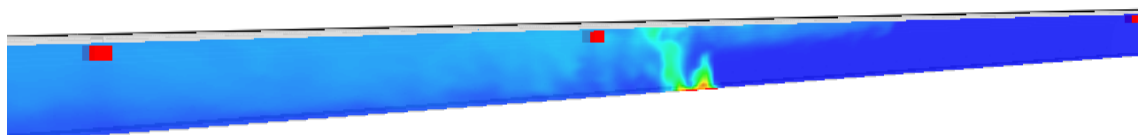


Figura 4.47 Temperatura dei gas sul piano XZ a 900 secondi.

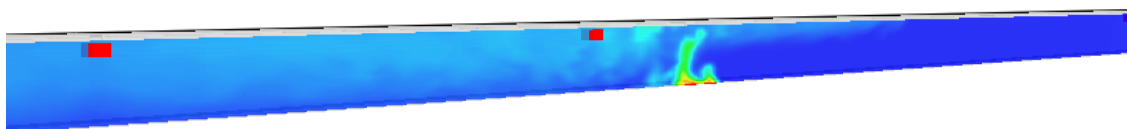


Figura 4.48 Temperatura dei gas sul piano XZ a 1200 secondi.

Nei primi quattro minuti della simulazione il fumo si distribuisce uniformemente da entrambi i lati, infatti anche la temperatura aumenta in maniera omogenea rispetto al luogo dell'incendio. Ad una distanza di 100 metri dalle fiamme si raggiungono sulla volta temperature di circa 100°C, tuttavia nei minuti successivi, grazie alla ventilazione, questi valori diminuiscono nella zona a monte (lato destro delle immagini), mentre aumentano verso valle (lato sinistro delle figure).

Nel modello 3D generato sono stati posizionate delle griglie di misura in diverse zone del tunnel per misurare velocità e temperatura, ogni griglia è composta da 9 sensori disposti con le stesse inter-distanze che avrebbero le termocoppie o gli anemometri tra loro. Nei grafici mostrati i valori di velocità e temperatura sono pari alla media dei 9 punti su una data sezione della galleria. La griglia è costituita da sensori posizionati su tre altezze, ovvero 1,2 2,4 e 4 metri, mentre lateralmente la distanza è di 3,6 metri, con tre dispositivi posizionati al centro della sezione e gli altri 6 ai due lati.

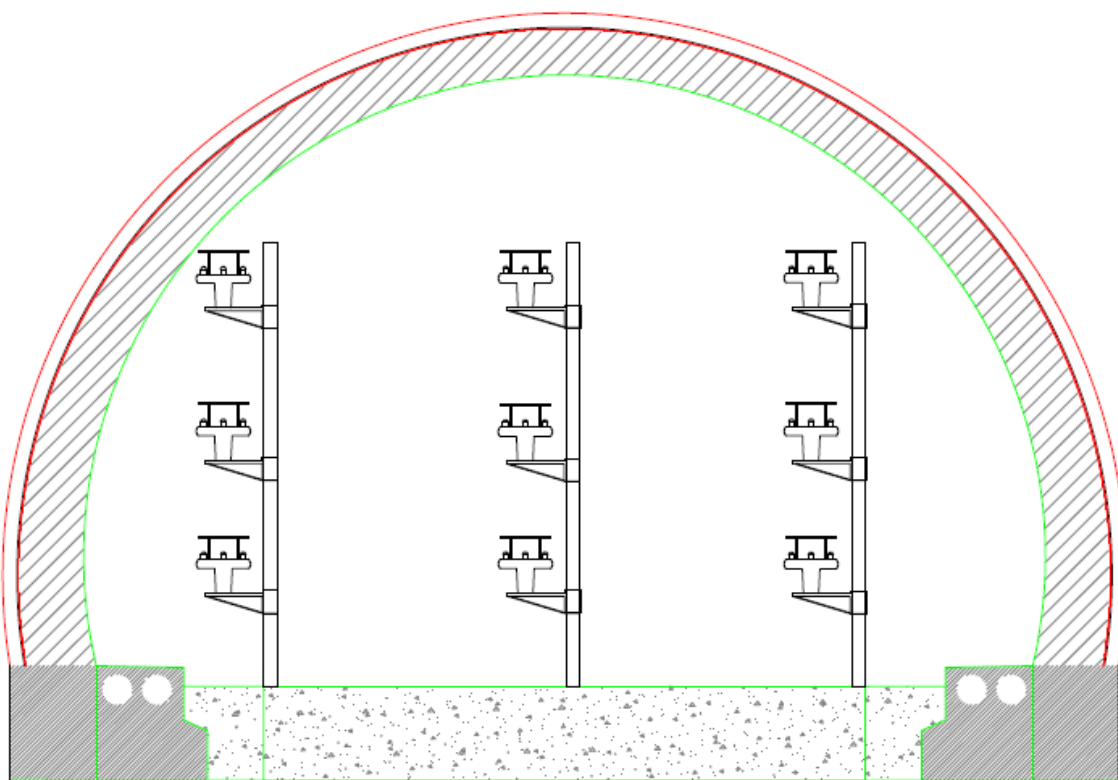
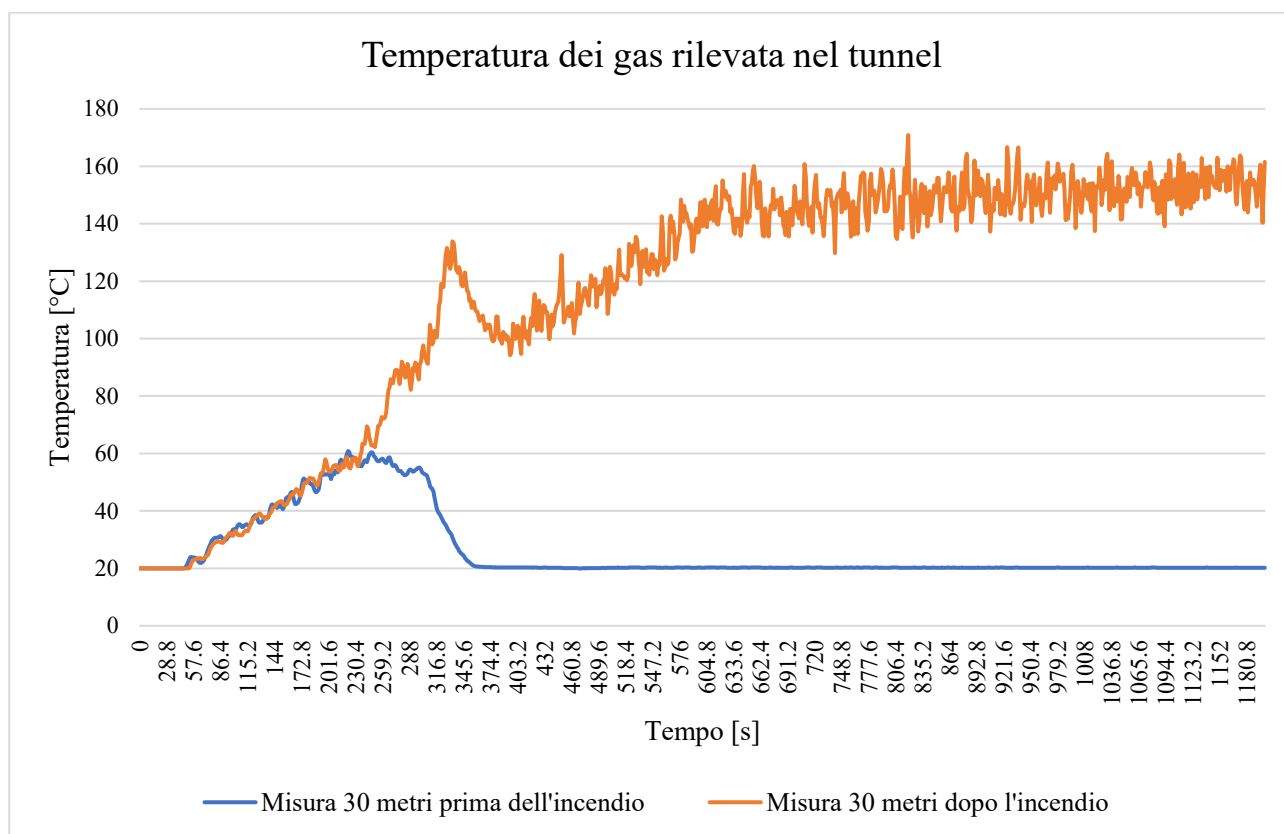


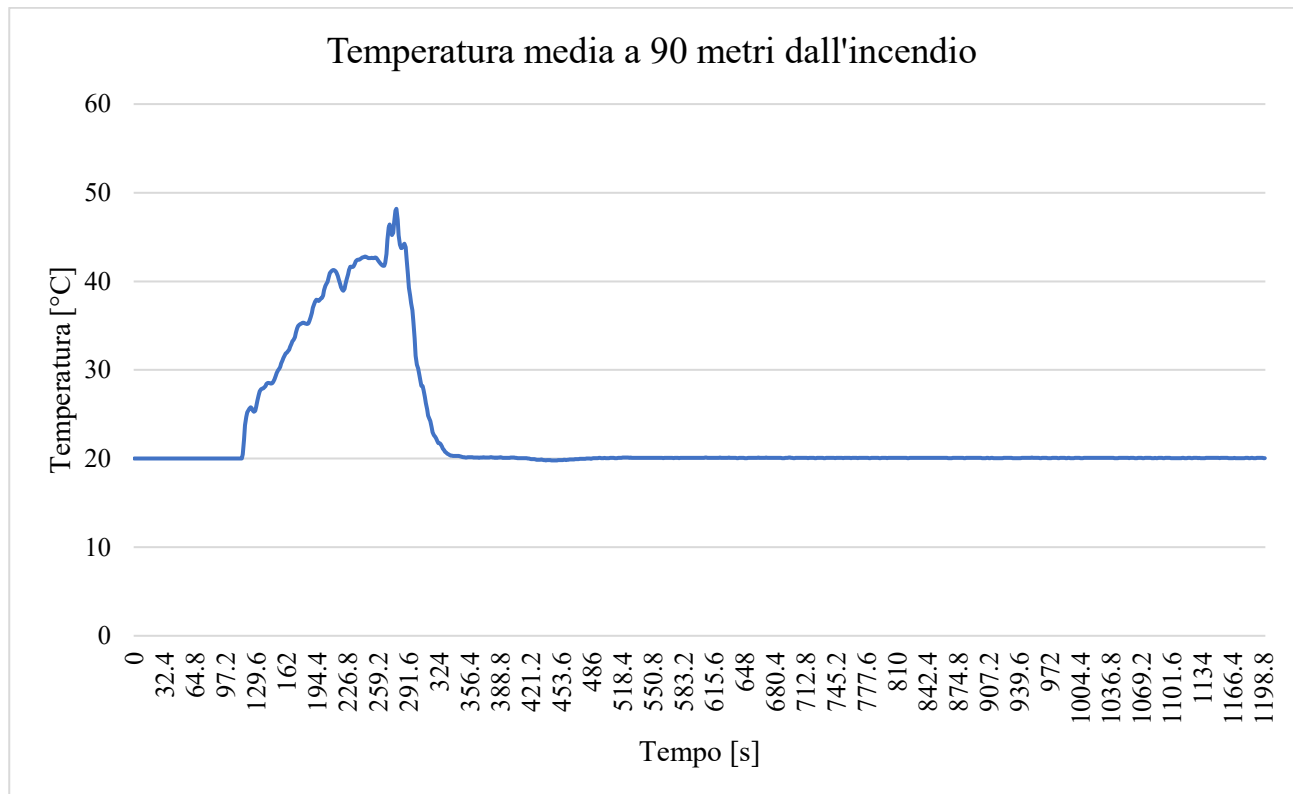
Figura 4.49 Esempio della disposizione degli anemometri durante le prove.

In seguito, vengono analizzati i transitori di temperatura e velocità nella galleria.



