Consiglio Nazionale delle Ricerche

PROGRAMMA SHORT – TERM MOBILITY – ANNO 2007

Relazione Finale del Programma

Measurements of tracer concentration and turbulent fluxes in a small scale model of a street canyon

Proponente:
Prof. Franco Prodi

Fruitore:
Antonio Donateo

Istituto di afferenza del Fruitore:
Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima – ISAC (u.o. Lecce)

Istituzione ospitante:
University of Surrey – EnFlo (Environmental Flow Research Centre)

Dipartimento: Terra e Ambiente (numero di codice: 1)

Introduzione

Il metodo della sperimentazione su modelli aerodinamici ed idrodinamici in scala ha assunto sin dall'inizio del Novecento un'importanza sempre più rilevante in numerosi campi di attività, dimostrandosi spesso un prezioso ed insostituibile mezzo d'indagine: ne sono ben note ad esempio le applicazioni nella tecnologia aeronautica, idraulica e navale, nonché in taluni settori della ricerca fondamentale. Nel particolare ambito dello studio della dispersione di inquinanti di tipo gassoso in atmosfera il contributo della modellistica sperimentale è essenziale data la difficoltà teorica di trattare taluni fenomeni quali gli effetti topografici del sito sulla dinamica dei pennacchi o l'influenza della stabilità atmosferica, l'intrappolamento dell'inquinante nella scia del camino stesso o di edifici posti nelle vicinanze.

Lo studio di problemi diffusionali si può basare su diverse metodologie tra loro interconnesse:

- studio della modellistica teorica mediante approccio analitico o numerico dell'equazione diffusionale che esprime il bilancio di massa contaminante nella corrente fluida. Gli approcci possono essere diversificati distinguendo fra modelli Euleriani (per esempio il modello Gaussiano) e Lagrangiani che si basano sull'analisi statistica delle traiettorie delle particelle fluide contenenti il contaminante eseguita con tecniche di tipo *random walk* o Monte Carlo.

- approccio sperimentale che può a sua volta essere suddiviso in modellistica in scala reale e modellistica in scala ridotta generalmente sviluppata in galleria del vento

In tempi più recenti le tecniche di modellistica fisica, notevolmente perfezionate, si sono rivolte alle analisi di fisica ambientale ed ai problemi connessi con il comportamento dello strato limite superficiale dell'atmosfera (PBL) di cui la diffusione di contaminanti gassosi rappresenta un aspetto di notevole interesse sia pratico che teorico a causa sia della legislazione in materia che della crescente sensibilizzazione ai problemi di conservazione della qualità dell'aria.

L'emissione in atmosfera e la conseguente dispersione di sostanze inquinanti si possono presentare sotto diverse forme. Ad esempio sorgenti praticamente puntiformi elevate di pennacchi galleggianti come sono i camini di un inceneritore o di un grosso impianto per la produzione di energia elettrica; sorgenti a terra praticamente lineari composte da un gran numero di sorgenti di debole intensità come succede per una autostrada trafficata; sorgenti distribuite su certe aree come nel caso di complessi industriali o di edificazione civile con emissioni distribuite da sistemi di riscaldamento urbano.

Le gallerie a strato limite sviluppato offrono la possibilità di riprodurre lo strato limite atmosferico ("Planetary Boundary Layer", PBL) nel quale gli edifici e le costruzioni in genere si trovano immerse, ossia di poter riprodurre le caratteristiche ambientali tipiche dei primi livelli troposferici. Lo strato limite viene generato artificialmente sfruttando opportuni promotori di turbolenza posti in prossimità del convergente di ingresso della galleria ed una distribuzione di rugosità sul pavimento della galleria.

Lo strato limite atmosferico si "sviluppa" man mano che l'aria percorre la dimensione longitudinale, raggiungendo le caratteristiche desiderate nella sezione della galleria in cui avviene la disposizione dei modelli e lo studio delle fenomenologie in analisi. Il flusso permette l'esecuzione di prove di diversa natura, delle quali, nel seguito, si elencano alcune:

- determinazione delle caratteristiche del vento su terreni ad orografia complessa;
- prove di carattere ambientale, ad esempio per la stima della diffusione di sostanze inquinanti da sorgenti puntuali (ciminiere), oppure sorgenti areali (insiemi di sorgenti poco significativi, discariche etc.) o ancora lineari (insiemi di camini disposti in serie o sorgenti stradali);
- valutazione delle azioni dinamiche globali su costruzioni;

La corretta valutazione dei fenomeni accennati presuppone che, nel corso delle prove in galleria del vento, le caratteristiche del flusso incidente vengano simulate correttamente. Nel corso della sperimentazione, infatti, devono essere rispettate alcune leggi, dette leggi di "similitudine", che garantiscono la possibilità che i risultati ottenuti sui modelli possano efficacemente rappresentare la situazione in scala "reale". Uno degli aspetti più importanti in questo tipo di sperimentazione è la stratificazione della densità dell'atmosfera nelle vicinanze del suolo terrestre dovuta al flusso di calore fra l'aria e la superficie terrestre. L'effetto determinato dalla stratificazione di densità al suolo è notevole e diventa molto importante tenerne conto nella modellazione in scala per

l'elevata frequenza temporale con cui questo si manifesta. La condizione di stabilità atmosferica di tipo neutra è caratterizzata dalla presenza di sola turbolenza di tipo meccanico (determinata dal flusso di masse d'aria: vento atmosferico) e pertanto risulta essere di più facile riproducibilità in galleria.

EnFLO Wind Tunnel

In Fig.1 è rappresentata l'ingresso della galleria del vento in funzione presso EnFLO (Environmental Flow Research Centre) con tutti gli elementi necessari per poter simulare uno strato limite atmosferico realistico.

