

## 5.2. Applicazione di modelli in scala ridotta (GdV)

Come evidenziato un aspetto fondamentale ai fini della validità dei risultati ottenuti è rappresentato dalla individuazione di idonee metodologie di validazione e di confronto per:

- la scelta del o dei modelli nella prima fase di individuazione degli strumenti di studio e di analisi;
- la valutazione della validità dei risultati ottenuti nella fase finale di analisi.

Dal punto di vista metodologico, l'approccio da tempo utilizzato all'interno del gruppo di ricerca dell'Università di Firenze, segue le indicazioni di altri gruppi di ricerca europei e internazionali nell'utilizzo di modelli in scala ridotta in galleria del vento, quali strumento fondamentale per la validazione dei codici di calcolo [13] nonché per la scelta del modello più appropriato al caso di studio.

La sperimentazione in galleria del vento può risultare di fondamentale importanza non solo nella validazione di codici di calcolo esistenti ma anche nel miglioramento dei modelli stessi, ad esempio in relazione alle parametrizzazioni utilizzate per la schematizzazione di fenomeni di difficile trattazione teorica, quali effetti fluidodinamici tridimensionali complessi, che sono per lo più di origine sperimentale.

Il problema nell'utilizzo di modellistica in scala ridotta risiede in primo luogo nel dover riprodurre le sorgenti emmissive e le condizioni al contorno dei fenomeni fisici, per mezzo di apposite regole di scalatura che non necessariamente richiedano il mantenimento dei rapporti in scala geometrica, ma che consentano l'ottenimento di velocità del flusso sufficientemente controllabili [14] [15] [16].

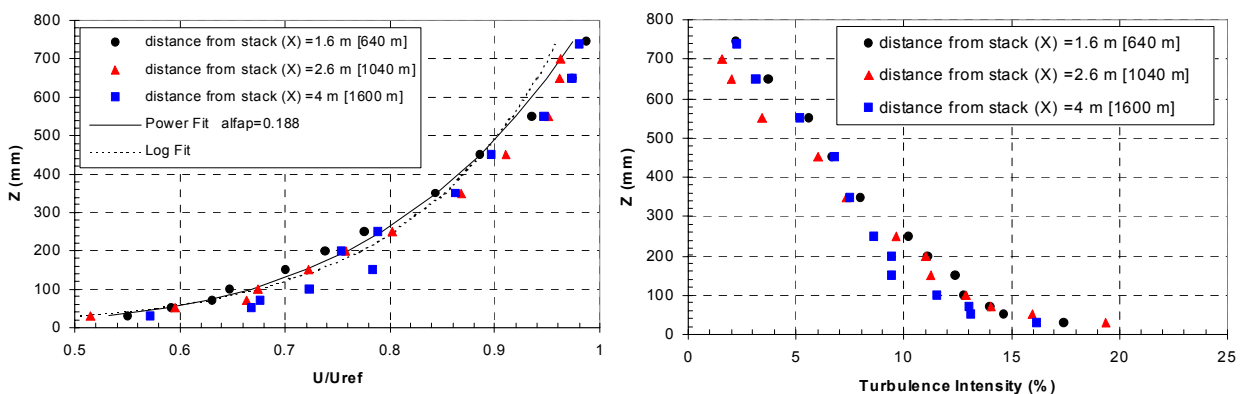


Figura 5.1 - Rappresentazione campo di vento in strato limite simulato in galleria del vento

Nella figura 5.1 a titolo di esempio è riportato un andamento tipico del campo di vento in strato limite ricostruito mediante set-up specifici in Galleria del Vento, con un profilo esponenziale del vento apri a circa 0,19 ed un andamento dell'intensità di turbolenza congruente con le condizioni di strato limite planetario (Planetary Boundary Layer, PBL).

La fase di studio e di caratterizzazione dei modelli diffusionali viene eseguito presso la galleria del vento del C.R.I.A.C.I.V. (Consorzio di Ricerca Interuniversitario per l'Aerodinamica delle Costruzioni e l'Ingegneria del Vento) con sede a Prato, di cui viene riportata una figura rappresentativa (Figura 5.2). Tale Galleria del Vento rappresenta in Italia

un esemplare unico di laboratorio di ricerca e sviluppo nel campo della diffusione di flussi in strato limite di tipo atmosferico.

La metodologia di indagine scelta segue le impostazioni sperimentali messe a punto presso la Galleria del Vento di Guilford (University of Surrey) e comprende la misura delle concentrazioni di inquinanti in scala ridotta per mezzo di un sistema di campionamento in ciclo di aspirazione continua e analisi del tracciante organico scelto mediante lettore di concentrazione di organici totali (gascromatografo a ionizzazione di fiamma, FID).

Il dosaggio del tracciante e di opportuni composti gassosi di miscela permettono di agire sulla rappresentazione in scala delle portate di tracciante e dei parametri di galleggiamento. La metodologia di validazione scelta viene quindi eseguita mediante tecniche statistiche [17] [18], secondo uno schema operativo messo a punto e descritto in numerose pubblicazioni scientifiche elaborate negli ultimi anni [19] [20] [21].



