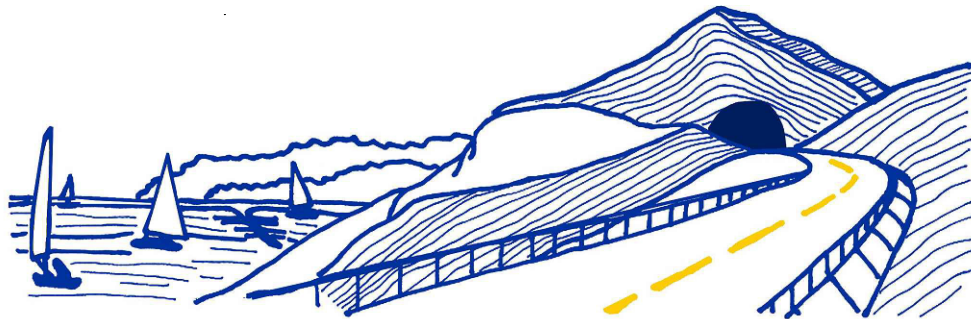


**VARIANTE ALLA S.S.1 AURELIA (AURELIA BIS)
VIABILITA' DI ACCESSO ALL' HUB PORTUALE DI LA SPEZIA
INTERCONNESSIONE TRA I CASELLI DELLA A-12 E IL PORTO DI LA SPEZIA
3° LOTTO TRA FELETTINO E IL RACCORDO AUTOSTRADALE**

PROGETTO ESECUTIVO DI STRALCIO E COMPLETAMENTO C - 3° TRATTO

PROGETTO ESECUTIVO

GE265



VISTO: IL RESPONSABILE
DEL PROCEDIMENTO

Ing. Fabrizio CARDONE

RESPONSABILE
DELL'INTEGRAZIONE DELLE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Alessandro RODINO

PROGETTISTA SPECIALISTA



Ing. Paolo Alberto COLETTI

IL COORDINATORE DELLA
SICUREZZA IN FASE DI
PROGETTAZIONE

Dott. Domenico TRIMBOLI

**IMPIANTI TECNOLOGICI
IMPIANTI MECCANICI
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTI DI VENTILAZIONE**

CODICE PROGETTO

NOME FILE

REVISIONE

SCALA:

PROGETTO LIV. PROG. N. PROG.

P00IM07IMPRES01_A

DPGE0265 E 20

CODICE ELAB. P00IM07IMPRES01

A

-

| | | | | | |
|------|-------------|------------|------------|-------------|------------|
| C | | | | | |
| B | | | | | |
| A | EMISSIONE | Marzo 2021 | F. Luraghi | G. Cassetti | D. Morgera |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO |

| INDICE | pag. |
|--|-------------|
| 1. PREMESSA | 1 |
| 2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO..... | 1 |
| 2.1 Prestazioni di progetto | 2 |
| 2.2 Dati di traffico | 3 |
| 2.1 Esercizio ordinario: ventilazione sanitaria..... | 3 |
| 2.1.1 Portate d'aria di rinnovo | 4 |
| 2.2 Esercizio in emergenza | 6 |
| 2.3 Caratterizzazione energetica della sorgente..... | 6 |
| 2.4 Caratterizzazione del flusso dei prodotti della combustione | 7 |
| 2.5 Modellizzazione del flusso del pericolo | 8 |
| 2.6 Modellazione di calcolo | 9 |
| 2.6.1 Modello di calcolo | 11 |
| 2.6.2 Condizioni ambientali in fase di esercizio..... | 12 |
| 2.7 Dotazioni di impianto | 12 |
| 2.8 Risultati di calcolo | 13 |
| 3. IMPIANTO DI RINNOVO ARIA E PRESSURIZZAZIONE DELLE VIE DI ESODO | 13 |
| 3.1 Obiettivi di sicurezza e raccomandazioni progettuali..... | 14 |
| 3.2 Criteri progettuali..... | 15 |
| 3.3 Dimensionamento dell'impianto..... | 16 |
| 3.3.1 Dimensionamento a porte chiuse..... | 16 |
| 3.3.2 Dimensionamento a porte aperte (v=0.75 m/s) | 19 |
| 3.4 Dimensionamento a porte aperte (v=2.00 m/s)..... | 19 |
| 3.5 Funzionamento del sistema di pressurizzazione delle vie di fuga | 19 |
| 3.6 Calcolo della forza di apertura porta..... | 20 |
| ALLEGATO DI CALCOLO: VENTILAZIONE SANITARIA..... | 21 |
| CHAPTER 1. CALCOLO PRODUZIONE INQUINANTI..... | 22 |
| CHAPTER 2. DATI GALLERIA | 25 |

| | |
|--|----|
| CHAPTER 3. RISULTATI | 27 |
| ALLEGATO DI CALCOLO: VENTILAZIONE DI EMERGENZA | 33 |

1. Premessa

Il presente documento tratta i sistemi di ventilazione installati a servizio della galleria Fornaci I, II, III, IV. La galleria presenta lunghezza complessiva del tratto coperto pari a circa 700 m ma ai fini della sicurezza e delle dotazioni minime di impianto si è considerata di lunghezza superiore a 1000 m. Pertanto, per la galleria, in accordo con il D.Lgs. 264/06 e con le Linee Guida ANAS per la Progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali, si è prevista l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica.

L'impianto di ventilazione meccanica è del tipo puramente longitudinale, realizzato mediante installazione di jet-fans reversibili sulla volta della galleria. L'impianto di ventilazione meccanica previsto per la galleria deve consentire, in tutti gli scenari di funzionamento:

- il controllo e la corretta diluizione degli inquinanti emessi dai veicoli circolanti all'interno della struttura, in caso di flussi di traffico normali ed intensi (picchi di traffico);
- il controllo degli stessi inquinanti in condizioni di arresto della circolazione per incidenti o anomalie sui flussi di traffico;
- il controllo del calore e del fumo prodotti in caso di incendio.

La galleria è servita da un sistema di vie di esodo in grado di garantire, in caso di emergenza, il deflusso in sicurezza delle persone coinvolte in un ipotetico evento incendio. Le vie di esodo sono realizzate mediante collegamenti pedonali (vani scala) al cunicolo di sicurezza ricavato sotto la sede stradale della galleria e mediante uscite dirette all'aperto. Il deflusso di esodo viene protetto all'interno del cunicolo e lungo le uscite di emergenza attraverso un'adeguata compartimentazione e mediante l'installazione di un filtro a prova di fumo.

2. Normativa di riferimento

Il principale riferimento normativo per la progettazione degli impianti tecnologici a servizio delle gallerie stradali è costituito dalla Direttiva Comunitaria 2004/54/CE e dal Decreto Legislativo 264/2006 che ne costituisce l'effettivo recepimento a livello nazionale.

A seguito dell'emanazione del Decreto Legislativo 264/2006, è stato redatto da parte dell'ANAS, un testo di "Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali" con lo scopo di uniformare a livello nazionale i metodi di progettazione in ambito stradale emanando un testo di raccomandazioni congruente con i dettami della direttiva europea.

Il testo redatto dall'ANAS riporta uno standard di progettazione per le gallerie di nuova costruzione, stabilendo le dotazioni impiantistiche più idonee ad assolvere il compito della salvaguardia degli utenti nei diversi scenari di funzionamento. La progettazione della nuova galleria in esame, si pone l'obiettivo di rispettare gli standard di progettazione ANAS per le nuove costruzioni, mirati alla realizzazione di sistemi efficaci e funzionali volti al rispetto delle prescrizioni di sicurezza da garantire per la salvaguardia degli utenti.

La normativa tecnica applicabile per gli impianti di ventilazione della galleria e per gli impianti di ventilazione e rinnovo aria nei luoghi sicuri è rappresentata dalle norme:

Leggi e Decreti

- Direttiva 2004/54/CE Relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della Rete

stradale transeuropea;

- D.Lgs. 264/06 - Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea;
- D.M. 30 Novembre 1983 - Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi;
- Testo coordinato del DM 03 agosto 2015 Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139 (Codice di Prevenzione Incendi).

Norme europee

- UNI EN 13501 - Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione;
- UNI EN 12101 - Sistemi per il controllo di fumo e calore.

Norme estere (applicabili come buona tecnica progettuale)

- Direttiva Svizzera: ASTRA 2004 - Ventilation des tunnels routiers – choix du système, dimensionnement et équipement;
- Direttiva Tedesca: RABT 2006 - Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln;
- Direttiva Francese: Circulaire interministérielle n° 2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national annexe n.2 instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation).

Sono da ritenersi validi ed applicabili tutti i riferimenti normativi espressamente richiamati nelle suddette norme. Inoltre, da sempre, nella progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali, si trae insegnamento dagli studi e dalle ricerche sviluppate negli anni nel corso dei grandi progetti europei ed americani. I risultati sono stati negli anni recepiti nelle legislazioni di quegli stati più sensibili ed interessati al tema della sicurezza antincendi in galleria e nelle linee guida emanate dall'Associazione mondiale della strada PIARC. I principali riferimenti cui oggi si affida il progettista nella progettazione della sicurezza antincendio in galleria sono:

- Road Tunnels: Operational Strategies for Emergency Ventilation PIARC Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation;
- Road and Transportation Research Association Working Group Traffic Routing and Road Safety. Regulations for the equipment and operation of road tunnels – RABT;
- Fire and Smoke Control In Road Tunnels - PIARC World Congress 1999;
- NFPA 502 - Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways.

2.1 Prestazioni di progetto

L'impianto di ventilazione di galleria deve assolvere a due compiti ben precisi:

- in condizione di funzionamento normale, deve assicurare il mantenimento del livello di inquinanti al di sotto delle soglie limite specificate;
- durante l'esercizio di emergenza in caso di incendio, deve garantire il salvataggio delle persone coinvolte nell'evento. In modo particolare deve controllare la diffusione dei fumi limitando l'estensione della sezione di galleria invasa dagli stessi e riducendo al minimo l'interazione con gli utenti coinvolti dall'evento.

Il sistema di ventilazione viene dimensionato, in esercizio normale, sulla base dei volumi di traffico effettivi, caratteristici della galleria, e sulla base delle stime più recenti delle emissioni dei veicoli. In esercizio di emergenza il dimensionamento dovrà garantire la dispersione dell'energia termica prodotta dal focolaio di incendio e il corretto controllo del moto dei fumi (e la diluizione delle sostanze tossiche ad essi associate).

2.2 Dati di traffico

I dati di traffico relativi alla galleria, desumibili dalle analisi previsionali, sono espressi in forma di valori medi di traffico orario e traffico giornaliero riferiti all'anno 2011; si trova:

- TGM = 25.000 uve/giorno (complessivi).

Considerando un tasso di crescita complessivo a 30 anni pari al 20% si trova il nuovo TGM di progetto che vale:

- TGM = 30.000 uve/giorno (complessivi).

Dalla percentuale media del traffico pesante fissata pari al 29% di si determina:

- TGM (VL) = 21.300 vei leggeri/giorno;
- TGM (VP) = 8.700 vei pesanti/giorno.

Il Traffico orario medio TOM è calcolato a partire dal TGM sulla base di una concentrazione oraria calcolata su 16 ore giornaliere.

- $TOM = TGM/16$.

Il traffico di punta TP è calcolato a partire dal TOM assunto un fattore di picco pari a 1.5; si trova:

- $TP = 1.2 \times TOM$.

2.1 Esercizio ordinario: ventilazione sanitaria

Il sottosistema ventilazione, in condizioni di esercizio ordinario, è preposto a:

- diluire gli inquinanti emessi dagli autoveicoli in ogni regime di traffico;
- diluire gli inquinanti emessi dagli autoveicoli in caso di arresto del traffico conseguente all'accadimento di un incidente non rilevante.