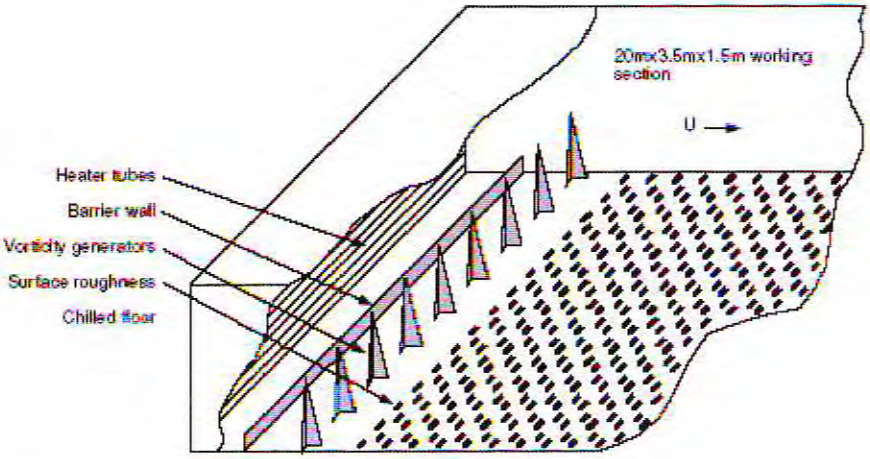


Fig. 1. Schema dell'inlet della galleria in funzione presso EnFlo. Si possono notare gli spike per la generazione della turbolenza, e subito dopo gli elementi di rugosità sistemati in array paralleli tra di loro.

La galleria è di tipo a circuito aperto con propulsione in aspirazione e camera di prova chiusa. Ha una sezione di lavoro larga 3.5 m, alta 1.5 m e lunga circa 20 m. Tale dimensioni sono state studiate per permettere di modellare un flusso atmosferico con scalatura variabile fra 1:200 e 1:400.

La rugosità di superficie rappresenta l'effetto della superficie terrestre a scala reale. Mediante l'attrito creato dagli elementi di rugosità si riesce a simulare un profilo per gli stress di Reynolds che riescono a controllare la turbolenza ed il profilo del vento. Una tipica disposizione degli elementi di rugosità è rappresentato in Fig.2. Gli elementi di rugosità sono costruiti in strisce di alluminio piegate a 90° per poter formare una base di appoggio ed un elemento verticale. Le dimensioni degli elementi utilizzati sono di 8cm x 2cm.

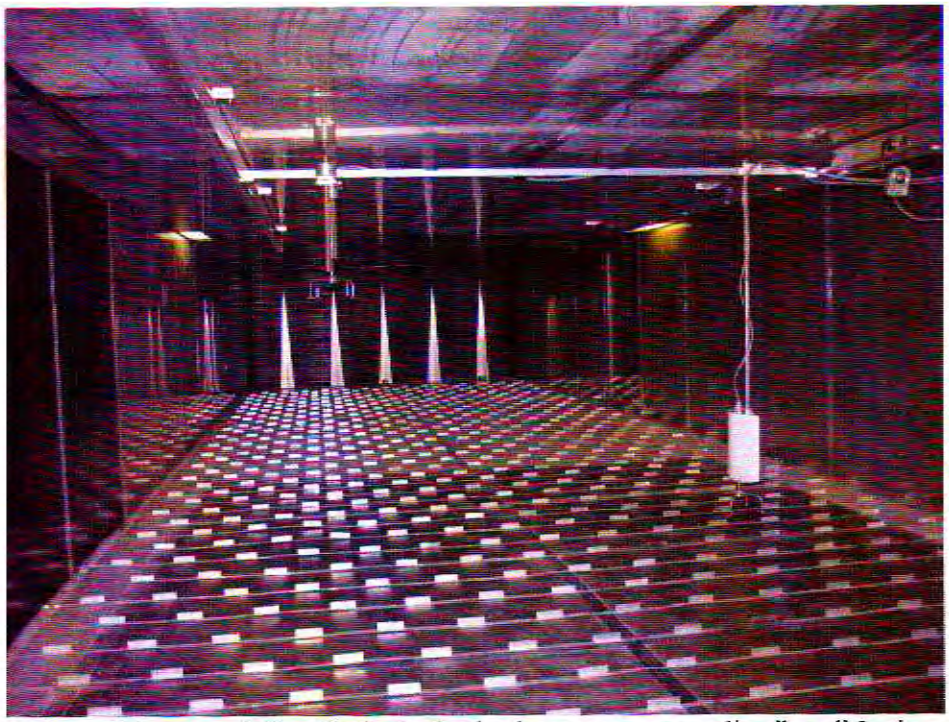


Fig.2. Sezione di ingresso della galleria. In fondo si possono notare gli spikes di Irwin e subito dopo gli elementi di rugosità sistemati a scacchiera rispetto al flusso.

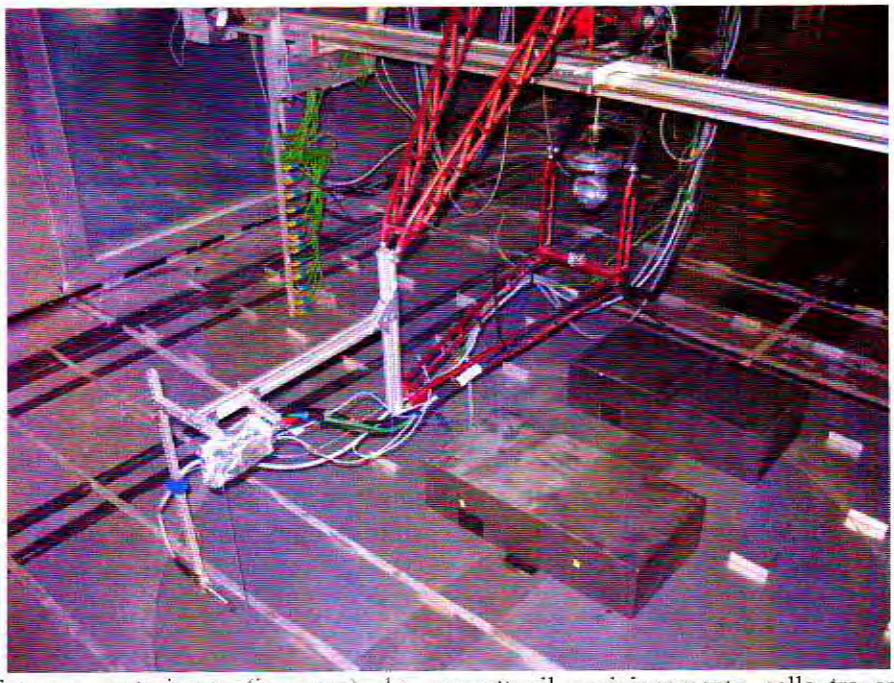


Fig.3. Traversa motorizzata (in rosso) che permette il posizionamento nelle tre coordinate spaziali degli strumenti di misura.