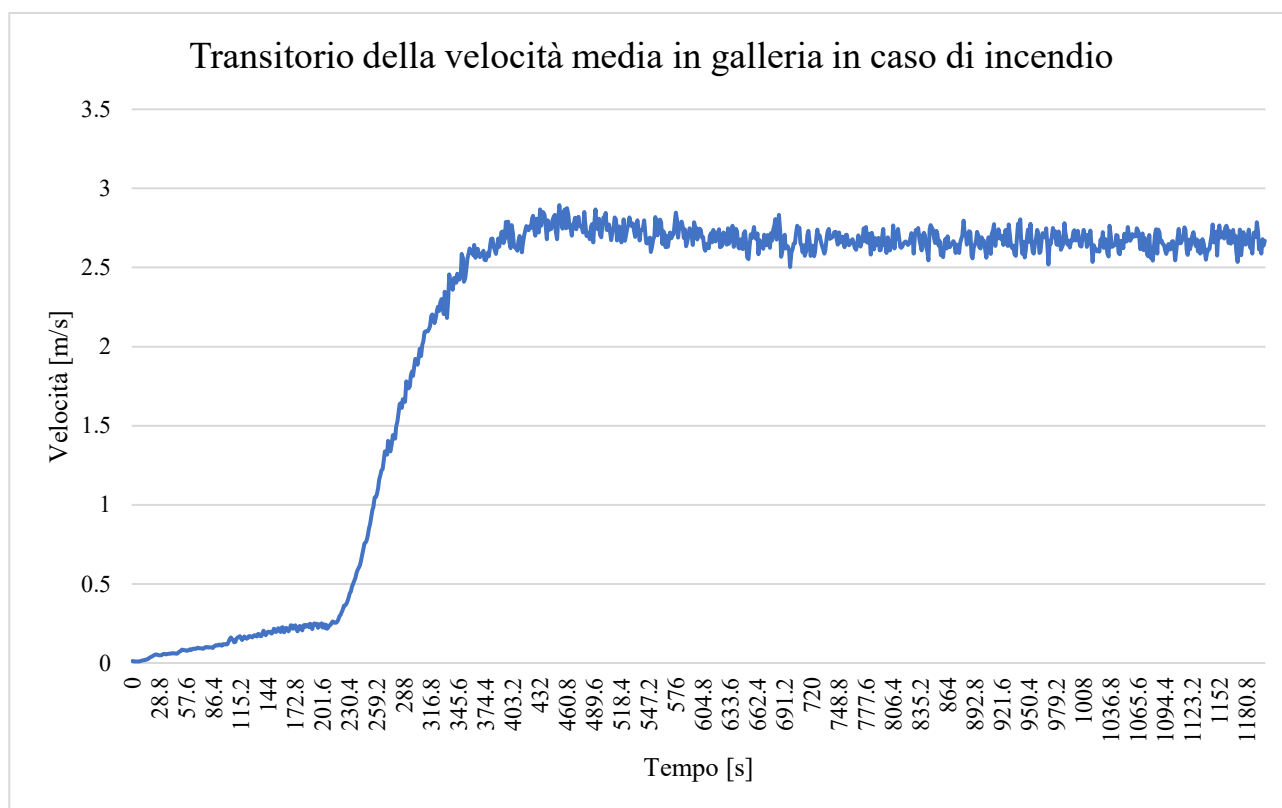
Nel grafico mostrato si può notare che nello spazio antecedente l'incendio la temperatura dell'aria aumenta prima rispetto alla misura posta più avanti (la linea blu anticipa di poco la linea arancione), questo accade perché nel modello si è tenuto conto dell'effetto camino che tende a muovere il fumo in una direzione preferenziale, che è opposta a quella di spinta dei jet fan in modo da considerare il caso peggiore di funzionamento. Intorno ai 220 secondi la temperatura smette di crescere nella zona dietro l'incendio, per poi iniziare a diminuire sensibilmente dopo circa un minuto. Invece, nella zona dopo l'incendio la temperatura aumenta più rapidamente dopo i primi 220 secondi fino a toccare un picco superiore ai 130°C intorno ai 5 minuti. La maggiore pendenza della curva è dovuta ai fumi caldi in arrivo dalla zona anteriore all'incendio che non possono più espandersi verso il portale a monte e vengono spinti verso quello a valle. Dopo questo massimo la temperatura diminuisce per circa 2 minuti e successivamente torna di nuovo a salire stabilizzandosi tra i 140° e i 160°C; la momentanea decrescita è dovuta al fatto che i jet fan raggiungono il regime dopo 310 secondi, ciò significa che da questo momento la spinta rimane massima per i restanti 15 minuti, però l'incendio raggiunge il picco dopo 600 secondi, per cui per un lasso di tempo l'aumento dell'energia termica rimossa (tramite il flusso d'aria mosso dai jet fan) è maggiore dell'aumento dell'energia termica rilasciata (dovuto all'aumento dell'HRR).

Nel grafico seguente è invece mostrato l'andamento della temperatura media sulla sezione della galleria a una distanza di 90 metri, la zona è verso il portale a monte.



Come mostrato la temperatura aumenta tra i 2 e i 5 minuti fino a un massimo di 48°C per poi diminuire bruscamente, questo dimostra che i fumi vengono rimossi correttamente. La temperatura misurata torna a valori di 20°C perché la sezione è posta a monte delle fiamme ed evidentemente il calore scambiato per irraggiamento a quella distanza non è sufficiente a scaldare l'aria.

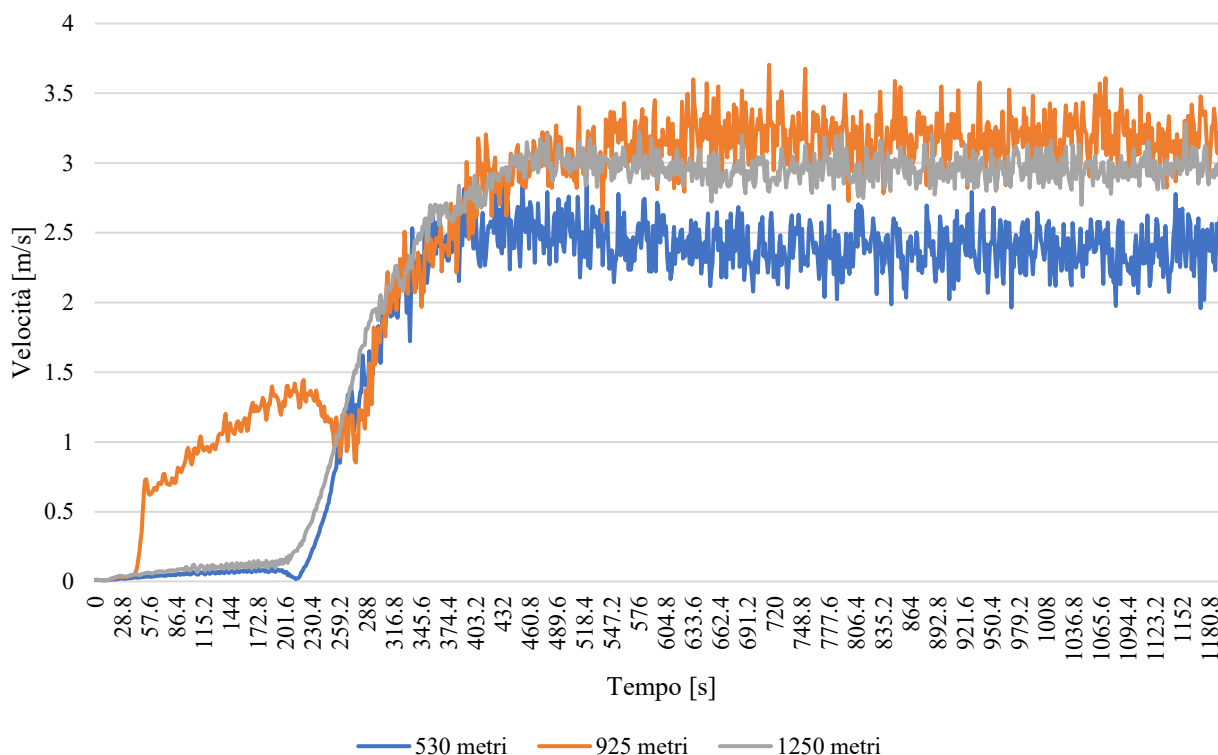
Nel grafico seguente è invece mostrato l'andamento della velocità media dell'aria in galleria (ottenuto tramite il software FDS).



Nei primi 4 minuti si nota un leggero aumento della velocità dell'aria dovuto essenzialmente alla presenza dell'incendio che attrae aria dai portali e inoltre produce i fumi che si spostano verso le uscite. La velocità massima raggiunta è di 2,85 m/s dopo circa 7 minuti, per poi scendere successivamente e stabilizzarsi intorno a valori di 2,65 m/s; questa diminuzione è dovuta al fatto che l'incendio arriva a regime solo dopo 10 minuti e la maggiore produzione di fumo rallenta il flusso d'aria nel tunnel.

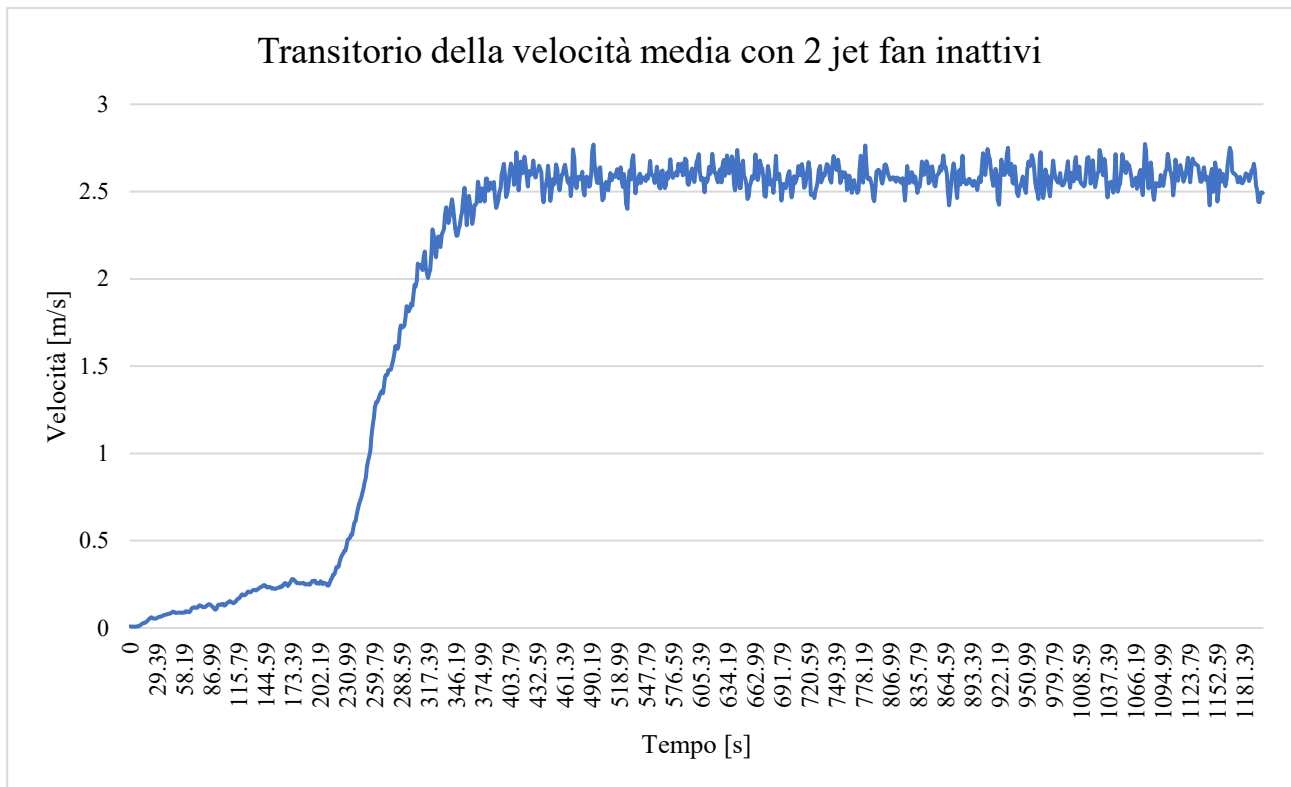
Nel grafico seguente sono confrontati gli andamenti in tre punti della galleria, ovvero: una zona a 530 metri dal portale di monte, situata 40 metri dopo una coppia di jet fan; una zona a 925 metri dal portale di monte, che si trova 25 metri dopo il luogo dell'incendio e 2 metri prima di una coppia di jet fan; una zona a 1250 metri dal portale di monte, lontana 90 metri dall'ultima coppia di jet fan (a questa distanza il moto è completamente sviluppato).

Transitorio della velocità nel tunnel in caso di incendio

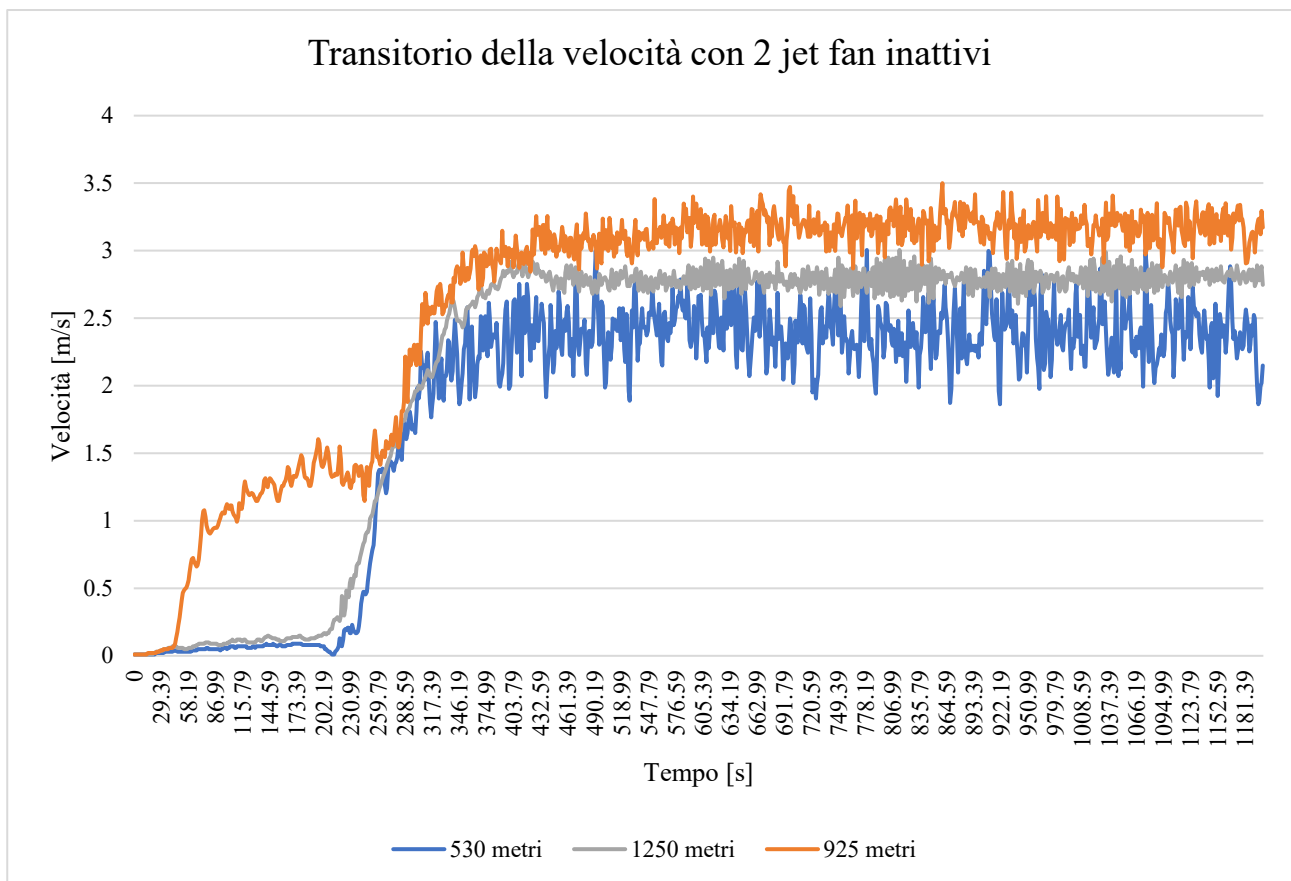


Il grafico mostra che nei pressi dell'incendio (curva arancione) c'è un flusso in moto fin dai primi secondi, questo è in parte dovuto ai fumi della combustione e in parte all'aria richiamata dal portale di valle. A regime la velocità è maggiore nelle zone situate dopo l'incendio di circa 0,7 metri al secondo, inoltre nella curva riferita a 925 metri la velocità è maggiore di 0,2 m/s rispetto al caso a 1250 metri, questo è dovuto alla turbolenza legata ai fumi della combustione e soprattutto alla posizione della coppia di jet fan che sono a solo 2 metri dal punto di misura.