L'impianto di ventilazione deve mantenere la concentrazione degli inquinanti all'interno della struttura a livelli tali da non compromettere la visibilità e contenere la dose di inquinanti assunta dagli utenti. Il calcolo delle portate d'aria di rinnovo viene condotto sulla base dei possibili scenari "critici" di traffico, che possono verificarsi in galleria. Alla base dei calcoli stanno le considerazioni sopra riportate relativi ai valori di traffico utilizzati come caratteristici della rete viaria. Si sono considerati, ai fini del calcolo, gli scenari di traffico equivalenti:

- al flusso massimo veicolare ($v=60$ km/h);
- al flusso veicolare rallentato con velocità media pari a 10 km/h;
- alla densità massima di veicoli per km di galleria, equivalente alla condizione di traffico

bloccato.

Il reale flusso di veicoli viene calcolato a partire dalla composizione media del traffico veicolare e dalla tipologia prevalente di mezzi pesanti. Normalmente si assume un fattore convenzionale di conversione tra veicoli leggeri (VL) e pesanti (VP) pari a 3 e pertanto si considera la lunghezza convenzionale dei mezzi pesanti pari a 3 volte quella dei veicoli leggeri.

2.1.1 Portate d'aria di rinnovo

I valori limite per la concentrazione degli inquinanti, per diverse condizioni di flusso di traffico e per tipo di inquinante, sono stati desunti dalle raccomandazioni PIARC pubblicate in "Road tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation" – 2019 (prospetto che segue).

| Soglia di concentrazione degli inquinanti in galleria (PIARC) | | |
|---|----------|--|
| Condizioni di traffico | CO [ppm] | Opacità: coeffic. di estinzione [m-1] |
| fluido | 50 | 0,005 |
| congestionato | 70 | 0,007 |
| bloccato | 100 | 0,009 |

In accordo con le più recenti pubblicazioni PIARC sulle emissioni veicolari ed il controllo delle portate inquinanti in galleria, si può definire la portata d'aria di rinnovo in galleria in un dato scenario di traffico come legata in modo direttamente proporzionale ai seguenti tre fattori:

- Il numero di veicoli n_{vei} presente in galleria nello scenario considerato;
- Il fattore base di emissione medio Q del totale dei veicoli presente in galleria nello scenario considerato;
- L'inverso della differenza tra la concentrazione ammissibile C_{adm} di inquinante in galleria e quella di fondo presente in ambiente C_{amb} .

I tre fattori sono legati dalla relazione:

$$\dot{V} = n_{vei} \cdot Q \cdot \frac{1}{C_{adm} - C_{amb}}$$

dove il numero di veicoli n_{vei} può essere calcolato secondo la relazione:

- $n_{vei} = \frac{M \cdot L}{v}$ per $v > 0$ km/h;
- $n_{vei} = D \cdot L$ per $v = 0$ km/h.

dove:

- M rappresenta il traffico orario di riferimento per lo scenario considerato (vei/h/km);
- L la lunghezza della galleria (km);
- v la velocità media del flusso di traffico. Per traffico fermo nella relazione compare la densità veicolare massima D espressa in vei/km.

Il fattore base di emissione medio Q , riportato sulla pubblicazione PIARC di riferimento, esprime in forma di media pesata un fattore globale rappresentativo del parco veicoli circolante (paesi UE). Il fattore base viene quindi adeguato mediante l'utilizzo di un fattore di influenza precalcolato in funzione dell'evoluzione tecnologica e l'introduzione delle norme EURO sulle immatricolazioni dei nuovi veicoli. Risulta:

$$Q = Q_{(2010)} * f_t$$

dove il fattore di influenza f_t è diagrammato nell'allegato di calcolo.

In linea generale, il fattore base di emissione, riportato nei documenti PIARC, è fedele alla composizione media del parco veicoli circolante ed è riproducibile in via analitica, come media pesata, sulla composizione percentuale delle classi, dei singoli fattori basi di emissione. La composizione media del parco veicoli, circolante sull'asse viario interessato, può, con buona approssimazione, farsi coincidere con quello Nazionale ed in ragione di ciò viene confermata l'adottabilità dei dati PIARC di riferimento.

I dati sulla tipologia e composizione media del traffico sono estratti dall'Annuario statistico dell'Automobil Club d'Italia (ACI2020 – riferito all'anno 2019) alla data di progetto.

CONSISTENZA PARCO AUTOVETTURE SECONDO L'ALIMENTAZIONE E LA CILINDRATA AL 31/12/2019

| Regione | fino 800 | 801-1200 | 1201-1600 | 1601-1800 | 1801-2000 | 2001-2500 | 2501-3000 | altro | TOTALE |
|-----------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|---------------|-------------------|
| Liguria | 2,99% | 23,36% | 50,70% | 3,27% | 14,01% | 3,57% | 2,06% | 0,04% | 100,00% |
| | 25.259 | 197.544 | 428.722 | 27.673 | 118.493 | 30.167 | 17.425 | 319 | 845.602 |
| Altre | 9 | 5 | | | | | | | 14 |
| Benzina | 22.759 | 186.570 | 219.182 | 9.498 | 14.766 | 1.893 | 1.679 | 2 | 459.439 |
| Benzina/GPL | 1.078 | 5.965 | 20.473 | 679 | 1.523 | 239 | 106 | 4 | 30.335 |
| Benzina/Metano | 12 | 2.869 | 5.832 | 89 | 215 | 29 | 11 | | 9.064 |
| Elettricità | | | 1 | | | 1 | | 307 | 309 |
| Gasolio | 1.384 | 2.083 | 179.052 | 15.788 | 101.463 | 27.439 | 11.177 | 1 | 339.284 |
| Ibrido Benzina | 17 | 49 | 4.113 | 1.619 | 334 | 557 | 40 | | 6.795 |
| Ibrido Gasolio | | | 67 | | 190 | 9 | 82 | | 350 |
| Non Definito | | 3 | 2 | | 2 | | | 5 | 12 |
| Dato Nazionale | 1.238.318 | 8.075.703 | 19.941.717 | 1.628.839 | 6.199.881 | 1.536.145 | 896.075 | 28.554 | 39.545.232 |
| | 3,13% | 20,42% | 50,43% | 4,12% | 15,68% | 3,88% | 2,27% | 0,07% | 100,00% |

CONSISTENZA PARCO AUTOCARRI MERCI SECONDO L'ALIMENTAZIONE E IL PTT AL 31/12/2019

| Regione | fino 2,5 | 2,6-3,5 | 3,6-7,5 | 7,6-12 | 12,1-14 | 14,1-16 | 16,1-32 | oltre 32 | Altro | TOTALE |
|----------------|---------------|---------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|-----------|-----------|---------------|
| Liguria | 50,78% | 40,82% | 2,88% | 1,72% | 0,44% | 0,63% | 2,70% | 0,01% | 0,03% | 100,00% |
| | 43.797 | 35.206 | 2.480 | 1.480 | 382 | 541 | 2.333 | 12 | 24 | 86.255 |
| Altre | 1 | | | | | | | | | 1 |
| Benzina | 9.671 | 188 | 32 | 10 | 6 | 1 | 4 | | 1 | 9.913 |
| Benzina/GPL | 1.469 | 117 | 3 | 2 | 1 | | 1 | | | 1.593 |
| Benzina/Metano | 760 | 56 | 2 | | | | | | | 818 |
| Elettricità | 153 | 12 | | | | | | | | 165 |
| Gasolio | 31.729 | 34.822 | 2.443 | 1.468 | 375 | 540 | 2.328 | 12 | 23 | 73.740 |
| Ibrido Benzina | 12 | 1 | | | | | | | | 13 |
| Ibrido Gasolio | 1 | 10 | | | | | | | | 11 |
| Non Definito | 1 | | | | | | | | | 1 |

| Regione | fino 2,5 | 2,6-3,5 | 3,6-7,5 | 7,6-12 | 12,1-14 | 14,1-16 | 16,1-32 | oltre 32 | Altro | TOTALE |
|-----------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|--------------|--------------|------------------|
| Liguria | 50,78% | 40,82% | 2,88% | 1,72% | 0,44% | 0,63% | 2,70% | 0,01% | 0,03% | 100,00% |
| Dato nazionale | 1.782.826 | 1.875.694 | 167.443 | 110.261 | 18.985 | 26.855 | 192.493 | 1.213 | 2.296 | 4.178.066 |
| | 42,67% | 44,89% | 4,01% | 2,64% | 0,45% | 0,64% | 4,61% | 0,03% | 0,05% | 100,00% |

2.2 Esercizio in emergenza

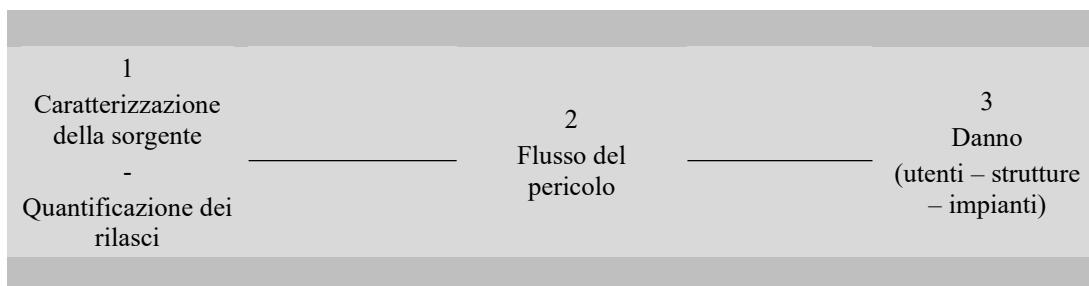
La condizione di esercizio più gravosa per l'impianto di ventilazione è rappresentata dalla presenza di un focolaio di incendio in galleria. L'impianto di ventilazione è infatti, uno dei principali componenti impiantistici per la gestione degli effetti generati dall'evento incendio. Deve essere dimensionato per controllare l'evacuazione dei fumi, consentire l'autosoccorso degli utenti e permettere l'intervento dei soccorritori in sicurezza. Riassumendo, gli obiettivi di sicurezza che devono essere garantiti da un sistema di ventilazione possono essere così sintetizzati:

- assicurare la diluizione delle emissioni dei veicoli all'interno della galleria in condizioni di esercizio così che siano garantite idonee condizioni di salubrità dell'aria ed il comfort visivo degli utenti;
- assicurare la gestione ed il controllo degli eventi incidentali possibili in galleria, individuati come critici dalla legislazione vigente, assicurare la compatibilità ambientale della struttura.

Il D.Lgs. 264/06 identifica come eventi critici per una galleria stradale:

- collisioni seguite da incendio dei veicoli coinvolti;
- incendi dei veicoli;
- rilasci in fase liquida (sversamenti) di sostanze infiammabili;
- rilasci in fase gassosa di sostanze tossiche e nocive.

Il dimensionamento del sistema di ventilazione in condizioni di emergenza richiede la simulazione degli scenari di pericolo possibili in galleria generati dall'accadimento di eventi critici. Il successivo schema logico sintetizza le fasi in cui si articola la procedura di modellazione degli scenari di pericolo in una galleria. Essa è finalizzata alla determinazione delle conseguenze sulla popolazione esposta al flusso del pericolo rappresentato dai fenomeni fisico-chimici pericolosi indotti dagli eventi critici.



2.3 Caratterizzazione energetica della sorgente

Essa è finalizzata alla determinazione delle conseguenze sulla popolazione esposta al flusso del pericolo rappresentato dai fenomeni fisico-chimici pericolosi indotti dagli eventi critici.