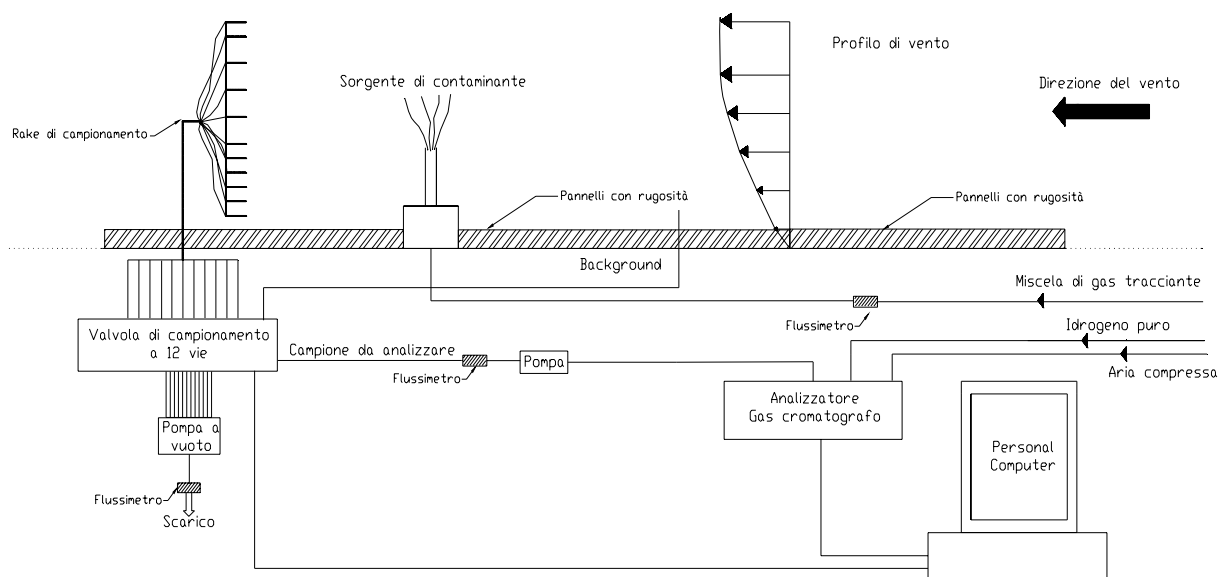
**Figura 5.2** - Vista della galleria del vento del C.R.I.A.C.I.V.

Sulla base dei dati sperimentali raccolti dal modello in scala rappresentato all'interno della galleria del vento è possibile valutare non solo l'affidabilità del modello diffusionale ma è possibile anche valutare le più opportune opzioni di calcolo per specifiche parametrizzazioni del modello, ad esempio relativa ai parametri di dispersione o ai parametri di innalzamento dei pennacchi, nel caso di sorgenti puntuali galleggianti. In definitiva l'utilizzo della Galleria del Vento può essere determinante anche a valle della scelta del modello di simulazione per la calibrazione più adeguata del codice di calcolo.



**Figura 5.3** - Vista della galleria del vento con set-up per generazione profilo di turbolenza atmosferico

La galleria del vento si pone dunque come strumento di grande rilievo nella fase di decisione del codice di calcolo da adottare e nella fase di messa a punto della procedura di valutazione mediante il codice scelto, oltre che nella determinazione delle incertezze di stima dello stesso.



**Figura 5.4.** Il sistema di misura delle concentrazioni nella galleria del vento del C.R.I.A.C.I.V.

Per la parte strumentale, la Galleria del Vento del C.R.I.A.C.I.V. attualmente opera con una linea di campionamento e di analisi basata su dodici canali. E' in fase di sviluppo e messa a punto il potenziamento della strumentazione di misura mediante il raddoppio della linea e la scelta di opzioni hardware e software in grado di automatizzare al massimo le fasi di analisi e

quindi di ridurre i tempi di set-up degli esperimenti, ad oggi non soddisfacenti, per i costi complessivi di gestione del laboratorio che ne conseguono.

La schematizzazione della catena di misura presente allo stato attuale all'interno della Galleria del Vento a strato limite sviluppato del C.R.I.A.C.I.V. è rappresentata nella figura 5.4, dove è possibile individuare il sistema di campionamento, il sistema di flussaggio al gascromatografo, la linea di analisi gascromatografica FID ed il sistema di trasmissione dati in uscita e analisi.



## 5.3. Descrizione dei modelli presi in esame

### 5.3.1. ISC3

Il codice gaussiano di calcolo ISC3 (Industrial Source Complex) consente il trattamento dei fenomeni diffusivi dovuti a sorgenti tipicamente di tipo industriale sia a breve termine temporale (ISCST3) sia a lungo termine (ISCLT3) [22].

Il modello include, rispetto alle precedenti versioni, nuovi algoritmi per il trattamento delle sorgenti areali e della deposizione secca, oltre che umida, ed inoltre consente di affrontare il problema della dispersione di inquinanti in presenza di terreni complessi, cioè nel caso in cui vi siano punti a quote superiori rispetto a quella delle sorgenti.

