

# ALLEGATO A

## Matrice Atmosfera

Impatto Atmosferico in conseguenza di evento incidentale in galleria

INDICE

A1. Premesse .....	1
A1.1 Oggetto dello studio .....	1
A1.2 Linee guida dello studio .....	2
A1.3 La documentazione esaminata .....	2
A2 – La componente meteorologica.....	3
A2.1 Il quadro generale .....	3
A2.2 La stabilità atmosferica .....	3
A3. Gli scenari emissivi di riferimento.....	10
A4. I modelli previsionali di calcolo .....	19
A4. 1 Il calcolo delle concentrazioni: AERMOD .....	19
A4.2 Il calcolo delle deposizioni: ISC.....	20
A5. La Qualità dell’Aria.....	21
A5.1 I valori massimi .....	21
A5.2 CO .....	23
A5.3 NO2 .....	24
A5.4 PM10 .....	24
A5.5 Metalli .....	25
A5.6 HCl.....	26
A5.7 HF.....	26
A5.8 CH2 CH CO Acroleine .....	27
A5.9 HCHO Formaldeide .....	27
A5.10 HCN.....	28
A5.11 SO2 .....	28
A6. Conclusioni .....	29
ALLEGATI I – ELABORATI GRAFICI.....	32

## A1. PREMESSE

### A1.1 Oggetto dello studio

Lo studio presentato in questa sezione è stato sviluppato per analizzare l'impatto atmosferico connesso con le fuoriuscite dal camino dell'impianto di estrazioni fumi, nel caso di evento incidentale all'interno della Galleria.

Lo scopo dello studio è quello di sviluppare scenari meteo rappresentativi del sito, scenari emissivi associati ad ipotesi di incidenti rilevanti, analizzare le ricadute al suolo in termini di concentrazione in atmosfera dei principali prodotti di combustione. In altri termini, in base a ipotesi di scenari critici, alle caratteristiche di progetto degli impianti di aspirazione, tramite avanzata modellistica di calcolo delle dispersioni e deposizioni atmosferiche, vengono valutate le concentrazioni di picco nell'area di impatto di detto camino.

Occorre evidenziare la scarsità di studi simili nel panorama internazionale sia a livello di lavori pubblicati sia di ricerche effettuate da organismi governativi e non governativi; la gran parte degli studi, infatti, rivolge l'attenzione alle problematiche di sicurezza e di emergenza, trascurando eventi di tossicità ambientale non acuta. Tale attenzione si giustifica con il fatto che, un eventuale incidente rilevante in galleria, potrebbe comportare diverse perdite in vite umane, mentre l'aspetto più propriamente ambientale viene parzialmente trascurato in quanto non associato ad un pericolo imminente di vita.

Solo nei più recenti anni si sta lentamente diffondendo un'attenzione maggiore su problematiche propriamente ambientali e non solo di emergenza.

Ad oggi, le caratterizzazioni incidentali si focalizzano sui seguenti indicatori:

- Temperatura – criticità di tenuta di materiali ed impianti
- Potenze energetiche degli incidenti – per lo più legate alle problematiche delle temperature da smaltire
- Tossicità – livelli di CO, CO<sub>2</sub> ed O<sub>2</sub> per lo più legati ad effetti tossici all'interno della galleria che non permettono un'efficace evacuazione
- Opacità – criticità nell'evacuazione e negli interventi di soccorso

Mentre è piuttosto vasta la documentazione per i suddetti indicatori, trattati anche nei pochi progetti di ricerca di simulazione incidentale, per altre sostanze tossiche sono presenti in bibliografia solo analisi di tipo qualitativo.

In base a tali risultanze, pur nelle difficoltà di elaborazione, il presente lavoro costituisce un originale approccio a problematiche che non riguardano la sicurezza interna alla galleria, bensì pongono l'attenzione su possibili scenari emissivi di gas tossici estratti dagli impianti di aerazione in caso di eventi a bassa probabilità ed elevato effetto.

Data l'incertezza e la varietà dei possibili scenari, l'approccio alle elaborazioni si basa sul principio della cautela, ovvero, considerando le condizioni di maggiore criticità.

Per la caratterizzazione degli scenari meteorologici, in mancanza di una stazione posta sul sito, sono stati utilizzati le distribuzioni di temperatura, direzione e velocità del vento, classi di stabilità per le seguenti stazioni e periodo di osservazione:

1. Stazione di Latina (Latitudine 41°33'; Longitudine 12°54'; altezza 26 metri) – 31 anni di dati
2. Stazione di Frosinone (Latitudine 41°38'; Longitudine 13°18'; altezza 181 metri) – 41 anni di dati
  - La stazione di Latina dista circa 50 km dal sito in posizione distante dal mare (circa 8 km) simile a quella di cui alla galleria; l'altezza però risulta discorde in quanto di pochi metri al di sopra del livello del mare
  - La stazione di Frosinone dista circa 40 km, ha altezza simile a quella del rilascio degli effluenti, però è posizionata a circa 39 km dal mare

**A1.2 Linee guida dello studio**

Lo studio di impatto atmosferico si basa sulle elaborazioni dei seguenti scenari e dei relativi indicatori:

- Elaborazione del giorno tipo estivo in base alle distribuzioni medie dei parametri meteo registrati presso le due stazioni di Frosinone e Latina
- Elaborazione del giorno tipo invernale in base alle distribuzioni medie dei parametri meteo registrati presso le due stazioni di Frosinone e Latina
- Elaborazione di scenario emissivo corrispondente ad un incidente grave in galleria
- Elaborazione di scenario emissivo corrispondente ad un incidente estremamente grave in galleria
- Stima delle distribuzioni di concentrazione di picco orario nei due giorni tipo per tutte le sostanze tossiche considerate come riferimento in seguito alle emissioni al camino della galleria
- Stima delle distribuzioni di deposizione nei due giorni tipo per l'intera durata dell'evento per polveri e metalli

In seguito alle suddette elaborazioni vengono riportate schematicamente:

- Giudizio sulla qualità dell'aria nella zona di impatto
- Probabilità di accadimento degli eventi

E' stata effettuata un'accurata indagine bibliografica con particolare riferimento a organismi internazionalmente riconosciuti ed accreditati, in particolare a livello Europeo ed Americano.

I dati meteo sono stati forniti da ENEL in collaborazione con il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica.

La modellistica per le elaborazioni delle distribuzioni degli inquinanti è costituito da un pacchetto software denominato AERMOD ISC VIEW certificato da EPA. Trattasi di un sistema di modelli tra i più accreditati ed utilizzati nel mondo

Gli scenari emissivi fanno riferimento alle più recenti acquisizioni di organismi e commissioni internazionali quali:

- PIARC
- OECD
- NIST
- FIT

Data l'estrema variabilità degli scenari meteorologici ed emissivi è stato considerato un approccio basato su ipotesi cautelative in modo da considerare gli eventi a maggiore criticità.

**A1.3 La documentazione esaminata**

Nella successiva tabella viene riportata una sintesi della bibliografia esaminata per la caratterizzazione degli scenari, elaborazione dei dati e sviluppo delle analisi.

1	Inland Transport Committee dell'Economic and Social Council delle Nazioni Unite, nell'ambito della Economic Commission for Europe - TRANS/AC.7/9, 10 December 2001
2	Fire and Smoke Control in Road Tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels – C5
3	Hazards by fires, PIARC WP2, Design Fire Scenarios
4	Generation and Transport of Smoke Components”, (Kathryn et al., Fire Technology, 40, 149-176, 2004
5	NIST Technical note 1439 “International study of the sublethal effects of fire smoke on survivability and health (SEFS)
6	TASK FORCE FOR TECHNICAL INVESTIGATION OF THE 24 MARCH 1999 FIRE IN THE MONT BLANC VEHICULAR TUNNEL Report of 30 June 1999 Minister of the Interior, Ministry of Equipment, Transportation and Housing, Inspector General of the Administration, Board of Bridges and Highways, Report of the Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Vehicular Tunnel
7	Manuale – User guide AERMOD - EPA
8	Manuale - User guide ISC - EPA
9	AERMOD, ADMS and ISC Dispersion Models for Regulatory Applications”, D.J. Hall et al., in 7 <sup>th</sup> Int. Conf. Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes
10	Dati meteorologici dal 1951 al 1991 – stazione Aeronautica Militare di Frosinone, fonte ENEL
11	Dati meteorologici dal 1961 al 1991 – stazione Aeronautica Militare di Latina, fonte ENEL
12	Smoke detection in tunnel using video images, AUBE 2001, 12 <sup>th</sup> International Conference on Automatic Fire Detection
13	Safety in Tunnels, Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels – PIARC OECD
14	Recent achievements modelling the transport of smoke and toxic gases in tunnel fires, 1 <sup>st</sup> International Symposium Safe and Reliable Tunnels, S. Kumar

15	Hazards and consequences for tunnel structures and human life, 1 <sup>st</sup> International Symposium Safe and Reliable Tunnels, Ton Vrouwenvelder
16	Measurements techniques in energy systems processes, J. Jacques and L. Possoz, JEP 83-108, 1996
17	Numerical simulation of the Howard Street Tunnel fire, NIST July 2001 – McGrattan, Hamins
18	Full scale simulation of fatal fire and comparison of results with two models, NIST – NISTIR 90-4268, August 1990

## A2 – LA COMPONENTE METEOCLIMATICA

### A2.1 Il quadro generale

La caratterizzazione meteorologica è funzionale ad una serie di elaborazioni, fra le quali:

individuare gli scenari più critici, ovvero le condizioni sfavorevoli di turbolenza, individuare gli scenari tipo, analizzare la qualità del microclima ambientale.

Tale caratterizzazione permette di produrre una serie di parametrizzazioni che identificano opportuni valori di input al processore meteorologico del codice di calcolo utilizzato per la previsione di impatto atmosferico.

La descrizione del quadro anemologico complessivo, definendo le direzioni prevalenti di provenienza del vento, risulta una fase fondamentale nell'individuazione delle condizioni che contribuiscono in maniera significativa al trasporto degli inquinanti. Nelle figure riportate di seguito vengono illustrate le rose del vento sia per classi di velocità, sia per classi di stabilità. Le rose dei venti rappresentano un modo grafico per evidenziare la distribuzione di frequenza delle direzioni di provenienza del vento in funzione delle categorie di velocità dello stesso. La rosa del vento per classi di stabilità offre un metodo immediato per stabilire quali siano le componenti del vento che comportano le condizioni di maggiore criticità diffusiva.

Nel caso di calma di vento non viene associata alcuna direzione prevalente, per cui la quota parte delle calme viene distribuita omogeneamente lungo tutte le direzioni.

I dati meteorologici di riferimento sono basati su aggregazione di misure effettuate su un arco temporale da 30 a 40 anni presso le stazioni di Latina e Frosinone. Lo scopo di utilizzare un arco temporale così vasto si giustifica con l'individuazione di punti a maggiore impatto frutto di una fenomenologia atmosferica stabile e non soggetta a sensibili variazioni che si possono manifestare con aggregati temporali inferiori.

Nelle sezioni dedicate alla descrizione delle principali variabili meteorologiche vengono riportati i grafici relativi alle distribuzioni dei vari parametri in funzione della stagionalità.

Tali grafici sono noti comunemente come rose ed indicano la distribuzione di frequenza associata alla direzionalità, alla velocità del vento ed alla categoria di stabilità.

Con tali rappresentazioni si evidenziano immediatamente quali siano le direzionalità e le intensità prevalenti del vento; inoltre ad ogni direzionalità è associata una componente più o meno dispersiva come risulta dalle distribuzioni della categoria di stabilità. In sintesi, le rose del vento con direzionalità ed intensità indicano il trasporto prevalente, le rose con direzionalità e stabilità indicano la prevalenza della dispersione; in tal modo è possibile caratterizzare le due componenti più importanti per la diluizione degli inquinanti:

1. trasporto
2. diffusione

Il quadro meteorologico che emerge dall'insieme delle distribuzioni dei vari parametri presenta, nelle due Stazioni di riferimento, molti punti in comune e talune differenziazioni che vengono schematicamente riepilogate di seguito.

### A2.2 La stabilità atmosferica

- La distribuzione delle categorie di stabilità atmosferica presenta una sostanziale invarianza presso le due stazioni; le differenze di variabilità stagionale rientrano in pochi punti percentuali, ovvero nella normale variabilità degli eventi, come si evidenzia dalla successiva tabella. Occorre evidenziare che tale parametro è quello che maggiormente caratterizza le proprietà dispersive degli inquinanti.

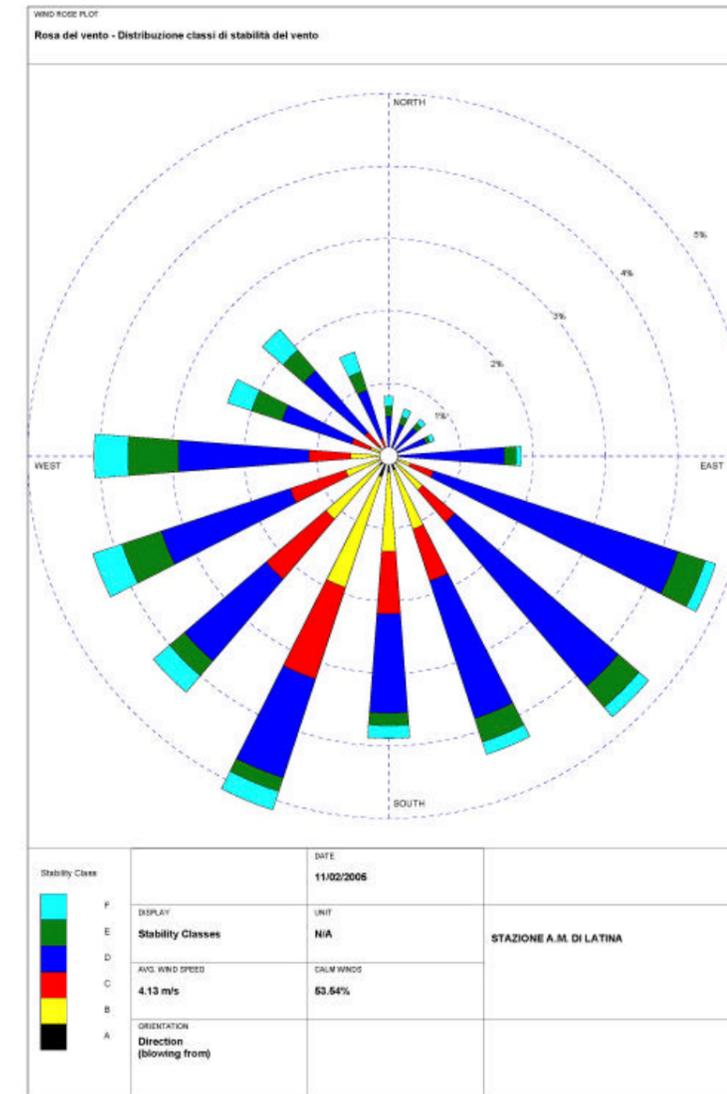
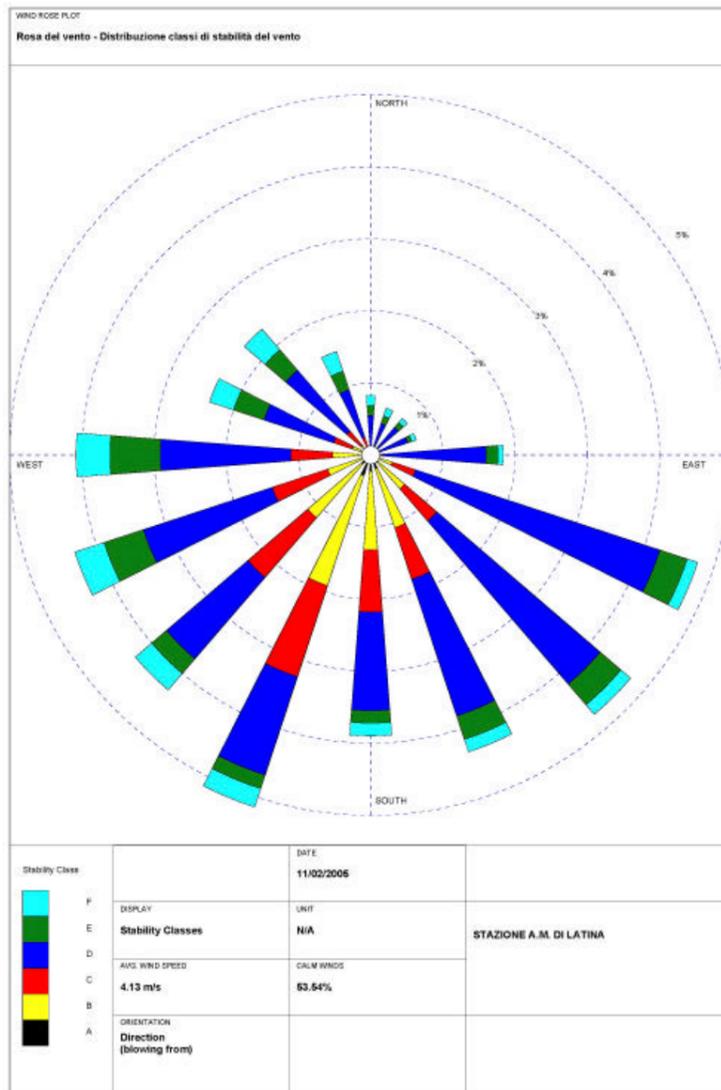
Frequenza in % delle distribuzioni di categorie di stabilità atmosferica nelle stagioni invernale ed estiva presso le stazioni di Latina e Frosinone						
	Categorie di stabilità atmosferica					
	Instabile		Neutrale		Stabile	
	Latina	Frosinone	Latina	Frosinone	Latina	Frosinone
Inverno	10	10	50	47	40	43
Estate	49	44	20	23	31	33

Le immagini che seguono sono le rappresentazioni delle distribuzioni annuali delle classi di stabilità in funzione della direzionalità del vento presso le due stazioni di Latina e Frosinone.