La potenza termica generata da un focolaio costituito da autoveicoli può essere stimata a partire dall'energia posseduta dal combustibile attraverso relazioni di tipo empirico. I risultati di tali relazioni sono riassumibili nel prospetto che segue (estratto Linee Guida ANAS - 2009) dove:

- E è l'energia attribuita ai singoli componenti costituenti il focolaio;
- PT è l'energia complessiva attribuita al focolaio;
- Q è la potenza massima generata dal focolaio.

| Veicolo | Tipologia | Energia - MJ | PT- MJ | Q - MW |
|--------------------|-----------------------------------|--------------|---------|--------|
| Veicolo da turismo | Piccolo | 6.000 | | |
| | Grande | 12.000 | 18.000 | 8 |
| Furgone carico | Allestimento | 9.000 | | |
| | prodotti cellullosici | 24.000 | 33.000 | |
| | liquido infiammabile | 54.000 | 63.000 | 15 |
| Veicolo pesante | Motrice | 7.000 | | |
| | Semi-rimorchio | 25.000 | | |
| | Combustibile autotrazione (500 l) | 18.000 | 50.000 | 30 |
| Carico | prodotti cellullosici | 280.000 | 330.000 | |
| | liquido infiammabile | 400.000 | 450.000 | 100 |

La potenza totale generata dal focolaio è comprensiva della componente convettiva e della componente radiativa. La componente radiativa può essere assunta, in prima approssimazione, pari al 30% della potenza massima. Le Linee Guida ANAS raccomandano che il dimensionamento del sistema di ventilazione sia condotto sulla base delle risultanze ottenute dalla simulazione di un numero finito, ma rappresentativo, di scenari di incendio possibili in galleria. Il modello, utilizzato per la verifica di calcolo, ha per oggetto la determinazione della spinta totale richiesta al sistema di ventilazione. La spinta è data dal prodotto della somma delle cadute di pressione e degli effetti di resistenza al moto dell'aria in galleria per il valore della sua sezione trasversale netta (metodologia descritta nel dettaglio nei successivi paragrafi).

2.4 Caratterizzazione del flusso dei prodotti della combustione

La velocità critica si assume dipenda da:

- componente convettiva della potenza termica generata dal focolaio;
- pendenza della galleria;
- sezione trasversale della galleria.

La stima della velocità critica nella pratica ingegneristica è effettuata risolvendo per via iterativa le seguenti relazioni accoppiate:

$$V_c = 0.61 \cdot k_p \left(\frac{g Q_c H}{\rho_a c_p T_f} \right)^{1/3}$$

$$T_f = T_a + \frac{Q_c}{\rho_a c_p A \cdot V_c}$$

dove:

- k_p è un coefficiente attraverso il quale si tiene conto della pendenza della galleria. Il coefficiente empirico introdotto assume i seguenti valori: $k_p = 1,0$ (0%) / $1,23$ (10%).

La velocità critica può essere altresì stimata dalla relazione:

$$V_c = \begin{cases} v_* \sqrt{gH} \left(\frac{Q_*}{Q_0} \right)^{1/3} & \text{se}(Q_* < Q_0) \\ v_* \sqrt{gH} & \text{se}(Q_* > Q_0) \end{cases}$$

con:

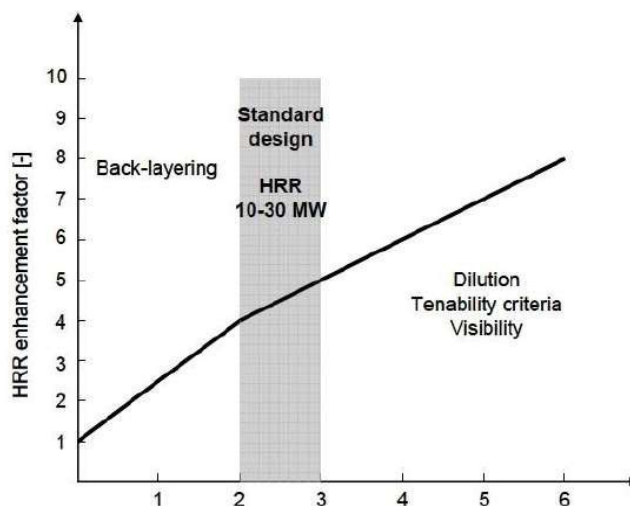
- $Q_0 = 0.12$
- $0.22 < v_* < 0.38$

$$Q_* = \frac{Q_c}{\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot g^{1/2} \cdot H^{5/2}}$$

dove:

- ρ_a , c_p , T_a rappresentano, rispettivamente, la densità, il calore specifico a pressione costante, la temperatura dell'aria in galleria;
- g è l'accelerazione di gravità;
- H è l'altezza della galleria.

La figura che segue esemplifica l'effetto della velocità del flusso d'aria in galleria sulla dinamica del focolaio ed evidenzia come essa possa modificare in modo sostanziale il flusso del pericolo all'interno della struttura.



2.5 Modellizzazione del flusso del pericolo

Il profilo di temperatura all'interno di una galleria, interessata da un evento di incendio, può essere determinato introducendo il modello di scambiatore di calore equivalente. L'evoluzione longitudinale della temperatura della miscela aria-fumi sottovento al focolaio può essere stimata attraverso la seguente relazione:

$$T_f(x, t) = T_a + [T_{f0}(\tau) - T_a] \left(\frac{hPx}{\rho_a c_p uA} \right)$$

con:

$$T_{f0}(\tau) = T_a + \frac{0.7 \cdot Q(\tau)}{\rho_a c_p u A}$$

$$\tau = t - \frac{x}{u}$$

La formula introdotta per il calcolo della temperatura della miscela aria-fumi in posizioni diverse all'interno della galleria ed in istanti diversi, stante la dipendenza esplicita dalla potenza termica generata dal focolaio fa sì che la temperatura della miscela debba essere considerata una grandezza stocastica. La variabile spaziale, che individua la sezione in corrispondenza della quale è valutata la temperatura della miscela, risulta essa stessa una grandezza stocastica in quanto la posizione del focolaio è per sua natura aleatoria.

2.6 Modellazione di calcolo

Il ricorso alla fluidodinamica computerizzata richiede, in genere, tempi e costi di calcolo ingenti e spesso, può essere utile, anche in relazione alla tipologia dei risultati attesi, fare ricorso a modellazioni semplificate. Nel caso specifico, un modello di simulazione 2D, denominato FAST2D applicato al contesto galleria è stato sviluppato con il fine di verificare la congruità delle misure di ventilazione proposte per la gestione degli scenari di incendio.

Nello specifico, la modellazione 2D consente di verificare il comportamento atteso nella propagazione dei fumi a seguito dell'applicazione delle metodologie di gestione adottate con particolare riferimento a velocità di progetto e tempi di regolazione. Il modello di calcolo semplificato consente un'analisi qualitativa puntuale dello scenario osservato evidenziando eventuali criticità relativamente a propagazione dei fumi, mantenimento della stratificazione e distribuzione delle temperature.

Affinché i risultati della modellazione semplificata possano ritenersi congrui con gli scenari analizzati è fondamentale che venga preliminarmente verificata la capacità del sistema di far fronte, in termini di spinta e potenza totale installata, alla gestione proposta. Per questo, la modellazione 2D proposta prevede una subroutine di verifica prestazionale dell'impianto in presenza di un definito scenario di incendio di progetto. L'analisi di calcolo prevede che lo scenario di incendio possa diversificarsi per:

- potenze di riferimento;
- progressive di incendio - 5 per fornici equamente distribuite (tra le progressive chilometriche limite poste a 100 m dai portali);
- condizioni di ventilazione iniziale (valori compresi tra -3 e +2 m/s);
- condizioni al contorno (scambio termico di parete);
- caratteristiche geometriche e fisiche della galleria (geometria, nr. corsie, altezza libera volta, altimetria e pendenza del tracciato);
- tipologia/composizione del traffico presente/previsto (unidirezionalità/bidirezionalità – percentuali veicoli pesanti - formulazione delle perdite di pressione per effetto pistone);
- tempi di composizione della coda in relazione alla tipologia di traffico presente ed alle misure gestionali di sicurezza previste (chiusura tunnel – barriere – semafori);
- tipologia e prestazioni degli impianti di ventilazione installati (spinta nominale, dati aeraulici e coefficiente di installazione).

Nello specifico l'analisi condotta, in accordo con i valori e le grandezze di riferimento

adottate in sede di progetto (vedi paragrafo successivo), ha previsto la modellazione di scenari di incendio caratterizzati da:

- presenza di un focolaio all'interno della galleria e regime di ventilazione in direzione Sud (discesa);
- progressive di incendio pari a 100 m, 211 m, 323 m, 434 m, 545 m dal portale Nord;
- potenza massima rilasciata dal focolaio di 30 MW;
- andamento della curva di rilascio termico caratterizzata da:
 - durata totale pari a 2 h;
 - tempo di picco pari a 600 s
 - tasso di crescita con andamento quadratico;
 - permanenza a picco 3600 s;
 - decadimento lineare (a zero) in 3000 s.
- frazione radiativa di incendio (quota parte del calore rilasciato dall'incendio e ceduto direttamente alle pareti e alla volta della galleria per irraggiamento – solo prossimità del focolaio) pari a 30%;
- condizioni di isoterma di parete per incrementare l'effetto di raffreddamento dei fumi per scambio convettivo con le pareti e la volta della galleria (ragionevole se commisurato al tempo di analisi (< 30 minuti);
- condizioni di ventilazione iniziale ponderati sulla variabilità del traffico (diurno/notturno); in particolare è prevista l'analisi degli scenari diurni ad elevato traffico (valori punta TP) e velocità iniziali positive (1 – 2 m/s - velocità superiori non richiedono attivazione dell'impianto di ventilazione) e di quelli notturni a traffico ridotto e velocità iniziali negative (valori compresi tra -3 e 0 m/s);
- composizione del traffico come da riferimento progettuale;
- prestazioni dell'impianto di ventilazione come da progetto.

Il codice prevede l'esportazione dei risultati in forma grafica e numerica riportando per ogni progressiva di incendio sopra definita un prospetto contenente:

- l'andamento, nel tempo, delle pressioni richieste nei diversi regimi di ventilazione iniziale;
- l'andamento, nel tempo, del numero di jet-fans richiesto per il più gravoso degli scenari calcolato come funzione della differenza di pressione richiesta e dell'efficienza attesa dell'impianto (installazione, velocità residua di ventilazione naturale, temperature/densità fumi);
- l'andamento, nel tempo, delle velocità regolate secondo il modello di sicurezza proposto.

La curva rappresentata in rosso nel grafico centrale (vedi allegato di calcolo) costituisce quindi il risultato dell'analisi di dimensionamento dell'impianto di ventilazione; in particolare, è riportato a lato di ogni grafico, il risultato numerico relativo al numero massimo calcolato di jet-fan richiesti per far fronte alla ventilazione di tutti gli scenari analizzati (per singola progressiva di incendio).

A completamento dell'analisi, nel grafico delle velocità, sono riportate anche le velocità critiche calcolate per lo scenario di riferimento, in accordo con quanto definito nei paragrafi precedenti.

2.6.1 Modello di calcolo

Il modello di calcolo contenuto nell'applicativo FAST2D consente come detto la verifica, per gli scenari di incendio, della spinta totale richiesta al sistema di ventilazione. La spinta è data dal prodotto della somma delle cadute di pressione e degli effetti di resistenza al moto dell'aria in galleria per il valore della sua sezione trasversale netta. I contributi di caduta di pressione e resistenza al moto dell'aria possono essere calcolati come nella formulazione che segue:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_f + \Delta p_{vei} + \Delta p_{mc} + \Delta p_{fuoco} + \Delta p_{camino}$$

Ricordando che la spinta totale è definita come:

$$S = \Delta p_{tot} \cdot A$$

Si determina, per ogni scenario, il numero di jet-fans necessari per il corretto funzionamento del sistema mediante la:

$$N_{jf} = \frac{S}{S_{jf}}$$

dove con S_{jf} si intende la spinta netta prodotta da ciascun jet-fan installato in galleria. Nell'analisi dei fattori che compongono la caduta di pressione totale del sistema si possono definire:

- Le perdite per attrito: sono le perdite prodotte sull'aria, per effetto del suo moto, dalla presenza delle pareti e della volta della galleria. La galleria può essere considerata come un tubo ad elevata scabrezza di diametro uguale al diametro idraulico. Sono calcolate considerando un coefficiente di attrito parietale costante funzione della sola scabrezza relativa della galleria.
- La resistenza prodotta dal moto dei veicoli: è l'effetto pistone prodotto dai veicoli presenti in galleria ed esposti al flusso d'aria di ventilazione. Vengono calcolate considerando le aree resistenti per le diverse categorie di veicoli suggerite dal PIARC. La resistenza opposta al moto dell'aria si tramuta in effetto utile quando la velocità media di percorrenza dei veicoli è concorde e superiore alla componente longitudinale di velocità dell'aria. Generalizzando, si può affermare che, a prescindere dalle condizioni al contorno della galleria (pressioni e temperature ai portali):
 - per velocità del traffico superiori a 15 km/h e concordi con la direzione del flusso di ventilazione, l'effetto pistone produce un effetto utile di spinta sull'aria che è causa di un aumento di velocità;
 - per traffico fortemente rallentato o bloccato o in presenza di flussi bidirezionali compensati, la componente di spinta viene meno e la presenza dei veicoli lungo la galleria è responsabile di un'ostruzione al moto dell'aria al suo interno.
- Gli effetti meteo-climatici: sono le condizioni al contorno della galleria dovute alla presenza di vento o di differenze di tipo climatico (pressione e temperatura) ai portali. Si può, in via generale, affermare che:
 - le temperature all'interno della galleria si mantengono generalmente intorno ad un valore costante durante tutto l'arco dell'anno e questo valore è qualche grado superiore alla temperatura media annuale di riferimento esterna;
 - a generare flussi di ventilazione naturale sono le differenze e le fluttuazioni di temperatura che si verificano tra l'interno e l'esterno della galleria. Le

differenze di temperatura danno vita ad una spinta sull'aria che si muove in galleria come equilibrio delle distribuzioni di pressione al contorno;

- a generare il moto dell'aria è l'effetto camino prodotto dalle differenze di densità prodotte dalle diverse condizioni di temperatura. Per calcolare l'effetto di moto, in via del tutto cautelativa, è bene considerare il valore massimo delle differenze di temperatura (per assicurare sempre il corretto funzionamento dei sistemi di ventilazione);
 - il valore massimo della differenza di temperatura può essere stimato, in assenza di dati precisi, secondo una metodologia riconosciuta a livello internazionale, come 1 °C ogni 450 m di lunghezza della galleria.
 - Ai fini della definizione delle cadute di pressione dovute agli effetti meteo-climatici al contorno della galleria, si considerano i valori di progetto riportati nel successivo paragrafo.
- Caduta di pressione dovuta al fuoco: è la caduta che si genera sul flusso di ventilazione per la presenza del focolaio, a causa dell'incremento di turbolenza e accelerazione che viene a crearsi sul flusso;
 - Effetto camino: è l'effetto di spinta generato sul flusso d'aria di ventilazione dalle spinte di galleggiamento prodotte per effetto delle differenze di densità tra zona calda e fredda della galleria. Per un tratto di galleria di lunghezza L e pendenza i, in presenza di fumi caldi a temperatura T, l'espressione dell'effetto camino si può scrivere come:

$$\Delta p_{\text{camino}} = -(\rho - \rho_0) \cdot g \cdot L \cdot i$$

dove con ρ e ρ_0 si indicano le densità dell'aria in galleria alla temperatura T e di quella esterna alla temperatura ambiente.

2.6.2 Condizioni ambientali in fase di esercizio

L'effetto meteorologico caratteristico della zona in cui si trova la galleria è stato sintetizzato considerando nel dimensionamento e nelle verifiche una differenza di pressione tra i portali pari a 30 Pa, effetto che si considera sempre opposto alla normale direzione di spinta dei ventilatori e genera all'interno della galleria un flusso d'aria opposto al flusso generato dagli stessi. La contropressione meteo è stata determinata sulla base delle valutazioni relative a:

- Contropressione meteo – è stata ipotizzata una contropressione meteorologica di 25 Pa per effetto della differente azione dei venti sui portali della galleria;
- Contropressione per effetto camino in galleria – ipotizzata pari a 5 Pa.

2.7 Dotazioni di impianto

I principali dati tecnici dei jet-fans, in termini di prestazioni aerauliche, sono riportati nel prospetto che segue.

| Caratteristiche jet-fans 1000mm | | | | |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|------------------------|
| Diametro girante [mm] | Portata [mc/s] | Velocità [m/s] | Spinta [N] | Pot. meccanica [kW] |
| 1.000 | 24,0 | 30,5 | 900 | 27 |

| Caratteristiche jet-fans 710mm | | | | |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|------------------------|
| Diametro girante [mm] | Portata [mc/s] | Velocità [m/s] | Spinta [N] | Pot. meccanica [kW] |
| 710 | 15,2 | 38,4 | 700 | 25 |

I jet-fans con girante paria a 710mm sono previsti all'interno delle gallerie naturali Le Fornaci II, III e IV aventi sezioni minori, i jet-fans con girante pari a 1000mm sono previsti all'interno della galleria Le Fornaci I, disposti a coppie con passo pari a circa 130m.

Si ricorda che le prestazioni aerauliche di progetto si riferiscono al ventilatore completo di tutti gli accessori necessari al corretto funzionamento. I dati riportati sopra sono stati utilizzati per il calcolo e si riferiscono a prestazioni minime inderogabili per ciascun ventilatore, in esercizio, pena l'invalidità dei risultati di calcolo di seguito riportati.

È bene considerare che le spinte nominali dichiarate si riferiscono ad un funzionamento in aria libera del ventilatore e nelle condizioni standard di pressione e temperatura (densità di riferimento). Nel calcolo della spinta reale prodotta da ciascun ventilatore si è tenuto in considerazione del:

- rendimento di spinta legato alla presenza in galleria di una velocità residua del flusso d'aria di ventilazione; all'aumentare della velocità dell'aria in galleria decresce la spinta prodotta dal ventilatore secondo la formula;
- rendimento di installazione legato all'influenza sulla spinta prodotta data dalla presenza delle pareti vicine al ventilatore; è funzione del rapporto tra la distanza asse ventilatore-parete (parete o volta sulla quale è installato il jet-fan);
- fattore di spinta legato alla densità dell'aria che decresce con l'altitudine della galleria (diminuisce la pressione atmosferica) e con la temperatura dell'aria (fattore di spinta unitario per valori di densità dell'aria superiori a 1.0 kg/mc).

2.8 Risultati di calcolo

Nell'allegato alla presente relazione, sono riportati i risultati del modello di calcolo descritto, sia in condizioni di esercizio normale che di esercizio in emergenza.

Ai fini della corretta ventilazione in tutti gli scenari di esercizio è richiesta l'installazione di 12 ventilatori di cui:

- 6 ventilatori con girante pari a 1000mm;
- 6 ventilatori con girante pari a 710mm.

La disposizione dei ventilatori lungo la galleria è riportata all'interno dell'elaborato: P00IM07IMPPL01.

3. Impianto di rinnovo aria e pressurizzazione delle vie di esodo

Il sistema di vie di esodo previsto per la galleria è realizzato a mezzo di vani scala e di camminamenti pedonali protetti. I camminamenti pedonali sono realizzati mediante l'installazione di un cunicolo di sicurezza ricavato sotto la sede stradale della galleria. I vani scala collegano la galleria al cunicolo, consentendo il deflusso delle persone verso i luoghi sicuri o aperti (a cielo libero). Il cunicolo di emergenza si sviluppa a partire dall'imbocco nord fino alla progressiva 3685.00, dove è prevista l'uscita di sicurezza verso l'esterno della

galleria attraverso la zona filtro, il vano scala e il cunicolo.

I vani scala sono costituiti da un locale filtro e da un vano scala vero e proprio aperto e comunicante direttamente con il cunicolo o con lo spazio a cielo libero (nel caso dell'uscita diretta all'aperto alla progressiva 3988.00. Il filtro separa la galleria dai percorsi sicuri attraverso una doppia compartimentazione REI 120.

Le condizioni di sicurezza degli utenti che hanno accesso ai luoghi sicuri sono assicurate da un impianto di ventilazione dedicato. L'impianto assolverà i compiti descritti nel dettaglio nei paragrafi successivi ed in particolare dovrà mantenere le strutture libere da fumi ed in sovrappressione rispetto alla galleria. Per la pressurizzazione delle uscite di emergenza e delle relative zone filtro è previsto un sistema di ventilazione locale installato sulle pareti divisorie delle zone filtro.

3.1 Obiettivi di sicurezza e raccomandazioni progettuali

Nel presente paragrafo vengono definiti i parametri caratteristici dei sistemi di sicurezza delle gallerie adibiti a via di fuga protetta. Riprendendo dalle "Linee Guida per la Progettazione della Sicurezza nelle Gallerie Stradali" redatte dall'ente ANAS si forniscono a seguire alcune utili definizioni e raccomandazioni per la progettazione:

- Una *via di fuga* è una zona destinata all'esodo sufficientemente illuminata, separata dalla galleria mediante strutture e porte caratterizzate da un grado di protezione REI 120;
- Una *via di fuga protetta* è una zona destinata all'esodo delle persone sufficientemente illuminata, mantenuta libera da fumi ed in sovrappressione rispetto alla galleria mediante ventilazione naturale o forzata e separata dalla galleria mediante strutture e porte caratterizzate da un grado di protezione REI 120;
- Un *luogo sicuro temporaneo* è un luogo di stazionamento costituito da una zona separata fisicamente mediante una zona filtro a prova di fumo rispetto alla canna incidentata, in grado di ospitare in condizioni di sicurezza un numero di persone fissate per un intervallo di tempo limitato e comunque non inferiore a 30 minuti, collegato ad una via di fuga verso l'esterno. Le condizioni di sicurezza degli utenti che in esso stazionano devono essere assicurate da un impianto di ventilazione dedicato capace di immettere aria direttamente dall'esterno della galleria.

Le stesse LINEE GUIDA, riprendendo dal D.M. 30 novembre 1983 *Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi*, e oggi anche dal Codice di Prevenzione Incendi D.M. 3 Agosto 2005, definiscono *zona filtro* a prova di fumo un vano delimitato da strutture con resistenza REI predeterminata e comunque non inferiore a 60 minuti, dotato di due o più porte munite di congegno di autochiusura con resistenza al fuoco REI predeterminata e comunque non inferiore a 60 minuti con camino di ventilazione di sezione adeguata e comunque non inferiore a 0.10 mq sfociante al di sopra della copertura dell'edificio, oppure vano con medesime caratteristiche di resistenza al fuoco mantenuto in sovrappressione ad almeno 30 Pa, anche in condizioni di emergenza, oppure aerato direttamente verso l'esterno con aperture libere di superficie non inferiore ad 1 mq con esclusione dei condotti.

In accordo con le definizioni sopra riportate, il cunicolo di sicurezza, separato dalla galleria a mezzo di zone filtro compartimentate REI 120 rispetto alla galleria e mantenute in sovrappressione da un impianto di ventilazione dedicato, può classificarsi come vie di esodo protetta della galleria.

La creazione di una zona calma in sommità ai vani scala consente l'installazione dei sistemi di comunicazione con l'utenza (SOS) e dei presidi antincendio (Estintori).

L'accesso degli utenti alle vie di fuga deve essere garantito da apposite uscite di emergenza realizzate tramite un'apertura sull'involucro delle strutture stesse. Le porte delle uscite di emergenza, devono aprirsi sempre nella direzione dell'esodo e presentare, il medesimo grado di protezione della via di fuga alla quale consentono l'accesso (REI 120). Devono essere normalmente chiuse e dotate di dispositivo di autochiusura. La larghezza complessiva delle uscite di emergenza deve risultare non inferiore al valore determinato dalla seguente relazione:

$$L = A/50 \cdot 0.6 \text{ [m]}$$

dove:

- A è l'affollamento della zona servita dalla via di fuga in esame;
- 0.60 m è il modulo unitario di passaggio, vale a dire la larghezza necessaria e sufficiente a consentire il transito di una persona;
- 50 è il numero di persone che possono defluire attraverso il modulo unitario di passaggio in un tempo medio di evacuazione prefissato.

La larghezza delle porte di uscita di emergenza dovrà essere un multiplo di 0.6 m (con tolleranza del 5%). La larghezza di un'uscita non potrà comunque risultare inferiore a 0.8 m. Le linee Guida consigliano l'utilizzo di aperture realizzate con un modulo da 120 cm per gallerie a 2 corsie e volume di traffico compreso tra 2.000 e 12.000 vei/giorno/corsia e pertanto viene adottata tale misura per la configurazione delle porte di emergenza.