Il codice richiede in ingresso due files di input, la cui struttura è basata su parole-chiave di facile comprensione ed applicazione, che consentono al modello di coprire una vasta gamma di opzioni.

Il primo file di input contiene gli ingressi selezionati dall'utente per il caso da simulare, quali l'ubicazione delle sorgenti, il posizionamento dei recettori, i parametri di emissione ed il tipo di output del codice; il secondo riguarda invece i dati meteorologici caratteristici delle condizioni atmosferiche da riprodurre.

Il codice consente anche l'introduzione di ulteriori files di ingresso che consentono di trattare la deposizione secca e la rimozione chimica di sostanze inquinanti, di descrivere le quote di particolari punti topografici e di specificare, per la versione "short term", le diverse emissioni orarie di inquinante, utili per contemplare casi di non stazionarietà.

Le numerose opzioni caratteristiche del codice ISC3 lo rendono uno strumento utilizzato per una varietà di applicazioni, specialmente negli Stati Uniti, essendo concepito con la particolare finalità di supportare i programmi normativi dell'EPA in materia di modellistica diffusionale [22], in modo tale che le opzioni di default rispondano alle linee guida emanate dalla stessa agenzia di protezione ambientale statunitense.

Le modalità standard di calcolo includono i fenomeni dello stack-tip downwash e dell'effetto di modifica dei parametri di dispersione durante la risalita del pennacchio dovuta al suo galleggiamento, prevedono l'innalzamento non graduale dei fumi, eccettuate le sorgenti interessate dal fenomeno di building downwash, comprendono una routine di calcolo per il processamento di calme di vento e presentano valori di default per gli esponenti dei profili di vento ed i gradienti di temperatura potenziale.

ISC3 prevede soltanto due modalità di calcolo dei parametri di dispersione, secondo le formule di Turner e di Briggs, valide rispettivamente per aree rurali ed urbane al variare delle classi di stabilità atmosferica secondo Pasquill-Gifford, ma consente di trattare il fenomeno di risalita graduale del pennacchio, di calcolare le concentrazioni di inquinante a quote rispetto al suolo diverse da zero, di valutare le medie su più periodi temporali in una singola simulazione e di considerare, oltre alle sorgenti puntuali, lineari ed areali, anche quelle volumetriche e quelle situate in ampie vallate ("open pit sources"), quali ad esempio cave o miniere di carbone.

Un'altra peculiarità del codice ISC3 è la presenza di algoritmi per la valutazione dell'effetto di downwash aerodinamico dovuto alla presenza di edifici in prossimità di sorgenti puntuali. L'insieme dei recettori può inoltre essere disposto secondo un sistema di riferimento cartesiano, polare o misto, al fine di poter infittire il loro numero nelle zone soggette alle



massime ricadute a terra, ma nello stesso tempo di garantire una copertura sufficientemente densa dell'area in esame.

### 5.3.2. SAFE-AIR

Il modello SAFE AIR (Simulation of Air pollution From Emissions Above Inhomogeneous Regions) è un'evoluzione del modello AVACTA II, il quale è uno dei modelli raccomandati dall'US EPA e dal Ministero della Salute, ed è stato adottato ufficialmente dalla regione Liguria per la pianificazione regionale [23] [24].

Esso si compone essenzialmente di due parti: un pre-processore meteorologico (WINDS, Wind-field Interpolation by Non-Divergent Schemes) ed un codice di calcolo che simula i processi di dispersione e trasporto (P6, Program Plotting Paths of Pollutant Puffs and Plumes).

WINDS è un modello basato sulla conservazione della massa sviluppato dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova, e permette di costruire un campo di vento tridimensionale in due fasi: per cominciare viene costruito un campo di vento iniziale, attraverso una procedura di interpolazione partendo dai dati disponibili sul vento in alcuni punti dati; successivamente si ha una fase di aggiustamento per il raggiungimento di un campo di vento non divergente. Il modello permette di prendere in considerazione i seguenti fenomeni: effetti cinetici dovuti all'orografia complessa, effetti di scabrezza, variazioni nella scabrezza (strato limite rugoso), variazioni nella velocità del vento dovute alla forza di Coriolis, effetti causati dalle condizioni di stabilità dell'atmosfera, etc.

Il codice P6 è basato sull'equazione gaussiana standard, ma consente accurate simulazioni numeriche in condizioni sia di emissioni non stazionarie che di emissioni non omogenee (ad esempio nel caso di orografia complessa). L'emissione alla fonte è suddivisa in una serie di elementi (che possono essere trattati sia come pennacchi, nella fase di trasporto, che come puff, nella fase di dispersione) connessi tra loro, la cui dinamica è legata alle locali condizioni meteorologiche. La dinamica di un dato elemento si compone quindi delle seguenti fasi: generazione alla sorgente, innalzamento del pennacchio, trasporto avvevivo (utilizzando WINDS), diffusione turbolenta, eventuali trasformazioni chimiche che danno origine ad inquinanti secondari a partire da una data percentuale di inquinante primario, eventuale deposizione al suolo (umida o secca), eventuale ricaduta delle particelle grossolane a causa della forza di gravità.