Nella camera di prova trovano alloggiamento una tavola rotante, la quale offre la possibilità di orientare il modello e studiare quindi l'effetto del vento proveniente da varie direzioni, e una traversa motorizzata (Fig.3) che consente di posizionare con

precisione sui tre assi cartesiani i vari sensori di misura all'interno dell'intero volume della camera di prova.

Le velocità di flusso libero nella sezione di prova che devono essere realizzate per riprodurre le emissioni gassose di ciminiere in scala ridotta sono generalmente comprese fra 0.3 e 4.5 m/s. Tale velocità di flusso viene misurata per mezzo di un anemometro sonico posto prima della camera di lavoro. L'altro aspetto interessante, tuttavia comune a ben poche gallerie del vento nel mondo, è la possibilità di ottenere una stratificazione di densità nella sezione di prova. Tale caratteristica, presente nel tunnel principale dell'EnFlo, viene generalmente ottenuta mediante pannelli riscaldanti/raffreddanti posti sul pavimento della galleria e dei riscaldatori in ingresso. In questo modo, se la potenza termica disponibile è sufficiente, è possibile creare una stratificazione termica e quindi di densità dell'ordine di 50-60 °C/m necessaria a simulare strati limiti stabili o convettivi.

Caratteristiche tecniche della galleria ENFLO

Dimensioni: Sezione di lavoro: 20 x 3.5 x 1.5 m;
Lunghezza totale 27 m
Riscaldatori in ingresso: Numero di strati: 15 @ 3.5 x 0.1 m
Massimo rate di riscaldamento totale: 400 kW
Massimo gradiente di temperatura: 80 $°Km^{-1}$
Pannelli del soffitto e del pavimento elettricamente riscaldabili
Massimo rate di riscaldamento: 5 kWm^{-2}
Massima temperatura superficiale: 120 °C
Pannelli del pavimento raffreddati ad acqua
Massimo rate di raffreddamento: 1 kWm^{-2}
Minima temperatura superficiale: 5 °C

Strumentazione di Misura
La velocità del vento è stata misurata con un anemometro laser doppler LDA (Laser Doppler Anemometer). Il principio di funzionamento di questo strumento su basa sulla diffusione della radiazione laser da parte di una particella che passa attraverso il raggio stesso intersecandolo. La frequenza della radiazione diffusa è spostata di una quantità proporzionale alla velocità della particella stessa a causa dell'effetto Doppler. Lo strumento può essere sistemato teoricamente in qualsiasi punto della camera di prova e permette quindi la misura della velocità della particella e del vento che la trasporta.

Il sistema LDA utilizzato in EnFLO (Fig.4) è un sistema a fibre ottiche a due componenti che misura simultaneamente le due componenti perpendicolari della velocità del vento (componente longitudinale e verticale). Ovviamente, perché lo strumento funzioni per bene è necessario avere un flusso continuo di particelle all'interno della galleria, almeno nella camera di lavoro. Per poter ottenere questo flusso di particelle si utilizza un generatore ultrasonico di 'fumo', sistemato all'ingresso della galleria, che utilizza una soluzione di zucchero per creare per cavitazione del fluido le particelle.