Il sistema di ventilazione preposto alla pressurizzazione ed al rinnovo d'aria del cunicolo di sicurezza e dei vani scala protetti deve garantire:

- il rinnovo d'aria all'interno del cunicolo lungo i camminamenti pedonali;
- la pressurizzazione della zona filtro rispetto alla canna incidentata al valore di almeno 30 Pa in condizioni di porte chiuse;
- una velocità del flusso d'aria in uscita dall'ambiente da proteggere (vano scala cunicolo) verso la galleria non inferiore a 0.75 m/s in condizioni di porte aperte, al fine di impedire l'ingresso dei fumi nella struttura protetta;
- una velocità del flusso d'aria in uscita dall'ambiente da proteggere (vano scala cunicolo) verso la galleria non inferiore a 2.00 m/s in condizioni di porte aperte al fine di consentire l'accesso alla canna incidentata dai luoghi sicuri agli addetti preposti allo spegnimento dell'incendio ed alle operazioni di soccorso (VV.F.).

Nel caso dell'uscita diretta all'esterno, presso l'uscita di sicurezza N.2, mediante vano scala protetto, il filtro sarà superiormente aerato con superficie minima pari a 0.20 m² e non mantenuto in sovrappressione, in accordo con i requisiti normativi sopra citati.

3.2 Criteri progettuali

In funzione degli scenari di funzionamento sopra descritti occorre eseguire il dimensionamento secondo i seguenti criteri:

- funzionamento a porte chiuse;

- funzionamento a porte aperte e velocità di 0.75 m/s sul varco pedonale;
- funzionamento a porte aperte e velocità di 2.00 m/s sul varco pedonale.

La pressurizzazione della via di fuga N.1 presso il cunicolo di emergenza è garantita mediante l'installazione di una coppia di ventilatori assiali sospesi in prossimità dei divisori di separazione tra i compartimenti zona filtro e cunicolo di sicurezza. L'aria di rinnovo dei filtri è prelavata dal cunicolo e a sua volta aspirata dall'esterno mediante due aperture di ventilazione ricavate sopra le uscite all'aperto del cunicolo stesso.

In modo dettagliato, il sistema di pressurizzazione locale delle vie di fuga comprende:

- due ventilatori assiali, diametro della girante pari a 560 mm;
- due silenziatori cilindrici per l'attenuazione del rumore;
- due griglie di protezione in aspirazione e mandata sui ventilatori;
- due serrande tagliafuoco rettangolari REI 120 (sul divisorio zona filtro-cunicolo/zona filtro-galleria);
- due serrande di sovrappressione a gravità regolabili con contrappeso tarato per evitare il ricircolo dell'aria in caso di funzionamento di un solo ventilatore (sul divisorio zona filtro-cunicolo/zona filtro-galleria).

I ventilatori sono installati in linea con i silenziatori e i diffusori, con aspirazione diretta sul cunicolo (vano scale). I salti di pressione tra cunicolo e zona filtro e tra zona filtro e galleria sono garantiti dall'installazione delle serrande di sovrappressione rettangolari; il ripristino della compartimentazione dei divisori, a forometrie ultimate, è ottenuta attraverso l'installazione, di serrande tagliafuoco REI 120. Le serrande sono del tipo a fusibile tarato a 72 [°C] e dotate di relativi finecorsa per la segnalazione dell'avvenuta apertura/chiusura.

3.3 Dimensionamento dell'impianto

3.3.1 Dimensionamento a porte chiuse

Al fine di determinare la portata del ventilatore atto a realizzare la sovrappressione di progetto, è necessario procedere al calcolo di dimensionamento come qui di seguito riportato. La portata totale QT del ventilatore è calcolabile come somma dei contributi di perdita prodotti da:

- Qp portata di deflusso attraverso le fessure delle porte (franco telaio/porta e porta/battuta) che si affacciano sul filtro;
- Qm portata di efflusso attraverso le micro fessure degli elementi di chiusura verticali del filtro (pareti);
- Qs portata di efflusso attraverso le micro fessure degli elementi di chiusura orizzontali del filtro (solai – pavimenti);
- Qw portata di efflusso attraverso serramenti, finestre o aperture di ventilazione.

La portata Qp definita come la portata di efflusso attraverso le porte chiuse del filtro è calcolabile, in accordo con il paragrafo A.1.4. – UNI EN12101-6 mediante la formulazione:

$$Q_p = 0.83 \cdot A_e \cdot \sqrt{P}$$

dove A_e è la sezione totale di deflusso in m^2 e P è la sovrappressione nominale del filtro (in

corrispondenza della bocca di mandata del ventilatore) in Pa.

Ai fini del calcolo della superficie totale delle aperture si considera la somma delle superfici apribili (più porte sulla stessa zona filtro – ai sensi della A.2.5. della norma UNI 12101-6). La superficie di efflusso di ciascuna porta è determinabile attraverso i valori del prospetto A.3 della norma. In particolare, per porte ad anta singola con apertura verso la zona pressurizzata (filtro) si trova $A = 0.01 \text{ m}^2$, mentre per porte ad anta singola con apertura verso la zona a pressione ridotta (cunicolo) si trova $A = 0.02 \text{ m}^2$. La Superficie totale di efflusso (2 porte) vale $A_e = 0.03 \text{ m}^2$ e pertanto risulta:

- Portata totale $Q_p = 0.176 \text{ m}^3/\text{s}$

La portata Q_m definita come la portata di efflusso attraverso le pareti del filtro è calcolabile mediante la:

$$Q_m = 0.83 \cdot A_e \cdot \sqrt{P}$$

in cui A_e è la sezione totale di deflusso in m^2 calcolabile come il prodotto tra la superficie totale delle pareti A_{wall} ed il rapporto di dispersione A_{LW}/A_{wall} . Il rapporto è indicato in funzione dello spessore della parete sul prospetto A.5 della UNI EN12101-6.

In particolare, risulta $A_{LW}/A_{\text{wall}} = 0.14 \cdot 10^{-4}$ e $A_e = 0.70 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ da cui:

- Portata totale $Q_m = 0.004 \text{ m}^3/\text{s}$

La portata Q_s definita come la portata di efflusso attraverso il pavimento ed il soffitto del filtro è da ritenersi trascurabile (strutture controterra).

La portata Q_w definita come la portata di efflusso attraverso le aperture di aerazione/ventilazione è calcolabile, sempre in accordo con il paragrafo A.1.4. – UNI EN12101-6 mediante la formulazione:

$$Q_w = 0.83 \cdot A_e \cdot \sqrt{P}$$

dove A_e è la sezione totale di deflusso in m^2 , P è la sovrappressione nominale del filtro in Pa.

Ai fini del calcolo della superficie totale delle aperture si considera la somma delle superfici nette di apertura delle serrande di sovrappressione installate sui divisori (verso la galleria).

Risulta $A = 0.25$ da cui si trova:

- Portata totale $Q_w = 1.467 \text{ m}^3/\text{s}$

La portata totale viene calcolata come somma dei tre fattori calcolati sopra e moltiplicata per un fattore maggiorativo di sicurezza pari a 1.2. Si procede al calcolo di QT, con la:

$$Q_T = (Q_p + Q_m + Q_s + Q_w) \cdot 1.2$$

Pertanto risulta:

- $Q_T = 1.98 \text{ m}^3/\text{s}$ ($7100 \text{ m}^3/\text{h}$)

Determinata la portata di progetto viene eseguito il dimensionamento del ventilatore in termini di pressione statica necessaria a realizzare la sovrappressione di progetto richiesta. La pressione statica del ventilatore (alla portata nominale) deve essere tale da compensare le cadute di pressione prodotte dal moto dell'aria all'interno del condotto di aspirazione più la pressione differenziale di progetto del filtro, secondo la:

$$\Delta p = \Delta p_c + 50 \text{ (Pa)}$$

Per il calcolo delle cadute di pressione si può utilizzare la formulazione generale di Bernoulli, dove il coefficiente di attrito f è espresso attraverso la formulazione di Colebrook-White:

$$\Delta p_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left(f \cdot \frac{L}{D} + \sum_i k_i \right)$$

dove:

- v è la velocità dell'aria nel condotto in m/s;
- D è il diametro del condotto di mandata dell'aria di ventilazione in m ($D = 0.5$ m pari al diametro ventilatore);
- ρ è la densità dell'aria in kg/m^3 ;
- L è la lunghezza del condotto in m.

La caduta di pressione sul flusso d'aria è direttamente proporzionale al quadrato della velocità dell'aria nel tratto di condotto considerato ed alla somma di due fattori, rispettivamente:

- Il prodotto del fattore di attrito f per il rapporto tra la lunghezza del tratto di condotto L ed il suo diametro D ;
- La sommatoria di tutti i coefficienti di perdita di carico concentrati k_i dovuti alle discontinuità geometriche presenti lungo il tratto di canale interessato (quali ad esempio innesti, curve, allargamenti e restringimenti, imbocchi...).

Il coefficiente di attrito adimensionale f è espresso, in regime di flusso pienamente sviluppato, mediante la:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} \right)$$

dove ε è la scabrezza superficiale delle pareti del condotto.

Per tubazioni di acciaio lisce la rugosità superficiale interna può essere fissata al valore di 0.5 mm; pertanto il fattore di attrito calcolato come sopra vale $f = 0.01$.

La sommatoria di tutti i coefficienti di perdita di carico concentrati k_i dovuti alle discontinuità geometriche presenti lungo il condotto (vedi prospetto che segue), vale a dire:

- nr. 1 imbocco con invito (boccaglio ventilatore $k = 0.4$);
- nr. 1 rete di protezione sull'imbocco ($k = 0.2$);
- nr. 1 sbocco senza invito (mandata ventilatori $k = 0.8$);
- nr. 2 serrande tagliafuoco/sovrapressione ($k = 0.2$);
- nr. 1 silenziatore ($k = 0.3$);

ammonta a $\sum k_i = 2.1$.

Il valore della perdita di pressione nel condotto vale:

$$\Delta p_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left(f \cdot \frac{L}{D} + \sum_i k_i \right) = \mathbf{135 \text{ Pa}}$$

La pressione statica del ventilatore (alla portata nominale) ammonta a:

$$- \Delta p = \Delta p_c + 50 = \mathbf{185 \text{ Pa}}$$

3.3.2 Dimensionamento a porte aperte ($v=0.75 \text{ m/s}$)

La portata Q definita come la portata di efflusso attraverso le porte aperte del locale è calcolabile mediante la:

$$Q = 0.75 \cdot A_p$$

in cui A_p è la sezione totale di deflusso in m^2 pari alla sezione netta del varco pedonale della via di esodo. Risulta che $A_p = 2.58 \text{ m}^2$ e che:

- $Q = 1.95 \text{ m}^3/\text{s}$

La portata calcolata in condizioni di porte aperte è minore di quella calcolata in condizioni di porte chiuse. In presenza di porte aperte anche la pressione statica richiesta al ventilatore sarà minore proprio per la presenza del varco pedonale aperto. Pertanto, la verifica della condizione a porte a chiuse garantisce anche la verifica della condizione a porte aperte.

3.4 Dimensionamento a porte aperte ($v=2.00 \text{ m/s}$)

La portata Q definita come la portata di efflusso attraverso le porte aperte del locale è calcolabile mediante la:

- $Q = 2.00 \cdot A_p = 5.18 \text{ m}^3/\text{s}$

La pressione statica del ventilatore (alla portata nominale) deve essere tale da compensare le sole cadute di pressione prodotte dal moto dell'aria all'interno del condotto di aspirazione (la sovrappressione nel locale si annulla per l'apertura delle porte).

$$\Delta p = \Delta p_c \text{ (Pa)}$$

La caduta di pressione sul flusso d'aria vale, viene calcolata supponendo il funzionamento simultaneo di due ventilatori (portata nominale dimezzata). La pressione statica del ventilatore (alla portata nominale) ammonta a:

- $\Delta p_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left(f \cdot \frac{L}{D} + \sum_i k_i \right) = \mathbf{230 \text{ Pa}}$

Le condizioni nominali di funzionamento dei ventilatori assiali asserviti alle vie di fuga sono:

- portata minima di 2.30 mc/s con pressione statica di 230 Pa (a porte chiuse);
- portata massima di 2.60 mc/s con pressione statica di 230 Pa (velocità 2.0 m/s a porte aperte).