Dai grafici riportati si evidenzia come le direzioni di provenienza da sud-est a sud-ovest siano apportatrici delle condizioni diffusive a più elevata turbolenza in quanto coincidente con le categorie maggiormente instabili A, B e C.

Le categorie stabili E ed F si manifestano tipicamente nelle ore serali e notturne in concomitanza di inversioni termiche.

Di notevole frequenza appare l'occorrenza della categoria neutrale, soprattutto nelle stagioni primaverili ed autunnali.



### A2.3 Il quadro anemologico

La distribuzione dei venti, in termini di velocità e direzionalità, mostra talune affinità e qualche diversità tra le due stazioni come si evince dalle osservazioni riportate di seguito. Le considerazioni che seguono vengono distinte in base alla stagionalità estiva ed invernale.

ESTATE

- ❑ I venti con velocità inferiore a 2m/s si manifestano per il 97% presso Latina ed il 92% presso Frosinone che appare, pertanto moderatamente più ventosa a causa della maggiore altitudine
- ❑ La frequenza delle calme di vento è elevata in entrambe le stazioni, come sintetizzato nella successiva tabella

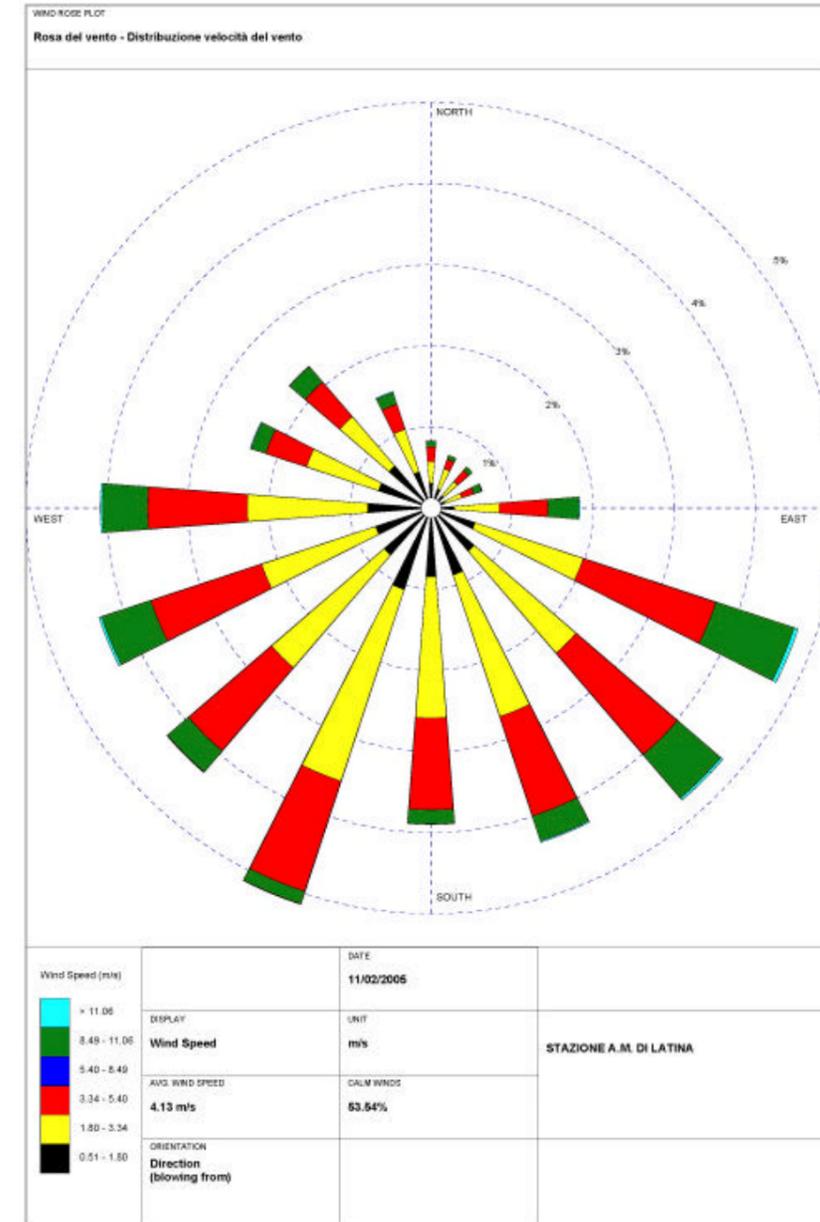
periodo	Frequenza % di calme sul periodo	
	Latina	Frosinone
annuale	54	54
estate	52	47
inverno	62	66

- ❑ Tali calme hanno una netta prevalenza nelle ore serali e notturne
- ❑ Durante la mattina si manifesta generalmente un vento modesto, di circa 2 m/s, con direzionalità prevalente da sud-est
- ❑ In tarda mattinata il vento si rafforza per il fenomeno della brezza (di mare in un caso, di vallata nell’altro) ruotando verso ovest e disponendosi con provenienza sud-sud-ovest
- ❑ Nel tardo pomeriggio il vento continua a ruotare con prevalenza da ovest-nord-ovest
- ❑ la sera si manifesta la netta prevalenza delle calme di vento con comportamento maggiormente spiccato presso Latina

INVERNO

- ❑ Durante la notte si conferma una netta prevalenza delle calme di vento soprattutto nella stazione di Latina;
- ❑ Durante le prime ore del mattino è presente una netta prevalenza delle calme di vento in maggiore misura presso Frosinone
- ❑ Durante la mattinata le calme persistono anche se si comincia a manifestare una modesta prevalenza di venti con provenienza sud-est di scarsa velocità
- ❑ Verso tarda mattinata, primo pomeriggio le calme calano di frequenza e si rafforza la componente sud-est con venti deboli

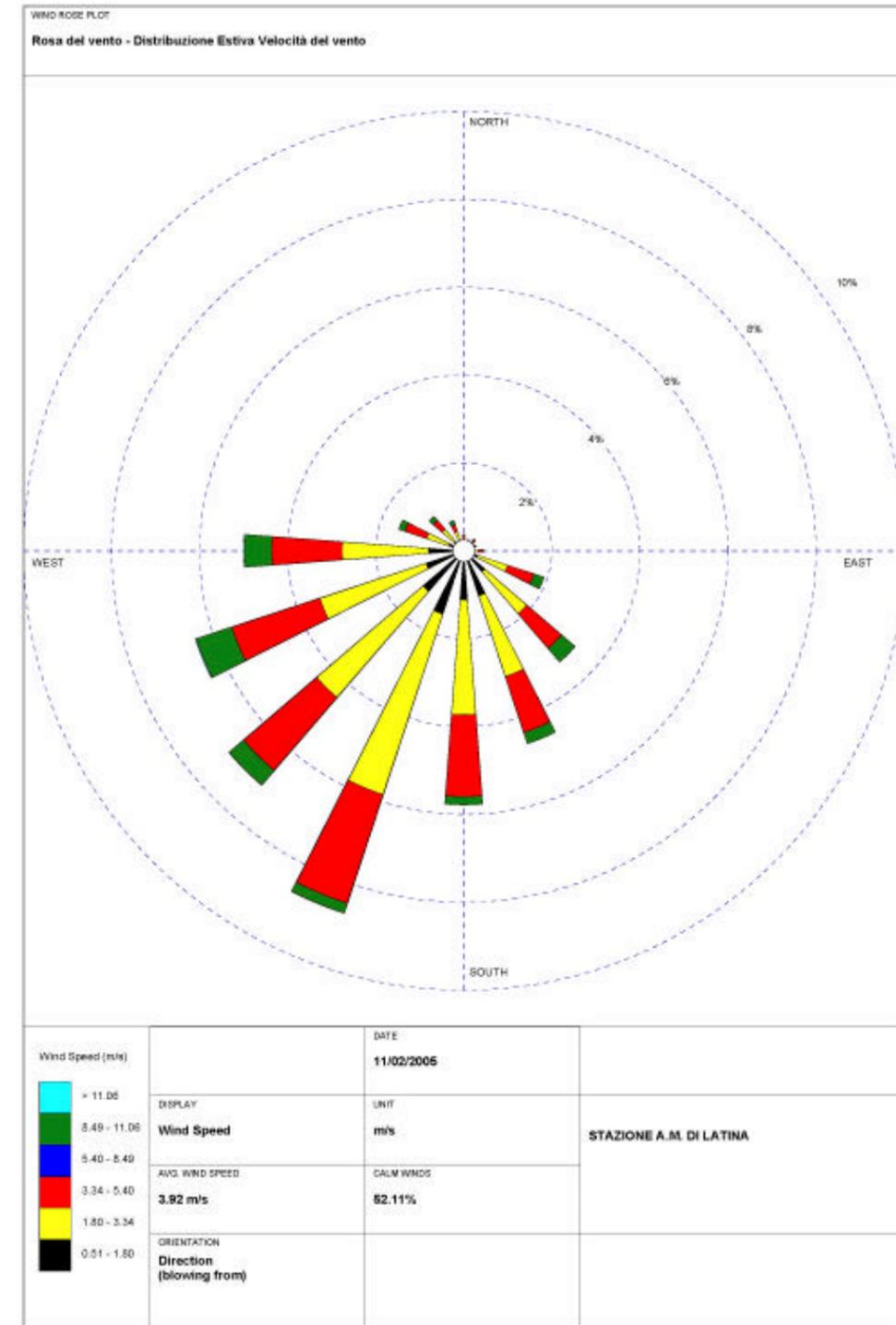
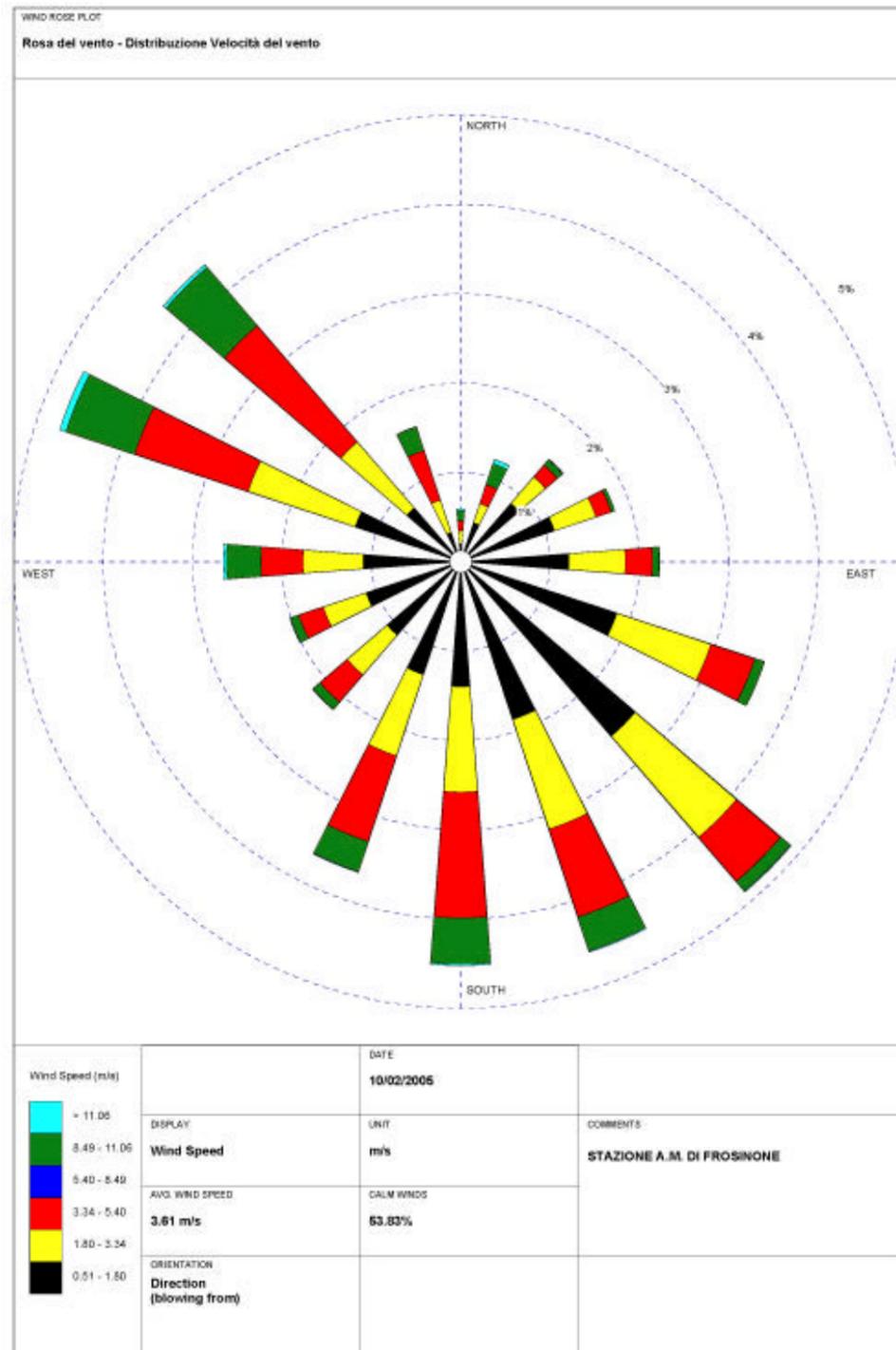
- ❑ Nel pomeriggio si manifesta una modesta crescita in intensità del vento con direzionalità più frequenti da sud-est ed ovest-nord-ovest
- ❑ In serata riprende la crescita delle calme anche se si manifesta una modesta prevalenza della componente nord-ovest per Frosinone e sud-est per Latina.



Variante alla S.S. 7 "Appia" in Comune di Formia

Progetto Preliminare

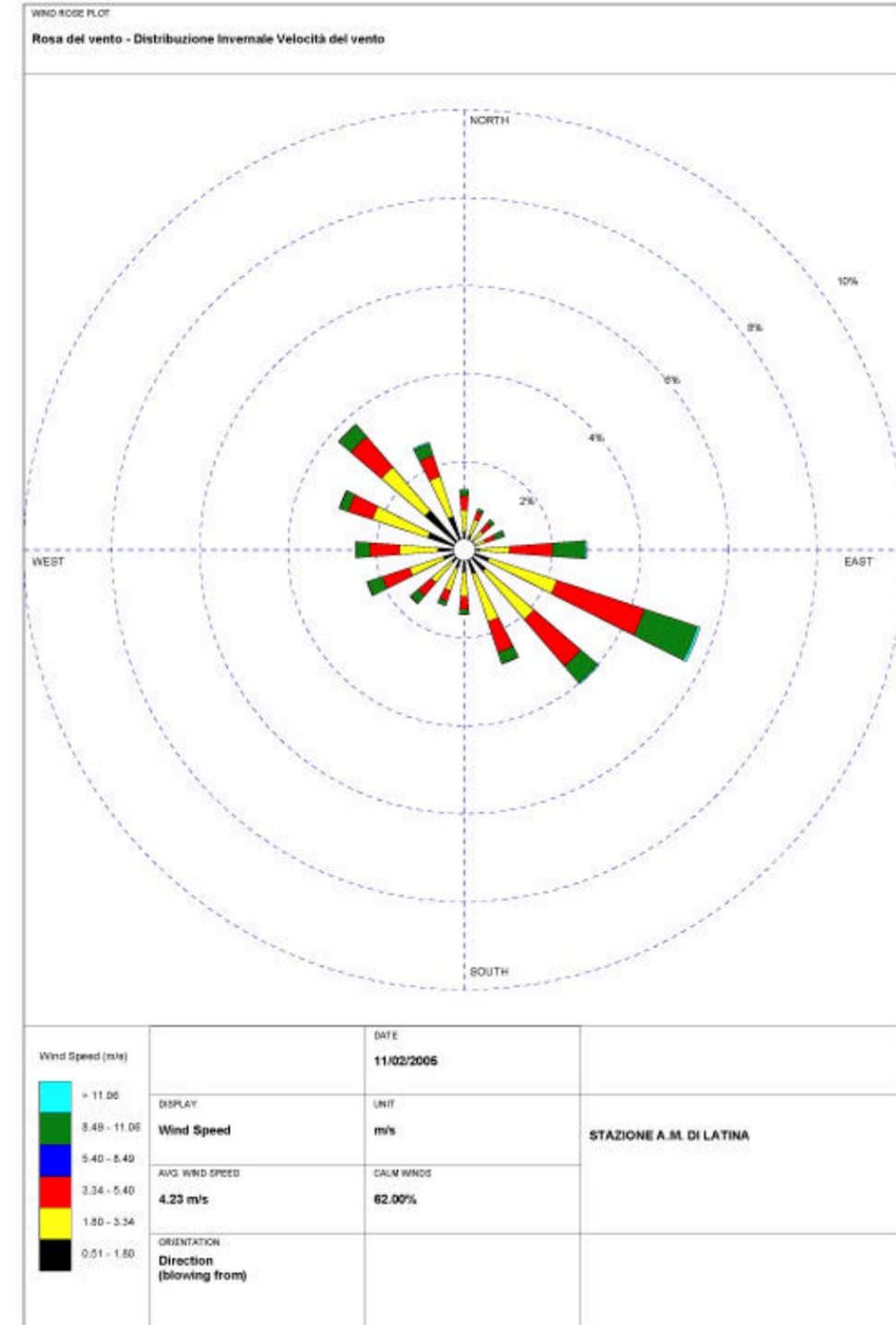
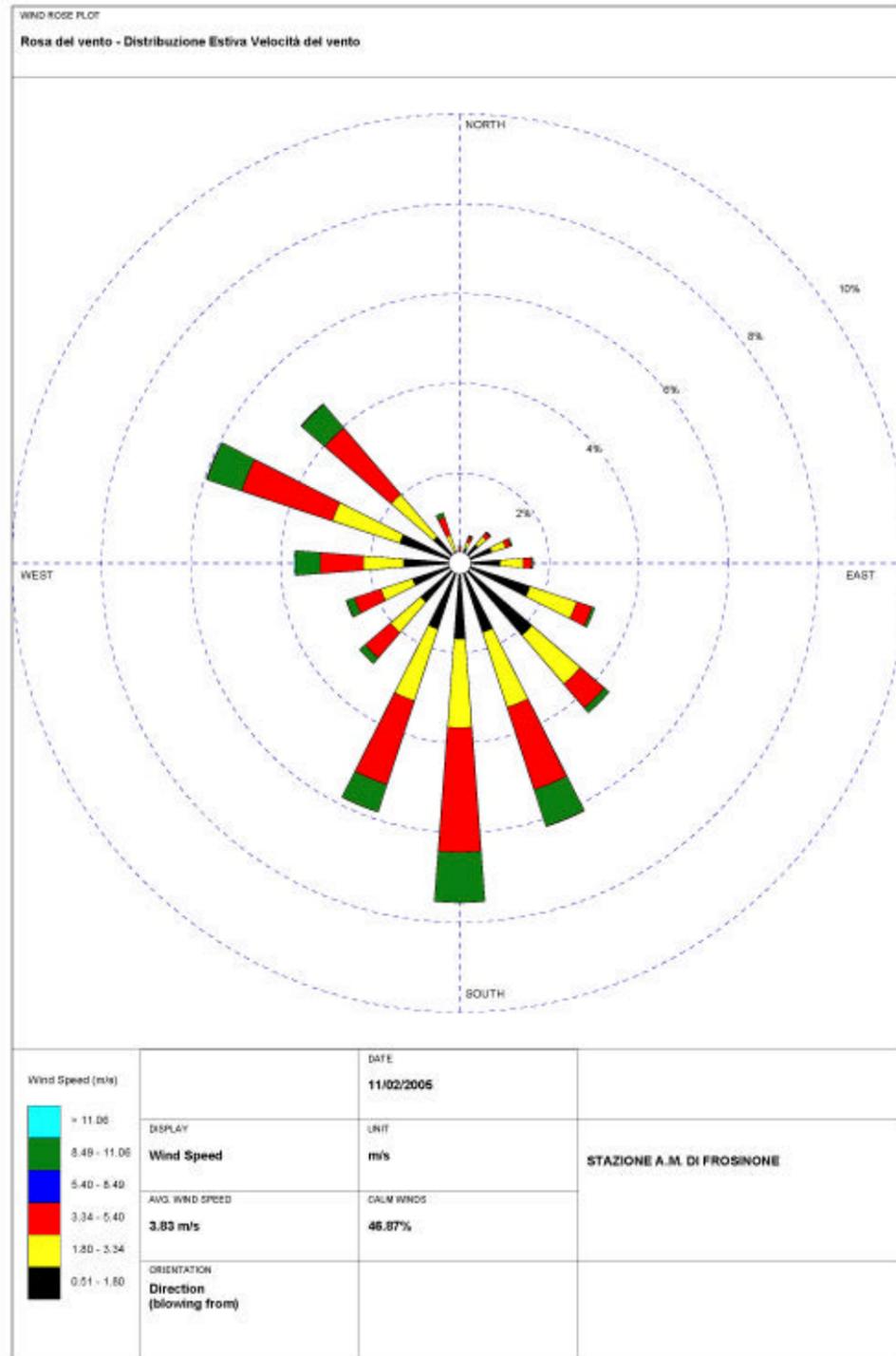
Studio di Impatto Ambientale – Quadro di Riferimento Ambientale – Integrazioni richieste dal Ministero dell'Ambiente, Commissione Speciale VIA