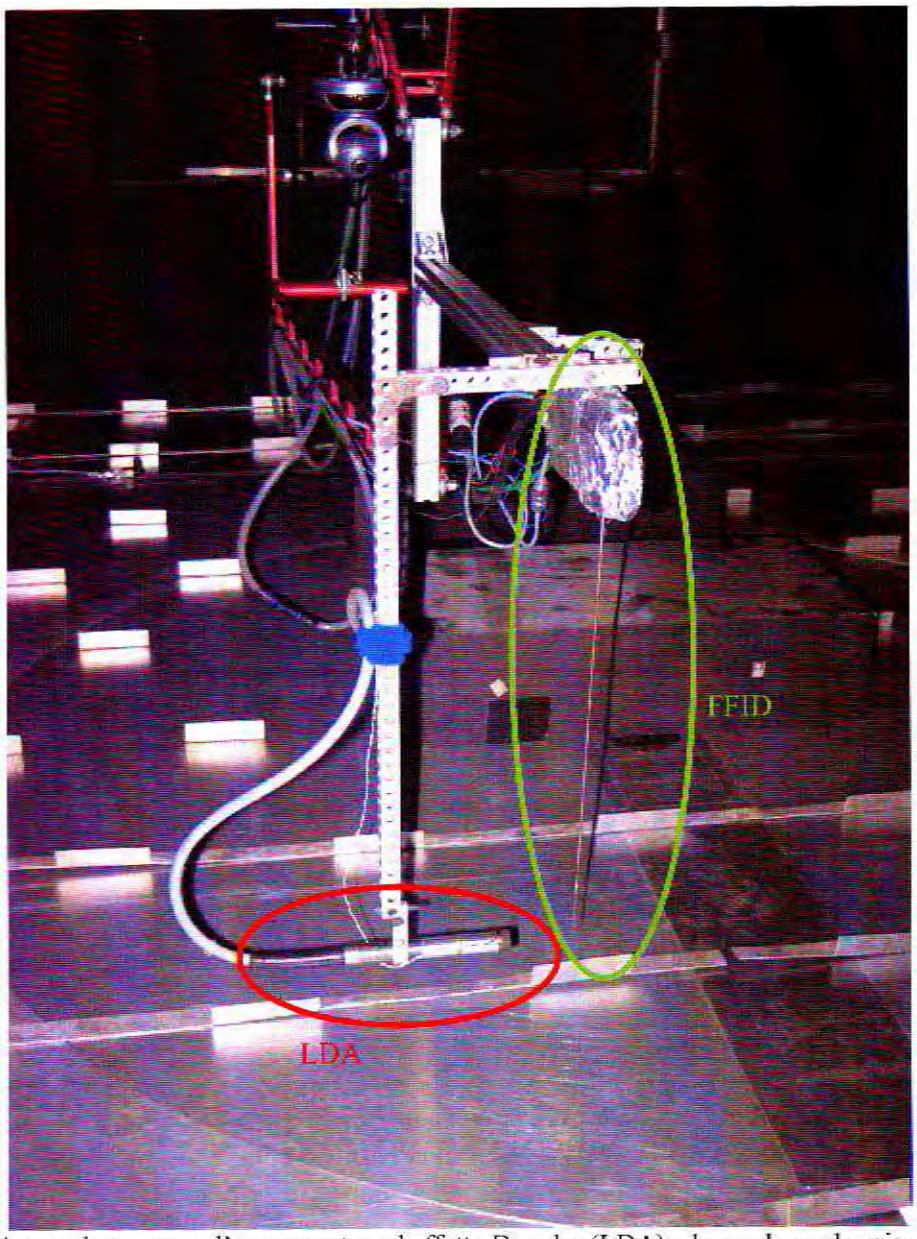


Fig.4. Accoppiamento tra l'anemometro ad effetto Doppler (LDA) e la sonda per la misura della concentrazione (FFID).

Per la misura della concentrazione del tracciante viene utilizzato un sensore FFID (Fast Flame Ionisation Detector) (Fig.4). La misura della dispersione nella galleria è basata sul rilascio di un gas di trasporto (carrier) inerte in miscela con una concentrazione nota di un idrocarburo, per esempio propano. Il gas viene iniettato all'interno della galleria mediante tubi flessibili montati su una struttura rigida terminale (Fig.5) che simula la sorgente puntiforme e può essere posizionata nella camera di lavoro. Il FFID opera sul principio della ionizzazione degli atomi di carbonio durante la combustione degli idrocarburi. Una proporzione fissa di molecole di idrocarburo ionizzeranno temporaneamente come un catione di carbonio ed un elettrone. Se si applica una carica elettrostatica sul volume di combustione gli elettroni saranno attratti dal polo positivo e si viene a creare una piccola corrente che si può misurare. La corrente elettrica sarà

proporzionale alla concentrazione di idrocarburi nella miscela. La frequenza di misura di un FFID può arrivare fino a circa 500Hz, nel nostro caso abbiamo una misura a frequenza di 100Hz.

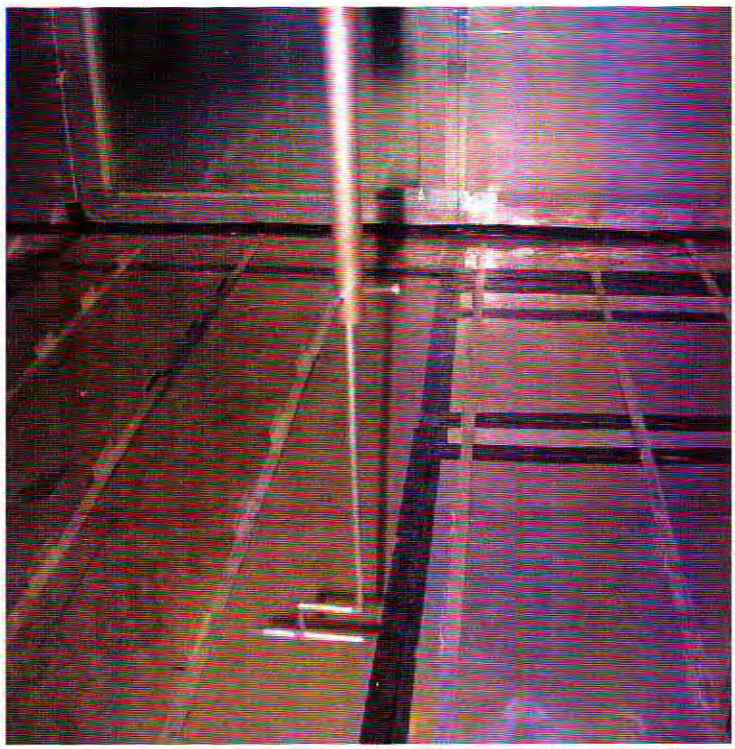


Fig.5. Sorgente di concentrazione. In basso si può notare l'ugello di emissione del gas tracciante.

Per poter misurare i flussi turbolenti di massa all'interno della galleria il sistema di misura della velocità del vento (LDA) è stato accoppiato con il sistema di misura FFID della concentrazione. A tal fine è stata applicata la tecnica di eddy correlation che mette in correlazione le fluttuazioni delle singole componenti della velocità del vento con le fluttuazioni della concentrazione.

Configurazione di Misura

In tutte le configurazioni utilizzate in questo lavoro, è stato realizzato uno strato limite neutrale con una velocità del vento pari a 2.5 m/s. La sorgente di gas tracciante è stata impostata con una emissione pari a 2 l/m ed una intensità percentuale rispetto alla emissione stessa pari a 1.9%. In questo lavoro viene variata la quota della sorgente con una configurazione a 150mm ed un'altra a 300mm. La sorgente dista dal primo blocco 1.20m.

Il set-up degli edifici prevede una prima elementare sistemazione di un singolo blocco parallelepipedo (one building) con due differenti orientazioni (0° e 90°) (Fig.6 e Fig.7)