3.5 Funzionamento del sistema di pressurizzazione delle vie di fuga

Il funzionamento del sistema di pressurizzazione può essere così sintetizzato:

- Funzionamento a porte chiuse: la sovrappressione nella via di fuga rispetto al fornice di galleria è mantenuta attivando uno dei due ventilatori in aspirazione dal cunicolo di fuga. Portata minima nominale del ventilatore pari a $1.98 \text{ m}^2/\text{s}$ con pressione statica di 185 Pa ;
- Funzionamento a porte aperte: l'accesso ad una via di fuga determina una riduzione della sovrappressione nel locale di accesso (per effetto dell'apertura della porta) e l'aumento locale della portata d'aria; la velocità del flusso d'aria di attraversamento delle porte

raggiunge il valore di progetto pari a 0.75 m/s. Portata minima nominale del ventilatore pari a 1.95 m²/s;

- Funzionamento a porte aperte per accesso dei soccorsi: attraverso l'azione sulla pulsantiera locale di comando, alloggiata nel collegamento pedonale, è possibile azionare il secondo ventilatore installato nella via di fuga per aumentare la velocità dell'aria al valore di progetto pari a 2.0 m/s in direzione del collegamento pedonale - galleria consentendo l'accesso sicuro degli addetti al soccorso e/o allo spegnimento dell'incendio. **Portata minima nominale del ventilatore pari a 2.59 m²/s con pressione statica di 230 Pa.**

Il funzionamento del ventilatore alla portata nominale di 2.60 mc/s ed alla pressione statica di 230 Pa (punto di funzionamento sulla curva pressione/portata caratteristica del ventilatore) è garanzia del corretto funzionamento del sistema in tutti gli scenari.

3.6 Calcolo della forza di apertura porta

Il sistema deve essere progettato in modo che la forza F sulla maniglia della porta di accesso al filtro non superi mai gli 80 N in modo da rendere agevole, in caso di emergenza, l'uscita dalla galleria.

Supposta la superficie netta di un battente pari a 2.58 m² (120x215 cm), e la sovrappressione massima di progetto attraverso un varco pari a 50 Pa, la forza di apertura porta vale:

$$F = F_p + \frac{\Delta p \cdot S}{2}$$

Dove:

- F è la forza di apertura porta supposta l'azione sull'estremo del battente (maniglione);
- F_p la forza per l'apertura della porta senza l'azione della pressione che si può generalmente stimare al valore di 20 N;
- Δp = 50 è la sovrappressione di progetto in Pa (=N/m²) della zona filtro/luogo calmo;
- S è la superficie netta frontale della porta tipo.

Risulta $F = 20 + \frac{50 \cdot 2.58}{2} = 84.5$ N compatibile con i requisiti di progetto.

Allegato di calcolo: Ventilazione sanitaria

CHAPTER 1. CALCOLO PRODUZIONE INQUINANTI

Le produzioni di inquinanti e le conseguenti portate d'aria di rinnovo, sono state calcolate utilizzando i dati relativi ai fattori base di emissioni di riferimento (parco veicolare come da standard A) forniti dal documento PIARC 2019 - "ROAD TUNNELS: VEHICLE EMISSIONS AND AIR DEMAND FOR VENTILATION". Le portate di inquinante sono riportate di seguito in forma grafica, così come diagrammate sul report PIARC e suddivise per categoria di veicolo:

- veicoli leggeri benzina;
- veicoli leggeri diesel;
- veicoli pesanti.

Gli andamenti dei fattori base di emissione sono diagrammati per ogni velocità di traffico prevista dal codice e per ogni possibile variazione della pendenza stradale (-6:+6%).

Figure 1.1. Fattori base inquinanti CO

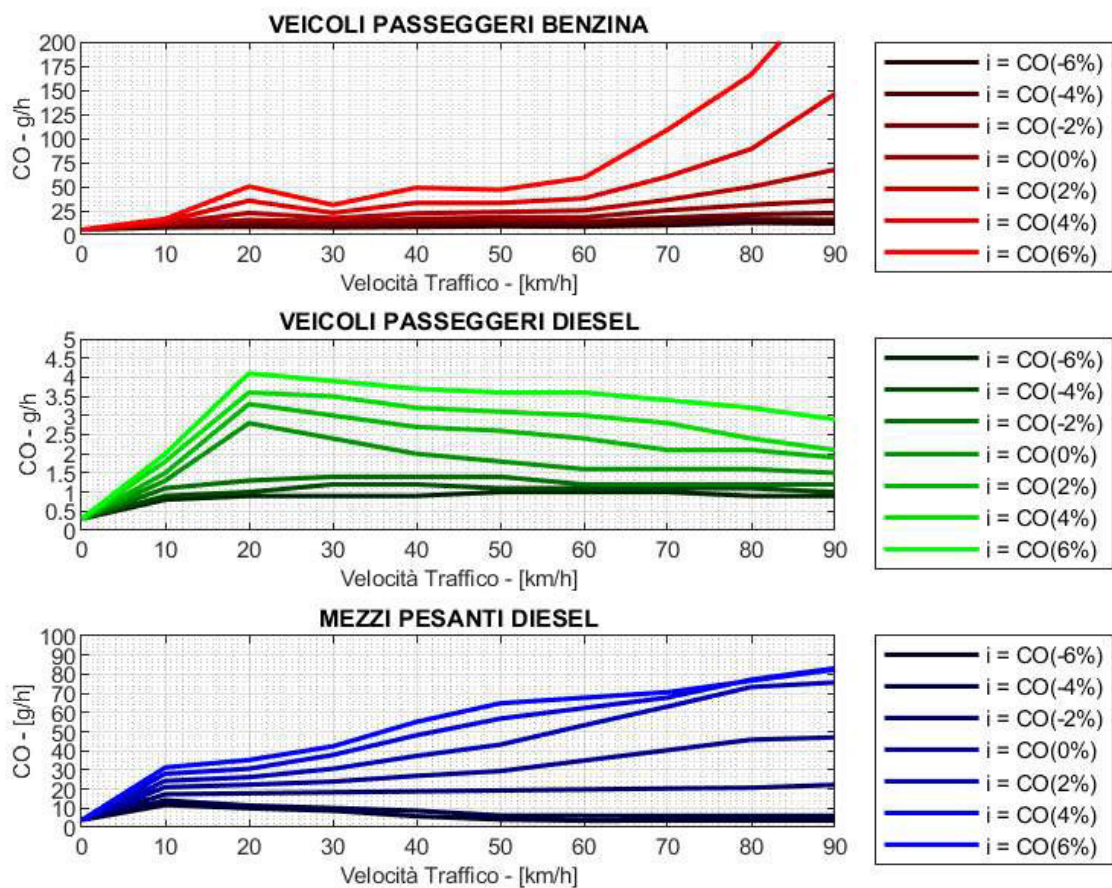


Figure 1.2. Fattori base inquinanti di NO

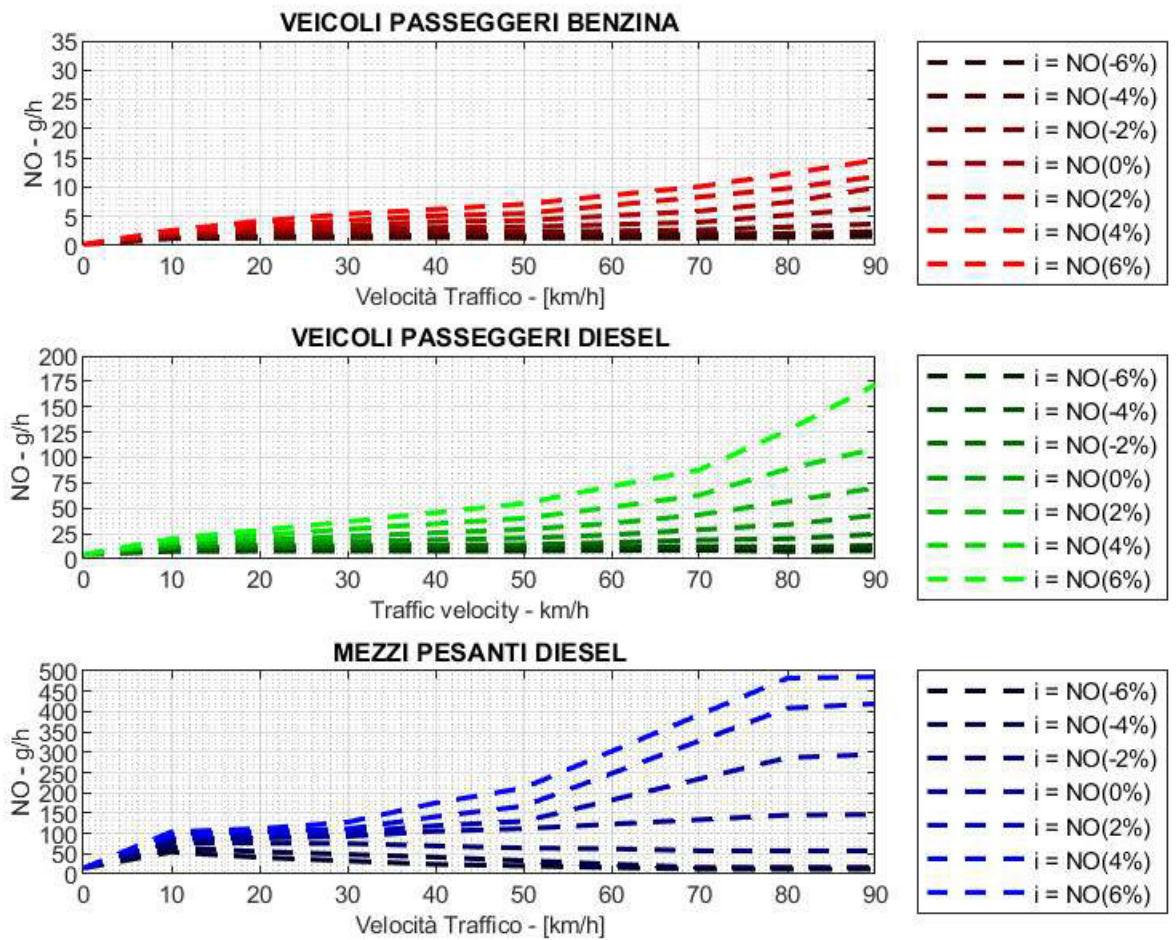
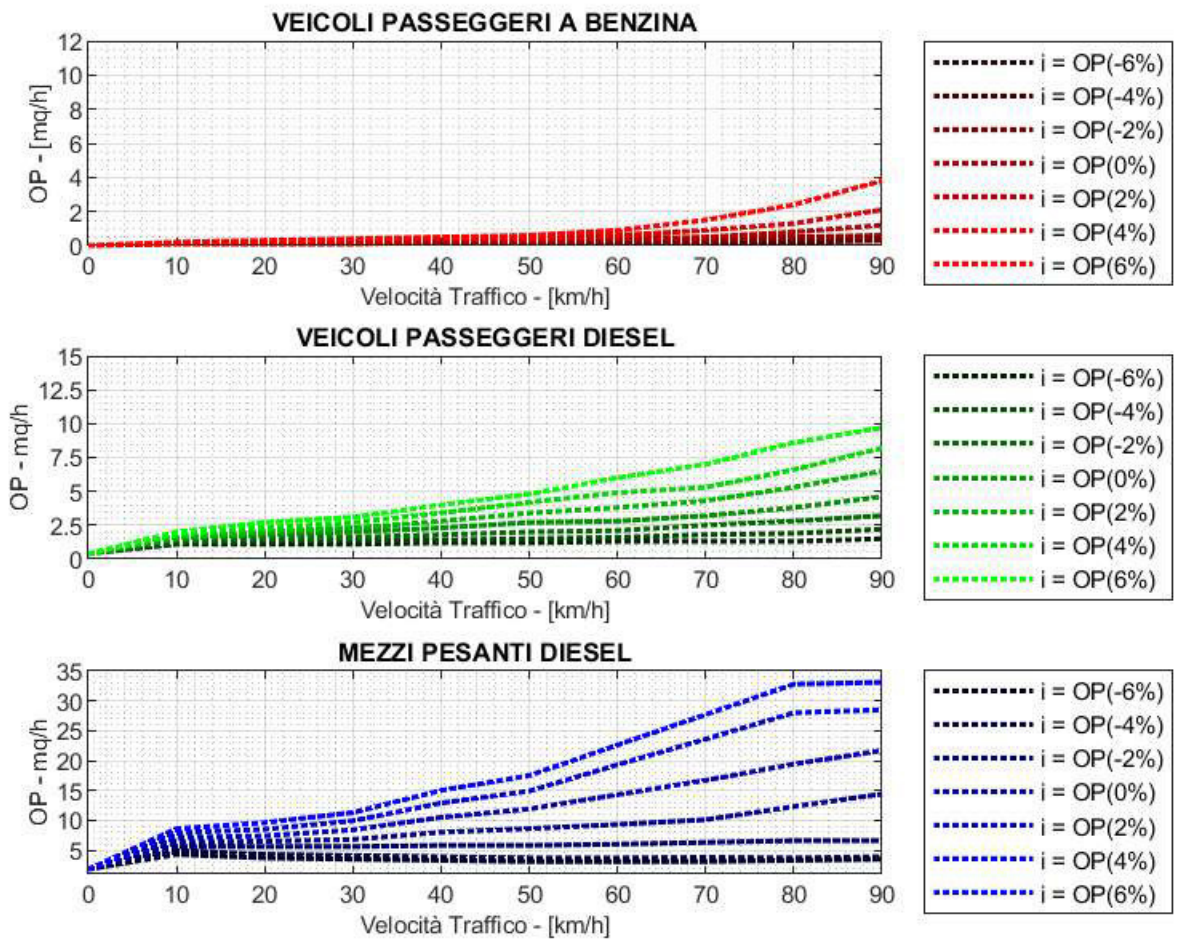