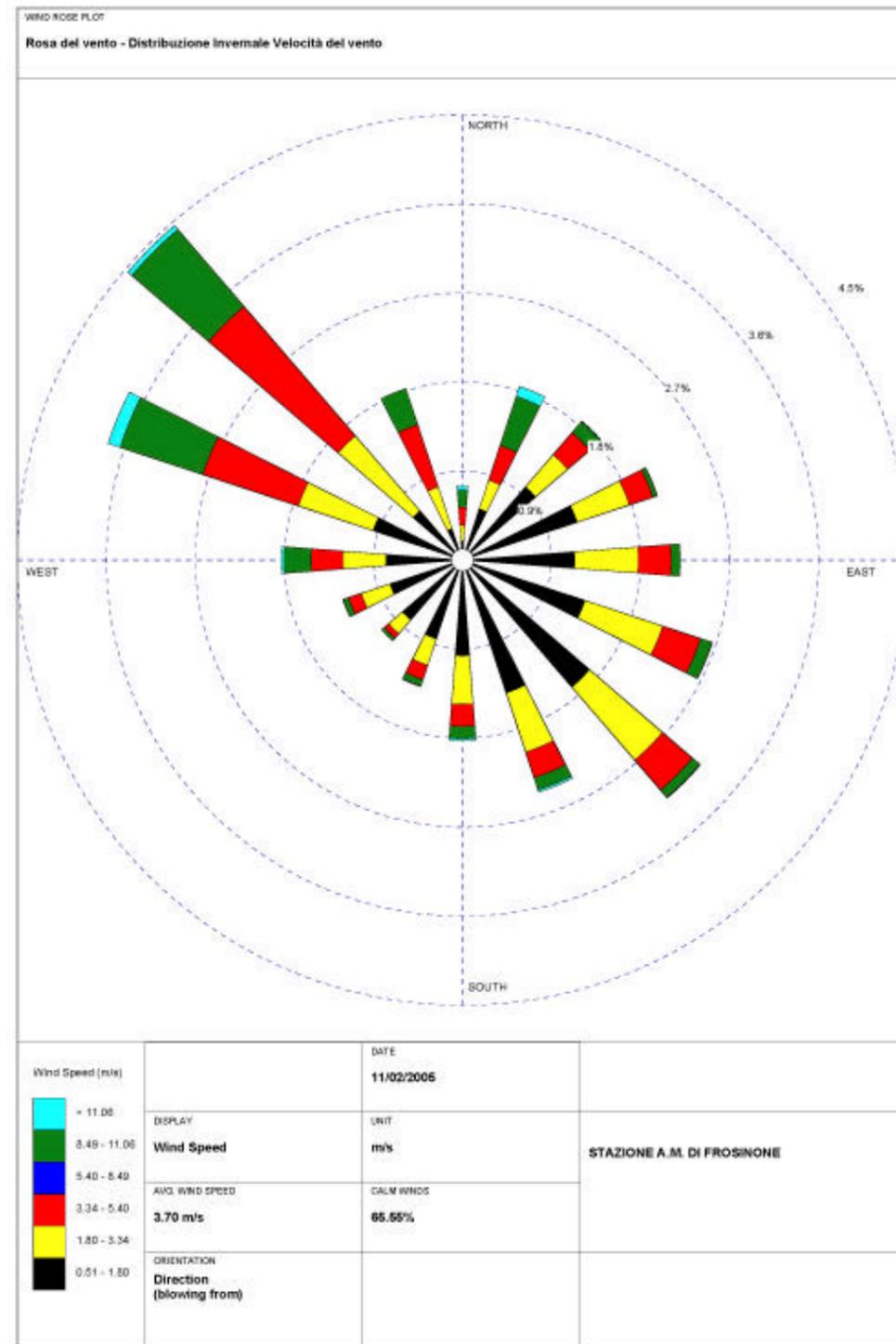


Variante alla S.S. 7 "Appia" in Comune di Formia

Progetto Preliminare

Studio di Impatto Ambientale – Quadro di Riferimento Ambientale – Integrazioni richieste dal Ministero dell'Ambiente, Commissione Speciale VIA





#### A2.4 La temperatura

Analogamente a quanto evidenziato per i venti, vengono riportate talune semplici considerazioni per le temperature in funzione della stagionalità.

##### ESTATE

- Durante le prime ore del mattino a Latina si manifestano temperature superiori di qualche grado rispetto a Frosinone a causa della maggiore elevazione della postazione di quest'ultima; sempre in queste ore a Frosinone si manifesta una maggiore umidità relativa
- In tarda mattinata le differenze di temperatura tendono ad attenuarsi, mentre l'umidità tende ad essere nettamente maggiore a Latina
- Nel tardo pomeriggio, prima serata, di nuovo, le temperature sono maggiori a Latina con umidità sostanzialmente equivalente
- In serata, temperatura ed umidità prevalgono a Latina con valori sensibilmente maggiori.

##### INVERNO

- Analogamente a quanto accade in estate, anche se su livelli inferiori, durante le prime ore del mattino a Latina si manifestano temperature solo leggermente superiori rispetto a Frosinone; sempre in queste ore a Frosinone si manifesta una maggiore umidità relativa
- In tarda mattinata la temperatura risulta superiore a Latina di qualche grado, mentre l'umidità tende ad equivalersi
- Ancora nel tardo pomeriggio, prima serata, le temperature sono maggiori a Latina con umidità sostanzialmente equivalente
- In serata, la temperatura è maggiore a Latina mentre l'umidità relativa è maggiore a Frosinone.

#### A2.5 Altezza dello strato di rimescolamento

Un altro parametro meteorologico utilizzato dai modelli previsionali è l'altezza dello strato di rimescolamento che risulta maggiore nelle categorie instabili e notevolmente ridotto in quelle stabili. Questo è dovuto al fatto che le categorie instabili sono associate a condizioni di forte insolazione che accresce i moti convettivi favorendo gli scambi termici, ed accrescendo così la

profondità dello strato di rimescolamento. Le categorie stabili sono associate ad assenza di scambi termici ed a conseguenti ridotti strati di rimescolamento.

Le misure dell'altezza dello strato di rimescolamento sono possibili solo attraverso continui sondaggi verticali dell'atmosfera. Tali misure risultano per lo più indisponibili a causa della connessa complessità ed onerosità. La determinazione delle altezze dello strato di rimescolamento per categoria di stabilità è stata effettuata tramite ricorso a dati presenti nella bibliografia di settore, alle esperienze effettuate su siti a simile orografia in funzione dell'orario della stagionalità.

Tali altezze vanno da circa 500 metri in concomitanza di categoria di stabilità A (stima cautelativa) fino a 100 metri in presenza di categoria F.

#### A2.6 Gli scenari meteorologici: i giorni tipo

La selezione degli scenari meteorologici su cui viene operata la stima delle distribuzioni di inquinanti si basa sulla caratterizzazione di due giornate tipo, una individua le tipiche condizioni di turbolenza atmosferica che si manifestano in estate, l'altra individua quelle tipiche nel periodo invernale; in sostanza, vengono così a determinarsi complessivamente due tipologie di scenari meteorologici:

- √ giorno tipo estivo
- √ giorno tipo invernale

Il periodo stagionale è associato alle diverse condizioni diffusive. Per rappresentare i giorni tipo stagionale si è fatto ricorso all'analisi degli insiemi dei dati di distribuzione che risultano presso le due stazioni di Latina e Frosinone.

Poiché i rilasci in atmosfera avvengono a una quota collinare si è ritenuto che, dove vi fosse una certa discordanza di dati fra le suddette stazioni, la stazione più appropriata fosse Frosinone in quanto collocata ad un'altezza di circa 181 metri sul mare.

I giorni tipo sono stati identificati in base a notevoli set di dati basati su circa 40 anni di misure effettuate presso la stazione dell'Aeronautica Militare di Frosinone; in particolare, sono state considerate le seguenti distribuzioni:

- Distribuzione annuale delle classi di velocità e direzione del vento per categoria di stabilità (7 tabelle)

- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento per categoria di stabilità nella stagione invernale (7 tabelle)
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento per categoria di stabilità nella stagione estiva (7 tabelle)
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento nella stagione invernale
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento nella stagione estiva
- Distribuzione delle classi di stabilità nella stagione invernale per ora sinottica
- Distribuzione delle classi di stabilità nella stagione estiva per ora sinottica
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento nella stagione invernale per ora sinottica (8 tabelle)
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento nella stagione estiva per ora sinottica (8 tabelle)
- Distribuzione di frequenza di temperatura ed umidità per ora sinottica nel mese di gennaio (4 tabelle)
- Distribuzione di frequenza di temperatura ed umidità per ora sinottica nel mese di luglio (4 tabelle)

Dalle brevi considerazioni su esposte e da un'analisi di dettaglio dell'insieme dei dati sono stati delineati i parametri identificativi delle due giornate tipo, estivo ed invernale, le quali costituiscono gli scenari meteo su cui vengono eseguite le stime delle concentrazioni degli inquinanti aerodispersi.

Nelle successive tabelle vengono riportati i valori di tali parametri.

Direzioni e velocità del vento, categorie di stabilità turbolente nei diversi periodi stagionali.						
ora	Scenario estivo			Scenario invernale		
	Direzione vento gradi	Velocità m/s	Cat. stabilità	Direzione vento gradi	Velocità m/s	Cat. Stabilità
1	310	0.5	F	290	0.5	F
2	320	0.5	F	300	0.5	F
3	60	0.5	E	320	0.5	F
4	330	0.5	D	270	0.5	F

Variante alla S.S. 7 "Appia" in Comune di Formia

Progetto Preliminare

Studio di Impatto Ambientale – Quadro di Riferimento Ambientale – Integrazioni richieste dal Ministero dell'Ambiente, Commissione Speciale VIA

5	300	0.5	D	300	0.5	F	3	200	17	100	-2
6	280	1.0	B	330	0.5	F	4	200	17	100	0
7	120	1.0	B	110	1.0	D	5	250	18	100	1
8	140	1.5	B	130	1.0	D	6	250	20	150	2
9	160	1.5	B	150	1.0	D	7	250	22	150	3
10	180	2	A	130	1.5	D	8	300	24	150	5
11	190	2.5	A	150	1.5	D	9	300	26	200	7
12	210	3.0	A	160	1.5	B	10	300	29	200	8
13	190	4.0	B	160	2	D	11	400	31	200	9
14	200	4.5	C	150	2	D	12	400	32	250	10
15	210	5.0	D	130	2	D	13	500	32	250	11
16	190	4.0	D	290	1.5	D	14	500	31	250	10
17	300	3.5	E	300	1.5	F	15	500	29	250	10
18	320	2.5	F	330	1.5	F	16	500	28	250	9
19	300	2	F	300	1.5	F	17	400	27	250	8
20	320	1.5	F	320	1.5	F	18	300	25	200	8
21	330	1.5	F	330	1.0	F	19	300	24	200	7
22	280	1.0	F	300	0.5	F	20	200	21	150	7
23	290	1.0	F	320	0.5	F	21	200	19	150	5
24	300	0.5	F	330	0.5	F	22	200	17	100	3
							23	200	16	100	2
							24	200	16	100	1

La categoria di stabilità viene utilizzata esclusivamente dal modello ISC per il calcolo delle deposizioni al suolo, mentre per le concentrazioni viene utilizzato il modello AERMOD che non si basa sulle categorie di Pasquill; tale modello necessita di altre variabili quali la lunghezza di Monin Obhukov, i flussi di calore latente e sensibile (tali parametri verranno trattati nella presentazione del modello AERMOD).

Altezze orarie dello strato di rimescolamento per tipologia di stagione (ipotesi cautelative).

Ora	Estate		Inverno	
	Altezza (m)	Temperatura (°C)	Altezza (m)	Temperatura (°C)
1	200	16	100	0
2	200	16	100	-1

### A3. GLI SCENARI EMISSIVI DI RIFERIMENTO

#### A3.1 Problematiche di caratterizzazione

Lo sviluppo della fase di ricerca ed elaborazione degli scenari emissivi risulta forse la parte più critica dell'intero lavoro. La complessità della caratterizzazione dipende da una serie di fattori fra i quali:

- Scarsità di lavori o ricerche a livello internazionale dovuta al fatto che l’interesse degli organismi più accreditati, dei comitati scientifici e degli Enti nazionali preposti alla sicurezza, sia rivolto soprattutto alle problematiche di tenuta delle strutture e delle apparecchiature di soccorso, nonché alle capacità di evacuazione e soccorso. In questo caso gli indicatori di riferimento maggiormente significativi sono la temperatura, la potenza energetica sviluppata, l’opacità, i gas ad effetto narcotizzante. Poche le informazioni riguardo i gas tossici, soprattutto in termini di concentrazioni misurabili o prevedibili.
- Enorme varietà degli scenari ipotizzabili in base sia alla natura dell’evento sia in termini delle tipologie di merci coinvolte.

Poiché la gravità degli incidenti potrebbe comportare la perdita di diverse vite umane risulta ovvio che le maggiori risorse vengano impegnate soprattutto verso le problematiche di sicurezza trascurando gli aspetti più propriamente ambientali.

Tenuto conto delle incertezze e dell’estrema variabilità dei possibili scenari si è proceduto con un approccio cautelativo che tenesse conto dei seguenti fattori:

- Analisi delle esperienze di incidenti rilevanti ben conosciuti e di cui risultano approfonditi studi, con particolare riguardo agli effetti sanitari ed ambientali (Monte Bianco, Gottardo, ecc.)
- Esperimenti tenuti da varie commissioni tecniche internazionali (Memorial Tunnel, Hagerbach Tunnel) per l’analisi dell’efficienza dei sistemi di sicurezza alla luce dei suddetti incidenti. Tali studi tendono a verificare l’efficienza dei sistemi nel caso in cui si ripresentino analoghe cause di incidenti come quelle citate in precedenza.
- Indicazioni, raccomandazioni e linee guida elaborate dagli organismi internazionali
- Ipotesi di concentrazioni orarie all’interno della galleria che vengono mantenute costanti per l’intera durata dell’evento, anche se normalmente le concentrazioni di picco si riscontrano nella prima ora dell’incidente, per poi ridursi per effetto della diluizione con aria aspirata
- Stima di due livelli incidentali uno di tipo grave, l’altro rilevante. Tali tipologie di incidente sono associate ad eventi a bassa probabilità di occorrenza.
- Analisi di due tipologie di sostanze tossiche in funzione dell’effetto sanitario acuto:
  1. narcotizzante
  2. irritante

Alla prima famiglia appartengono CO e HCN (CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> non vengono considerati in quanto all’esterno della galleria, ovvero in ambiente aperto, non costituiscono un inquinante).