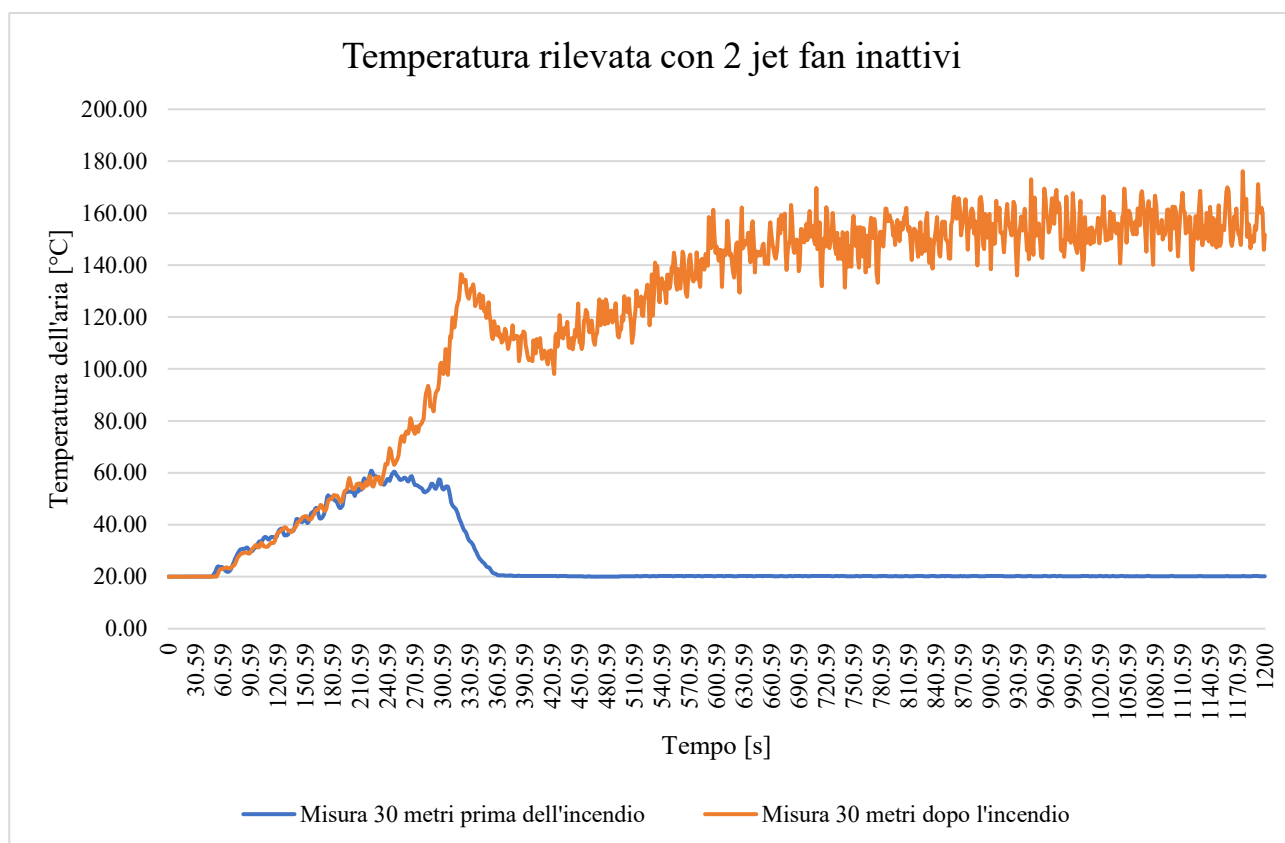
Gli impianti di ventilazione delle gallerie vengono progettati in modo da garantire l'eliminazione dei fumi anche nel caso che una coppia di jet fan non funzioni. Questo potrebbe verificarsi qualora l'incendio dovesse svilupparsi vicino a dei ventilatori, infatti, questi potrebbero non avviarsi correttamente a causa della temperatura dei fumi, che sopra le fiamme è di alcune centinaia di gradi. A questo proposito è stata eseguita un'ulteriore simulazione per verificare la rimozione dei fumi nel caso in cui 2 jet fan non funzionino (quelli più vicini alle fiamme). Di seguito vengono quindi riportati i transitori di velocità e temperatura per la stessa galleria, ma con 18 ventilatori anziché 20.



La velocità media nel tunnel presenta il medesimo andamento della simulazione con 20 jet fan attivi, tuttavia ha un valore più basso di circa 0,15 m/s. Nel grafico seguente sono mostrati i transitori nei tre punti specifici già analizzati precedentemente.



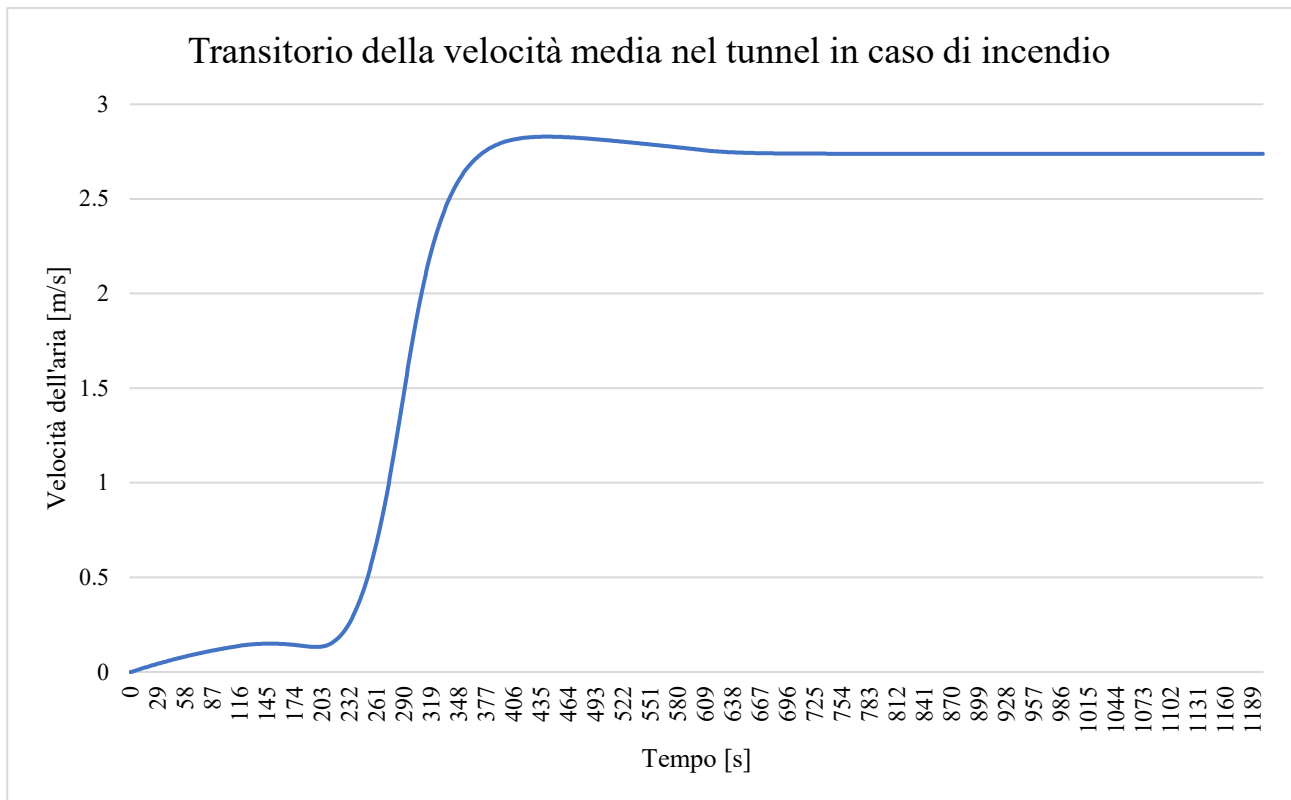
La velocità dell'aria nelle zone mostrate nel grafico precedente è inferiore di circa 0,2 m/s rispetto al caso base, mentre l'andamento delle curve è il medesimo. Questo flusso d'aria consente comunque di rimuovere i fumi della combustione, quindi secondo la simulazione effettuata non dovrebbero esserci problemi di sicurezza.



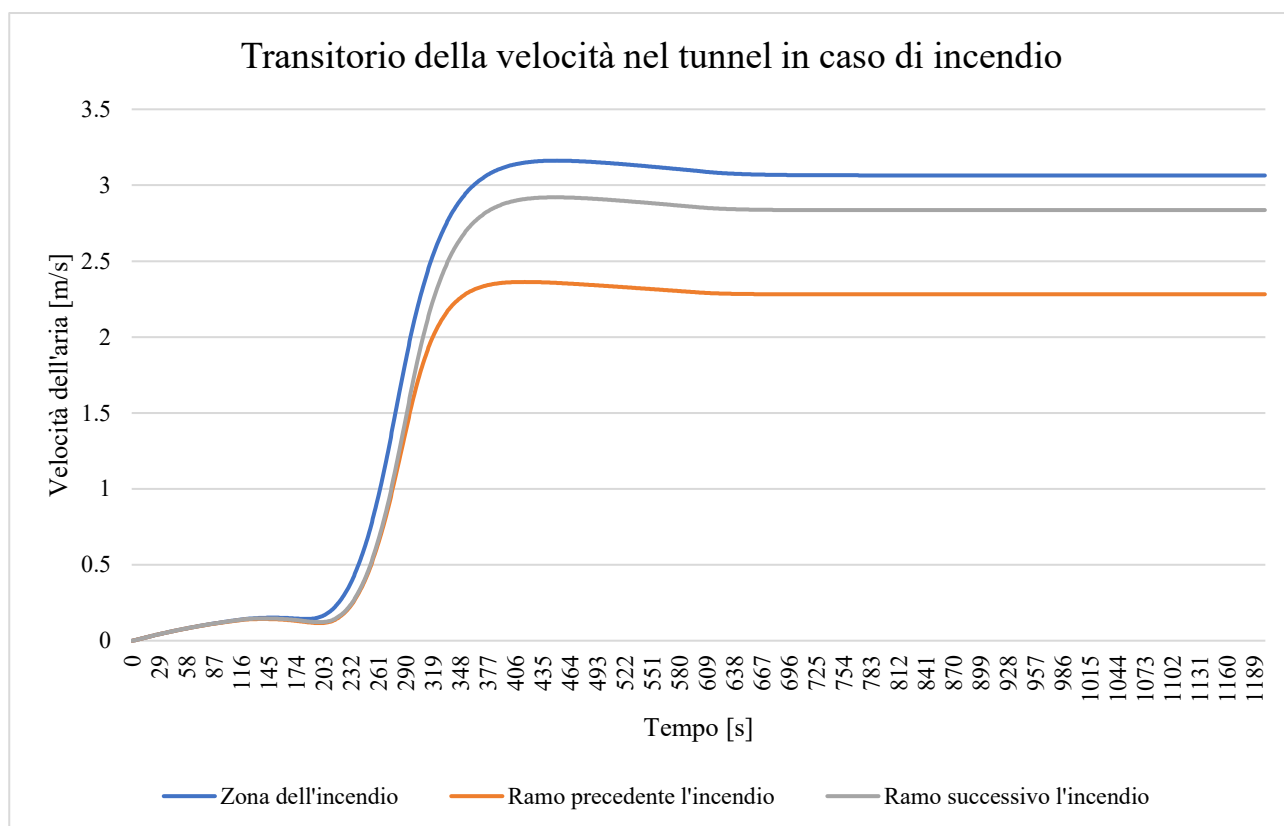
La temperatura appare pressoché la stessa del caso base, il leggero aumento può essere dovuto al fatto che il fumo muovendosi a una velocità inferiore di circa 0,2 m/s rimane più tempo in galleria e scalda maggiormente l'ambiente.

4.3.3.2 Analisi in caso di incendio mediante Whitesmoke

Tramite il software Whitesmoke è stato costruito un modello 1D per analizzare il fenomeno. Come descritto precedentemente è stata creata una rete di nodi e rami che simuli la geometria della galleria.