P6 è principalmente studiato per la simulazione di sorgenti emissive multiple puntuali, anche se possono essere ottenute anche simulazioni di sorgenti areali, lineari e volumetriche. Pur essendo basato sul modello gaussiano standard, il modello P6 permette un'accurata simulazione numerica anche in condizioni non stazionarie e non omogenee.

I principali input per P6 sono: dati altimetrici del terreno, caratteristiche delle sorgenti e dei recettori, classi di stabilità orizzontali e verticali, componenti tridimensionali del vento (ad esempio quelle fornite da WINDS), altezza di mescolamento, rateo di trasformazione chimica, parametri di deposizione secca ed umida, velocità di deposizione, temperatura ambiente [25]. Inoltre P6 permette di selezionare differenti formule per il calcolo dell'innalzamento del pennacchio e dei coefficienti di dispersione  $\sigma$ , e differenti impostazioni sulla riflessione sia al suolo che al bordo dello strato di miscelamento.

Il modello si basa sulla formula gaussiana standard. Quest'ultima risulta vantaggiosa soprattutto per la sua semplicità e per la necessità di pochi dati in ingresso. Essendo, però,



una formula stazionaria, essa è valida solo in condizioni di trasporto (ad esempio per  $U \geq 1$  m/s), per situazioni all'incirca stazionarie ed omogenee.

Per aggirare queste limitazioni sono stati sviluppati due differenti metodi [25]:

- 1) Il modello *segmented-plume* che, comunque, necessita ancora di condizioni di trasporto.
- 2) Il modello a *puff*, che funziona anche in condizioni di calma di vento o comunque vento scarso.

Entrambi i metodi prevedono la frammentazione del pennacchio in elementi (puff o segmenti) la cui dinamica è funzione delle condizioni locali (variabili nel tempo).

L'utente deve definire otto differenti quantità aventi dimensioni di un tempo (il tempo di simulazione, due passi temporali e cinque tempi-vita):

- Il tempo di simulazione;
- Il passo temporale meteorologico  $\Delta t_m$ ;
- Il passo temporale di dispersione  $\Delta t$ ;
- L'inverso del fattore di conversione chimica,  $K^{-1}$ ;
- L'inverso di quattro possibili fattori di riduzione (deposizione secca,  $j=1$ , deposizione umida,  $j=2$ , deposizione inquinante primario,  $i=1$ , deposizione inquinante secondario,  $i=2$ ).  $P_{ij}^{-1}$ .

Il tempo di simulazione, tipicamente dell'ordine di poche ore, è il tempo durante il quale si assume avvengano i fenomeni di diffusione.

Questo può essere suddiviso in vari intervalli di grandezza  $\Delta t_m$ , tipicamente 30-60 min, durante i quali le condizioni meteorologiche sono assunte costanti.

L'intervallo  $\Delta t$  rappresenta un'ulteriore suddivisione di  $\Delta t_m$ ; in tale intervallo di tempo viene completato ogni ciclo per ogni elemento considerato (segmento o puff), cioè emissione dalla sorgente ed immissione nella catena degli elementi, trasporto, diffusione, trasformazioni chimiche, deposizione e calcolo della concentrazione.

La dinamica di ogni elemento, quindi, consiste in [25]:

- 1) Generazione dell'elemento dalla sorgente;
- 2) Innalzamento del pennacchio (eventualmente prendendo in considerazione sia l'effetto scia del camino che quello dell'edificio);
- 3) Trasporto avvevativo da parte del vento;
- 4) Diffusione turbolenta;
- 5) Possibili trasformazioni chimiche e creazione di inquinanti secondari a partire da una certa frazione degli inquinanti primari;
- 6) Possibile deposizione al suolo, secca e umida;
- 7) Deposizione per gravità delle particelle aggregate.

L'elemento considerato parte da un "punto centrale iniziale A" fino ad arrivare ad un "punto centrale finale B". Il fatto che l'elemento sia considerato un segmento o un puff non influisce sulla sua dinamica, ma solo sul calcolo della concentrazione.

Ogni elemento è caratterizzato dai seguenti parametri, variabili nel tempo e nello spazio, calcolati nel punto B: coordinate spaziali  $\vec{e}(x_e, y_e, z_e)$ , quota di B sul livello del suolo  $h_e$ , massa degli inquinanti primari e secondari  $M_1$  e  $M_2$ , deviazioni standard della distribuzione gaussiana della concentrazione orizzontale, verticale sotto B e verticale sopra B  $\sigma_h$ ,  $\sigma_{z1}$  e  $\sigma_{z2}$ .



Ad ogni intervallo temporale  $\Delta t$  un elemento da ogni sorgente viene aggiunto alla catena degli elementi.

L'innalzamento del pennacchio calcolato è solo quello finale, e si assume che tale quota si raggiunga dall'elemento generato dopo l'intervallo  $\Delta t$ . In altre parole serve solo a calcolare la concentrazione dell'inquinante, mentre il transitorio non è previsto. L'utente può scegliere tra diverse formule disponibili (Turner, Briggs, Moore) oppure può definire egli stesso una metodologia di calcolo. Si può inoltre scegliere se mettere in conto o no l'effetto scia del camino e dell'edificio e l'eventuale interazione dell'innalzamento del pennacchio con il bordo superiore dello strato di miscelamento.