Alla seconda famiglia appartengono HCl, HF, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CH<sub>2</sub>CHCHO, HCHO, polveri e metalli.

Dal punto di vista della sicurezza, l’esposizione ad elevate concentrazioni di gas narcotizzante produce, in caso di incendio, la principale causa di morte, in quanto limita la possibilità di evacuazione o l’allontanamento dalla sorgente. Quando inalati, tali gas provocano incapacità al movimento ed in casi estremi la morte in pochi minuti; i gas narcotici, infatti, attaccano il sistema centrale nervoso causando una riduzione della lucidità, delle capacità motorie e provocando intossicazione. Esposizioni di qualche minuto ad alta concentrazione (come quelle trattate nel presente studio) causano perdita di coscienza ed eventualmente la morte. La misura dell’effetto narcotizzante dipende non solo dalla concentrazione atmosferica ma anche dalla dose inalata.

I gas irritanti prodotti dalla combustione causano irritazioni agli apparati sensoriali, agli occhi, trachea, polmoni, gradualmente dalla irritazione grave al blocco respiratorio. Con la crescita dell’irritazione le capacità motorie calano pericolosamente. L’effetto tossico è strettamente connesso con la concentrazione, la quale, se estremamente elevata, può causare gravi alterazioni metaboliche fino alla morte.

In base alle suddette considerazioni, dovendo analizzare scenari legati ad eventi estremamente gravi sono stati ipotizzati livelli di concentrazione in galleria estremamente elevati ed in linea con effetti di tipo gravissimo come quelli sopra descritti.

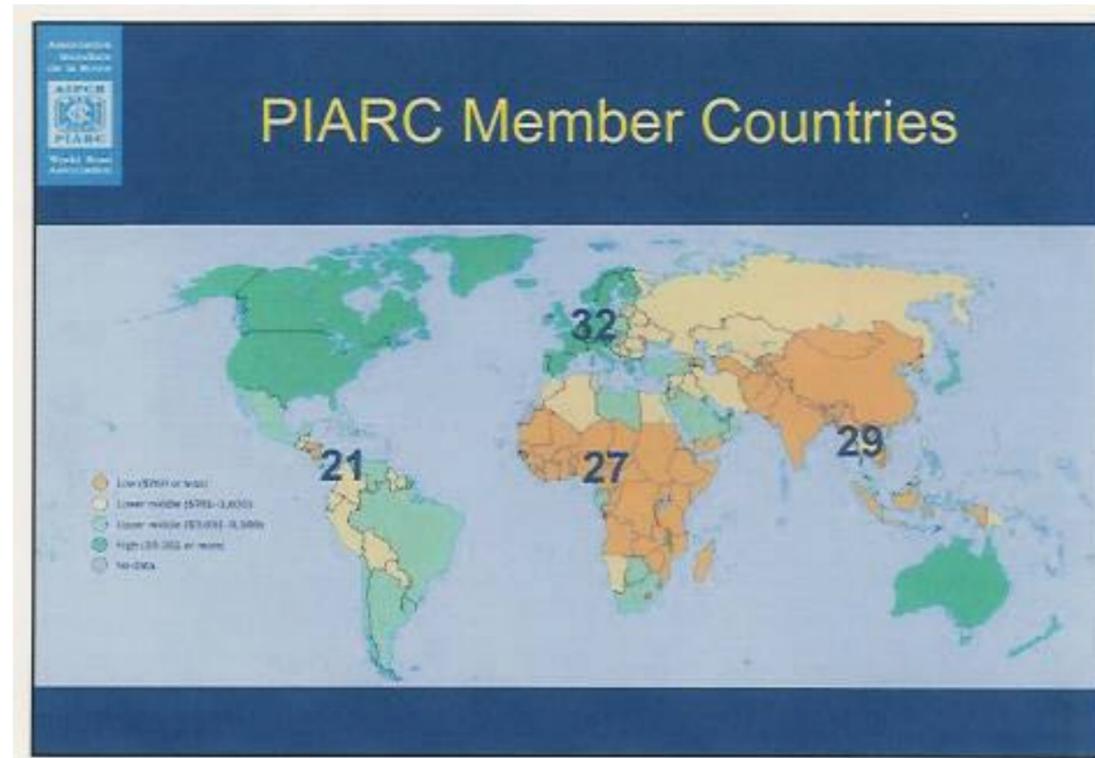
### **A3.2 Le cause**

In questa sezione vengono analizzate le principali cause di incidente e le probabilità di occorrenza degli eventi. Tali considerazioni si basano su documenti dei vari organismi governativi e non governativi che producono linee guida, analizzano i casi incidentali, elaborano statistiche in base alla raccolta delle informazioni provenienti dai relativi stati membri. Tra questi organismi ricordiamo:

- PIARC
- OECD
- NIST
- FIT

La frequenza di incendi in galleria nei paesi più avanzati dell’Unione Europea si aggira intorno a:

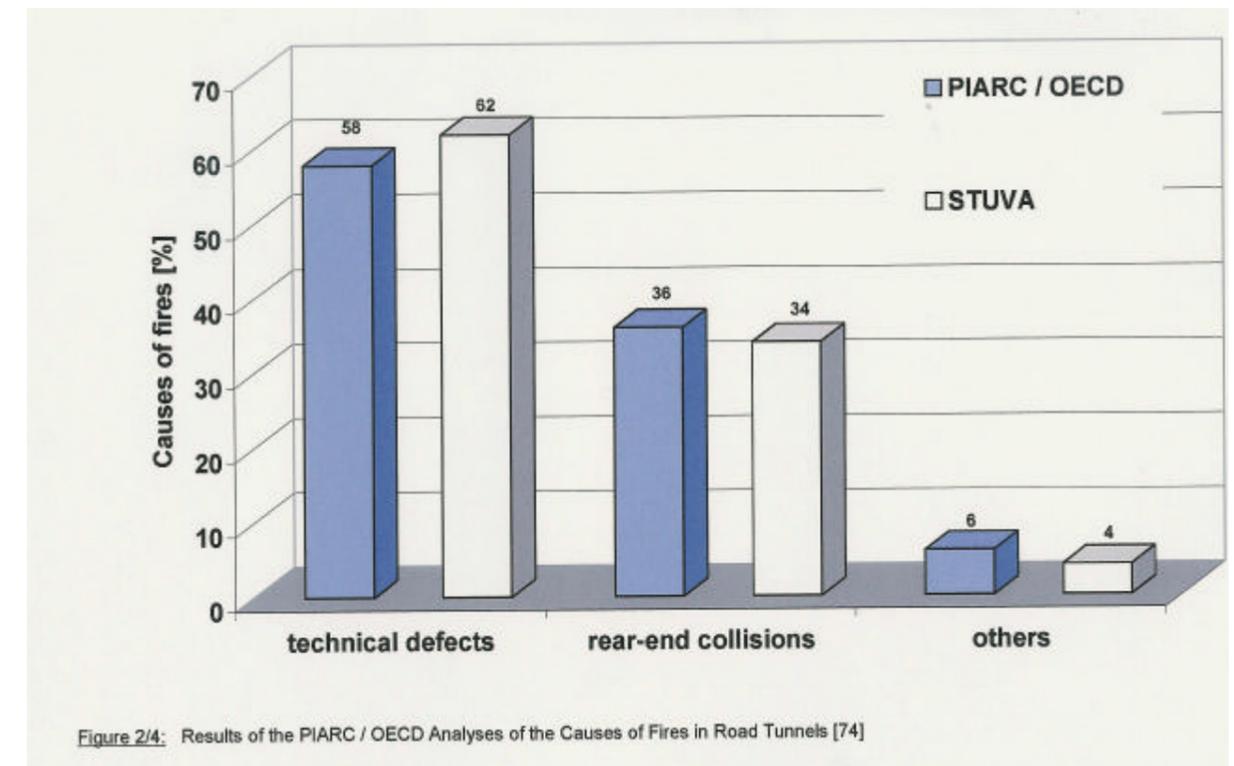
- 0,1% di tutti i veicoli che prendono fuoco
- tra 0,3 e 0,45% dei veicoli che prendono fuoco con motore acceso
- tra 6,7 e 10% dei veicoli che prendono fuoco in seguito a collisione



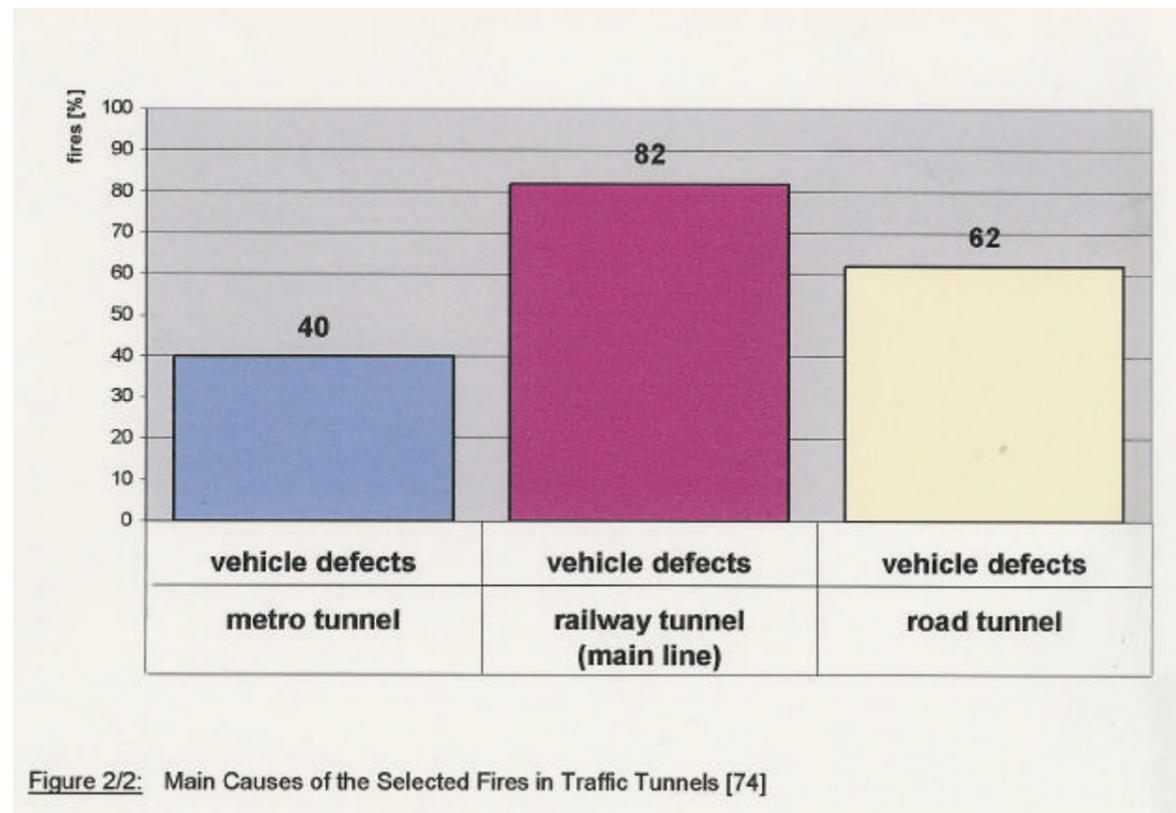
Le statistiche incidentali si basano su eventi degli ultimi 20-30 anni per cui le analisi di probabilità incidentale non possono essere applicate tal quale alla singola galleria, in quanto ogni situazione, ogni progetto di galleria ha peculiarità proprie che possono discostarsi sensibilmente dai vari campioni statistici. Ad esempio un incidente avvenuto negli anni 70-80 non avverrebbe oggi o almeno potrebbe provocare effetti non nelle medesime proporzioni.

Alcune considerazioni generali riportate di seguito possono però aiutare a comprendere quali siano le dimensioni delle problematiche dovute agli eventi incidentali in galleria.

Gli studi condotti dalle commissioni tecniche del PIARC/OECD e del STUVA sugli incendi degli ultimi 40 anni mostrano le cause principali connesse con incendi in galleria. Dall’immagine riportata di seguito si evidenzia che la prima causa di incendio in galleria è attribuibile a difetti dei veicoli stradali ed in secondo luogo ad incidenti tra veicoli



Un analogo studio eseguito in Inghilterra (Home Office UK), paese tra i più impegnati nelle ricerche di tali problematiche, conduce a conclusioni analoghe come si può osservare dalla figura che segue.



Anche in questo caso il 62% sul totale degli eventi è causato da difetti dei veicoli

Dallo studio di Inland Transport Committee dell'Economic and Social Council delle Nazioni Unite, nell'ambito della Economic Commission for Europe vengono indicate delle generali probabilità incidentali su strade ed in galleria dell'Unione Europea.

L'indice di rischio normalmente indica la probabilità dell'evento incidentale sul numero medio dei veicoli per unità chilometrica. Tale indice viene espresso sul numero medio giornaliero dei veicoli su base annuale (numero totale annuale dei veicoli diviso per 365). L'indice di rischio in galleria viene normalizzato su 100 milioni di veicoli chilometro; in base a tale indice, nel suddetto studio, in accordo con le risultanze del PIARC vengono riportate semplici conclusioni riguardo le frequenze di incidenti in galleria :

- 1.300 in aree urbane
- tra 900 e 1900 in aree montuose

Tale frequenza cresce in dipendenza del gradiente stradale fino a circa 5 volte per tunnel con gradiente di circa 2,5%

La frequenza, invece, degli eventi con incendio è nettamente inferiore sia su strada sia in tunnel. Come già evidenziato in precedenza la maggioranza degli incendi non sono causati da incidenti, bensì da autocombustione dovuta generalmente a difetti nell'impianto elettrico, di combustione o altro. Quando però si considerano eventi a gravissimo impatto (circa 14 nel mondo) questi sono per lo più causati da incidenti fra veicoli, fatta eccezione per il Monte Bianco dove l'evento è stato causato da autocombustione di mezzo pesante.

Nel 1999 il PIARC ha presentato uno studio di sintesi (Fire and Smoke Control in Road Tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels – C5) in base alle informazioni raccolte presso i vari stati membri:

- in nessun caso la frequenza di incendi in tunnel è superiore a 25 su 100 milioni veicoli chilometro
- la frequenza degli incendi è maggiore nelle gallerie urbane
- in taluni tunnel (Chamois, Elbe, Frejus, Monte Bianco, Gottardo) gli eventi sono causati per lo più da mezzi pesanti
- la frequenza degli incendi cresce in funzione della lunghezza e del volume del traffico
- in molti casi è coinvolto un solo veicolo (in accordo con le considerazioni relative all'autocombustione)

### A3.3 Gli effetti degli incidenti in galleria

L'effetto di un incidente viene primariamente accusato dai soggetti direttamente coinvolti e dagli utenti della strada. Il numero dei casi nei quali le persone che non sono a diretto contatto con l'evento incidentale (ad esempio rilascio di sostanze tossiche nell'ambiente) è molto basso e difficilmente quantificabile. Dal punto di vista ambientale una componente ambientale rilevante è il sistema drenante della strada che permette il convogliamento delle acque inquinate, nel caso di rilasci non susseguenti ad incendi.

La componente atmosferica viene coinvolta soprattutto in caso di incendio per immissione in atmosfera dei prodotti della combustione come nel caso trattato dal presente studio, dove l'aria viene convogliata in un camino da dove vengono espulsi i fumi che si creano in galleria. Occorre

ribadire ancora una volta che gli effetti primari riscontrati negli incendi in galleria sono da collegarsi con la scarsa visibilità che ostacola l'evacuazione ed il soccorso, le alte temperature, la riduzione dei livelli di ossigeno nell'aria e la creazione di smog tossico. Risulta ovvio che per l'ambiente esterno, in caso di emissione al camino, gli indicatori non avranno la medesima rilevanza degli stessi considerati nel tunnel, anzi a volte un indicatore "sfavorevole" in galleria potrebbe diventare favorevole in ambiente: è il caso della temperatura. Quest'ultima, infatti, mentre in galleria potrebbe comportare severi danni strutturali, alle apparecchiature di emergenza, provocare effetti sanitari rilevanti anche per brevi esposizioni, potrebbe essere favorevole nel caso di rilasci di gas tossici dal camino in quanto causerebbe un innalzamento dei fumi favorendo la dispersione e diminuendo così le ricadute in termini di concentrazione e deposizione al suolo.

Nel caso di espulsioni dal camino dell'aria estratta dalla galleria gli indicatori principali di riferimento sono le emissioni di gas tossici che disperdendosi in atmosfera tendono a diffondersi su ampie zone di territorio. Lo scopo del presente studio sarà di valutare la distribuzione critica di tali livelli di inquinamento nel caso di eventi incidentali gravi.