Figure 1.3. Fattori base inquinanti di OP (opacità)



CHAPTER 2. DATI GALLERIA

La galleria ha le seguenti caratteristiche geometriche.

Table 2.1. Dati galleria

| Lunghezza [m] | Sezione [mq] | Perimetro [m] | Altezza [m] | Rugosità [m] | Quota portale alto [m] | Quota portale basso [m] |
|---------------|--------------|---------------|-------------|--------------|------------------------|-------------------------|
| 645 | 82 | 35 | 8 | 0.0300 | 16 | 2 |

Nella seguente tabella è riportato il numero di veicoli che occupano la galleria in base alla velocità media tenuta.

Table 2.2. Caratteristiche di traffico galleria

| Tipo di traffico | Velocità di progetto [km/h] | Numero di corsie | Traffico medio giornaliero [vei/g] | Auto benzina [%] | Auto diesel [%] | Mezzi pesanti [%] |
|------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| bidirezionale | 90 | 2 | 30000 | 39 | 32 | 29 |

La galleria è caratterizzata dai seguenti dati di traffico.

Table 2.3. Flussi veicolari in galleria (vei/galleria)

| Velocità [km/h] | Veicoli pesanti | Veicoli leggeri Benzina | Veicoli leggeri Diesel |
|-----------------|-----------------|-------------------------|------------------------|
| 0 | 36 | 49 | 40 |
| 5 | 71 | 95 | 78 |
| 10 | 36 | 48 | 39 |
| 15 | 24 | 32 | 26 |
| 20 | 19 | 25 | 21 |
| 25 | 16 | 21 | 18 |
| 30 | 14 | 19 | 16 |
| 35 | 13 | 17 | 14 |
| 40 | 12 | 16 | 13 |
| 45 | 11 | 14 | 12 |
| 50 | 10 | 14 | 11 |
| 55 | 10 | 13 | 11 |
| 60 | 9 | 12 | 10 |
| 65 | 8 | 11 | 9 |
| 70 | 7 | 10 | 8 |

| | | | |
|----|---|---|---|
| 75 | 7 | 9 | 7 |
| 80 | 6 | 8 | 7 |
| 85 | 6 | 7 | 6 |
| 90 | 6 | 7 | 6 |

I valori limite per la concentrazione degli inquinanti, per diverse condizioni di flusso di traffico e per tipo di inquinante, sono stati desunti dalle raccomandazioni PIARC e riportate nel prospetto seguente.

Table 2.4. Concentrazioni limite ammissibili di inquinanti

| Condizioni Traffico | COlim [ppm] | OPlim [ppm] | NO2[m-1] |
|------------------------------------|-------------|-------------|----------|
| Congestionato/bloccato (V<40 km/h) | 70 | 2 | 0.0070 |
| Fluido (V>40 km/h) | 50 | 2 | 0.0050 |

Nella tabella che segue sono riportate le caratteristiche dei Jet-Fan installati/previsti in galleria.

Table 2.5. Caratteristiche Jet-Fan

| D girante [mm] | Spinta Nominale Ventilatore [N] | Velocità in uscita Ventilatore [m/s] | Coeff. Istallazione [-] |
|----------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 1000 | 900 | 30.5 | 0.9000 |
| 710 | 700 | 38.4 | 0.9000 |

CHAPTER 3. RISULTATI

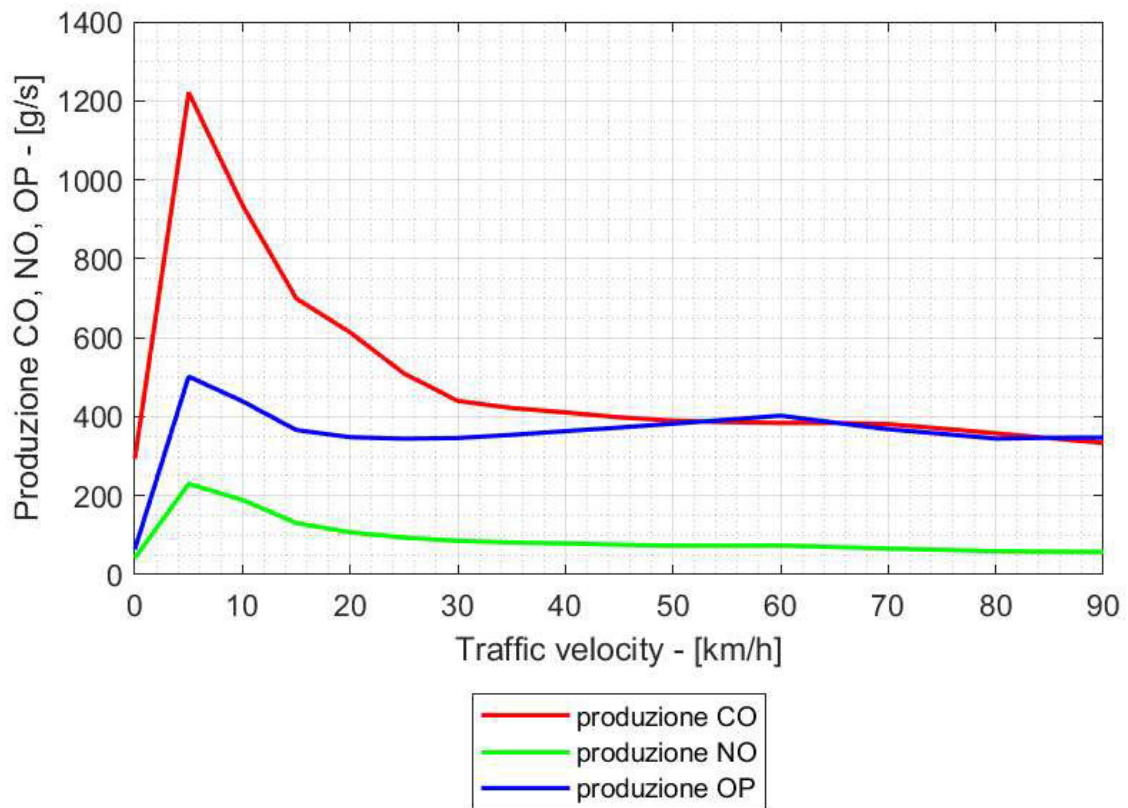
Si riportano qui a seguire i risultati dell'analisi di calcolo.

In particolare risultano, per la condizione di traffico di progetto, le seguenti portate totali di inquinanti prodotte in galleria dal traffico veicolare circolante.

Table 3.1. Produzione totale di inquinanti

| Velocità [km/h] | CO [g/s] | NO [g/s] | OP [g/s] |
|-----------------|----------|----------|----------|
| 0 | 293 | 42 | 64 |
| 5 | 1221 | 230 | 502 |
| 10 | 936 | 189 | 439 |
| 15 | 699 | 131 | 366 |
| 20 | 613 | 107 | 348 |
| 25 | 510 | 94 | 344 |
| 30 | 440 | 85 | 346 |
| 35 | 422 | 82 | 354 |
| 40 | 411 | 79 | 363 |
| 45 | 398 | 76 | 372 |
| 50 | 390 | 73 | 382 |
| 55 | 386 | 73 | 392 |
| 60 | 384 | 74 | 403 |
| 65 | 384 | 70 | 385 |
| 70 | 381 | 66 | 368 |
| 75 | 370 | 63 | 357 |
| 80 | 358 | 59 | 344 |
| 85 | 346 | 58 | 347 |
| 90 | 333 | 57 | 347 |

Figure 3.1. Produzione totale di inquinanti



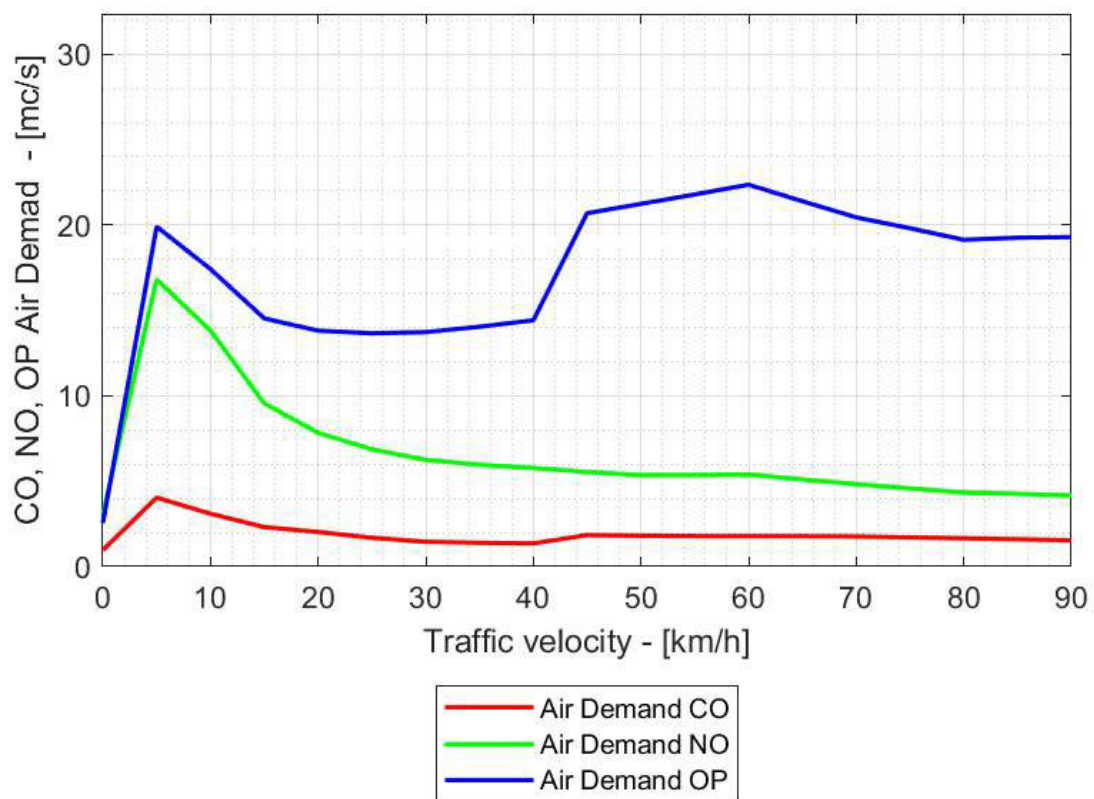
In funzione delle portate totali di inquinanti calcolate ed in ragione dei limiti ammissibili di galleria, si determinano le portate d'aria di rinnovo richieste per ogni scenari di esercizio.