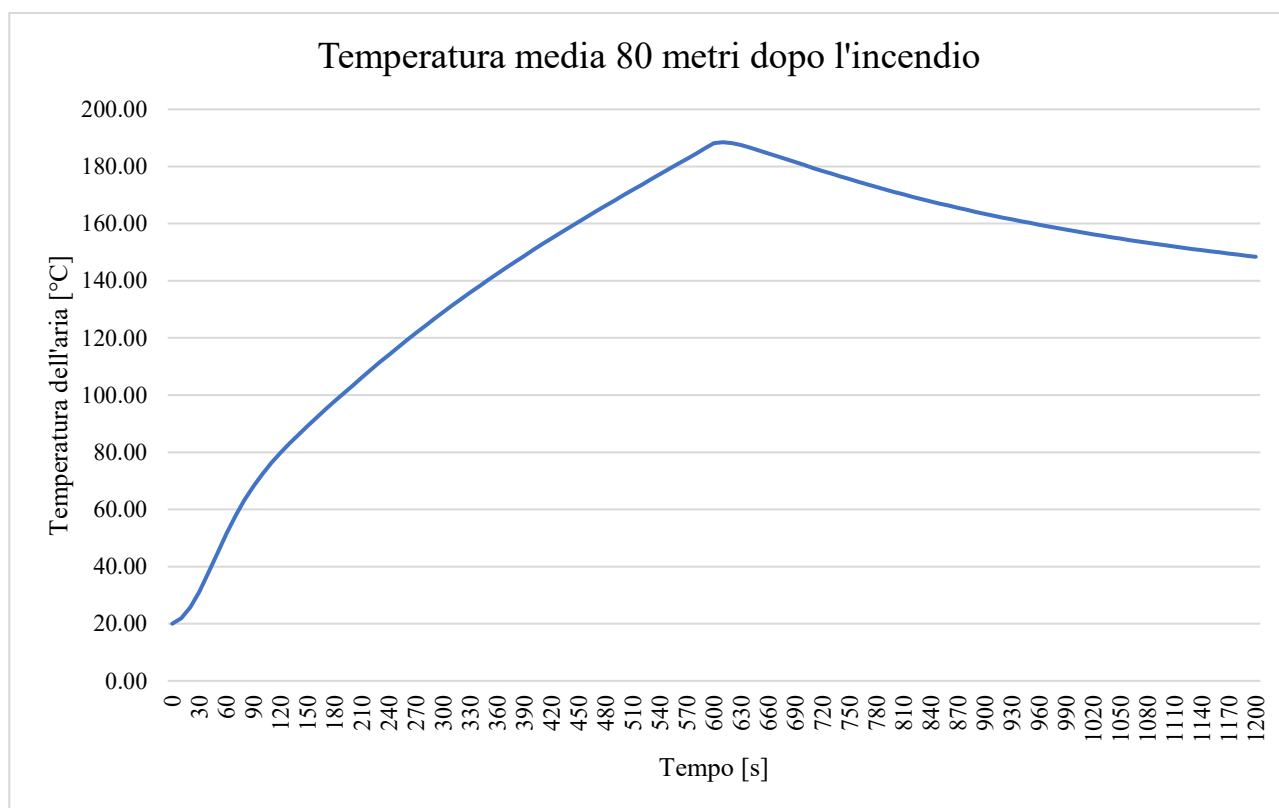


La velocità massima raggiunta secondo questa simulazione è simile a quella ottenuta con il software FDS, tuttavia, l'andamento durante il transitorio è diverso, infatti, la curva ha una pendenza maggiore; questo può essere dovuto a un diverso peso dell'incendio nell'attrarre aria dall'ambiente esterno.



Come mostrato, la velocità maggiore è misurata nei pressi dell'incendio (come avviene con la simulazione di FDS), mentre la velocità minore è nel ramo precedente le fiamme. Secondo questa simulazione il transitorio nei primi due minuti è uguale per i tre rami diversamente da quanto ottenuto da FDS.

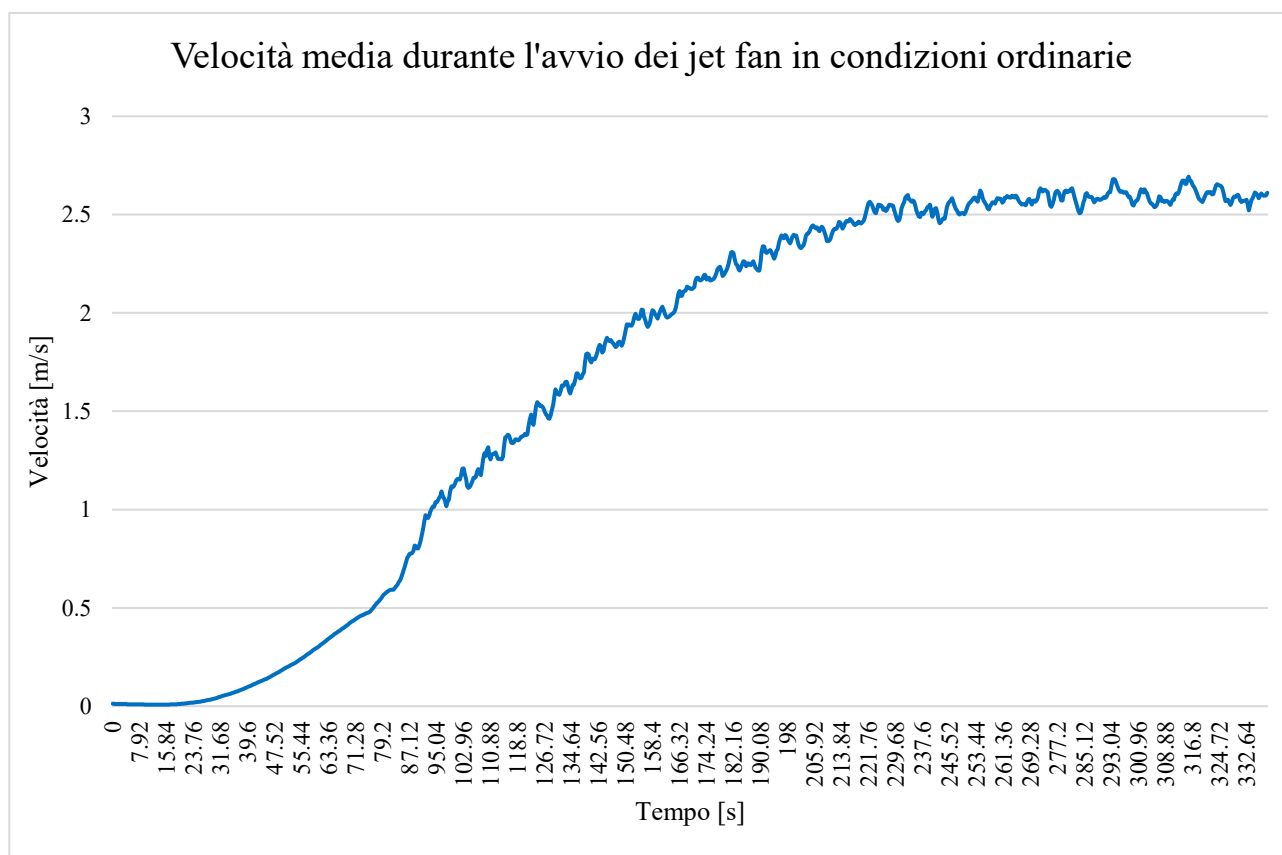
Nel grafico seguente si analizza la temperatura media di un nodo posto 80 metri dopo l'incendio.



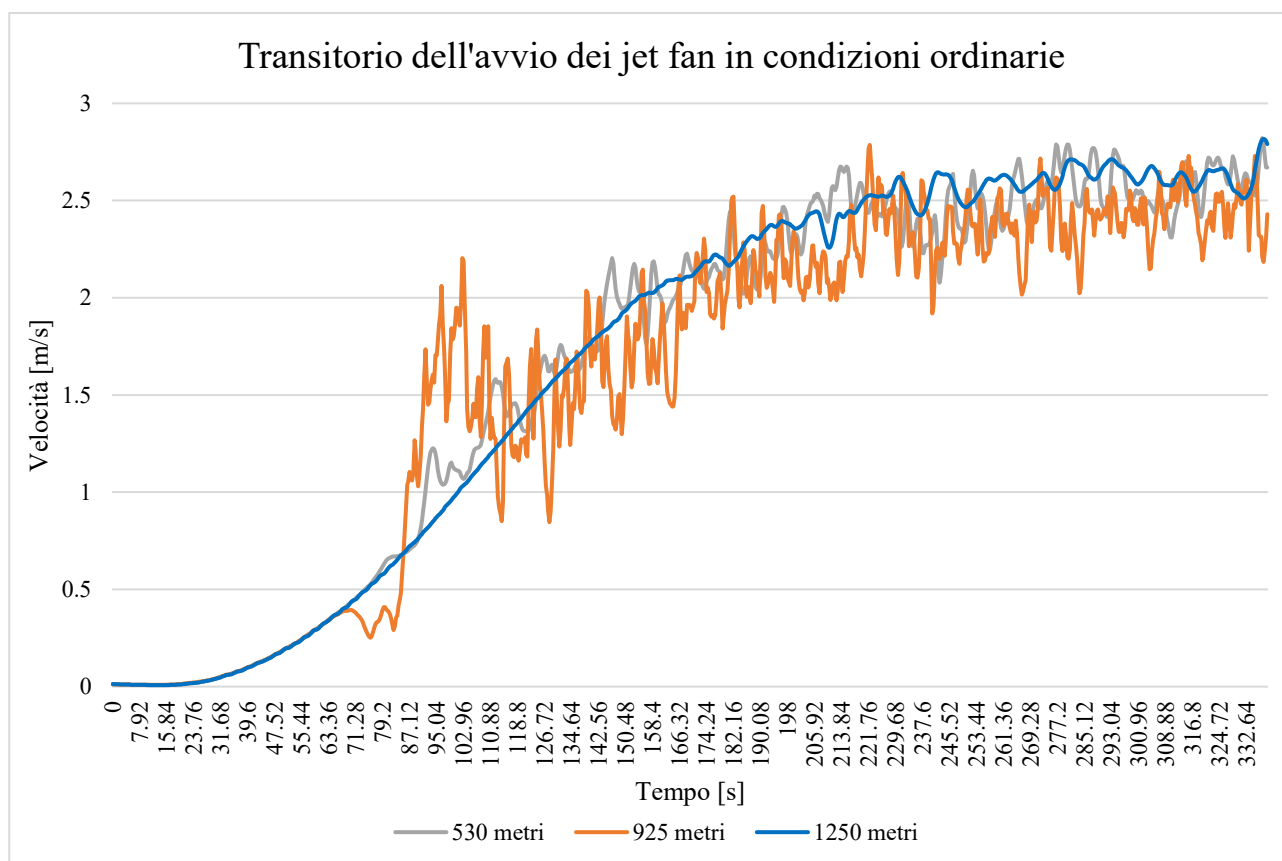
Come mostrato dal grafico, la temperatura aumenta più velocemente rispetto a quanto computato nella simulazione con FDS (riferito al punto situato 30 metri a valle delle fiamme). Inoltre, l'andamento in questo caso è più ripido nei primi 90 secondi per poi cambiare pendenza. Un'altra osservazione è che in questa simulazione la temperatura diminuisce dopo aver raggiunto il massimo anziché restare costante.

4.3.3.3 Analisi in condizioni ordinarie mediante FDS

L'analisi fluidodinamica è stata altresì effettuata nel caso di condizioni ordinarie, cioè senza incendio, per stimare il transitorio di accensione dei jet fan che verrà poi verificato con le misure sul campo. I parametri con cui è stata impostata la simulazione su FDS sono i medesimi del caso con incendio, l'avvio dei jet fan dura comunque due minuti ma incomincia dall'istante iniziale.



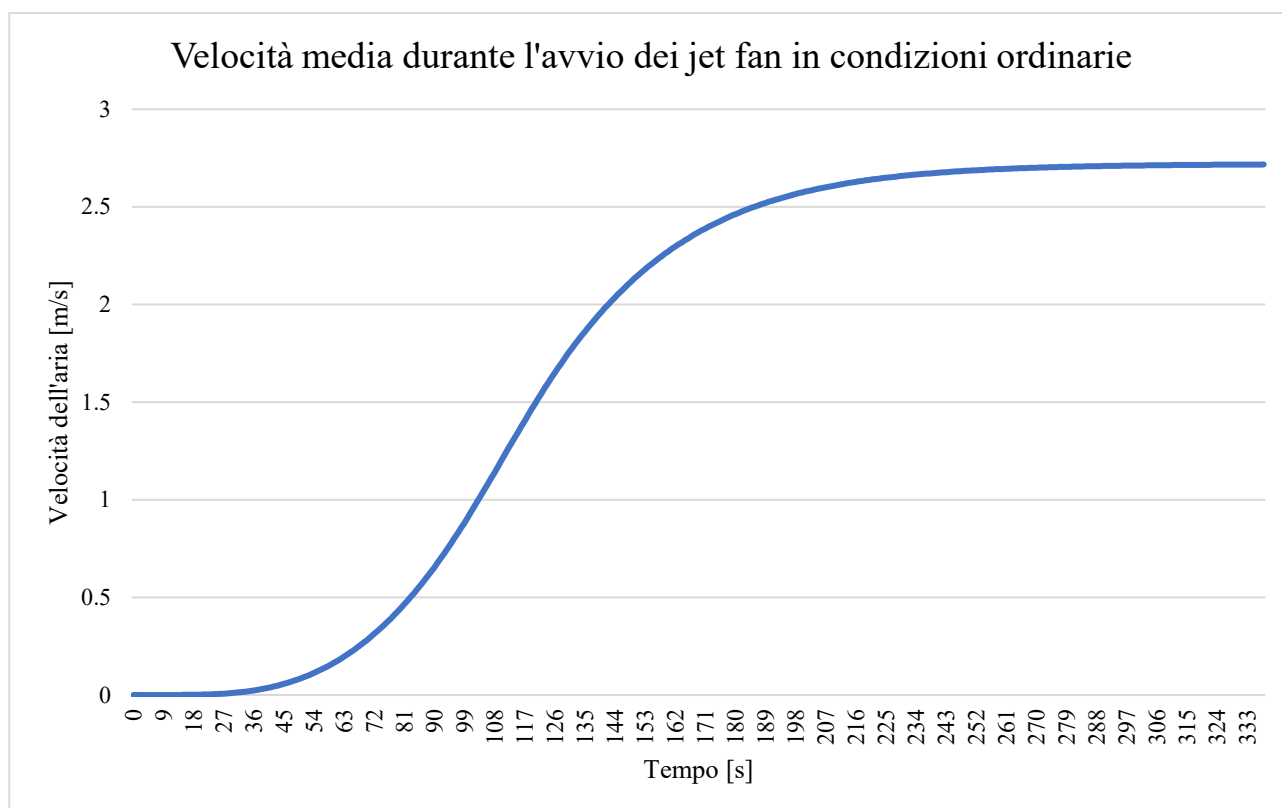
Il sistema raggiunge il regime in meno di 5 minuti e la crescita ha un andamento di tipo quadratico nei primi 100 secondi e lineare nel minuto successivo per poi appiattirsi nel finale. Rispetto al caso precedente la velocità media stimata è più bassa di 0,2 m/s, questo perché il moto dei fumi e il richiamo di aria esterna contribuivano nella misura della velocità. Secondo quanto riportato nel grafico nei primi 90 secondi la velocità dell'aria ha oscillazioni contenute, mentre successivamente è più variabile.