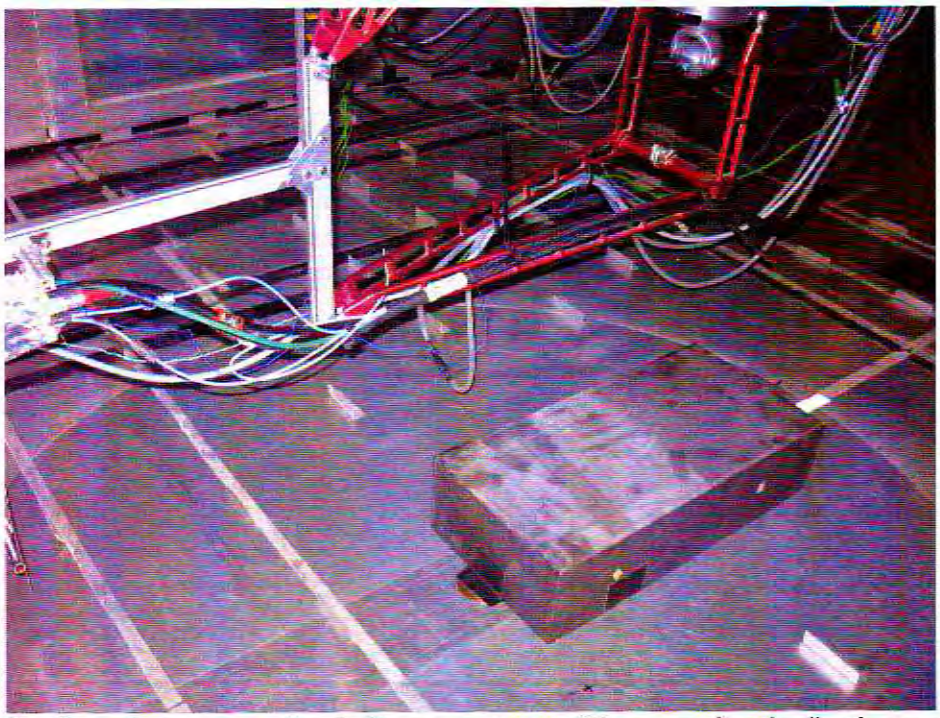


Fig.6. Configurazione con un singolo blocco posto con il lato maggiore in direzione parallela (0°) rispetto alla direzione del flusso.

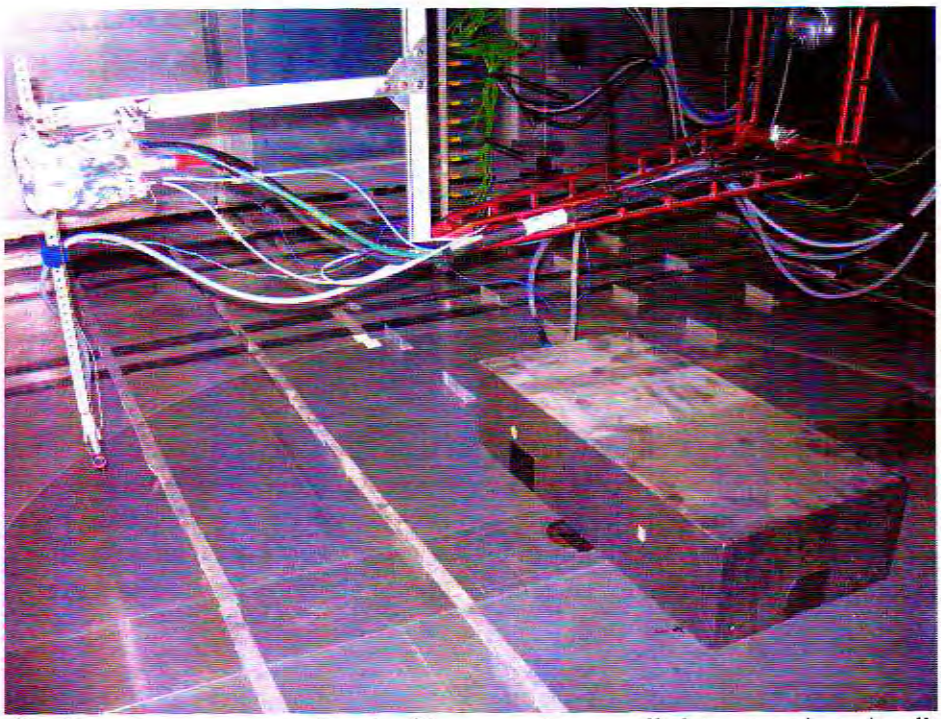


Fig.7. Configurazione con un singolo blocco posto con il lato maggiore in direzione perpendicolare (90°) rispetto alla direzione del flusso.

In seguito la prima configurazione viene complicata con l'aggiunta di un secondo blocco (two building) delle stesse dimensioni posto parallelamente al primo (Fig.8). In questo modo creiamo il modello di uno street canyon. Nel primo set di misure abbiamo

utilizzato un rapporto altezza dell'edificio (Hs) larghezza dello street canyon (Ws) pari a 1, nella seconda configurazione il rapporto è stato diminuito passando a 0.5.

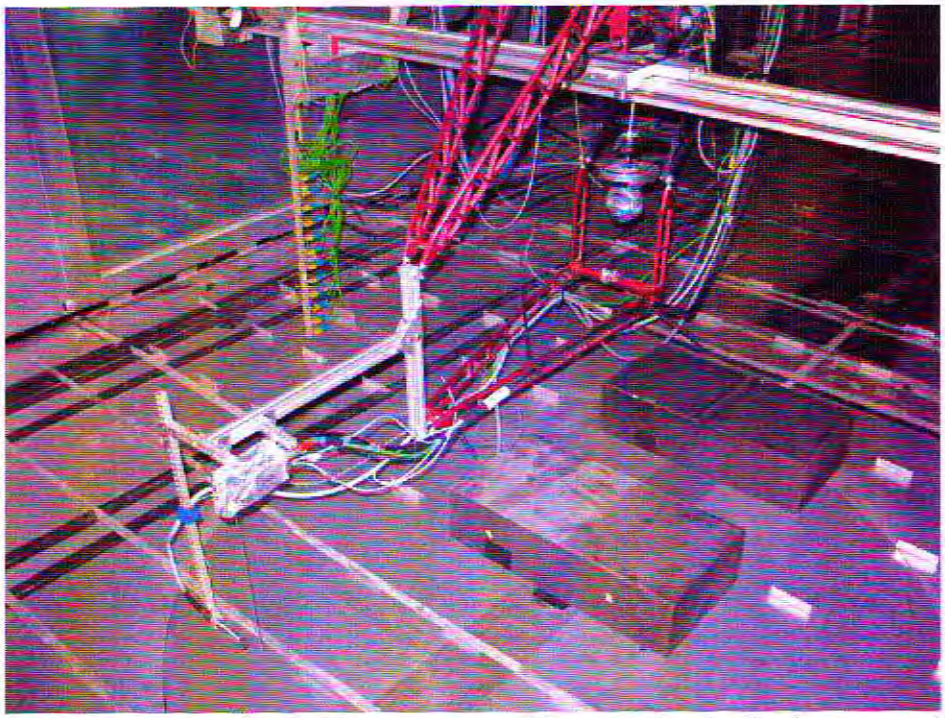


Fig.8. Configurazione con doppio blocco posto con il lato maggiore in direzione perpendicolare (90°) rispetto alla direzione del flusso.