Analizzando ancora un evento incidentale nell'ambito degli effetti che si manifestano all'interno ed all'esterno della galleria tramite espulsione dal camino di aspirazione dell'aria, occorre precisare anche che:

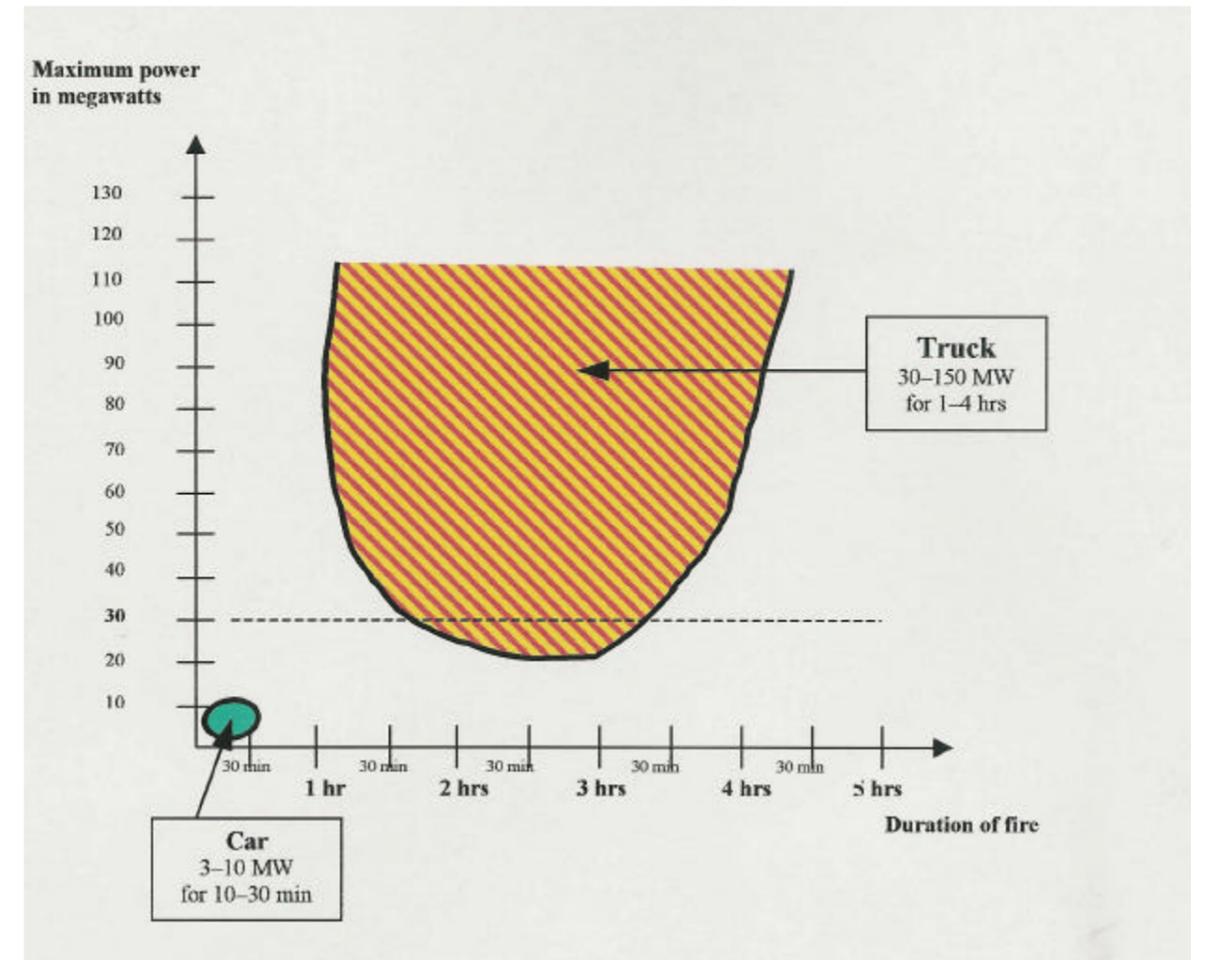
- al raddoppiare delle emissioni di gas tossici in galleria si riscontra un raddoppio delle concentrazioni degli stessi
- al raddoppiare delle emissioni di gas tossici in galleria non corrisponde un raddoppio delle concentrazioni e delle deposizioni all'esterno, in quanto, anche se raddoppiano le emissioni al camino, si manifesta anche una crescita della temperatura dei fumi che incide sensibilmente sulla dispersione degli inquinanti emessi

L'entità di un livello incidentale che causa incendio può essere valutata in termini di sviluppo del calore, ovvero in megawatt. Nella tabella a seguire vengono riportate tipiche potenze energetiche associate a incendi di vari veicoli (fonte PIARC)

Energie e potenze sviluppate in incendi in funzione del veicolo coinvolto			
Tipo veicolo	Tipico carico energetico (MJ)	Tipiche potenze (MW)	Note
auto	3.000 – 3.900	2,5 - 5	Scenario utilizzato come test in

			Finlandia
bus	41.000	20	Livelli utilizzati in test EUREKA.
camion	65.000	20 - 30	Nella stima dei rilasci non sono considerati eventuali tank di trasporto combustibile
TIR	88.000	30	

L'immagine che segue rende immediatamente visibile gli intervalli delle potenze e delle durate degli eventi associati



A livello Europeo il PIARC consiglia di porre come riferimento per la progettazione e il dimensionamento degli impianti di ventilazione una potenza di 30 Megawatt.

Nel presente studio sono stati invece analizzati due possibili scenari ad elevato impatto:

1. 50 MW
2. 100 MW

Per entrambi gli scenari sono state calcolate le temperature in flusso laminare associate ai fumi convogliati in camino; tali temperature sono ancora inferiori ai livelli di criticità dell’impianto di aspirazione progettato per la galleria

#### A3.4 Le emissioni

Come già evidenziato in precedenza risulta molto difficile riuscire a quantizzare le emissioni di gas tossici in galleria a causa della estrema varietà delle condizioni in cui avviene la combustione, della vastità delle tipologie merceologiche e dei relativi prodotti di combustione; inoltre, solo negli ultimi anni si è posta l’attenzione sui possibili effetti ambientali oltre ai consolidati studi sulla sicurezza interna dove le problematiche si manifestano in modo certamente più critico.

In tale contesto di carenza informativa si è ritenuto di analizzare due tipologie di incidenti ai quali associare livelli di concentrazione che provocano i relativi effetti sulla incapacità di evacuazione dalla zona incidentata. Tale scelta si giustifica con l’esperienza che le perdite di vita in incendi in galleria è associata con il mancato allontanamento in pochi minuti dal luogo in cui avviene l’evento. Pertanto, per i due scenari analizzati, sono stati considerati i corrispondenti livelli di concentrazione che provocano i seguenti effetti:

1. indebolimento delle capacità comportamentali di evacuare il luogo di incidente per metà della popolazione adulta
2. impossibilità di evacuare il luogo di incidente per metà della popolazione adulta

In base a questi due criteri sono stati identificati i corrispondenti livelli di concentrazione dei principali prodotti di combustione. Tali livelli sono noti da una serie di studi riportati anche nel documento “Hazards by fires”, PIARC ed illustrati nella successiva tabella

Livelli di concentrazione associati ai limiti comportamentali nell’evacuazione del luogo dove si verifica l’evento incidentale, utilizzati negli scenari di calcolo

	Concentrazione (ppm)
--	----------------------

Gas tossico	Impedimento in metà della popolazione – scenario 1	Impossibilità per metà della popolazione – scenario 2
HCl	200	900
SO <sub>2</sub>	25	120
NO <sub>2</sub>	70	350
Acroleine – CH <sub>2</sub> CH CHO	4	20
Formaleide - HCHO	6	30
HCN	40	150

Per altre sostanze tossiche trattate nello studio sono stati presi come riferimento valori massimi associati a combustioni di materiale vario di potenza termica analoga. Anche tali valori si pongono su livelli di severo danno sanitario anche per esposizioni di breve durata.

Livelli massimi di concentrazione associati a prodotti di combustione (mg/m <sup>3</sup> )		
Sostanza	Scenario 1	Scenario 2
HF	50	200
PM <sub>10</sub>	1000	3500
metalli	30	100
CO	3500	17000

Allo scenario 1 è associata una potenza termica di circa 50 MW, allo scenario 2 una potenza di circa 100 MW; in realtà allo scenario 2 potrebbero essere associate potenze ben più elevate. L’ipotesi di non conservare la linearità tra potenza e concentrazione all’interno della galleria si basa sull’ipotesi cautelativa che per incendi intorno 100MW vengano coinvolti mezzi pesanti con trasporto di merce di vario genere che contribuisce alla generazione di prodotti particolarmente tossici.

Un incremento della potenza a parità di concentrazioni tossiche comporta una situazione più critica in galleria (alte temperature e alte concentrazioni), ma meno critica in ambiente aperto (parità di concentrazione, innalzamento fumi per effetto termico).

In base alla potenza termica, alla portata dell’impianto di aspirazione, alla sezione dei condotti è possibile stabilire l’incremento termico dell’aria; all’incendio di potenza termica di 50MW è associato un incremento termico di circa 108°C, alla potenza termica di 100MW è associato un incremento netto di 216°C.

Nella tabella che segue vengono riportate le caratteristiche fisiche delle emissioni al camino.

Principali caratteristiche fisiche del punto di rilascio		
	Scenario 1	Scenario 2
Portata (m <sup>3</sup> /s)	240	
Altezza del rilascio	In corrispondenza del pendio – livello del suolo	
Sezione camino (m <sup>2</sup> )	28,26	
Potenza termica (MW)	50	100
Temperatura (°C)	108	216
Durata stimata dell’evento (h)	3	4

Gli indicatori trattati nel presente studio ovviamente non sono esaustivi del complesso panorama che potrebbe risultare dalla combustione di sostanze con rilascio di gas tossici.

Le sostanze trattate, comunque, comprendono una notevole varietà di possibili casi e costituiscono la base utile all’analisi dei livelli di impatto e delle relative dimensioni delle aree interessate.

Un’altra tipologia di approccio per la determinazione delle sostanze generate da incendi, che comunque ancora necessita di ricerche maggiormente approfondite, si basa sullo studio dei fattori di emissioni delle sostanze bruciate. Nelle successive tabelle verranno riportati i fattori di emissione relativi alle masse di fumo (polveri) che si generano per unità di massa di combustibile bruciato; l’intervallo dei valori è normalmente compreso fra poche unità percentuali fino a circa il 30% di massa combustibile. Combustibili quali legno e metano costituiscono gli estremi di questa scala, rispettivamente superiore ed inferiore.

La misura di tale livello di polvere (smoke), per la determinazione dei fattori di emissione, non è banale per problematiche termodinamiche, per accuratezza nel peso dei filtri, per il prelievo dei campioni di misura a causa della forte eterogeneità dei flussi. Altre cause che concorrono all’incertezza dei fattori di emissione sono in relazione alle differenti condizioni in cui avvengono gli incendi (differenti flussi radiativi), l’incompleta caratterizzazione dei materiali bruciati, la configurazione del campione bruciato, ecc.

La determinazione sperimentale di tali fattori di emissione è pertanto piuttosto approssimativa e difficilmente applicabile a singoli eventi.

La successiva tabella tratta da “Generation and Transport of Smoke Components”, (Kathryn et al., Fire Technology, 40, 149-176, 2004) evidenzia che la quantità di smoke generato è fortemente dipendente dalla tipologia del materiale bruciato in condizioni di buona ventilazione. Combustibili contenenti ossigeno, quali alcoli, mostrano fattori di emissione minori, mentre agli aromatici sono associati i fattori maggiori.

**TABLE 1  
Smoke Yields for Flaming Combustion in Air from Tewarson [5]**

Material	Smoke Yield (g <sub>smoke</sub> /g <sub>fuel</sub> )	Comments
Gases and Liquids		
Ethyl alcohol	0.008	C–H–O
Ethane	0.013	C–H
Propane	0.024	C–H
Heptane	0.037	C–H
Propylene	0.095	C–H unsaturated
Acetylene	0.096	C–H unsaturated
Styrene	0.177	C–H aromatic
Toluene	0.178	C–H aromatic
Solids (Polymers)		
Teflon (PTFE)	0.003	C–F halogenated linear structure
Wood (red oak)	0.015	C–H–O structure
Polymethylmethacrylate (PMMA)	0.022	C–H–O structure
Polypropylene (PP)	0.059	C–H branched structure
Polyethylene (PE)	0.060	C–H linear structure
Nylon	0.075	C–H–O–N linear structure
Polyester (PET)	0.089–0.091	C–H–O aromatic structure
Polycarbonate (PC)	0.112	C–H–O aromatic structure
Rigid polyurethane (PU) foam	0.104–0.130	C–H–O–N aromatic structure
Flexible polyurethane (PU) foam	0.131–0.227	C–H–O–N aromatic structure
Polystyrene (PS)	0.164	C–H aromatic structure
Polyvinylchloride (PVC)	0.172	C–H–Cl halogenated linear structure

Occorre evidenziare che tali fattori dipendono notevolmente anche dalle condizioni di ventilazione; ovvero in condizioni di sottoventilazione, a causa della combustione incompleta, i fattori di emissione aumentano notevolmente. Misure effettuate sui prodotti di combustione del legno hanno dimostrato che in condizioni di scarsa ventilazione il fattore di emissione cresceva di un ordine di grandezza rispetto a condizioni di iperventilazione. La frazione organica dell’aerosol cresce in condizioni di incendi sottoventilati; in questo caso l’aerosol prodotto è certamente più tossico dello stesso prodotto in condizioni di iperventilazione.

Nella successiva immagine (tabella in originale) vengono riportati una serie di fattori di emissione per vari tipi di combustibile; dalla stessa è possibile osservare la variabilità dei fattori per il medesimo combustibile.

**Table 41. Smoke Yields for Flaming Combustion in Air**

Material	Smoke Yield (g <sub>smoke</sub> /g <sub>fuel</sub> )	Comments	References
PVC	0.185	9.6 l/s airflow	Patterson et al., 1990 <sup>57</sup>
PVC	0.094, 0.144	4.8 l/s airflow	Patterson et al., 1991 <sup>60</sup>
Asphalt	0.119	9.6 l/s airflow, 80 kW/m <sup>2</sup>	Patterson et al., 1991 <sup>60</sup>
PC	0.102, 0.104		Patterson et al., 1990 <sup>57</sup>
Asphalt	0.097	9.6 l/s airflow, 50 kW/m <sup>2</sup>	Patterson et al., 1991 <sup>60</sup>
Rigid PU foam	0.085, 0.091		Zinn et al., 1979 <sup>62</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
Tire rubber	0.082, 0.089	9.6 l/s airflow	Patterson et al., 1990 <sup>57</sup>
Expanded PS foam	0.085		Zinn et al., 1979 <sup>62</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
#5 Diesel oil	0.071	9.6 l/s airflow	Patterson et al., 1991 <sup>60</sup>
Asphalt	0.061	5 l/s airflow, 50 kW/m <sup>2</sup>	Patterson et al., 1991 <sup>60</sup>
Rigid trimer foam	0.060		Zinn et al., 1979 <sup>62</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
#5 Diesel oil	0.045, 0.053	4.8 l/s airflow	Patterson et al., 1991 <sup>60</sup>
Plain rubber	0.045	4.8 l/s airflow	Patterson et al., 1990 <sup>57</sup>
PP	0.042		Patterson et al., 1990 <sup>57</sup>
PS	0.032, 0.041		Zinn et al., 1978 <sup>53</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup> , Patterson et al., 1990 <sup>57</sup>
#2 Diesel Oil	0.023, 0.035, 0.045		Patterson et al., 1991 <sup>60</sup>
Kerosene	0.027, 0.031		Patterson et al., 1991 <sup>60</sup>
HDPE	0.028		Patterson et al., 1990 <sup>57</sup>
Flexible PVC	0.028		Zinn et al., 1978 <sup>53</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
Rigid PVC	0.025		Zinn et al., 1978 <sup>53</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
Wood	0.025	25 kW/m <sup>2</sup>	Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
PP	0.018		Zinn et al., 1978 <sup>53</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
Rigid PVC	0.012		Bankston et al., 1978 <sup>61</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
MDPE	0.012		Zinn et al., 1978 <sup>53</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
PMMA	0.008-0.018		Zinn et al., 1978 <sup>53</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup> , Patterson et al., 1990 <sup>57</sup>
Flexible PU foam	< 0.01		Bankston et al., 1978 <sup>61</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>
Wood	0.0026, 0.0041, <0.01	80, 50 kW/m <sup>2</sup>	Patterson et al., 1990 <sup>57</sup> , Bankston et al., 1981 <sup>59</sup>

A completamento di tale sezione, viene riportato di seguito uno schema tratto da NIST Technical note 1439 "International study of the sublethal effects of fire smoke on survivability and health (SEFS)", nel quale vengono illustrati i principali effetti delle sostanze trattate nel presente studio.

(Sublethal effects occurring: A, below 10<sup>-5</sup> volume fraction (10 ppm by volume); B, 10<sup>-5</sup> to 10<sup>-4</sup> volume fraction (tens of ppm by volume); C, at 10<sup>-4</sup> to 10<sup>-3</sup> volume fraction (hundreds of ppm by volume); D, at 10<sup>-3</sup> to 10<sup>-2</sup> volume fraction (thousands of ppm by volume).<sup>98</sup>)

Toxic Gas	Potential Sources	Sublethal Effects
Acrolein (CH <sub>2</sub> =CHCHO)	Cellulosic materials, e.g., wood, cotton, paper; polystyrenes, ABS	A
Toluene diisocyanate (TDI)	Flexible polyurethane foams	A
Formaldehyde (HCHO)	POM, polypropylenes	B
Hydrogen cyanide (HCN)	Nitrogen-containing materials, e.g., wool, silk, PAN, ABS, acrylic fibers, nylons, urea/formaldehyde, melamine, polyurethanes, polyacrylamide	C
Nitrogen dioxide (NO <sub>2</sub> )	Nitrogen-containing materials	B
Hydrogen chloride (HCl)	PVC and chlorinated additives	B, D
Hydrogen fluoride (HF)	PTFE, other fluorinated compounds and additives	B
Hydrogen bromide (HBr)	Brominated compounds and additives	B,D
Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> )	Sulfur-containing materials, e.g., wool, vulcanized rubbers, poly(phenylene sulfide)	B
Hydrogen sulfide (H <sub>2</sub> S)	Sulfur-containing materials	C
Ammonia (NH <sub>3</sub> )	Nitrogen-containing materials	C
Styrene (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> )	Polystyrenes, ABS	C
Toluene (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	Polystyrenes, PVC, polyurethane foams	D
Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	Polystyrenes, PVC, polyesters, nylons	C

In conclusione di questa sezione, possiamo affermare che sono stati trattati i principali indicatori tossici di cui si dispone di informazioni semi quantitative. Gli scenari incidentali sono stati configurati ad elevato impatto compatibilmente con gli attuali sistemi di sicurezza.