Il trasporto dell'elemento viene simulato utilizzando il valore medio della velocità e della direzione del vento sul volume occupato dall'elemento stesso, calcolando così le nuove coordinate del punto centrale finale. Il metodo di calcolo del vettore medio della velocità del vento è piuttosto complicato, poiché bisogna mettere in conto il fatto che in realtà con il modello gaussiano un certo elemento non ha un volume finito.

Per quel che riguarda la diffusione ad ogni intervallo temporale  $\Delta t$  i valori delle  $\sigma$  vengono incrementati utilizzando il concetto della "distanza/età virtuale" [25]. Il calcolo viene effettuato a partire dalle condizioni di turbolenza presenti nel dominio dell'elemento.

Le formule per il calcolo dei coefficienti di dispersione  $\sigma$  sono numerose, fra le quali l'utente può scegliere quella più adatta.

Le trasformazioni chimiche vengono simulate adottando una cinetica del primo ordine con costante K. In maniera semplice si ottiene quindi sia la diminuzione di  $M_1$  che l'aumento di  $M_2$ .

Anche la rimozione secca ed umida viene simulata allo stesso modo, utilizzando in questo caso i coefficienti  $P_{ij}$ .

Per il calcolo della deposizione gravitazionale del particolato si utilizza la velocità di deposizione  $V_g$ .

Il tipo di elemento considerato (puff o segmento) non influisce affatto sulla sua dinamica ma solo sui calcoli necessari alla stima della concentrazione.

Il criterio per stabilire la tipologia dell'elemento di basa sul rapporto tra la lunghezza dell'elemento stesso (cioè la distanza tra i punti centrali A e B)  $L_e$  e la deviazione standard orizzontale del pennacchio  $\sigma_{hm}$ , che è la media tra  $\sigma_h$  dell'elemento considerato e  $\sigma_h$  dell'elemento emesso dalla sorgente immediatamente dopo.

- Se  $L_e/\sigma_{hm} < 2$  l'elemento è considerato puff.
- Se  $L_e/\sigma_{hm} \geq 2$  l'elemento è considerato segmento.

In condizioni di calma o di vento molto debole l'elemento può essere emesso direttamente dalla sorgente come un puff.

L'algoritmo descritto fa sì che la distanza tra due puff consecutivi non sia mai superiore a  $2\sigma_{hm}$ , che è la condizione affinché la rappresentazione a puff sia realistica.

Per ogni recettore la concentrazione finale è data dalla sovrapposizione di tutti gli elementi che interessano il recettore stesso, siano essi puff o segmenti. Questo schema è in grado di simulare la dinamica del pennacchio in tutte le situazioni di velocità del vento, in presenza di calma e/o di condizioni variabili. Lo schema della sovrapposizione degli effetti, inoltre, risulta molto utile quando esiste una variazione della direzione del vento di  $180^\circ$  con gli elementi che hanno già superato il recettore che tornano ad interessarlo nuovamente.

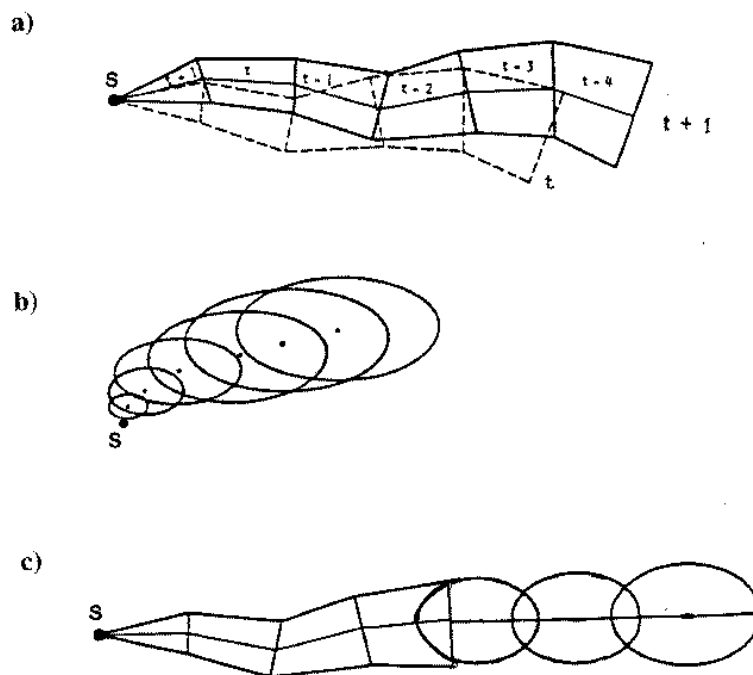


Figura 5.5. Rappresentazione a puff ed a segmenti in SAFE AIR[25].