Table 3.2. Portate d'aria di rinnovo

| Velocità [km/h] | CO [mc/s] | NO [mc/s] | OP [mc/s] |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 0 | 1 | 3 | 3 |
| 5 | 4 | 17 | 20 |
| 10 | 3 | 14 | 17 |
| 15 | 2 | 10 | 15 |
| 20 | 2 | 8 | 14 |
| 25 | 2 | 7 | 14 |
| 30 | 1 | 6 | 14 |
| 35 | 1 | 6 | 14 |
| 40 | 1 | 6 | 14 |

| | | | |
|----|---|---|----|
| 45 | 2 | 6 | 21 |
| 50 | 2 | 5 | 21 |
| 55 | 2 | 5 | 22 |
| 60 | 2 | 5 | 22 |
| 65 | 2 | 5 | 21 |
| 70 | 2 | 5 | 20 |
| 75 | 2 | 5 | 20 |
| 80 | 2 | 4 | 19 |
| 85 | 2 | 4 | 19 |
| 90 | 2 | 4 | 19 |

Figure 3.2. Portate d'aria di rinnovo



Una volta calcolate le portate d'aria di rinnovo è possibile determinare la spinta totale richiesta al sistema di ventilazione e quindi anche il numero di ventilatori richiesti per far fronte a tutti gli scenari di ventilazione sanitaria. Il calcolo della spinta passa per la valutazione delle cadute di pressione totali legate complessivamente alla compensazione delle perdite per attrito ed degli effetti pistone prodotti dal traffico circolante. Ricordando che la

spinta totale è definita come:

$$S = D_{ptot} * A$$

Si determina, per ogni scenario, il numero di jet-fans necessari per il corretto funzionamento del sistema mediante la:

Si determina, per ogni scenario, il numero di jet-fans necessari per il corretto funzionamento del sistema mediante la:

$$N_{jf} = S / S_{jf}$$

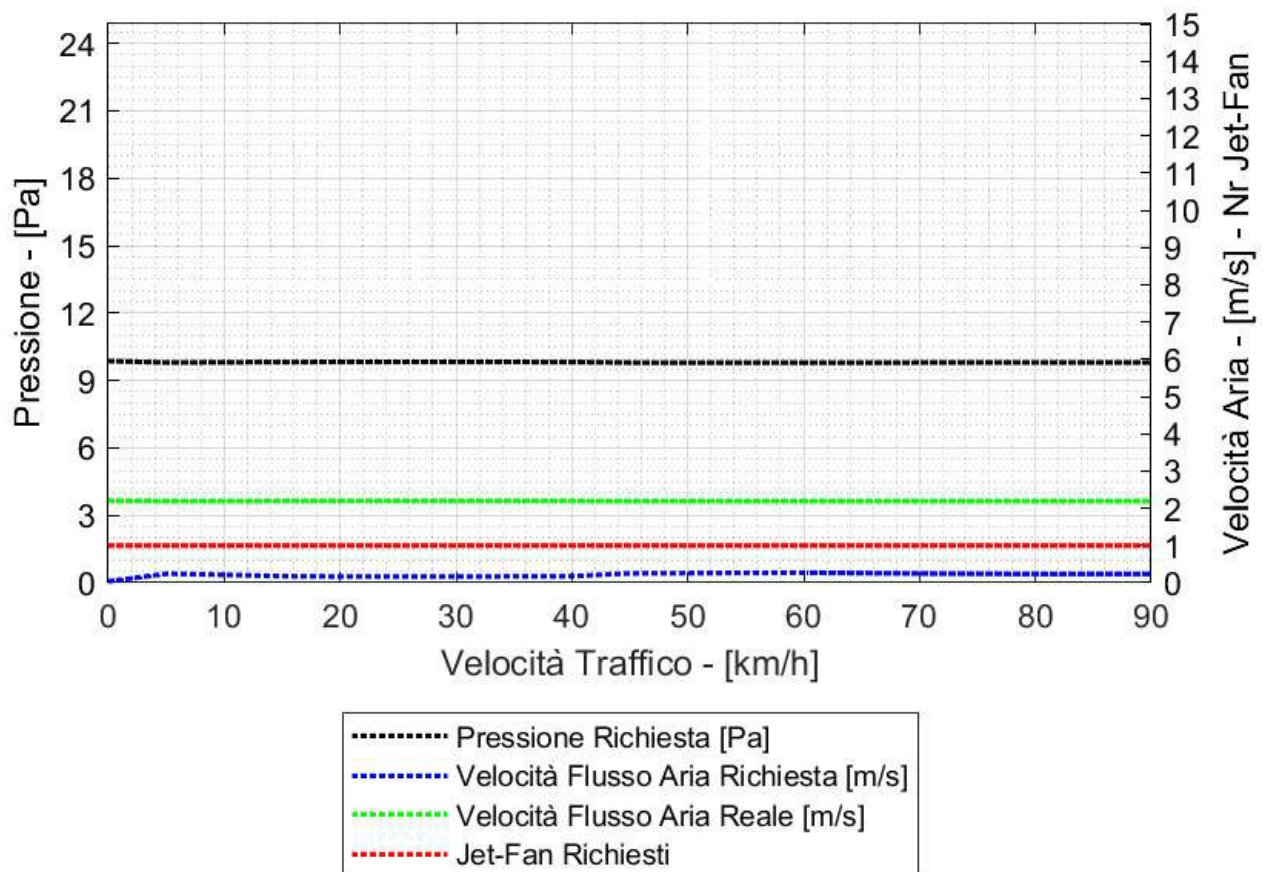
dove con S_{jf} si intende la spinta netta prodotta da ciascun jet-fan installato in galleria.
 Si trovano i risultati della tabella che segue.

Table 3.3. Risultati di pressione e spinta richiesti

| Velocità [km/h] | Pressione Richiesta [Pa] | Velocità Flusso Aria Richiesta [m/s] | Velocità Flusso Aria Reale [m/s] | Jet-Fan Richiesti [-] |
|-----------------|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 0 | 9.8658 | 0.0373 | 2.2008 | 1 |
| 5 | 9.7981 | 0.2427 | 2.1933 | 1 |
| 10 | 9.8081 | 0.2125 | 2.1944 | 1 |
| 15 | 9.8197 | 0.1772 | 2.1957 | 1 |
| 20 | 9.8226 | 0.1684 | 2.1960 | 1 |
| 25 | 9.8232 | 0.1666 | 2.1961 | 1 |
| 30 | 9.8229 | 0.1674 | 2.1960 | 1 |
| 35 | 9.8217 | 0.1713 | 2.1959 | 1 |
| 40 | 9.8201 | 0.1758 | 2.1957 | 1 |
| 45 | 9.7950 | 0.2523 | 2.1929 | 1 |
| 50 | 9.7928 | 0.2590 | 2.1927 | 1 |
| 55 | 9.7906 | 0.2657 | 2.1924 | 1 |
| 60 | 9.7883 | 0.2727 | 2.1921 | 1 |
| 65 | 9.7922 | 0.2608 | 2.1926 | 1 |
| 70 | 9.7959 | 0.2494 | 2.1930 | 1 |
| 75 | 9.7985 | 0.2416 | 2.1933 | 1 |
| 80 | 9.8012 | 0.2333 | 2.1936 | 1 |
| 85 | 9.8007 | 0.2348 | 2.1935 | 1 |
| 90 | 9.8006 | 0.2353 | 2.1935 | 1 |

Dal prospetto si nota che una volta azionati i ventilatori, per effetto dell'arrotondamento all'intero superiore, la velocità effettiva in galleria è maggiore di quella minima teorica richiesta

Figure 3.3. Ventilazione sanitaria



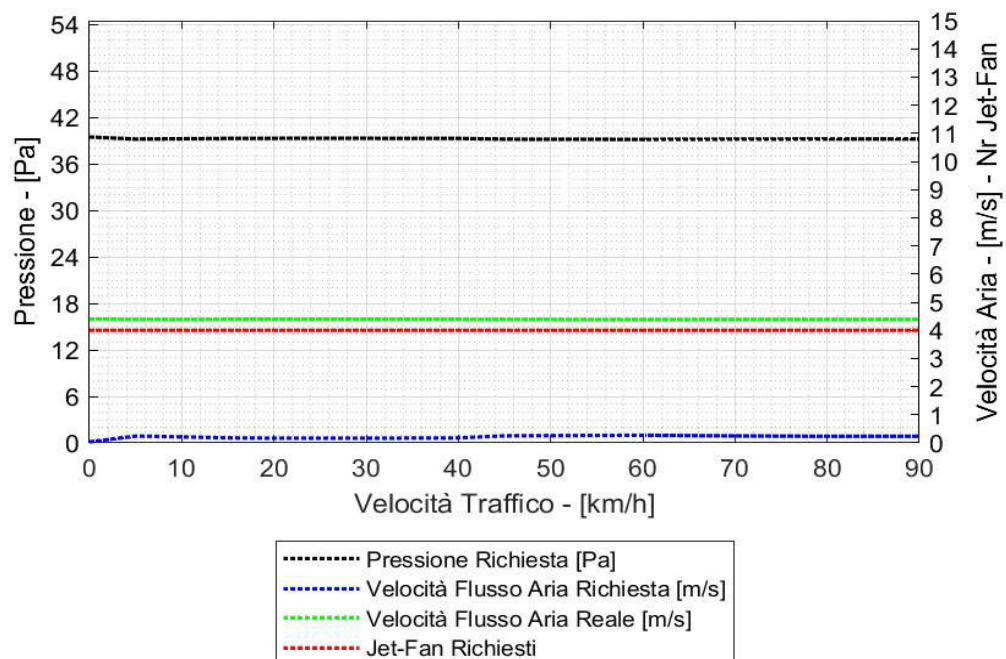
Riprendendo i risultati dell'analisi finale, si riportano qui a seguire le nuove soluzioni ottenute andando a considerare le variazioni meteorologiche ai portali con gradiente barometrico sfavorevole pari a 30 Pa.

Table 3.4. VENTILAZIONE SANITARIA CON INFLUENZA DELLA PRESSIONE METEREOLGICA

| Velocità [km/h] | Pressione Richiesta [Pa] | Velocità Flusso Aria Richiesta [m/s] | Velocità Flusso Aria Reale [m/s] | Jet-Fan Richiesti [-] |
|-----------------|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 0 | 9.8658 | 0.0373 | 2.2008 | 1 |
| 5 | 9.7981 | 0.2427 | 2.1933 | 1 |
| 10 | 9.8081 | 0.2125 | 2.1944 | 1 |

| | | | | |
|----|--------|--------|--------|---|
| 15 | 9.8197 | 0.1772 | 2.1957 | 1 |
| 20 | 9.8226 | 0.1684 | 2.1960 | 1 |
| 25 | 9.8232 | 0.1666 | 2.1961 | 1 |
| 30 | 9.8229 | 0.1674 | 2.1960 | 1 |
| 35 | 9.8217 | 0.1713 | 2.1959 | 1 |
| 40 | 9.8201 | 0.1758 | 2.1957 | 1 |
| 45 | 9.7950 | 0.2523 | 2.1929 | 1 |
| 50 | 9.7928 | 0.2590 | 2.1927 | 1 |
| 55 | 9.7906 | 0.2657 | 2.1924 | 1 |
| 60 | 9.7883 | 0.2727 | 2.1921 | 1 |
| 65 | 9.7922 | 0.2608 | 2.1926 | 1 |
| 70 | 9.7959 | 0.2494 | 2.1930 | 1 |
| 75 | 9.7985 | 0.2416 | 2.1933 | 1 |
| 80 | 9.8012 | 0.2333 | 2.1936 | 1 |
| 85 | 9.8007 | 0.2348 | 2.1935 | 1 |
| 90 | 9.8006 | 0.2353 | 2.1935 | 1 |

Figure 3.4. Ventilazione sanitaria con influenza della pressione meteorologica



Allegato di calcolo: Ventilazione di emergenza