Nel punto di misura a 925 si può notare che i valori di velocità sono molto altalenanti a causa della vicinanza del jet fan che è situato appena 2 metri dopo, questo genera delle forti turbolenze che danno oscillazioni della velocità sia in modulo che in direzione. Le misure a 1250 metri sono invece più stabili perché non vi sono ventilatori vicini. Questo mostra l'importanza di scegliere la giusta posizione quando si effettuano misure in galleria perché la vicinanza di un jet fan potrebbe inficiare i dati rilevati, che quindi sarebbero troppo diversi dai valori medi.

4.3.3.4 Analisi in condizioni ordinarie mediante Whitesmoke

La simulazione in condizioni ordinarie è stata effettuata anche mediante il software Whitesmoke, togliendo quindi il transitorio dell'incendio dai file di input.



In questo caso la velocità raggiunta a regime è pressoché la stessa rispetto al caso con presenza di incendio. Rispetto alle simulazioni con FDS l'aria incomincia ad accelerare più tardi, ma il transitorio è più breve.

4.4 Valutazione del fattore di attrito

Il valore del fattore di attrito serve per poter effettuare le simulazioni tramite il software Whitesmoke, mentre per l'uso di FDS è sufficiente conoscere la rugosità. Per calcolare il fattore di attrito viene applicato un set di equazioni ai valori di velocità dell'aria misurati durante il transitorio di spegnimento dei jet fan.

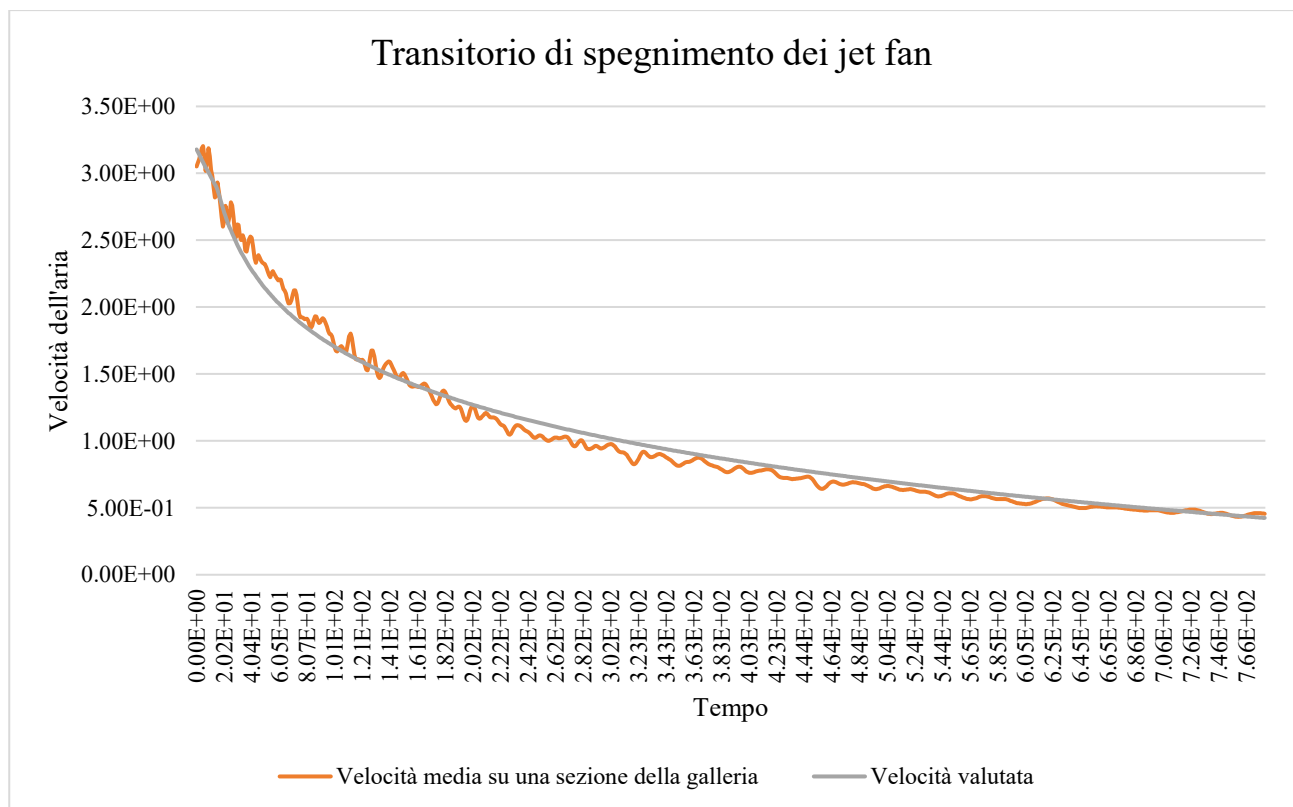
Innanzitutto, si calcola il valore medio della velocità a partire dai valori misurati dai nove anemometri. Successivamente, bisogna ottenere l'equazione che meglio descrive il transitorio di spegnimento dei jet fan, basandosi sulla velocità media. Nel caso in esame è stata utilizzata la velocità misurata su una sezione composta da nove punti della simulazione di FDS (disposti come se si trattasse delle prove in galleria) e nei primi 14 secondi il transitorio può essere descritto dal seguente polinomio:

$$v = x^6 * 10^{-16} - 3 * x^5 * 10^{-13} + 4 * x^4 * 10^{-10} - 2 * x^3 * 10^{-7} + 9 * x^2 * 10^{-5} - 0.0205 * x + 3.1784$$

La variabile “x” rappresenta il tempo, mentre “v” è la velocità dell’aria. Nei restanti minuti l’andamento della velocità può essere descritto dall’equazione logaritmica di seguito riportata:

$$v = -0.625 * \ln(x) + 4.5867$$

È importante applicare queste due equazioni perché altrimenti si avrebbero oscillazioni della velocità nel tempo, invece in questo modo si ottiene una serie di valori ad andamento costante.



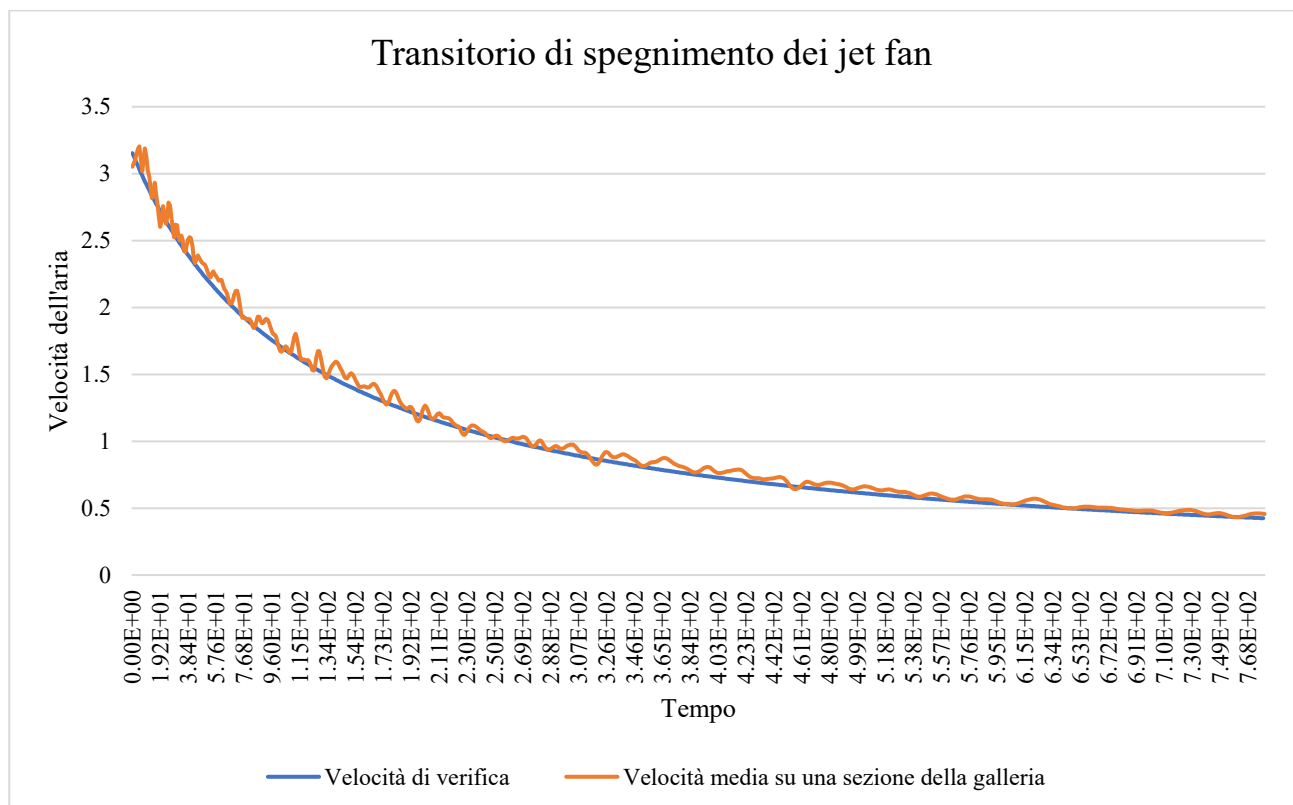
Infine, si calcola il fattore di attrito mediante la seguente formula:

$$f = \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{v_1^2} * \frac{d_i}{\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right) * \Delta t}$$

Dove: f è il fattore di attrito; Δt è il tempo trascorso tra due misure consecutive della velocità; v_1 è la velocità misurata nella rilevazione passata; v_2 è la velocità misurata nella rilevazione presente; d_i è il diametro idraulico della galleria.

Applicando quest'ultima equazione per tutti i valori della velocità si ottiene una serie di valori del fattore di attrito. Effettuando la media di questi si avrà il fattore di attrito del tunnel, che per il caso in esame risulta pari a 0,0338, in linea con quanto ottenuto applicando la formula usata dal software FDS ovvero 0,0352 e con il valore letto sul diagramma di Moody pari a 0,0343, mentre applicando la correlazione di Haaland si otterrebbe 0,0298.

Nel grafico seguente è mostrato il confronto tra la curva ottenuta effettuando una media di nove valori presi su una sezione trasversale del tunnel mediante FDS e la curva risultante dal calcolo della velocità utilizzando il fattore di attrito ottenuto.



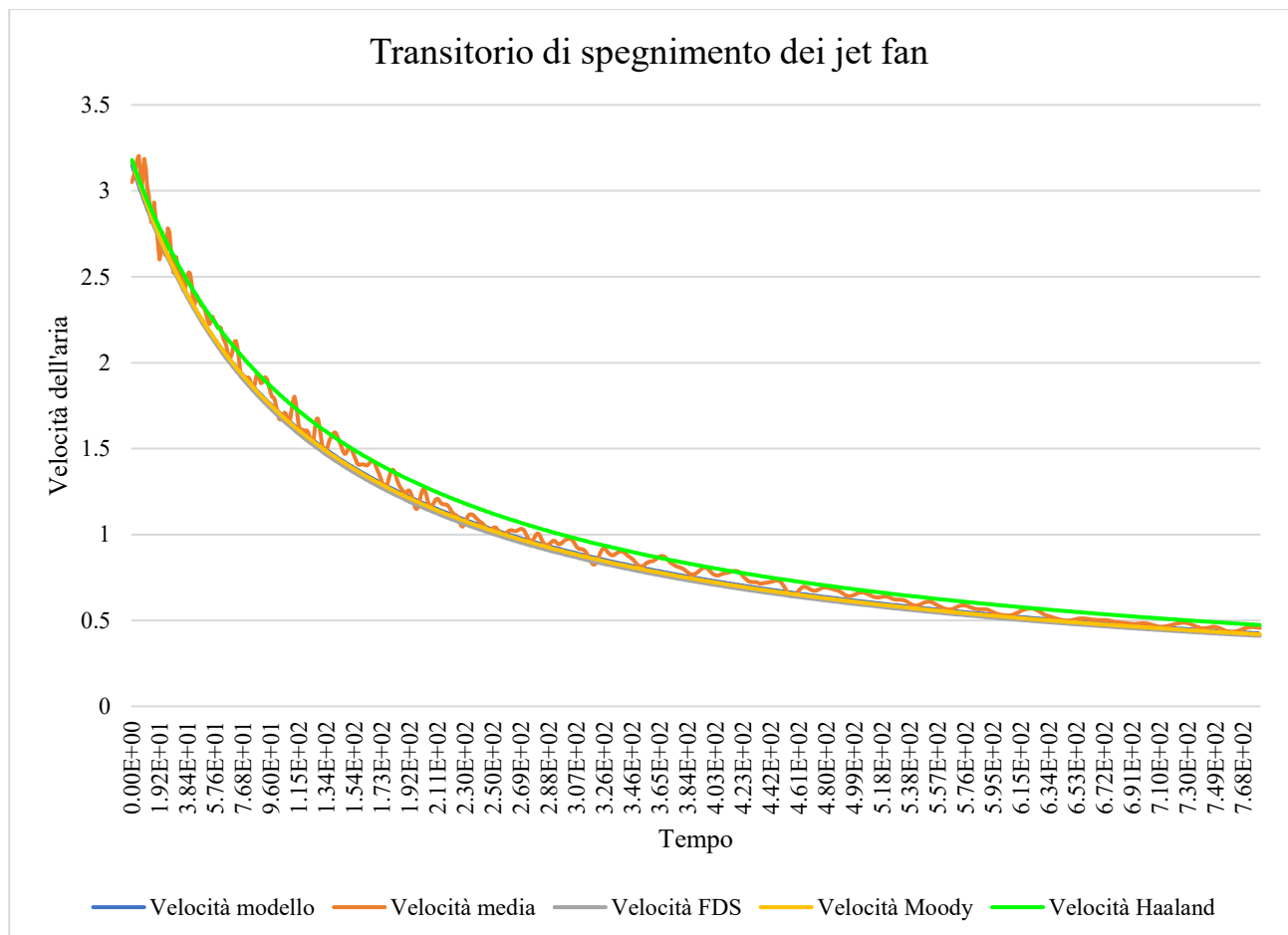
La formula da usare per ricavare il fattore di attrito è stata ottenuta a partire dalle seguenti equazioni:

$$\Delta p_{din} = 0.5 * \rho * v_{air}^2$$

$$\Delta p_{loss} = 0.5 * \rho * v_{air}^2 * f * \frac{\Delta l}{d_i}$$

Dove: Δp_{din} è la pressione dinamica; v_{air} è la velocità dell'aria; Δp_{loss} sono le perdite distribuite lungo un certo tratto; Δl è la lunghezza del tratto considerato. Per ogni fattore di attrito è stata tracciata una curva del relativo “run down” dell'impianto di ventilazione, successivamente per ogni curva è stato calcolato lo scarto quadratico medio rispetto all'andamento originale (linea arancione nel grafico).