La metodologia utilizzata, quindi, permette la coesistenza di puff e segmenti. Alcuni problemi si possono avere, però, quando il recettore è nella zona di transizione tra elementi di tipo puff e elementi di tipo segmento. In questo caso ci possono essere errori di tipo numerico. P6 utilizza particolari algoritmi per prevenire tali errori.

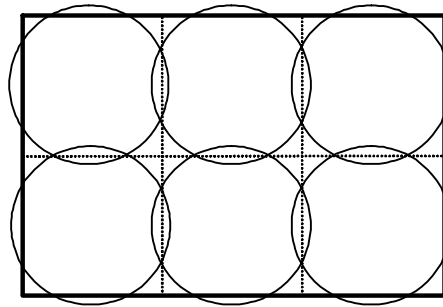
Il modello P6 è in grado di calcolare senza problemi l'emissione di inquinanti diversi da sorgenti diverse [25]. Nel caso si volesse considerare l'emissione di diversi inquinanti da una sola sorgente bisogna procedere come segue:

1. Calcolare l'innalzamento del pennacchio considerando l'emissione totale.
2. Eseguire tante simulazioni quanti sono gli inquinanti utilizzando il valore di innalzamento del pennacchio precedentemente calcolato.

Il codice P6 è in grado di simulare, oltre a sorgenti puntuali, anche l'emissione e la dispersione a partire da sorgenti areali, lineari e di volume. Bisogna stare però attenti alla distanza dei recettori da questo tipo di sorgenti, poiché i risultati possono essere poco accurati nelle vicinanze delle sorgenti.

Sorgenti areali:

La forma delle sorgenti areali utilizzata da P6 è circolare. È possibile comunque approssimare qualunque tipo di forma suddividendola in sottosorgenti circolari.



**Figura 5.6** – Approssimazione sorgenti areali rettangolari con sorgenti circolari.

Poiché non ci sono algoritmi per il calcolo dell'innalzamento del pennacchio, questo deve essere definito dall'utente. Normalmente, comunque, questo viene trascurato nel caso di sorgenti areali.

Sorgenti lineari:

Le sorgenti lineari in P6 possono essere trattate come caso particolare delle sorgenti areali.



**Figura 5.7** – Schematizzazione sorgenti lineari.

Più precisamente la sorgente sarà approssimata come composta da  $N$  sorgenti areali, dove  $N$  è la lunghezza della sorgente diviso la sua larghezza.

Nel caso di sorgenti lunghe e molto strette,  $N$  può risultare troppo elevato. In questo caso è possibile ridurre il numero delle sorgenti ponendole ad una certa distanza l'una dall'altra. È consigliabile comunque non superare la distanza pari alla larghezza della sorgente.

### 5.3.3. CALINE4

Il modello CALINE 4 è stato sviluppato dal Dipartimento dei Trasporti dello Stato della California (USA); è l'ultimo di una serie di modelli per la stima della diffusione di sostanze inquinanti generate da una sorgente lineare. In particolare costituisce una notevole evoluzione rispetto al precedente CALINE 3, sia per quanto riguarda la versatilità di uso, sia per quel che concerne le procedure di calcolo.

Il calcolo della dispersione, è basato su un'equazione di diffusione gaussiana.

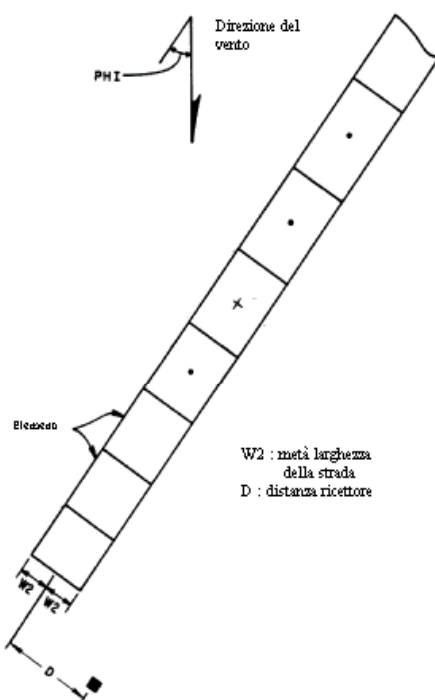
Il modello CALINE 4 è stato strutturato in modo tale da poter essere impiegato per il calcolo della concentrazione di monossido di carbonio (CO), biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) e particolato, nel caso di generico arco della rete stradale, ma anche nei casi particolari di intersezione, strada a canyon e aree di parcheggio.

Per quanto riguarda le emissioni, il modello CALINE 4 non opera direttamente la loro valutazione; è necessario fornire, quindi, il valore del fattore di emissione composito (cioè il fattore di emissione basato su una determinata composizione del parco veicolare, e per un

determinato ciclo di guida), ottenuto da un modello di emissione statico, che permetta il calcolo delle emissioni medie nell'intervallo di tempo di riferimento.

Soltanto nell'utilizzo in caso di intersezione è presente un sottomodello dinamico di emissione che consente il calcolo delle emissioni istantanee del solo monossido di carbonio; in particolare si tratta di un modello modale, in quanto, se coadiuvato da un modello di coda e deflusso, perviene alla stima delle emissioni nei diversi modi cinematici di accelerazione, decelerazione, crociera e fermata.