**Le configurazioni incidentali utilizzate nel presente studio si pongono nella scala estrema di quelle attualmente previste dagli organismi accreditati dai Paesi maggiormente sviluppati. A titolo di esempio, risulta banale osservare che non**

**avrebbe alcun senso riprodurre gli effetti manifestatisi nell’incidente del Monte Bianco, in quanto, come risulta dalle Commissioni Internazionali, tale incidente non sarebbe riproducibile con le stesse modalità con gli attuali sistemi di sicurezza.**

Nonostante le diversità delle energie associate al noto evento del Monte Bianco e quella utilizzata nel presente studio (comunque rilevante), possiamo affermare che nell’ambito delle concentrazioni orarie delle sostanze tossiche considerate vi è una sostanziale equivalenza; le differenze infatti risiedono per lo più nella durata dell’evento: 50 ore per l’incendio del Monte Bianco, 4 ore quella trattata nel presente studio. La maggiore durata dell’evento non incide sui picchi orari (già analizzati nello studio come worst case), bensì inciderebbe sulle deposizioni al suolo. Occorre comunque evidenziare che negli elaborati di seguito allegati, vengono presentati anche i grafici relativi alle concentrazioni orarie massime che si possono verificare ad ogni recettore sul periodo del giorno tipo sulle 24 ore. Tali rappresentazioni grafiche vanno così interpretate:

- le concentrazioni massime in tutti i recettori non sono verificabili contemporaneamente in quanto trattasi di valori che si verificano in contesti orari e meteorologici differenti
- i valori interpolati sono i livelli di concentrazione massima che possono verificarsi presso un singolo recettore per l’intervallo di un’ora sulle 24 in cui l’evento si manifesta

Nella tabella a seguire vengono illustrati i principali parametri caratterizzanti l’incidente del Monte Bianco ed i due scenari trattati nel presente studio

Sintesi dei parametri principali che caratterizzano l’evento incidentale del Monte Bianco <sup>1</sup> e gli scenari trattati nel presente studio			
Parametro	Incidente del 24/3/99	Presente studio	
	Monte Bianco	Scenario 1	Scenario 2
Energia (GJ)	6000 - 9000	540	1440
Durata evento (ore)	50	3	4
Potenza media (MW)	30 -50	50	100
Principali sostanze emesse	Acroleine (margarina) – CO – NO2 – HCl (PVC) – HCN (poliuretano) - HCHO	Acroleine – CO – NO2 – HCl – HCN – HCHO - SO2 – PM10 – Metalli - HF	
Concentrazioni	Non quantificate	Difficoltà motorie – valori massimi provenienti da combustioni sperimentali di materiale composito di similare potenza	Perdita di vita per esposizioni di pochi minuti – valori massimi provenienti da combustioni sperimentali di materiale composito di similare potenza

**<sup>1</sup> TASK FORCE FOR TECHNICAL INVESTIGATION  
OF THE 24 MARCH 1999 FIRE  
IN THE MONT BLANC VEHICULAR TUNNEL  
Report of 30 June 1999**

Minister of the Interior  
Ministry of Equipment, Transportation and Housing  
Inspector General of the Administration  
Board of Bridges and Highways  
Report of the Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Vehicular Tunnel

#### A4. I MODELLI PREVISIONALI DI CALCOLO

##### A4.1 Il calcolo delle concentrazioni: AERMOD

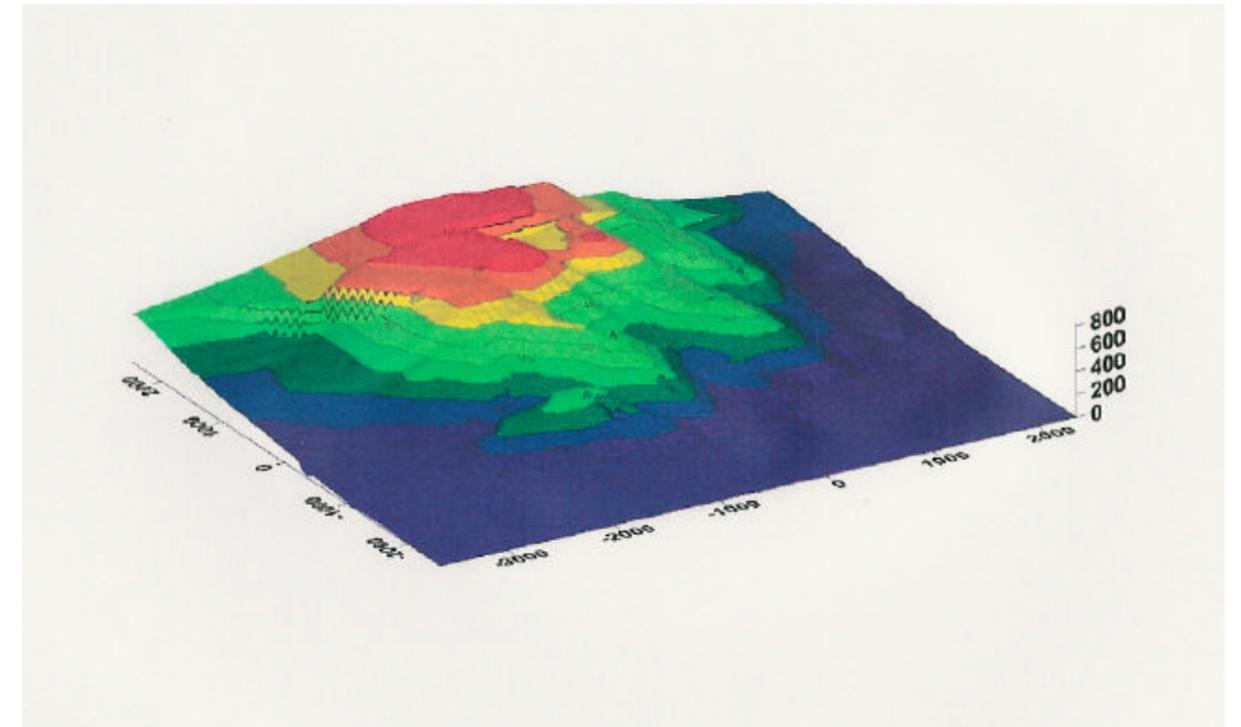
Per ottenere una simulazione affidabile su un’area così complessa per il calcolo delle concentrazioni in atmosfera si è deciso di utilizzare il più avanzato modello oggi in circolazione validato dall’EPA. Tale modello è stato messo a punto solo di recente dopo una lunga fase di sperimentazione grazie al proficuo lavoro dell’EPA Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS) e del NOAA’s Atmospheric Science Modeling Division.

L’evoluzione principale di tale modello consiste nell’abbandono degli schemi classici della parametrizzazione dispersiva, a favore delle più recenti acquisizioni in termini di bilanci energetici dei fenomeni turbolenti. Una maggiore definizione dei fenomeni convettivi e meccanici ovviamente necessita di una serie di dati meteorologici di maggiore dettaglio e normalmente non acquisibili come standard. Il modello comunque permette di stimare una notevole serie di variabili “termiche e meccaniche” in base ad algoritmi testati in funzione delle normali variabili meteorologiche misurate nello strato superficiale (dati standard). Risulta comunque evidente che il grado di precisione sarà tanto più accurato quanto maggiore sarà il numero e la qualità delle variabili misurate e quanto minore sarà il ricorso alla stima delle stesse tramite associazioni di calcolo.

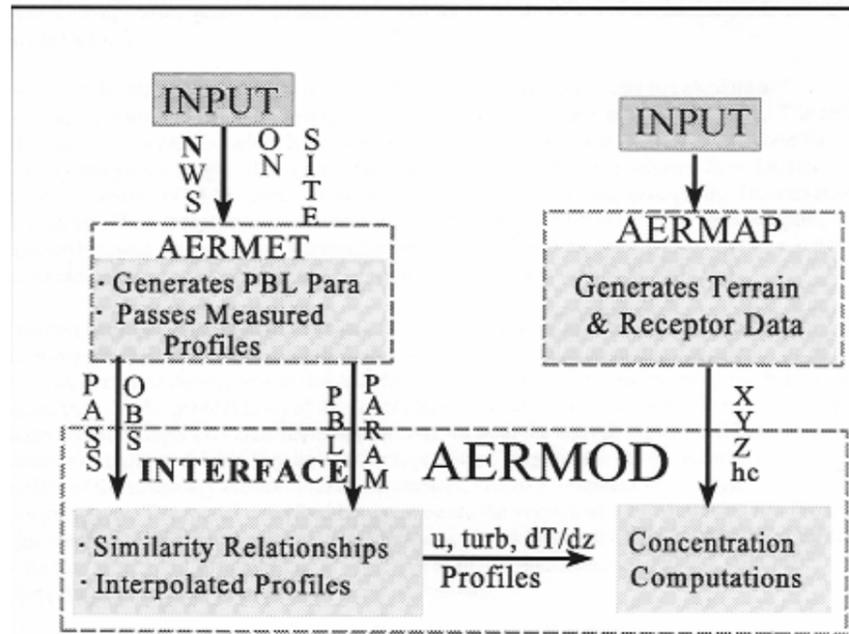
Il Modello consta essenzialmente di tre processori principali:

1. Preprocessore meteorologico dove vengono identificate le variabili ed i parametri di base che definiscono i fenomeni turbolenti convettivi e meccanici sia nello Strato Limite Convettivo (CBL), sia nello Strato Limite Superficiale (SBL) :
  - a. Flusso di calore sensibile (CBL)
  - b. Velocità di attrito (CBL)
  - c. Lunghezza di Monin Obukhov (CBL)
  - d. Altezza di miscelazione convettiva (CBL)
  - e. Scala di velocità convettiva (CBL)
  - f. Altezza di miscelazione meccanica (CBL)
  - g. Velocità di attrito (SBL)
  - h. Flusso di calore sensibile (SBL)
  - i. Lunghezza di Monin Obukhov (SBL)
  - j. Altezza di miscelazione meccanica (SBL)

2. Interfaccia meteorologica dove vengono elaborate le funzioni che descrivono gli andamenti dei fenomeni turbolenti convettivi e meccanici:
  - a. Profilo della velocità del vento
  - b. Profilo della direzione del vento
  - c. Profilo del gradiente della temperatura potenziale
  - d. Turbolenza verticale (varianza della velocità verticale – convettiva + meccanica)
  - e. Turbolenza totale orizzontale (varianza della velocità orizzontale – convettiva + meccanica)
3. Preprocessore del terreno, che elabora le quote del piano di campagna determinando le grandezze di scala dei recettori in modo che il modello possa essere applicato anche su terreni complessi e non omogenei. Tale processore noto come AERMAP riproduce ed interpola le quote del suolo caratterizzando i fenomeni dispersivi su terreno complesso. Nell’immagine che segue viene visualizzata la parametrizzazione del territorio complesso del sito in esame.



A seguire viene presentato uno schema semplificato di funzionamento a diagrammi di flusso di AERMOD



AERMOD si pone all'avanguardia nelle modellazioni più complesse; l'accuratezza descrittiva dei fenomeni turbolenti giustifica la classificazione "di ultima generazione". Effettuando un sintetico confronto con i modelli predecessori (ISC, CALINE, ecc.) AERMOD contiene una serie di funzioni di notevole miglioramento:

- ❑ Dispersione in entrambi gli stati convettivi e stabili
- ❑ Effetti di galleggiamento
- ❑ Penetrazione parziale in strati di inversione in quota
- ❑ Calcolo dei profili verticali del vento, della turbolenza e della temperatura
- ❑ Trattazione dello Strato Limite Urbano
- ❑ Trattazione di tutte le tipologie di terreno
- ❑ Effetto downwash

I parametri meteorologici non disponibili presso le due stazioni prese di riferimento sono stati calcolati tramite una software library sviluppata appositamente per il calcolo dei flussi di calore, la determinazione della lunghezza di Monin Obukov, e le variabili convettive. Tali parametri sono necessari per il funzionamento di AERMOD in quanto il modello non utilizza gli schemi di Pasquill (categorie di stabilità) tipici dei modelli classici.

AERMOD è uno strumento sviluppato per rispondere a esigenze di trattazione di una qualsiasi sorgente per qualsivoglia ambientazione complessa e si sta confermando in breve tempo dalla sua nascita uno standard internazionale. Tale modello dell'US EPA ha forti analogie con il modello (antagonista nel panorama internazionale dei modelli più evoluti) ADMS dell'UK EA (Agenzia Ambientale Inglese)<sup>1</sup>.

Poiché AERMOD non possiede il modulo per il calcolo delle deposizioni al suolo, per la valutazione di queste ultime è stato utilizzato il noto modello ISC nella versione short term, le cui caratteristiche verranno illustrate nella successiva sezione.

#### A4.2 Il calcolo delle deposizioni: ISC

Il modello ISC (Industrial Source Complex) utilizzato per il calcolo delle deposizioni al suolo è un codice di calcolo gaussiano multisorgente accreditato dall'EPA per analisi di impatto atmosferico connesso con il funzionamento di qualsiasi sorgente di tipo puntiforme quali camini industriali, impianti termici, sbocchi di impianti aerazione, ecc.

Si tratta di un modello molto noto ed utilizzato sia a livello nazionale sia internazionale; esso ha subito negli anni diversi aggiornamenti fino alla versione 3 che utilizza notevoli set di parametri per diminuire gli errori legati alle ipotesi di stazionarietà ed omogeneità tipiche dei modelli gaussiani.

Anche per tale modello è stato inserito il profilo 3D del suolo, anche se a differenza di AERMOD tale configurazione non incide sui parametri convettivi e di dispersione dei fumi.

Anche in Italia tale modello è diffusamente impiegato anche se, al contrario della normativa americana, l'uso della modellistica dispersiva è stato acquisito dalla legislazione italiana solo recentemente. Le applicazioni del modello ISC sono molteplici e prevedono:

- Corretta individuazione dell'altezza e posizionamento dei camini industriali
- Valutazione comparativa di diverse tipologie di combustibili utilizzati
- Adeguate progettazione di stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria
- Valutazione comparativa di alternative progettuali e tecnologiche
- Analisi preventiva di deterioramento significativo (PSD)

<sup>1</sup> vedasi "An intercomparison of the AERMOD, ADMS and ISC Dispersion Models for Regulatory Applications", D.J. Hall et al., in 7<sup>th</sup> Int. Conf. Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes

Il modello consta di 4 sezioni differenti:

1. meteorologica
2. sorgente
3. griglia recettori
4. parametri di controllo

Il cuore del modello è rappresentato dal processore meteorologico che richiede una notevole serie di dati e parametri di input: i principali sono stati esplicitati nelle precedenti tabelle

I dati relativi alla sorgente consistono nelle grandezze fisiche dei punti di emissione (camini), le caratteristiche chimico – fisiche delle emissioni, gli scenari di funzionamento dell’impianto. Un particolare cenno merita il trattamento dei parametri che influenzano il livello di deposizione delle polveri. Le emissioni di queste ultime evidenziano un’ampia variabilità granulometrica che si manifesta con particelle di diversa densità e composizione. La determinazione della massa del particolato e dello spettro granulometrico caratterizza la velocità di sedimentazione, la quale determina la deposizione al suolo. Coerenti con un approccio cautelativo è stato considerato un valore di circa 1micron per il diametro delle particelle.

Come per AERMOD la griglia di recettori su cui viene effettuato il calcolo copre un’area molto estesa che può definirsi aria vasta di impatto; essa prevede un’estensione totale di circa 10.000.000 mq.

La sezione dedicata ai parametri di controllo non viene illustrata in quanto trattasi prevalentemente di parametri di interfaccia utente; per altri parametri a prevalenza fisica, si può precisare che i coefficienti di dispersione utilizzati si basano sulle curve di Briggs e non sulle categorie di Pasquill – Gifford; la scelta si giustifica nell’adottare un approccio cautelativo che tenda a non favorire eventuali sottostime.

Il modello ISC consta di due distinte versioni: Short term per analisi di tipo orario, giornaliero, mensile - Long term per analisi di tipo stagionale o annuale

In realtà i due moduli sono identici dal punto di vista delle caratteristiche dispersive; le differenze consistono esclusivamente nella modalità di inserimento dei dati meteorologici. La versione short term richiede informazioni per ogni ora analizzata, la versione long term accetta in input le distribuzioni di frequenza senza necessitare di informazioni orarie. Ovviamente nel nostro caso è stata utilizzata esclusivamente la versione short term in quanto trattasi di eventi della durata di qualche ora.

## A5. LA QUALITÀ DELL’ARIA

### A5.1 I valori massimi

In questa sezione vengono presentati i risultati relativi agli scenari incidentali e meteorologici analizzati in precedenza. Prima dell’effettiva elaborazione dei modelli dispersivi per il calcolo delle concentrazioni e le deposizioni all’esterno della galleria, occorre calcolare le emissioni alla bocca del camino ed identificare la possibile area di impatto, la quale definisce il grigliato dei modelli.

L’emissione degli inquinanti trattati non è altro che il bilancio tra le concentrazioni degli inquinanti all’interno della galleria, le portate dei fumi all’interno della galleria e le portate complessive di cui all’impianto di estrazione fumi. Tale bilancio emissivo viene riportato nella tabella a seguire.

Emissioni al camino dell’impianto di ventilazione				
Sostanza	Concentrazione in fumo		Emissione fumi	
	g/m <sup>3</sup>	g/m <sup>3</sup>	g/s	g/s
HCl	0,00596	0,02682	1,43	6,44
HF	0,000984	0,0041	0,24	0,98
SO <sub>2</sub>	0,006288	0,03144	1,51	7,55
NO <sub>2</sub>	0,01316	0,0658	3,16	15,79
Acroleine (CH <sub>2</sub> CH				
CHO)	0,000916	0,00458	0,22	1,10
HCHO (formaldeide)	0,000738	0,00369	0,18	0,89
CO	0,345	1,725	82,80	414,00
HCN (acido cianidrico)	0,0044	0,0165	1,06	3,96
PM <sub>10</sub>	0,0200	0,0700	4,80	16,80
METALLI	0,0006	0,0020	0,14	0,48

I valori indicati in tabella sono stati supposti costanti per il periodo di durata dell’evento; risulta probabile che tali valori siano sovrastimati in quanto risulta difficile che per tutto il periodo si mantengano su livelli così elevati come quelli ipotizzati. Mentre è possibile che il picco orario possa raggiungere valori limite come quelli indicati nella precedente tabella, risulta alquanto

improbabile che tali valori si mantengano per periodi prolungati. A dimostrazione di tali sovrastime, in base alla portata dell'impianto, nella successiva tabella vengono riportate le emissioni complessive associate alle ipotesi di mantenimento dei livelli di picco per l'intera durata dell'evento.