Fattori di attrito		Scarto quadratico medio
Modello	0,0338	0,0477
Correlazione di FDS	0,0352	0,0662
Diagramma di Moody	0,0343	0,0540
Correlazione di Haaland	0,0298	0,0544



5. Sviluppo dei sistemi di misura delle prestazioni dell'impianto di ventilazione

5.1 Tipo di sensori selezionati

Per misurare la velocità dell'aria sono stati scelti degli anemometri sonici a 2 assi (come quello mostrato nella figura seguente), che sono anche in grado di fornire la direzione del flusso che li attraversa.



Figura 5.1 Montaggio dell'anemometro sul supporto.

Gli strumenti scelti presentano un'elevata precisione e un range di misura ampio, tuttavia hanno un peso e un ingombro rilevanti, pertanto richiedono una struttura robusta per il montaggio.

Caratteristiche tecniche anemometri DNB 306

	Grandezze	Valori
	Uscita	2x4÷20 mA
	Tipo	Sonic 2-Axis (U-V)
	Misure	Velocità e direzione del vento
	Materiale	Alluminio
	Alimentazione	12-30 Vdc
	Consumo (@12Vdc)	12 mA
	Dimensioni	180x160 mm
	Peso	1 kg
	Montaggio	Su palo Ø 35-50 mm
	Temperatura operativa	-40 ÷ 60°C
	Grado di protezione	IP66
	Connettore	10-pins (MG2267)
	Compatibilità datalogger	Versioni con uscita RS232, 4÷20 mA: M-Log (ELO008) E-Log , Alpha-Log con modulo ALIEM Versioni con uscita RS485: A-Log
Velocità del vento	Range di misura	0÷60 m/s
	Accuratezza	± 0,2 m/s o 3% (0,02-35 m/s) 5% (> 35 m/s)
	Soglia	0,01 m/s
	Risoluzione	0,01 m/s
Direzione del vento	Range di misura	0÷360°
	Accuratezza	±2 (> 1 m/s)
	Soglia	0,2 m/s
	Risoluzione	1°
	Soglia velocità	0,2 m/s

I nove sensori sono stati montati su 3 aste modulari (in grado di arrivare fino a 8 metri di altezza), che poggiano su un treppiede e vi sono ancorate con dei tiranti. L'ancoraggio serve a garantire la stabilità della struttura durante le prove, infatti, l'elevata velocità del vento e le variazioni di modulo e direzione potrebbero far oscillare le aste rendendo imprecise le misure. Inoltre, i cavi che collegano gli anemometri ai data logger sono stati fissati alle aste tramite delle fascette per evitare che il peso gravasse sul supporto dei singoli sensori. Le basi delle aste sono costituite da dei profilati di acciaio inossidabile particolarmente lunghi in grado di garantire stabilità alla struttura.

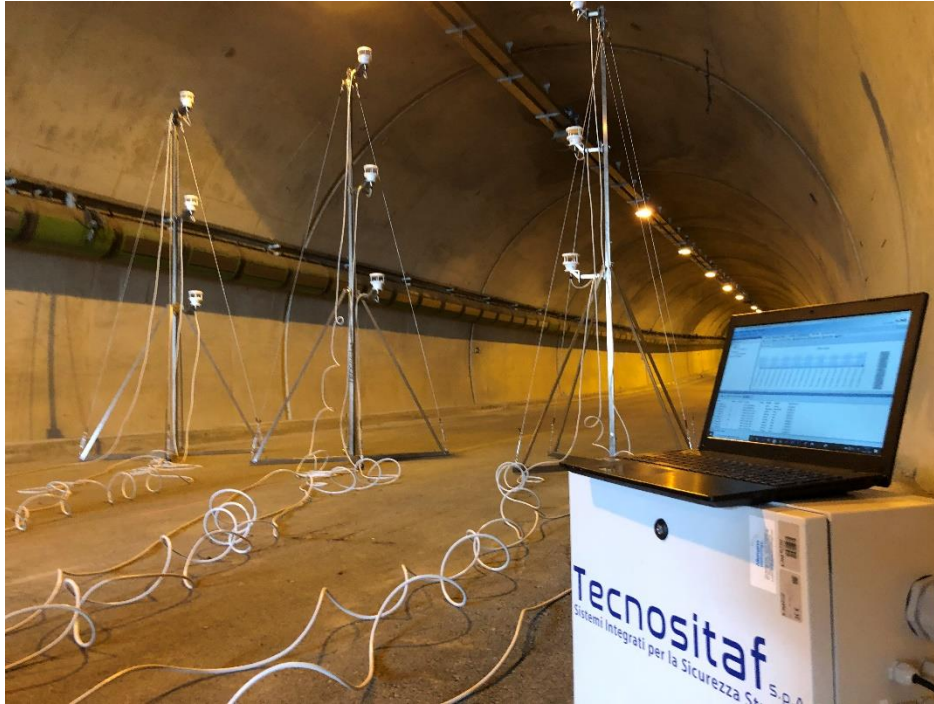


Figura 5.2 Disposizione strumenti di misura e data logger.

Per la misura della temperatura sono state scelte delle termocoppie di tipo K, in grado di resistere a temperature elevate (oltre 1200 °C), anche questi sensori sono montati su 3 aste durante la prova a fuoco; il giunto positivo è in nickel-cromo mentre il giunto negativo è in nickel-alluminio. Le aste usate per le termocoppie sono costituite da acciaio zincato, che è più resistente alle alte temperature, inoltre come ulteriore precauzione l'asta posizionata a ridosso delle fiamme va ricoperta con della lana di roccia nella parte più esposta al fuoco. Inoltre, è meglio usare della lana di roccia anche per proteggere le canaline e i cavi nella zona dell'incendio simulato.

5.2 Sistema di acquisizione dati

I dati degli anemometri vengono registrati tramite un data logger, alimentato a batteria, che è a sua volta collegato a un computer. I cavi che trasmettono il segnale sono collegati agli acquisitori mediante una morsettiera, per ogni informazione da rilevare bisogna collegare due fili (uno positivo ed uno negativo) oltre ai due per l'alimentazione. Il segnale della misura è in corrente, in questo modo non bisogna preoccuparsi dei cali di tensione lungo il cavo.

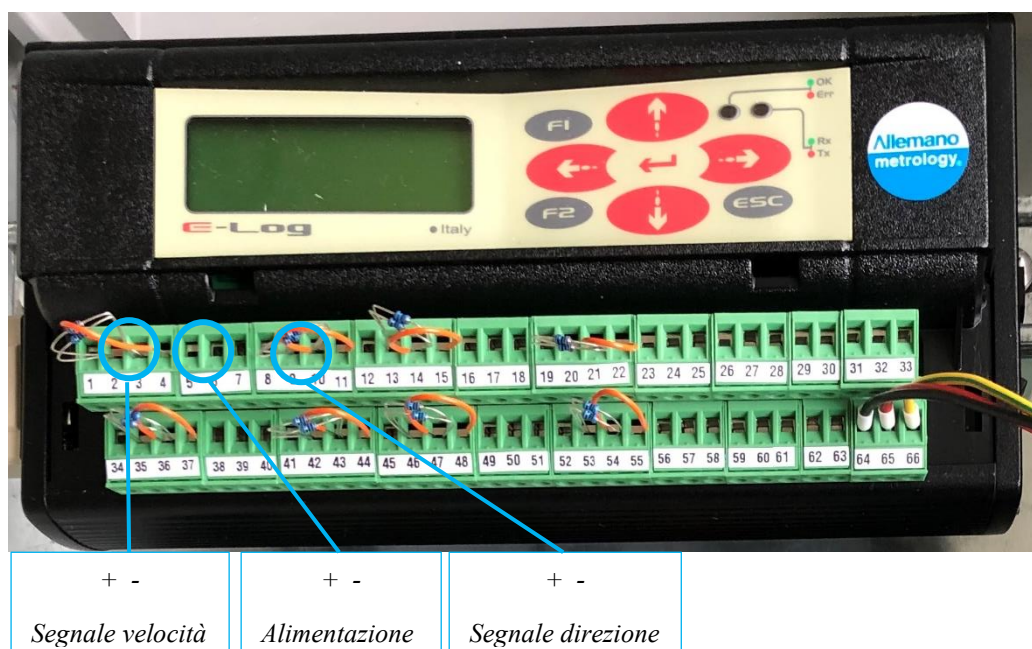


Figura 5.3 Schema delle connessioni elettriche del data logger.

Per garantire la corretta lettura dei dati ricevuti dagli anemometri, l'acquisitore necessita di due resistenze disposte in parallelo (di colore blu nella figura 5.3) ed un corto circuito (colore arancione nell'immagine) in serie rispetto alle resistenze. Questa modifica del circuito elettrico permette di ricevere un segnale più "pulito", eliminando frequenze indesiderate causate ad esempio da rumori.

I collegamenti sono abbastanza complicati da effettuare a causa dell'ingombro dei vari cavi, inoltre occorre molto tempo per collegare ogni filo alla morsettiera perché vanno avvitati singolarmente i vari morsetti, pertanto sono stati inseriti dei componenti intermedi (morsettiera componibili) che permettono di connettere i nove sensori ai data logger in pochi secondi.

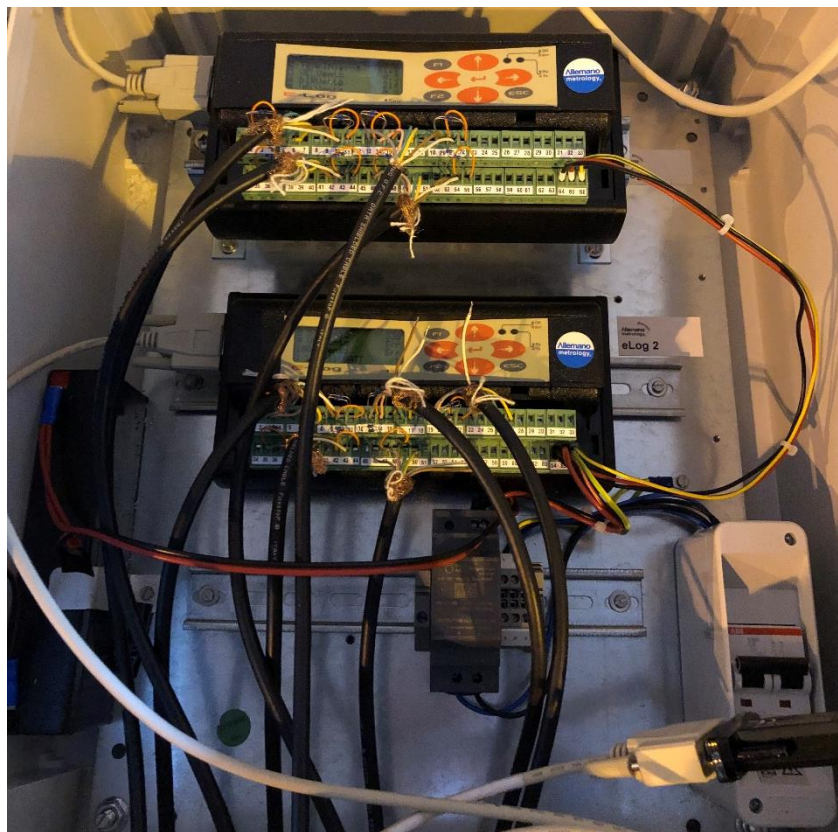


Figura 5.4 Collegamenti elettrici tra gli anemometri ed i due data logger.

Il dispositivo per acquisire i valori misurati dalle termocoppie è più semplice da utilizzare, infatti è sufficiente collegare l'apposito cavo al data logger corrispondente, inoltre presenta minor peso e spazio occupato.

La trasmissione dei dati al computer avviene tramite un cavo VGA collegato al data logger. Il software 3DOM permette di gestire i data logger e i dati in arrivo, in particolare si possono eseguire le seguenti azioni:

- lettura delle specifiche degli acquisitori;
- visualizzazione e acquisizione della configurazione attuale dei data logger;
- configurazione dei due data logger, modificando ad esempio il tempo di campionamento, il tipo di dati letti o le equazioni da applicare ai dati in ingresso (che sono comunicati col segnale in corrente);
- visualizzazione dello stato degli acquisitori;
- lettura dei valori istantanei inviati dagli anemometri;
- elaborazione dei dati e invio al programma per la visualizzazione di grafici e tabelle (GidasViewer);

- salvataggio dei dati sul database, che può essere locale o in remoto.