Il modello di dispersione si basa sulla suddivisione di ogni tratto stradale in elementi di diversa lunghezza, determinata tenendo conto della direzione del vento e della posizione rispetto alla strada del punto ricettore in cui si vuole stimare la concentrazione (v. figura 5.8).



**Figura 5.8.** Suddivisione del tratto stradale operata da CALINE4.

Ciascun elemento in cui è ripartito il tratto stradale è schematizzato come una sorgente lineare fittizia di emissione perpendicolare alla direzione del vento; per ognuna di queste sorgenti viene simulato un processo di dispersione gaussiana delle sostanze inquinanti (v. figura 5.9).

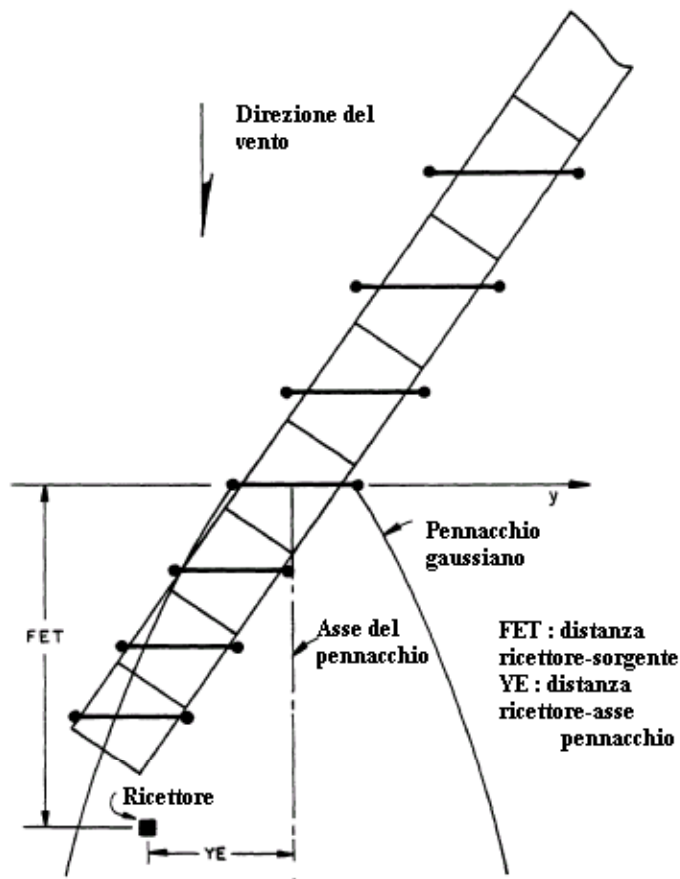


Figura 5.9. Schematizzazione della sorgente in CALINE4.

L'equazione gaussiana di base usata da CALINE 4, in riferimento ad un tratto infinitesimo di strada, ammettendo una riflessione totale da parte del suolo, è la seguente:

$$dC = \frac{q \cdot dv}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left( e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right)$$

dove :

- dC : incremento della concentrazione
- q : emissione sul tratto infinitesimo
- u : velocità del vento
- H : altezza della sorgente
- $\sigma_y, \sigma_z$  : parametri di dispersione orizzontale e verticale

Il parametro di dispersione verticale,  $\sigma_z$ , viene calcolato sulla base dell'approccio empirico di Pasquill e Smith, modificato in modo da tener conto degli effetti di turbolenza meccanica e termica nella zona d'aria sovrastante ogni singola sorgente di emissione.

Il parametro di dispersione orizzontale,  $\sigma_y$ , viene invece calcolato come mostrato da Draxler.

### 5.3.4. CAL3QHC

CAL3QHC è un modello finalizzato alla previsione della concentrazione di monossido di carbonio (CO) o altri inquinanti inerti (come ad esempio il particolato) in corrispondenza delle intersezioni stradali semaforizzate. CAL3QHC include il modello di dispersione di sostanze inquinanti prodotte da sorgenti lineari CALINE 3.

Ciascun tratto di strada in cui è scomposta la rete stradale (massimo 120 archi, i cui punti di incontro sono considerati intersezioni semaforizzate), viene a sua volta scomposto in un “arco di flusso libero” e in un “arco di coda”; un “arco di flusso libero” è definito come un tratto di strada che abbia valori costanti di larghezza, altezza, volume di traffico, velocità di percorrenza, fattore di emissione e in cui i veicoli viaggino senza ritardi dovuti ai semafori. Un “arco di coda” è definito come un tratto di strada con valori costanti di larghezza ed emissione, sul quale i veicoli si trovino in condizioni di fermata; risulta essere delimitato dalla linea di arresto e dal punto in cui si calcola che la coda abbia termine.

A causa della suddivisione precedentemente esaminata, è necessario fornire due valori diversi delle emissioni: un fattore di emissione composito (riferito cioè alla velocità media di un ciclo di guida che comprenda differenti livelli di accelerazione e decelerazione) per quanto riguarda gli “archi di flusso libero”, e un rateo di emissione da fermo, per gli “archi di coda”.