EMISSIONI TOTALI in [kg]		
SOSTANZA	SCENARIO 1	SCENARIO 2
<i>Durata evento</i>	<b>3 ore</b>	<b>4 ore</b>
HCl	15	93
HF	3	14
SO2	16	109
NO2	34	227
Acroleine (CH2 CH CHO)	2	16
HCHO (formaldeide)	2	13
CO	894	5962
HCN (acido cianidrico)	11	57
PM10	52	242
Metalli	1	7

Dalla precedente tabella risulta evidente l'enorme quantità associata a CO, PM10, HCl, NO2, SO2 e HCN.

Poiché non è dato a sapere in quale ora si possa manifestare l'evento incidentale, si è ipotizzato che in qualsiasi ora si potesse manifestare l'incendio, pertanto, è stato possibile calcolare la condizione più critica dal punto di vista meteorologico (worst case). I risultati del worst case vengono riportati negli elaborati allegati in forma di grafici illustranti:

1. i livelli cromatici di concentrazione e deposizione su planimetria dell'area per ciascuna delle sostanze trattate. Si rammenta che le concentrazioni possono essere calcolate sia, per i gas sia per le polveri, mentre le deposizioni possono essere calcolate, ovviamente, solo per polveri e metalli.

2. i livelli cromatici di concentrazione massima presso tutti i recettori non verificabili simultaneamente.

Nella successiva tabella vengono riportati i valori massimi associati al worst case. Occorre rilevare che, come ben visibile dai grafici allegati, tali valori siano riscontrabili in zone molto limitate, dell'ordine di 1000 metri quadrati, dopo tendono a decrescere piuttosto rapidamente.

#### RIEPILOGO CONCENTRAZIONI / DEPOSIZIONI

CONCENTRAZIONI MEDIE ORARE [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]				
INDICATORE	SCENARIO 1		SCENARIO 2	
	INVERNO	ESTATE	INVERNO	ESTATE
CO	4.350,16	4.373,52	<b>18.943,20</b>	16.929,22
NO2	165,94	166,83	<b>722,59</b>	645,76
SO2	79,29	79,71	<b>345,26</b>	308,55
HCl	75,15	75,55	<b>294,53</b>	1.316,06
HF	12,41	12,47	<b>45,02</b>	40,24
CH2CHCO	11,55	11,61	<b>50,30</b>	44,95
HCHO	9,31	9,36	<b>40,52</b>	36,21
HCN	55,48	55,78	<b>181,20</b>	161,93
Polveri	252,18	253,54	<b>768,71</b>	686,98
METALLI	7,21	7,24	<b>21,96</b>	19,63
X	400	400	<b>500</b>	400
Y	-200	-100	<b>-200</b>	-100
ORA	19	22	<b>16</b>	22

CONCENTRAZIONI MEDIE 24 ORE PM10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]				
INDICATORE	SCENARIO 1		SCENARIO 2	
	INVERNO	ESTATE	INVERNO	ESTATE
Polveri	31,52	31,69	<b>128,12</b>	114,50
X	400,00	400,00	<b>500,00</b>	400,00
Y	-200,00	-100,00	<b>-200,00</b>	-100,00

DEPOSIZIONI MASSIME [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ]				
INDICATORE	SCENARIO 1		SCENARIO 2	
	INVERNO	ESTATE	INVERNO	ESTATE
Polveri	13,00	11,74	<b>41,56</b>	41,29
METALLI	0,37	0,34	<b>1,19</b>	1,18
X	300,00	300,00	<b>400,00</b>	400,00
Y	0,00	0,00	<b>0,00</b>	0,00

CONCENTRAZIONI MEDIE 8 ORE CO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]				
INDICATORE	SCENARIO 1		SCENARIO 2	
	INVERNO	ESTATE	INVERNO	ESTATE
CO	1.631,31	1.640,07	<b>9.471,60</b>	8.464,61
X	400,00	400,00	<b>500,00</b>	400,00
Y	-200,00	-100,00	<b>-200,00</b>	-100,00

Dalla precedente tabella e dai grafici allegati possono essere tratte alcune osservazioni di carattere generale riportate di seguito; nelle successive sezioni verranno illustrate le conclusioni per ogni tipo di sostanza trattata nel presente studio in forma di scheda dell'inquinante.

- Nello scenario a minore potenza energetica gli scenari estivo ed invernale si equivalgono
- I medesimi scenari stagionali vengono nettamente a differenziarsi nel caso a maggiore potenza, ovvero in inverno si manifestano concentrazioni nettamente maggiori. Tale comportamento discorde potrebbe essere connesso con l'effetto della temperatura, con le condizioni di bassa dispersione invernale e l'altitudine del punto di impatto; nello scenario 2, infatti, le temperature maggiori innalzano in misura maggiore il pennacchio il quale però, rimanendo in condizioni di bassa dispersione impatta compatto sui livelli più elevati del suolo. In questo contesto gioca un ruolo importante l'altezza dello strato di miscelazione che risulta piuttosto bassa in inverno per cui i fumi vengono intrappolati in vicinanza delle quote collinari più elevate dove poi vanno ad impattare. Nello scenario 1, invece, le temperature non producono un innalzamento così significativo da alterare sensibilmente i suddetti equilibri termodinamici.
- Da tali semplici osservazioni, risulta banale affermare che una differente quota del camino potrebbe comportare anche significative variazioni sia dei livelli massimi di concentrazione sia delle relative distribuzioni sul territorio
- In accordo con quanto affermato per le emissioni, le concentrazioni di polveri, metalli, NO<sub>2</sub>, HCl e HCN risultano piuttosto elevate. I livelli di tossicità verranno analizzati nelle rispettive schede.
- Nello scenario in cui si verificano i valori massimi assoluti, in corrispondenza dei recettori posti a distanza di circa 2km dalla sorgente le concentrazioni tendono a zero (vedi grafici concentrazioni medie orarie di picco)
- In talune ore dove i massimi relativi sono nettamente inferiori ai massimi assoluti, si manifestano concentrazioni di circa un quarto del picco anche a distanze di circa 2 km dalla sorgente (vedi grafici concentrazioni orarie massime in tutti i recettori)
- In sostanza, nel caso in cui si manifestano valori maggiori di concentrazione questi sono più ravvicinati alla sorgente e decrescono velocemente con la distanza, nel caso in cui valori di concentrazione sono apprezzabili anche a distanze maggiori (1/4 del picco a 2 km) i relativi massimi sono nettamente inferiori.

#### A5.2 CO

Si tratta di un gas ad effetto fortemente narcotizzante ed altamente tossico a concentrazioni elevate. Il monossido di carbonio si forma per combustione incompleta o in carenza di ossigeno; quando inalato viene assorbito rapidamente nel sangue combinandosi con l'emoglobina per formare CoHb. Tale reazione inibisce l'assorbimento e quindi il trasporto di ossigeno ai tessuti. Sostanzialmente si possono distinguere i seguenti casi ad elevate concentrazioni e conseguente assorbimento di CO:

- 10 – 20% di CoHb provocano affanno
- 30 – 40% di CoHb provocano forti difficoltà respiratorie, nausea, vomito e collasso
- 50 – 100% di CoHb causano la morte

Occorre, comunque evidenziare che per taluni individui valori di circa il 20% potrebbero provocare la morte; difatti, gli effetti sanitari non possono prescindere dallo stato di salute generale dell'individuo esposto. Ad esempio, in riferimento alla causa di morte, per un individuo soggetto ad angina gli indici di assorbimento calano drasticamente senza che sia possibile stabilire un proprio livello di rischio.

Concentrazioni massime di CO (mg/m <sup>3</sup> ) e riferimenti normativi						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Picco orario	Estate	4.4	3500	17	17000	10
	Inverno	4.4		19		
Media 8 ore	Estate	1.7		8.5		
	Inverno	1.7		9.5		

Nonostante che i valori ipotizzati in galleria fossero estremamente elevati, tali da poter provocare la morte in pochi minuti di esposizione, le concentrazioni di picco esterno appaiono piuttosto contenute; anche il picco orario massimo di 19 mg/m<sup>3</sup>, riscontrabile nel peggiore dei casi è inferiore al precedente limite normativo di 40 mg/m<sup>3</sup> stabilito sul campionamento di 1 ora.

**Per tale indicatore, pertanto, si riscontra un'estrema criticità in galleria, ma un modesto impatto all'esterno.**

**A5.3 NO2**

Inquinante molto diffuso nelle aree urbane, caratterizzato da livelli di concentrazione sempre piuttosto elevati al limite dello standard di qualità dell’aria. Si tratta della sostanza maggiormente monitorata in quanto i livelli nelle aree urbane sono in stretta relazione al traffico veicolare.

Il suo colore appare tra il giallo ed il marrone scuro in fase liquida, mentre in forma di gas va dal rossastro al marrone con odore pungente e soffocante alle alte concentrazioni.

La soglia minima percepibile di odore varia fra 0.11 e 0.14 ppm, viene riconosciuto intorno a 0.22 ppm , ma a seconda della sensibilità percettiva le soglie olfattive variano fra 0.39 e 5 ppm (1ppm è circa 1.88mg/m<sup>3</sup> a 25°C). Buona la cosiddetta “warning properties”, ovvero la percezione anticipata della soglia di pericolosità, in quanto la soglia olfattiva è inferiore al relativo TLV.

La principale sorgente di NO2 è la reazione della combustione alle alte temperature.

Esso è fortemente irritante alle vie respiratorie ed estremamente tossico alle alte concentrazioni fino ad essere causa di morte. Reagisce con il vapore acqueo (umidità) formando acido nitrico e nitroso che sono altamente corrosivi per la pelle e gli occhi; è anche un probabile mutageno.

Prime irritazioni dell’apparato respiratorio possono manifestarsi a 15-25 ppm. A tali concentrazioni sono possibili affaticamenti respiratori, dispnea, cadicarchia e nausea. Tra 25 e 100 ppm si manifestano effetti più critici con effetti respiratori bronchiali probabilmente reversibili. A concentrazioni superiori a 150 ppm sono possibili edemi polmonari che conducono alla morte. Tre possibili stadi possono innescarsi con esposizione ad alti livelli:

1. alterazione dei battiti cardiaci, dispnea, senso di fatica e nausea; tali effetti normalmente svaniscono con la cessazione dell’esposizione
2. attacchi di panico con insufficienza respiratoria, blocco della mobilità
3. severe infiammazioni polmonari, edemi polmonari; tali sintomi possono manifestarsi anche dopo diverso tempo dalla cessazione dell’esposizione (da 3 a 36 ore) con effetti di tipo irreversibile

Concentrazioni massime di NO2 (mg/m <sup>3</sup> ) e riferimenti normativi						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Picco orario	Estate	0.167	132	0.65	658	0.200
	Inverno	0.166		0.72		

Le concentrazioni considerate all’interno alla galleria, nello scenario più critico, potrebbero comportare la perdita di vita già per esposizioni di pochi minuti; nonostante ciò, all’esterno le concentrazioni sono comunque al di sotto di soglie di pericolo (TLV è uguale a 3 ppm circa 5.6 mg/m<sup>3</sup>). Quindi anche se il picco orario supera il limite di legge non sussistono preoccupazioni di tipo sanitario in quanto si tratta di esposizioni di breve periodo.

Il grafico allegato, relativamente all’ora di picco assoluto, mostra che comunque valori circa la metà dello standard di legge si manifestano sino a circa 2 km dal camino.

Nelle altre ore, quando si registrano massimi inferiori al picco assoluto, è possibile che valori ancora superiori al limite di legge si registrino anche a distanze di circa 1300 metri dalla sorgente (vedi grafico concentrazioni massime in tutti i recettori). In questi casi, valori fra 100µg/m<sup>3</sup> e 200µg/m<sup>3</sup> sono possibili anche a distanze di circa 2km, valori fra 50µg/m<sup>3</sup> e 100µg/m<sup>3</sup> sono possibili anche a distanze di circa 3km

Gli scenari a cui sono imputabili concentrazioni inferiori al picco assoluto, ma apprezzabili anche a grandi distanze, si sviluppano in condizioni di stratificazione stabile dell’atmosfera. Tali considerazioni, anche se su livelli di concentrazione differenti, si applicano a tutti gli inquinanti considerati.

**A5.4 PM10**

Inquinante presente in quantità critiche nelle aree urbane, ben noti sono i blocchi del traffico causati dai livelli di concentrazione spesso superiori ai limiti di legge. Non si tratta di una sostanza in particolare ma di un insieme di composti in forma particellare di diametro inferiore a 10 micron. La pericolosità di tale insieme di sostanze è data dalla sua composizione che è estremamente variabile.

Nel nostro caso, in via precauzionale, le polveri sono state assimilate a particelle inferiori a 10 micron anche se la distribuzione granulometrica delle stesse è molto variabile; in base a tale ipotesi, è possibile che le concentrazioni ipotizzate all’interno della galleria siano piuttosto sovrastimate; ne consegue che anche le concentrazioni all’esterno sono sovrastimate tanto più che è stato ipotizzato che, tramite l’impianto di aspirazione, tutte le polveri prodotte vengano emesse al camino.

Concentrazioni massime di PM10 (mg/m <sup>3</sup> ) e riferimenti normativi						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Picco orario	Estate	0.25	1000	0.69	3500	0.050
	Inverno	0.25		0.77		
Media 24 ore	Estate	0.032		0.11		
	Inverno	0.032		0.13		
Deposizioni massime di PM 10(mg/m <sup>2</sup> )						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Durata evento	Estate	31.7		114	-	-
	Inverno	31.5		128		

Per le deposizioni non esiste un valore limite di riferimento.

Per le concentrazioni è possibile osservare i notevoli livelli di polveri ipotizzati all'interno della galleria. Con tali valori di concentrazione, i livelli di opacità interni non permettono agevoli soccorsi comportando una criticità sia negli effetti sanitari degli esposti sia severe condizioni di evacuazione dei locali.

I livelli esterni sono piuttosto critici, abbondantemente sopra lo standard di qualità dell'aria. Non trascurabili neanche le deposizioni che comunque darebbero la possibilità di capire la reale composizione dei prodotti di combustione.

La deposizione assume pertanto un significato particolarmente importante in quanto è possibile risalire (con la cessazione dell'evento e della fase di emergenza dei soccorsi) agli effetti dell'incendio misurando non solo i livelli depositati sul terreno ma anche la relativa composizione.

Tale attività di analisi è possibile applicando modelli di dispersione avanzati, analogamente a quanto è stato fatto nel presente studio con la differenza di un processo a ritroso, ovvero non si parte dalla sorgente ma da un suo procurato effetto.

Dai grafici allegati si evidenzia che:

- le deposizioni si esauriscono in circa un 1 km dalla sorgente, mostrando un picco a circa 500 metri dal camino

- Il grafico allegato, relativamente all'ora di picco assoluto delle concentrazioni in atmosfera, mostra che quest'ultimo si manifesta a circa 700 metri dal camino.
- Nelle altre ore, quando si registrano massimi inferiori al picco assoluto, è possibile che valori ancora superiori al limite di legge si registrino anche a distanze di circa 1300 metri dalla sorgente (vedi grafico concentrazioni massime in tutti i recettori). In questi casi, valori orari intorno a 100µg/m<sup>3</sup> sono possibili anche a distanze di circa 2km, valori intorno a 50µg/m<sup>3</sup> sono possibili anche a distanze di circa 3km
- Gli scenari a cui sono imputabili concentrazioni inferiori al picco assoluto, ma apprezzabili anche a grandi distanze, sono imputabili a condizioni di stratificazione stabile dell'atmosfera.

#### A5.5 Metalli

Come per le polveri non è possibile individuare un'unica sostanza; al fine della determinazione dei livelli di concentrazione è stata considerata la somma dei vari contributi; tra questi spiccano il mercurio, antimonio, piombo, cromo, rame, manganese, nichel, vanadio, stagno, ecc.

Poiché i metalli sono calcolati in riferimento alle polveri, risulta ovvio che se queste ultime risultano sovrastimate, anche le prime non saranno da meno.

Concentrazioni massime di Metalli (mg/m <sup>3</sup> ) e riferimenti normativi						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Picco orario	Estate	0.007	30	0.020	100	-
	Inverno	0.007		0.022		
Deposizioni massime di metalli (mg/m <sup>2</sup> )						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Durata evento	Estate	0.34		1.18	-	-
	Inverno	0.37		1.19		

Analogamente a quanto già espresso per il caso delle polveri, anche per i metalli sarebbe possibile un’analisi di dettaglio nella fase post incidentale, ovvero al termine delle attività propriamente di emergenza. La traccia lasciata sul terreno potrebbe essere un elemento di rilievo per comprendere i reali effetti ambientali in caso di rilascio al camino dell’impianto di aspirazione. Il caso analizzato, pur trattando livelli di picco orario consistenti, non costituisce una significativa fonte di impatto in quanto di breve durata e di rara frequenza.

**A5.6 HCl**

Normalmente tale sostanza si forma in seguito alla combustione di materiale PVC o di altri materiali ritardanti del fuoco.