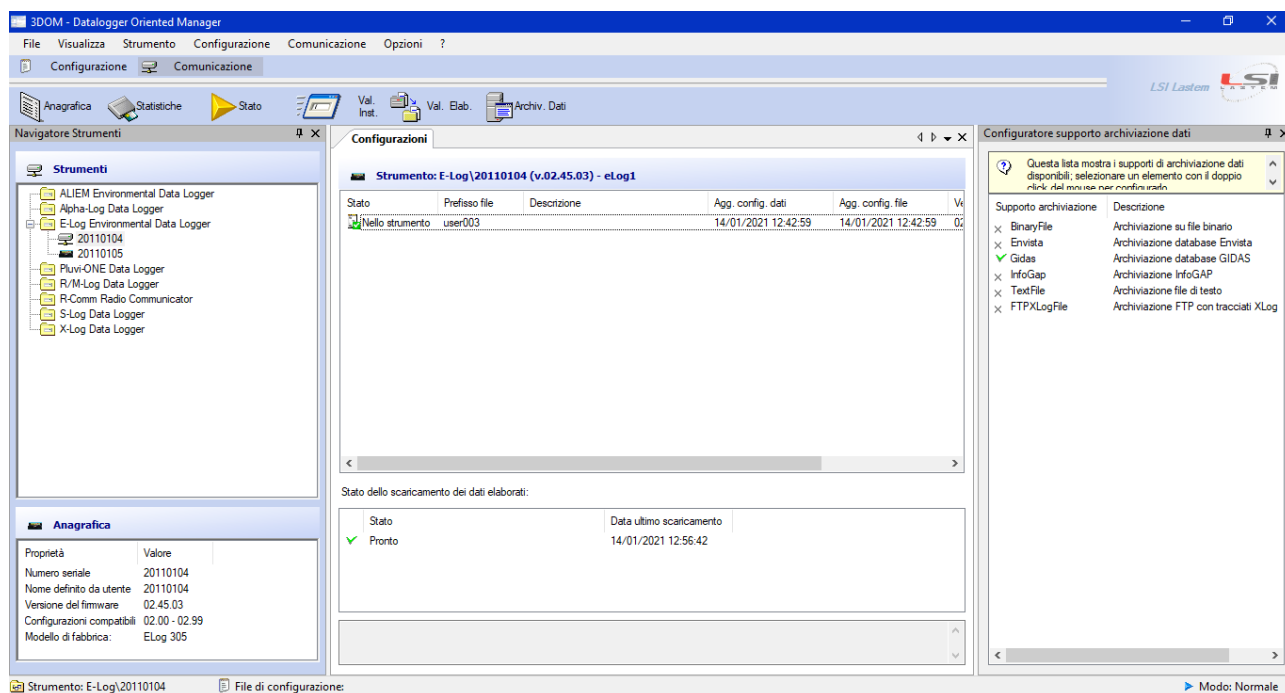


Figura 5.5 Schermata principale del software 3DOM usato nell'acquisizione dei dati.

Il software 3DOM non permette di visualizzare tutti i dati acquisiti durante le misurazioni e nemmeno l'andamento di questi su un grafico, per far questo è utilizzato il software GidasViewer. Quest'ultimo programma fornisce i valori medi misurati durante il tempo di campionamento, nonché la deviazione standard e i valori massimi e minimi. Per analizzare i valori tramite il software GidasViewer è necessario aver prima elaborato i dati tramite 3DOM.

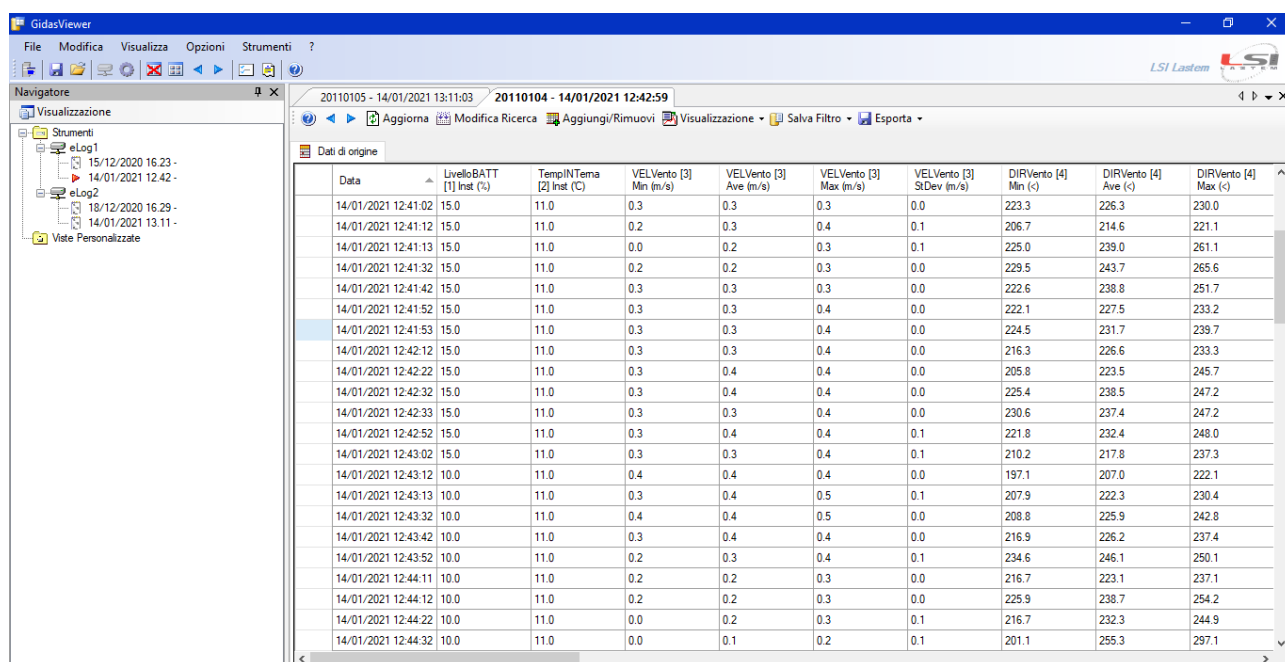


Figura 5.6 Schermata principale del software GidasViewer usato per la visualizzazione dei grafici.

5.3 Disposizione della strumentazione per le prove

Le misurazioni vengono effettuate in galleria durante la notte, dopo averla chiusa al traffico, in modo da limitare il disservizio rispetto alle ore diurne. Il montaggio dei vari sensori e delle aste per sostenerli richiede alcune ore pertanto bisogna essere rapidi in questa fase altrimenti si corre il rischio di non avere tempo a sufficienza per effettuare tutte le prove necessarie. Per quanto riguarda il test in bianco, cioè senza incendio simulato, il procedimento per la disposizione degli strumenti è composto dalle seguenti fasi:

- posizionamento delle basi delle tre aste in modo tale che gli anemometri possano essere equidistanti tra loro, a causa dell'ingombro queste basi vengono disposte a "X" rispetto all'asse della galleria (anziché essere disposte a croce);
- montaggio delle aste sulle basi, dove ogni asta è a sua volta composta da tre pali infilati di cui il primo viene fissato alla base tramite viti e bulloni;
- fissaggio delle staffe a cui verranno collegati i supporti degli anemometri, le staffe più in alto sono più corte per limitare il carico a sbalzo sull'asta;
- montaggio dei nove anemometri sui supporti e collegamento con le staffe sulle aste;
- regolazione dei tiranti delle aste;
- collegamento dei sensori ai due data logger tramite i nove cavi schermati, questi data logger oltre a ricevere i dati misurati forniscono la corrente elettrica agli anemometri;

- sistemazione dei sensori all'altezza desiderata, l'anemometro più in alto viene posizionato in prossimità dell'altezza della sagoma limite della galleria;
- assemblaggio delle due stazioni meteo da disporre ai portali della galleria;
- configurazione dei data logger e inserimento di temperatura e pressione rilevate all'interno del tunnel prima dell'inizio delle prove;
- accensione dei jet fan in sequenza.

Dopo aver effettuato gli step descritti è possibile iniziare il rilevamento dei valori di velocità dell'aria, l'intera prova può durare dai 10 ai 20 minuti. Nel caso del test in presenza di incendio oltre alla disposizione degli anemometri come descritto sopra, bisogna anche preparare le vasche contenenti il combustibile e le sonde per la temperatura. In questo caso gli anemometri vengono disposti sopravento rispetto alle fiamme in modo che il fumo non li possa raggiungere. Le termocoppie vanno disposte in prossimità delle fiamme in modo da rilevarne la temperatura. Come combustibile viene solitamente usata una miscela di diesel e benzina. Pertanto, riguardo il test in presenza di incendio simulato gli step per la preparazione sono i seguenti:

- sistemazione delle due vasche contenenti il combustibile;
- posizionamento delle basi delle tre aste per le nove termocoppie (tre per ogni asta), di cui una sarà situata esattamente nel punto dell'incendio e le altre due a pochi metri dalla prima;
- assemblaggio dei pali che compongono l'asta;
- inserimento delle termocoppie nelle scanalature predisposte sulle aste;
- collegamento delle termocoppie al data logger;
- copertura dei cavi e dell'asta più vicina al fuoco con lana di roccia;
- accensione del combustibile;
- accensione dei ventilatori dopo circa tre minuti.

Questa prova dura almeno 20 minuti perché bisogna aspettare che raggiungano il regime sia i jet fan che l'incendio simulato.

5.4 Procedura per le misurazioni sul campo

Le prove in bianco (senza incendio) da effettuare permettono di valutare le prestazioni del sistema di ventilazione e sono composte dai seguenti step:

- rilevamento delle condizioni di temperatura, pressione, umidità, pioggia, velocità e direzione del vento ai portali della galleria mediante le stazioni meteo;
- misurazione della velocità di fondo in galleria tramite gli anemometri a ultrasuoni;
- accensione dei ventilatori e misurazione della velocità dell'aria per 20 minuti;
- spegnimento dei jet fan e rilevamento del transitorio di spegnimento, che sarà utile per calcolare il fattore di attrito;
- valutazione della spinta dei jet fan mediante un trasduttore di pressione, i cui capi vanno posizionati 80 metri dopo e 20 metri prima del ventilatore in esame;
- accensione del solo ventilatore di cui va verificata la spinta;
- spegnimento del ventilatore valutato.

Durante queste prove è possibile misurare la velocità dell'aria mediante l'anemometro a ventolina, in modo da avere dati riguardo punti diversi rispetto a quelli dove sono posizionati i sensori a ultrasuoni.

Per le prove con incendio simulato gli step riguardanti la misura della velocità dell'aria sono i medesimi della prova in bianco, la differenza sta nella disposizione delle vasche contenenti il combustibile e delle termocoppie. Ovviamente, gli anemometri in questo secondo caso vanno disposti sopravento rispetto alle fiamme per evitare che il fumo possa raggiungere il personale che effettua le prove.



Figura 5.7 Esempio di accensione dell'incendio simulato.

6. Conclusioni

Il presente lavoro è mirato a definire degli strumenti di verifica della sicurezza in galleria sulla base di test effettuati sul campo, in particolare è riferito al contributo dell'impianto di ventilazione di tipo longitudinale per le gallerie a singola canna.

Il progetto ha previsto in una prima fase la stima dell'influenza delle prestazioni dell'impianto di ventilazione sul livello di rischio associato alla galleria (definito dal D.Lgs 264/06 in termini di Valore Atteso del Danno) effettuata mediante un'analisi parametrica sui risultati ottenuti dal modello DG-QRAM del PIARC. La seconda fase del lavoro è consistita nella progettazione e realizzazione di un sistema di misura della velocità dell'aria in galleria finalizzato a fornire una valutazione sul campo delle effettive prestazioni di un impianto reale in condizioni ordinarie e incidentali.

Al fine di valutare le prestazioni dell'impianto in condizioni di incendio è stato costruito un modello CFD della galleria da tarare sulla base dei dati misurati e da utilizzare per simulare gli scenari di emergenza di progetto e per calcolare le velocità dell'aria nelle condizioni realistiche.

Le analisi effettuate in questa tesi sono state un utile punto di riferimento per questo nuovo progetto e hanno permesso di definire il protocollo da applicare per valutare le prestazioni dell'impianto di ventilazione, che pertanto consiste nei seguenti step:

- analisi termofluidodinamica preliminare mediante modello numerico 1D, ipotizzando la rugosità della galleria e valutando il fattore di attrito mediante una correlazione;
- analisi termofluidodinamica opzionale mediante modello numerico 3D;
- misurazioni sul campo, effettuate in condizioni normali e di incendio simulato;
- analisi dei dati rilevati mediante gli appositi software;
- valutazione del fattore di attrito reale mediante il metodo descritto;
- analisi termofluidodinamica tramite modello 1D utilizzando il fattore di attrito reale;
- comparazione dei valori reali e dei risultati delle simulazioni numeriche;
- redazione del report contenente i risultati delle analisi effettuate.

In allegato a questa tesi è inserito un esempio del report tipo da utilizzare per le misure da effettuare in campo.

Non è stato possibile effettuare le misure nella galleria Ramat, tuttavia la procedura descritta in questa tesi è stata applicata in una galleria di emergenza al fine di testarne i tempi di esecuzione. In questo modo è stato verificato il corretto funzionamento della strumentazione acquistata per questo progetto.