Configurazione One Building

Il set up sperimentale a singolo blocco, sia nella configurazione a 0° che in quella a 90°, è stato rappresentato in maniera schematica, rispettivamente, in all.1 e all.2. In entrambe le configurazioni sono state rilevati una serie di profili verticali prima del blocco, sul blocco e dopo il blocco rispetto alla direzione di provenienza del flusso d'aria. Sempre nello stesso ordine sono stati rilevati una serie di profili laterali. Sia in un caso che nel secondo abbiamo ricavato informazioni sulla velocità del vento, sulla concentrazione e sui flussi verticali turbolenti di massa.

Profili Verticali

In Fig.9 a), b) e c) possiamo vedere rispettivamente il profilo verticale di velocità del vento, il profilo di concentrazione ed il profilo per i flussi verticali turbolenti sulla linea della center line del pennacchio generato, precisamente nei punti #1, #4 e #6 riportati nell'all.1 per la configurazione 0°, mentre in Fig.10 a), b) e c) vediamo gli stessi grafici per la configurazione a 90°.

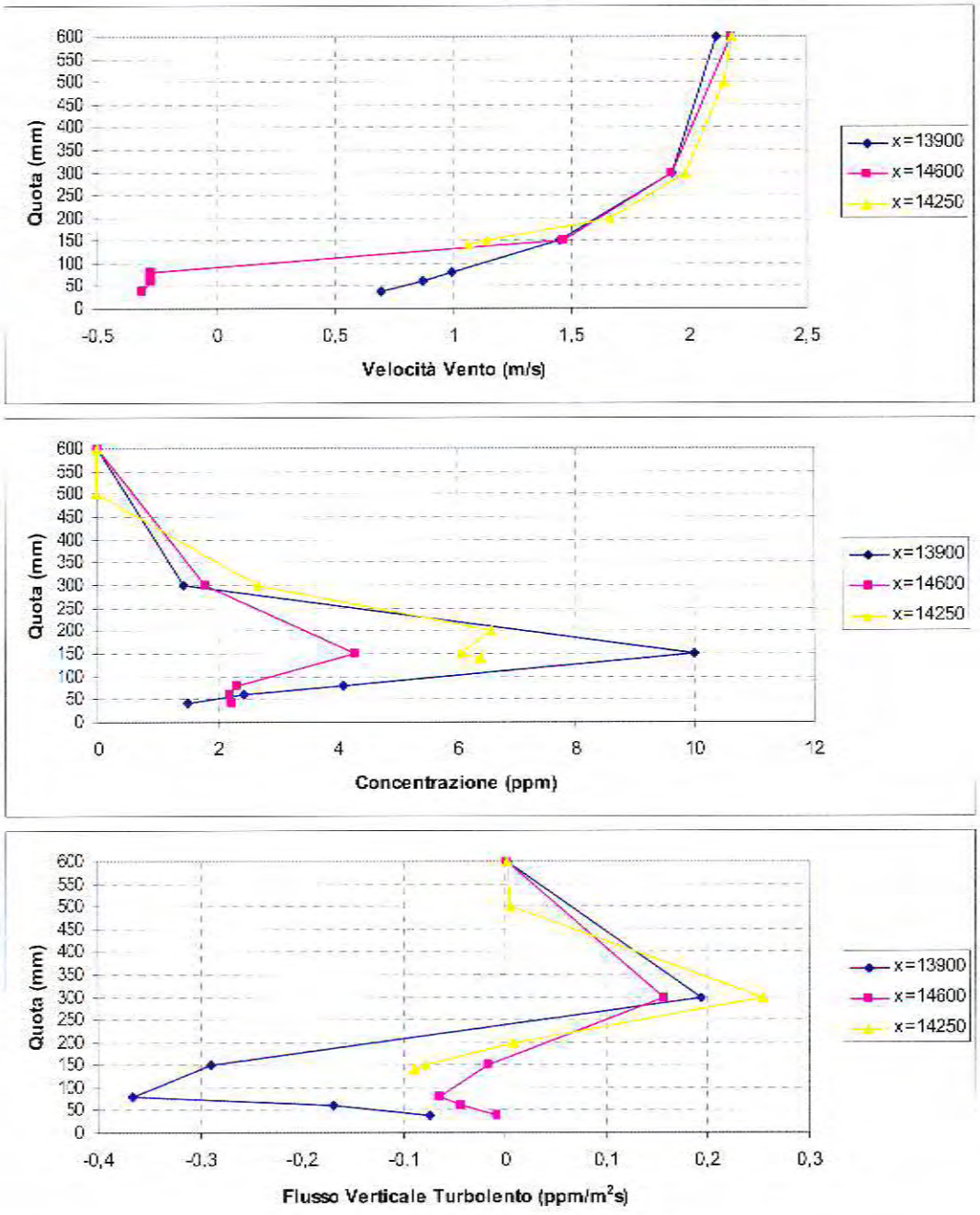


Fig.9. Configurazione one building (0°) - profili sulla center line del pennacchio. a) profilo della velocità media del vento. b) profilo di concentrazione. c) profilo del flusso verticale turbolento

Per avere un controllo sull'allargamento (spread) del pennacchio abbiamo rilevato una serie di profili verticali anche in posizioni lontane dalla center line del pennacchio (a y=450mm ovvero punto #2, y=225mm ovvero punto #3 e punto #5 con y=-450), trovando una concentrazione trascurabile, entro l'errore associato alla misura stessa.