Combinandosi con acqua genera acido idroclorico che è altamente irritante per gli occhi, la gola ed i tratti dell’apparato respiratorio. Normalmente è incolore o giallo pallido alle alte concentrazioni. Soglie di odore sono comprese fra 1 e 5 ppm (1ppm è circa 1.49mg/m<sup>3</sup> a 25°C), a 10 ppm ha odore irritante. Scarsa la “warning properties” in quanto la soglia di odore è dello stesso ordine di grandezza del TLV (5 ppm). La sua pericolosità è in relazione non solo alla concentrazione, ma anche in funzione della presenza di umidità o vapore. Normalmente alcuni effetti sono possibili con i seguenti livelli:

- 35 ppm irritante per l’apparato respiratorio
- Tra 50 e 100 ppm severe irritazioni nasali e dell’apparato respiratorio fino ad ulcere alla gola e trachea per esposizioni prolungate
- 1000 ppm edema polmonare anche per brevi tempi di esposizione

Concentrazioni massime di HCl (mg/m <sup>3</sup> )						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Picco orario	Estate	0.076	298	0.29	1341	-
	Inverno	0.075		1.3		

L’incertezza associata alla valutazione di tale sostanza è connessa anche con le possibili reazioni con il vapore acqueo. I livelli considerati in galleria di 200 ppm nello scenario 1 e 900 ppm (1341

mg/m<sup>3</sup>) nello scenario più critico sono associati ad effetti drammatici anche per esposizioni brevi. Nonostante tale ipotesi, pur evidenziando valori non trascurabili, si può affermare che l’impatto all’esterno risulta consistente ma non di notevole preoccupazione. Il valore di picco, infatti è inferiore a 1 ppm. Per esposizioni di breve durata come quelle ipotizzate non si dovrebbero manifestare sensibili effetti sanitari.

**A5.7 HF**

Tale sostanza viene prodotta dalla combustione di taluni polimeri; combinandosi con vapore acqueo produce acido idrofluorico che è un acido estremamente potente. Come per HCl, può essere causa di edema o ustioni ai tratti dell’apparato respiratorio. Si tratta di un gas incolore ma avvertibile già a concentrazioni ridotte: percepibile già a 0.03 mg/m<sup>3</sup> (0.04 ppm), riconoscibile fra 0.03 mg/m<sup>3</sup> e 0.11 mg/m<sup>3</sup>.

A causa della sua grande reattività è improbabile che rimanga nella sua composizione originaria per tempi prolungati. I suoi effetti principali sono:

- Fino a 2ppm non sono riscontrabili effetti manifesti per esposizioni di breve durata; in qualche caso a questi livelli sono stati riscontrati taluni sintomi di disturbo respiratorio scomparsi poi dopo 4 ore la cessazione dell’evento.
- 32 ppm (1ppm è circa 0.82mg/m<sup>3</sup> a 25°C) irritazione degli occhi e del naso
- 60 ppm forti irritazioni ai vari tratti dell’apparato respiratorio
- 50 – 100 ppm pericoloso per la vita per pochi minuti di esposizione

Concentrazioni massime di HF (mg/m <sup>3</sup> )						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Picco orario	Estate	0.012	50	0.040	200	-
	Inverno	0.012		0.045		

Mentre i valori riscontrati all’interno sono pericolosi per la vita già per brevi periodi di esposizione, all’esterno non sono osservabili effetti sanitari neanche nel peggiore degli scenari.

**A5.8 CH<sub>2</sub> CH CO Acroleine**

Tale sostanza risulta prodotta dalla combustione di materiali quali legno, cotone, idrocarburi e dalla margarina (incidente Monte Bianco).

Esso è un forte irritante per gli occhi e per i tratti più alti dell'apparato respiratorio. I suoi effetti possono essere così schematizzati:

- 1 ppm (2.3 mg/m<sup>3</sup>) irritazione
- 5.5 ppm irritazione intensa
- 24 ppm intollerabile

Come per le altre sostanze i suddetti valori sono indicativi, in quanto gli effetti variano in funzione dello stato di salute dell'esposto, per età, peso e sensibilità soggettiva. Tra 5 e 20 ppm comunque vengono riscontrati effetti che inibiscono alcune capacità motorie che possono alterare significativamente la possibilità di evacuare dal luogo dell'evento incidentale. Per tale sostanza di colore giallo e dall'odore pungente è fissato un TLV di 0.1 ppm (scarsa la “warning properties”).

Concentrazioni massime di Acroleine (mg/m <sup>3</sup> )						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Picco orario	Estate	0.012	9.16	0.045	45.8	-
	Inverno	0.012		0.050		

I valori ipotizzati in galleria producono forti difficoltà respiratorie inducendo un grave pericolo di vita per incapacità di evacuazione. Le concentrazioni all'esterno sono inferiori anche al TLV (0.23 mg/m<sup>3</sup>), non producendo così stati di preoccupazione sanitaria.

**A5.9 HCHO Formaldeide**

Si tratta di un gas incolore con odore pungente, quasi soffocante. La soglia olfattiva è molto variabile da individuo a individuo, si registrano infatti intervalli compresi fra 0.027 ppm e 1.9 ppm

(1 ppm è uguale a 1.23mg/m<sup>3</sup>). Scarsa la “warning properties” in quanto il TLV può essere dello stesso livello della soglia olfattiva.

La formaldeide è prodotta industrialmente in grandi quantità, essa viene impiegata largamente per gli usi ed i materiali più svariati: utilizzato come fungicida, microbocita, per decontaminare industrie per trattamento di animali.

Si forma in grande quantità nella troposfera per ossidazione degli idrocarburi e come prodotto di combustione di materiali organici; prodotta anche dalla combustione di legna e cherosene.

A concentrazioni elevate è un gas fortemente irritante e molto tossico se inalato. I suoi effetti principali possono essere così riassunti per esposizione a breve periodo:

- Moderata irritazione del naso e gola per concentrazioni di 0.3 - 3 ppm; circa il 20% della popolazione mostra ipersensibilità per esposizioni a bassa concentrazione dell'ordine di 0.25 ppm.
- Intorno a 10 ppm si rilevano severe irritazioni dei tratti più alti dell'apparato respiratorio, con forte sensazione di bruciore di naso e gola; in alcuni individui a tali concentrazioni si manifestano vomito e intense tossi
- Per esposizioni intorno a 50 ppm possono manifestarsi infiammazioni severe dei polmoni fino alla comparsa di liquidi (edema polmonare). Tali sintomi possono manifestarsi anche dopo 24 -48 ore la cessazione dell'esposizione.

Concentrazioni massime di Formaldeide (mg/m <sup>3</sup> )						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
Picco orario	Estate	0.0093	7.4	0.036	37	-
	Inverno	0.0094		0.041		

Le concentrazioni stimate in galleria sono tali da provocare effetti tossici per esposizioni di qualche minuto (37 mg/m<sup>3</sup>, ovvero circa 30 ppm), mentre all'esterno, nello scenario più critico, i valori si mantengono al di sotto del TLV (0.3ppm – 0.37mg/m<sup>3</sup>), quindi non sono osservabili effetti sanitari significativi.

**A5.10 HCN**

Prodotto dalla combustione di vari tipi di materiali quali lana, seta, nylon, acrilico, talune plastiche e schiume poliuretatiche. Di colore blu biancastro assume odore tendente alla mandorla amara. La soglia olfattiva è piuttosto variabile nella popolazione comprendendo intervalli che variano fra 0.58 ppm e 4.5 ppm. Scarsa la “warning properties” a causa dell’estrema variabilità della soglia olfattiva. Si tratta di un gas estremamente tossico e se assorbito anche a basse dosi può causare danni irreversibili. I primi sintomi si manifestano con stato di eccitazione, ansietà, debolezza, tachicardia, nausea, vomito, irritazione naso e gola, fatica respiratoria, un innalzamento della pressione sanguigna. Successivamente possono manifestarsi debole battito cardiaco, crollo della pressione sanguigna, tachicardia, stato di incoscienza e convulsioni. Nei casi più gravi intervengono collassi cardiovascolari, shock e edemi polmonari fino alla morte. A concentrazioni dell’ordine di 200 ppm si manifestano rapidi collassi e morte per esposizioni di breve durata; sempre a tali livelli si manifesta un’incapacità motoria con esposizioni inferiori al minuto. Per esposizioni intorno alla decina di ppm tale incapacità si manifesta nell’ordine di decine di minuti. Il TLV per tale sostanza è fissato in 4.7 ppm (5.2mg/m<sup>3</sup>).

Concentrazioni massime di HCN (mg/m <sup>3</sup> )						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
		Picco orario	Estate	0.056	44	
	Inverno	0.056	0.181			

Il massimo valore di concentrazione all’interno della galleria è dell’ordine di 150 ppm, per cui gli esposti hanno pochissimi minuti per porsi in salvo a causa della forte incapacità di evacuazione prodotta da tali livelli di esposizione. Le concentrazioni all’esterno, nel caso peggiore, sono nettamente inferiori al TLV ed alla soglia di odore, pertanto non sono apprezzabili effetti significativi per brevi periodi di esposizione.

**A5.11 SO2**

Prodotta dalla combustione di parti contenente gomma ed altri materiali contenenti zolfo. La soglia di odore varia fra 1 e 3 ppm con sensazione irritante e pungente; scarsa la “warning properties” in quanto la soglia olfattiva è dello stesso ordine del TLV (2 ppm, 5.24 mg/m<sup>3</sup>). Combinandosi con acqua o vapor acqueo produce acido solforoso che è altamente irritante per gli occhi. I suoi effetti principali per esposizione a breve termine temporale sono:

- 1 ppm per 6 ore di esposizione possono comportare un lieve affaticamento respiratorio reversibile
- Per esposizioni a più breve termine (30 minuti) a 5 ppm si possono manifestare restrizioni ai tubi bronchiali
- 20 ppm irritazione agli occhi e tosse incontrollabile
- 100 – 250 ppm pericoloso per la vita
- 600 – 800 ppm morte in pochi minuti

Concentrazioni massime di SO2 (mg/m <sup>3</sup> )						
		Scenario 1		Scenario 2		Standard di qualità DM 60/2002
		out	in	out	in	
		Picco orario	Estate	0.080	63	
	Inverno	0.079	0.345			

I valori all’interno della galleria risultano di estremo pericolo per la vita, all’esterno il valore massimo riscontrato nello scenario maggiormente critico rimane al di sotto dello standard di qualità dell’aria.

Valori di circa 50 µg/m<sup>3</sup> possono manifestarsi a oltre 2 km dal luogo di emissione.

**A6. CONCLUSIONI**

Nel presente lavoro sono stati caratterizzati due distinti scenari incidentali in galleria in funzione della gravità dell’evento. Entrambi gli eventi si pongono su scenari ancora più critici rispetto ai medesimi consigliati dal PIARC per il dimensionamento degli impianti di aspirazione; infatti a dispetto di un valore di potenza indicato in 30 MW dal PIARC, sono stati considerati due distinti eventi rispettivamente di potenza:

1. 50 MW
2. 100 MW

Per entrambi gli scenari sono state caratterizzate le grandezze fisiche e chimiche che definiscono le immissioni in atmosfera dal camino di aspirazione dei fumi. Per la caratterizzazione chimica delle possibili concentrazioni interne si è fatto ricorso ad un’approfondita ricerca su casi già studiati, indicazioni e linee guida provenienti dagli organismi internazionali più accreditati. In mancanza di una caratterizzazione quantitativa delle concentrazioni dei gas tossici in galleria è stato utilizzato un approccio estremamente cautelativo in modo da considerare le condizioni incidentali più critiche, ovvero effetti sanitari che comportano la morte in pochi minuti di esposizione. Per talune grandezze come, ad esempio, polveri e metalli sono stati stabiliti valori di massima provenienti da esperimenti di incenerimento di pari potenza, normalizzando i valori alle rispettive portate (sperimentali ed impiantistiche).

Per la caratterizzazione degli scenari meteorologici si è fatto ricorso ai dati misurati dall’Aeronautica Militare presso le stazioni di Latina e Frosinone, in mancanza di uno specifico presidio sul sito in esame. Tali banche dati si basano sulla raccolta di circa 40 anni di misure. Per entrambe le stazioni sono state definite alcune serie di distribuzioni di dati meteo che hanno permesso le caratterizzazioni di due giornate tipo, una estiva ed una invernale in funzione della prevalenza delle frequenze associate ai vari parametri meteo. Nel caso di discordanza fra le distribuzioni ottenute nelle due stazioni, si è preferito optare per i parametri misurati presso Frosinone in quanto avente un’altitudine simile al luogo di emissione. Per le variabili non disponibili quali stabilità ed altezza dello strato di rimescolamento sono stati considerati i valori maggiormente critici. Ulteriori variabili meteorologiche più complesse quali lunghezza di Monin Obukov, velocità convettive, flussi di calore sensibili e latente, sono state calcolate tramite avanzati modelli di dispersione di ultima generazione. Al caso in esame, infatti, ai fini della stima

delle ricadute di concentrazione, è stato applicato il modello di ultima generazione AERMOD il quale è un’evoluzione dei classici modelli gaussiani, riproduce gli stati convettivi e turbolenti con gli algoritmi più avanzati oggi disponibili dal mondo della ricerca. Poiché però tale modello non dispone del modulo delle deposizioni al suolo, per queste ultime è stata utilizzata la versione short term del modello ISC.

Inoltre, essendo il territorio in esame piuttosto complesso, è stato utilizzato il modulo AERMAP, contenuto in AERMOD, il quale riproduce le quote collinari ed i relativi effetti sugli stati convettivi dell’atmosfera.

Le sostanze valutate non sono certo esaustive di tutti i casi che si possono presentare, ma comunque comprendono un ampio spettro di condizioni e materiali in cui si possono manifestare i fenomeni di combustione. Tutti i valori considerati all’interno della galleria (quelli da smaltire al camino) si caratterizzano per eventi estremi con probabilità di occorrenza molto limitata; anche in questo caso sono stati riportati i risultati in indici di rischio incidentale per gallerie stradali nei paesi membri che afferiscono al PIARC (Unione Europea e Paesi più industrializzati).

Nella successiva tabella vengono riportate alcune semplici conclusioni che schematizzano gli effetti sanitari associabili alle concentrazioni di picco in atmosfera registrate all’esterno della galleria come conseguenza dei prodotti di combustione.

Sostanze a cui sono associabili differenti effetti in funzione dei livelli massimi di concentrazione e deposizione registrati nell’area vasta di impatto del territorio				
Sostanze per cui si manifestano effetti sanitari	Sostanze per cui si manifestano valori di picco superiori allo standard di qualità	Sostanze per cui si riscontrano valori leggermente al di sotto degli standard di qualità	Sostanze per cui si manifestano valori consistenti ma al di sotto di effetti sanitari rilevabili	Sostanze i cui valori pur non trascurabili non destano significativa preoccupazione
-	NO2	CO	Metalli	HF
-	PM10	SO2	HCl	Acroleine
-				Formaldeide
-				HCN

Al fine di determinare i livelli di impatto e le distribuzioni sul territorio sono stati riprodotti i grafici relativi alle distribuzioni cromatiche dei livelli di concentrazione e deposizione di tutte le sostanze considerate nello scenario più critico.

Dal punto di vista dell’impatto del territorio è possibile affermare che:

- I picchi orari si registrano a circa 500 - 700 metri dalla sorgente
- Livelli intorno alla metà del valore massimo si spingono fino ad 1 km dalla sorgente
- Valori intorno al 25% del valore massimo si possono manifestare fra 1.5 km e 2 km dalla sorgente
- Tra 2 km e 3 km dalla sorgente si possono manifestare concentrazioni massime intorno al 10% del picco assoluto
- L’analisi delle deposizioni nella fase post incidentale, una volta concluse le attività di soccorso, di emergenza e ripristino, potrebbe caratterizzare meglio la natura, le condizioni dell’evento e la tipologia delle sostanze emesse. Tale caratterizzazione non è altro che un’attività iterativa a ritroso rispetto a quella condotta nel presente studio: ovvero, invece che dalla sorgente caratterizzare l’impatto, da un indicatore di impatto caratterizzare la sorgente per poi ridefinire la dimensione dello stesso.
- Una differente altezza del camino dell’impianto di estrazione fumi potrebbe modificare sensibilmente il livello di impatto in termini di concentrazioni e deposizioni al suolo.

**ALLEGATI I – DISTRIBUZIONI METEO**

- Distribuzione annuale delle classi di velocità e direzione del vento per categoria di stabilità (7 tabelle)
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento per categoria di stabilità nella stagione invernale (7 tabelle)
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento per categoria di stabilità nella stagione estiva (7 tabelle)
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento nella stagione invernale
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento nella stagione estiva
- Distribuzione delle classi di stabilità nella stagione invernale per ora sinottica
- Distribuzione delle classi di stabilità nella stagione estiva per ora sinottica
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento nella stagione invernale per ora sinottica (8 tabelle)
- Distribuzione delle classi di velocità e direzione del vento nella stagione estiva per ora sinottica (8 tabelle)
- Distribuzione di frequenza di temperatura ed umidità per ora sinottica nel mese di gennaio (4 tabelle)
- Distribuzione di frequenza di temperatura ed umidità per ora sinottica nel mese di luglio (4 tabelle)

**ALLEGATI I – ELABORATI GRAFICI**

1. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di Acroleine su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
2. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di Acroleine su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
3. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di CO su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
4. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di CO su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
5. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di Formaldeide su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
6. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di Formaldeide su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
7. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di HCl su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
8. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di HCl su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
9. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di HCN su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
10. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di HCN su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
11. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di HF su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
12. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di HF su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
13. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di Metalli su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
14. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di Metalli su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
15. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
16. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
17. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di Polveri su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
18. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di Polveri su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
19. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di SO<sub>2</sub> su planimetria – picco orario nello scenario più critico (worst case)
20. Livelli cromatici di distribuzione delle concentrazioni di SO<sub>2</sub> su planimetria – valori massimi non simultanei in tutti i recettori
21. Livelli cromatici di distribuzione delle deposizioni di Polveri su planimetria – scenario più critico (worst case)
22. Livelli cromatici di distribuzione delle deposizioni di Metalli su planimetria – scenario più critico (worst case)