La normativa europea sulla sicurezza in galleria recepita in Italia con il D.Lgs 264/06 introduce l'analisi di rischio come strumento per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali. Il legame tra il valore del rischio e la velocità dell'aria in galleria mostra l'importanza di avere un sistema di ventilazione adeguato. L'analisi di rischio che è stata eseguita in questa tesi supporta l'utilità di effettuare verifiche delle prestazioni dei ventilatori sul campo, al fine di garantirne il corretto funzionamento. Nel caso di aria pressoché ferma in galleria il valore atteso del danno è circa il doppio rispetto a quello in cui la velocità dell'aria è di 4,5 m/s. Per valutare le prestazioni dell'impianto di ventilazione bisogna però tenere presente i costi, infatti, questi non devono risultare troppo ingenti rispetto al beneficio ottenuto dall'analisi effettuata.

Secondo lo studio sviluppato, l'utilizzo di una griglia costituita da nove punti di misura è un buon compromesso tra precisione dei dati rilevati e costo della strumentazione; questo vale sia per gli anemometri che per le termocoppie. La scelta di anemometri ad ultrasuoni è giustificata dal fatto che, oltre a garantire un'accuratezza elevata, permettono anche di rilevare la direzione del flusso d'aria, il che può essere fondamentale per applicazioni in gallerie che presentino una o più curve, o addirittura in reti di tunnel sotterranei.

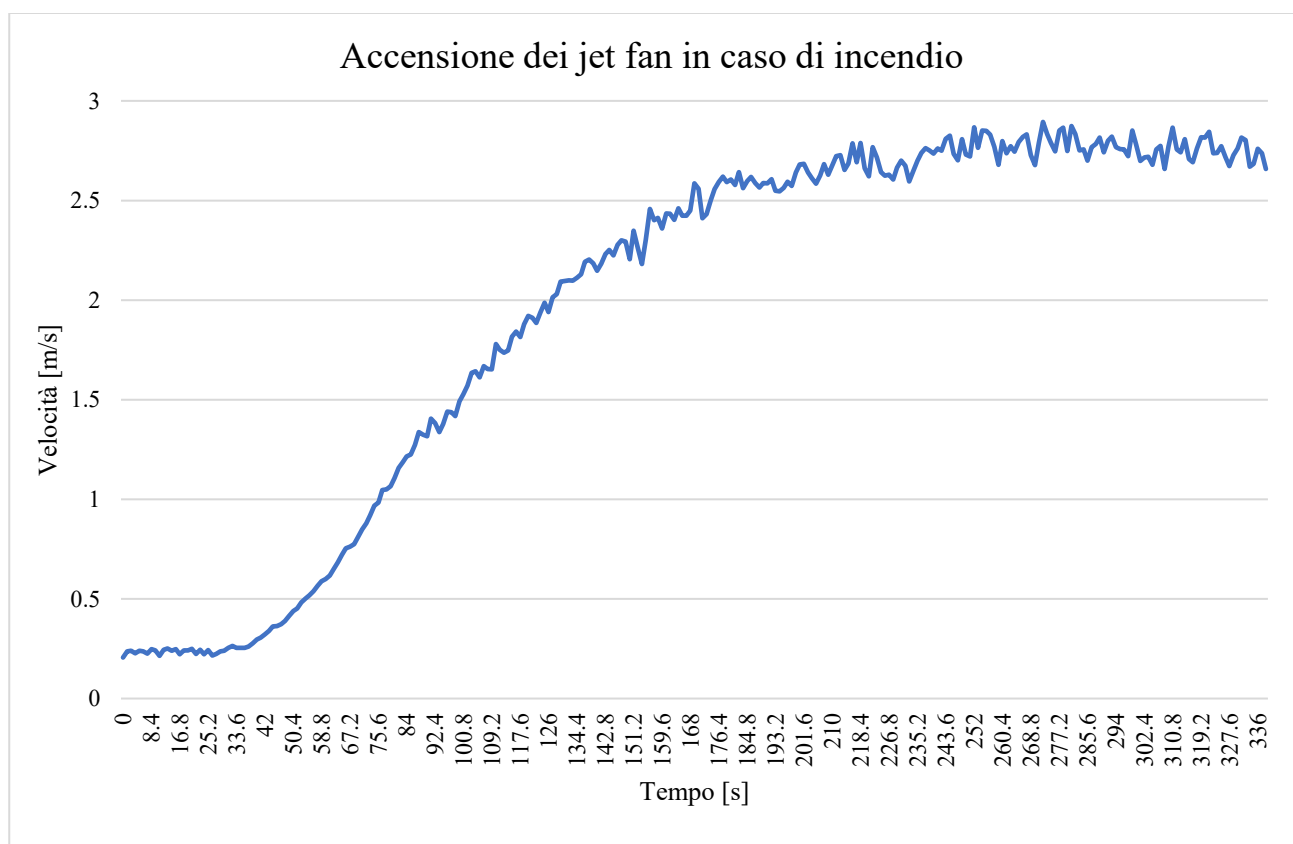
La rigidità delle aste che sostengono i sensori è un aspetto fondamentale delle misure, infatti, delle oscillazioni ampie vanificherebbero il lavoro svolto nelle misure, rendendo inutile l'utilizzo di sensori costosi e ad alta precisione. Durante il test effettuato per sperimentare la strumentazione e perfezionarne il montaggio è stata verificata l'indeforabilità delle aste, nonostante la presenza di raffiche di vento di oltre 5 metri al secondo.

Inoltre, il modello 1D è uno strumento che può essere utilmente impiegato anche per effettuare analisi dinamiche del tunnel, infatti permette di ottenere dei validi risultati in tempi contenuti. Un possibile impiego può essere quello di accoppiare una simulazione 1D all'analisi di rischio dinamica, in tal modo, oltre a valutare il valore atteso del danno (tramite il database dei valori di rischio), sarebbe possibile anche valutare istantaneamente la durata dell'incendio che si potrebbe sviluppare e il suo transitorio in termini di temperatura nelle varie posizioni della galleria. Il metodo sviluppato per la valutazione del coefficiente di attrito si è rivelato preciso e permette di caratterizzare correttamente la simulazione del modello 1D. Infatti, le analisi svolte hanno mostrato una buona correlazione tra il fattore di attrito della letteratura, quello derivato dalla rugosità che è stato imposto nel modello e

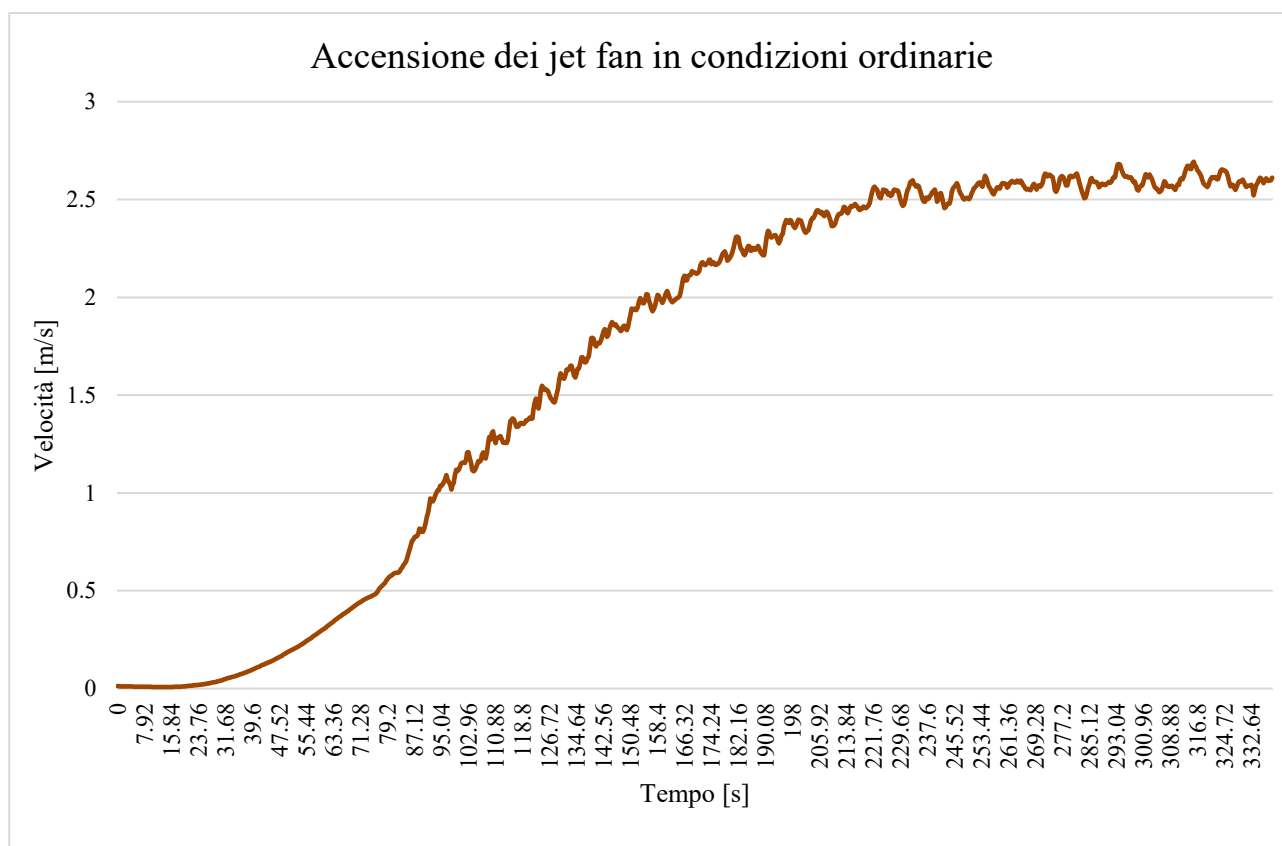
quello ottenuto mediante l'analisi dei dati di velocità in condizione di "run down" (spegnimento di tutti i ventilatori).

La possibilità di avere stime affidabili delle prestazioni della ventilazione consente di confermare i risultati delle analisi di rischio e rendere più affidabili i valori delle analisi di rischio dinamiche, oltre a fornire una verifica del corretto funzionamento dell'impianto, in particolare in fase di collaudo funzionale per la messa in servizio.

Secondo l'analisi del modello fluidodinamico il transitorio di accensione dei ventilatori ha il medesimo andamento in condizioni ordinarie o di incendio simulato, tuttavia sono presenti alcune differenze.



Il transitorio di accensione termina dopo circa 4 minuti, infatti, da questo momento in poi la velocità dell'aria oscilla tra 2,66 e 2,86 m/s.



I valori massimi e minimi dei transitori sono differenti a causa dell'aria che l'incendio richiama dall'esterno della galleria, di conseguenza la velocità massima è maggiore di circa 0,15 m/s rispetto al caso in condizioni ordinarie. Il transitorio di accensione in condizioni ordinarie termina in 4 minuti e 40 secondi, pertanto risulta essere più lento rispetto al caso di incendio. Inoltre, in condizioni ordinarie è evidente che nei primi 90 secondi l'aumento della velocità procede senza oscillazioni osservabili, mentre nel caso di incendio la maggiore turbolenza dell'aria determina fluttuazioni maggiori durante tutto il transitorio.

Il caso specifico per cui è stata svolta l'analisi termofluidodinamica ha mostrato quindi che, nella galleria Ramat, i prodotti della combustione dovrebbero essere espulsi correttamente dal sistema di ventilazione, anche nel caso in cui una coppia di jet fan non funzioni (a causa della prossimità dell'incendio). Pertanto, le simulazioni svolte hanno verificato quanto ottenuto dai calcoli preliminari, cioè che 18 jet fan siano in grado di espellere i fumi generati.

L'impiego di un modello CFD della galleria, mono-dimensionale o tri-dimensionale, tarato sui dati reali consente al gestore della galleria di valutare le prestazioni dell'impianto in diverse condizioni di esercizio, quali ad esempio condizioni meteo estreme o malfunzionamento di alcuni ventilatori. Lo scopo di una verifica di questo tipo è definire eventuali misure di sicurezza integrative o interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria.

7. Bibliografia e sitografia

- [1] Małgorzata Król, Aleksander Król, Piotr Koper, Paweł Wrona, 2017. Full scale measurements of the operation of fire ventilation in a road tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* 70, 204–213.
- [2] Małgorzata Król, Aleksander Król, Piotr Koper, Paweł Wrona, 2017. Numerical modeling of air velocity distribution in a road tunnel with a longitudinal ventilation system. *Tunnelling and Underground Space Technology* 91.
- [3] Steinemann U., Zumsteg F., 2004. Measurements of air flow, temperature differences and pressure differences in road tunnels. 1st International Conference ‘Tunnel Safety and Ventilation’ 220-226.
- [4] M. Beyer, P.J. Sturm, M. Saurwein, M. Bacher, 2016. Evaluation of jet fan performance in tunnels. 8th International conference ‘Tunnel Safety and Ventilation’ 298-315.
- [5] Xu Wang, Mingnian Wang, Li Yu, Yuan Tian, Guanfeng Yan, 2019. Influence of humidity and salt-rich spray environment on ventilation effect in urban undersea road tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* 94.
- [6] www.lsi-lastem.com
- [7] www.flowkinetics.com
- [8] www.gillinstruments.com
- [9] Yaozhuang Li, Tao Chen, Zhisheng Xu, Jie Kong, Mengqi Wang, Chuangang Fan, 2019. Influence of winding wall on the entrainment characteristics of air jet in curved road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 90, 330-339.
- [10] Haukur Ingason, Ying Zhen Li, Anders Lönnemark, 2015. *Tunnel fire dynamics*. Springer.
- [11] František Schlosser, Martin Rázga, Peter Danišovic, 2014. Risk analysis in road tunnels. *Procedia engineering* 91, 469-474.
- [12] Technical committee D.5 Road tunnels, 2019. Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation. PIARC.

[13] Ingo Riess, Daniel Weber, Michael Steck, 2020. On the air-flow resistance of tunnel fires in longitudinal ventilation - the "Throttling Effect". Virtual conference 'Tunnel Safety and Ventilation'.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il mio relatore Vittorio Verda, il mio tutor aziendale Sara Cosentino e l'ingegnere Luca Stantero per il supporto ricevuto nello sviluppo di questo progetto.