Il modello di deflusso contenuto in CAL3QHC è basato sulla procedura esposta dal Highway Capacity Manual; le condizioni di deflusso nell’ “arco a flusso libero”, sono del tipo ininterrotto a velocità costante, valutata in relazione alle diverse categorie di strade. Nell’ “arco di coda”, il deflusso dei veicoli viene caratterizzato dai risultati di un relativo modello di coda.

Le emissioni totali, dovute al flusso dei veicoli, vengono poi convertite in massa di inquinante per unità di lunghezza e per unità di tempo, in modo da poter essere gestite dal modello di diffusione CALINE 3.

Il modello CALINE 3 si basa su un’equazione di diffusione gaussiana ed è stato sviluppato per valutare la dispersione di inquinanti inerti (CO, particolato), prodotti da veicoli circolanti su strade operanti in condizioni di flusso libero.

Il modello CAL3QHC, a causa delle limitazioni del modello di dispersione usato, non permette una valutazione corretta della concentrazione degli inquinanti in condizioni orografiche complesse e nel caso di strade a canyon.

### 5.3.5. CALPUFF

Il modello di dispersione CALPUFF [26] e tutti i modelli ed i programmi correlati (incluso il modello meteorologico CALMET) sono stati sviluppati dalla Sigma Research Corporation (ora parte dell’Earth Tech, Inc.), come parte di uno studio volto al progetto e allo sviluppo di un sistema di modellazione generalizzato non stazionario per applicazioni regolatorie per la qualità dell’aria. Lo sviluppo originario di CALPUFF e CALMET era stato sponsorizzato dal California Air Resources Board (CARB).

Le specifiche di progetto originali per il sistema modellistico includevano:

1. La capacità di trattare sorgenti areali e puntuali con emissioni variabili nel tempo.
2. Applicabilità per domini di modellazione da decine di metri a centinaia di chilometri dalla sorgente.
3. Predizioni per tempi di mediazione da un anno.
4. Applicabilità agli inquinanti inerti e quelli soggetti a meccanismi di rimozione e conversione chimica di tipo lineare.
5. Applicabilità per situazioni di orografia semplice o complessa.



Il sistema di modellazione CALPUFF include tre componenti principali: CALMET, CALPUFF e CALPOST, oltre ad un'ampia serie di programmi di pre-processo utili ad interfacciare il sistema a banche dati geofisiche e meteorologiche di tipo standard e facilmente accessibili.

CALMET è un modello meteorologico atto allo sviluppo di campi orari di vento e di temperatura tridimensionali. Sono inoltre incluse nell'output dell'elaborazione altre grandezze bidimensionali, quali altezza di mescolamento, caratteristiche superficiali e parametri della dispersione.

CALPUFF è un modello di trasporto e dispersione che simula l'avvezione di "puffs" di materiale emesso dalle sorgenti modellate, utilizzando normalmente come file in ingresso i risultati di CALMET.

CALPOST viene invece utilizzato per l'elaborazione dei files di output di CALPUFF, producendo tabelle riassuntive di interesse per i vari casi di studio.

Il modello di dispersione vero e proprio (CALPUFF) è un modello a puff multi strato, multi specie e non stazionario, in grado di simulare gli effetti di condizioni meteorologiche variabili nel tempo e nello spazio sul trasporto degli inquinanti, sulla trasformazione e la rimozione. Può utilizzare i campi meteorologici tridimensionali prodotti da CALMET o, più semplicemente, dati provenienti da singole stazioni di misura del vento in un formato compatibile con altri modelli gaussiani stazionari, quali ISC3, AUSPLUME, CTDMPPLUS.

CALPUFF inoltre contiene algoritmi utilizzabili per simulare sia effetti localizzati nei pressi della sorgente, quali l'effetto scia degli edifici adiacenti ("building downwash"), sovrainnalzamento del pennacchio (in regime transitorio), penetrazione parziale del pennacchio nello strato di inversione, sia effetti globali quali rimozione di inquinanti (rimozione umida e deposizione di tipo secco), trasformazioni chimiche, venti di taglio verticali, brezze marine e interazioni mare-costa.

La deposizione secca viene computata in funzione dei parametri geofisici, delle condizioni meteorologiche e delle specie chimiche presenti. La rimozione umida viene invece implementata mediante un approccio di tipo empirico.

Per quel che riguarda le trasformazioni chimiche, CALPUFF include tre modalità di parametrizzazione: utilizzo dello schema a 5 specie chimiche ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HNO}_3$  e  $\text{NO}_3^-$ ) impiegato nel modello MESOPUFF II; utilizzo di uno schema modificato a 6 specie ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$  e  $\text{NO}_3^-$ ) adattamento del metodo RIVAD/ARM3; utilizzo ratei variabili di trasformazione definiti dall'utente.

Il modulo per orografia complessa utilizzato da CALPUFF è basato sullo stesso approccio di CTDMPPLUS (Complex Terrain Dispersion Model) [27].