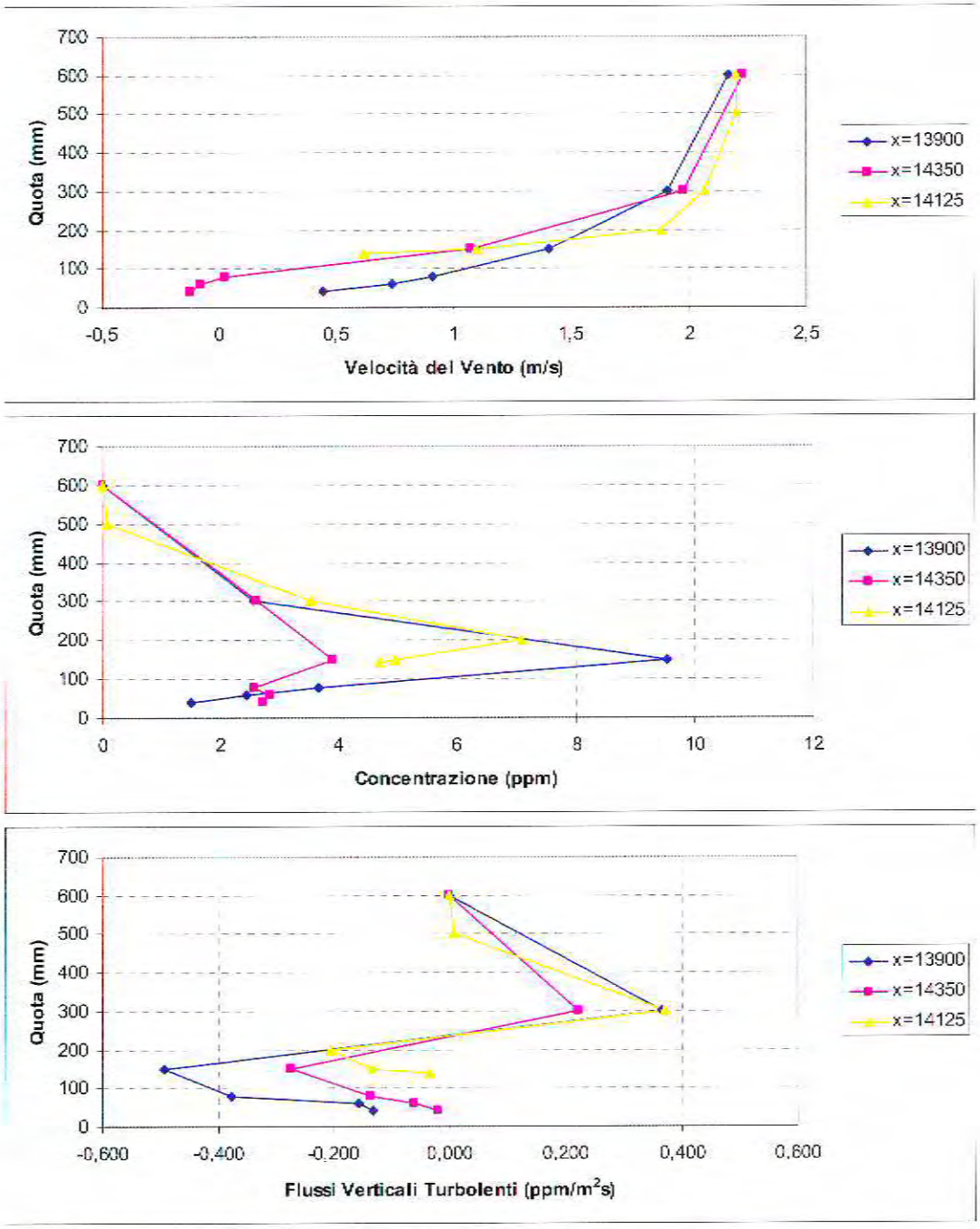


Fig.10. Configurazione one building (90°) - profili sulla center line del pennacchio. a) profilo della velocità media del vento. b) profilo di concentrazione. c) profilo del flusso verticale turbolento.

Profili Laterali

In Fig.11 a), b) e c) riportiamo i profili laterali, a quota z = 100mm, della velocità del vento e della concentrazione ed in Fig.12 a), b) e c) per la configurazione a 90°.

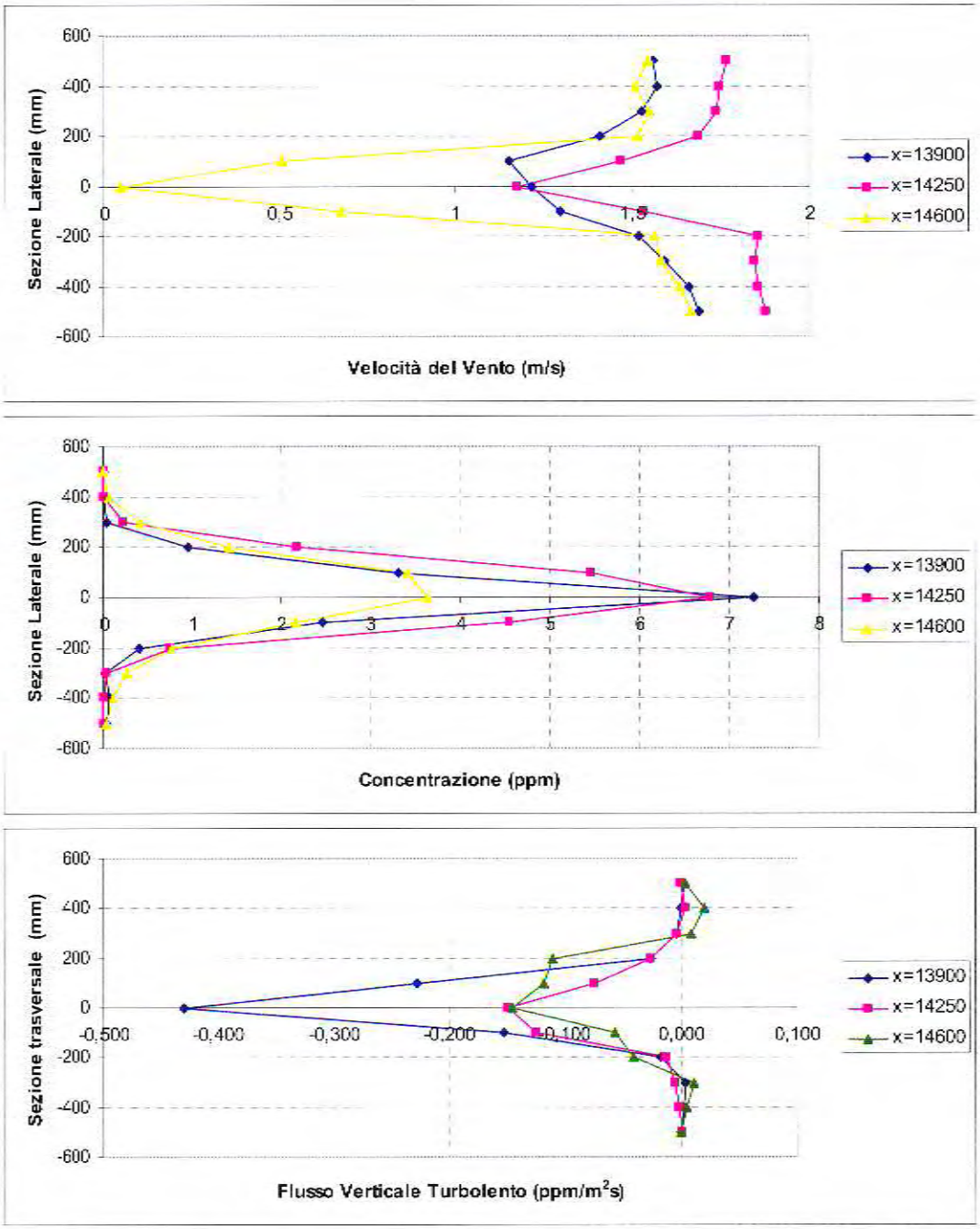


Fig.11. Configurazione one building (0°) - profili laterali da y=-500 a y=500, a quota z=100. a) profilo della velocità media del vento. b) profilo di concentrazione. c) profilo del flusso verticale turbolento.

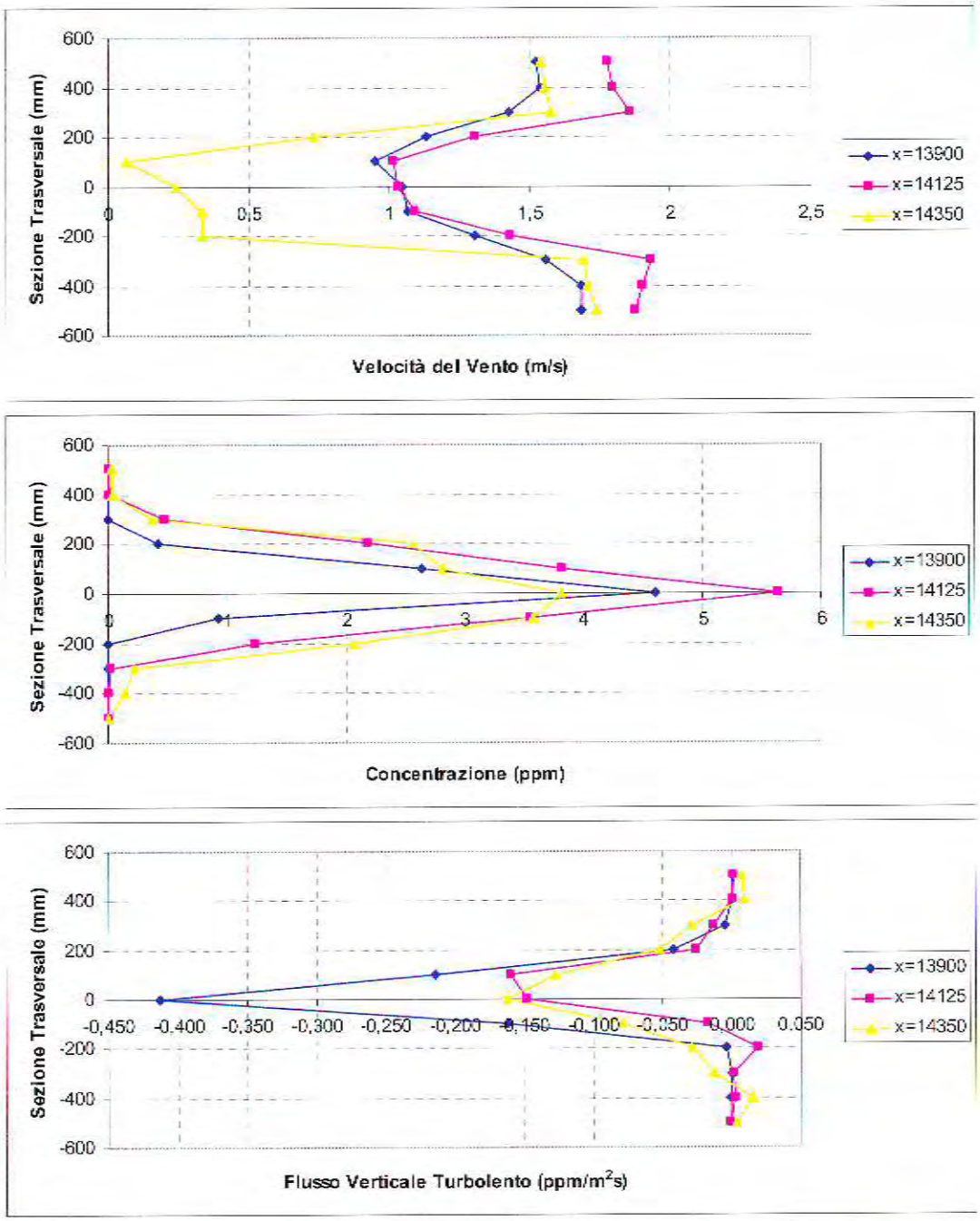


Fig.12. Configurazione one building (90°) - profili laterali da y= -500 a y=500, a quota z=100. a) profilo della velocità media del vento. b) profilo di concentrazione. c) profilo del flusso verticale turbolento.

Configurazione Two Buildings

Come già affermato, nella configurazione del singolo blocco a 90° è stato aggiunto un secondo blocco parallelo al primo ed in questo modo si realizza uno street canyon. A questo punto ci siamo interessati al rilevare i profili verticali sopra vento e sottovento rispetto alla direzione del flusso ma in particolare abbiamo ricavato i profili verticali e laterali all'interno dello street canyon vero e proprio.

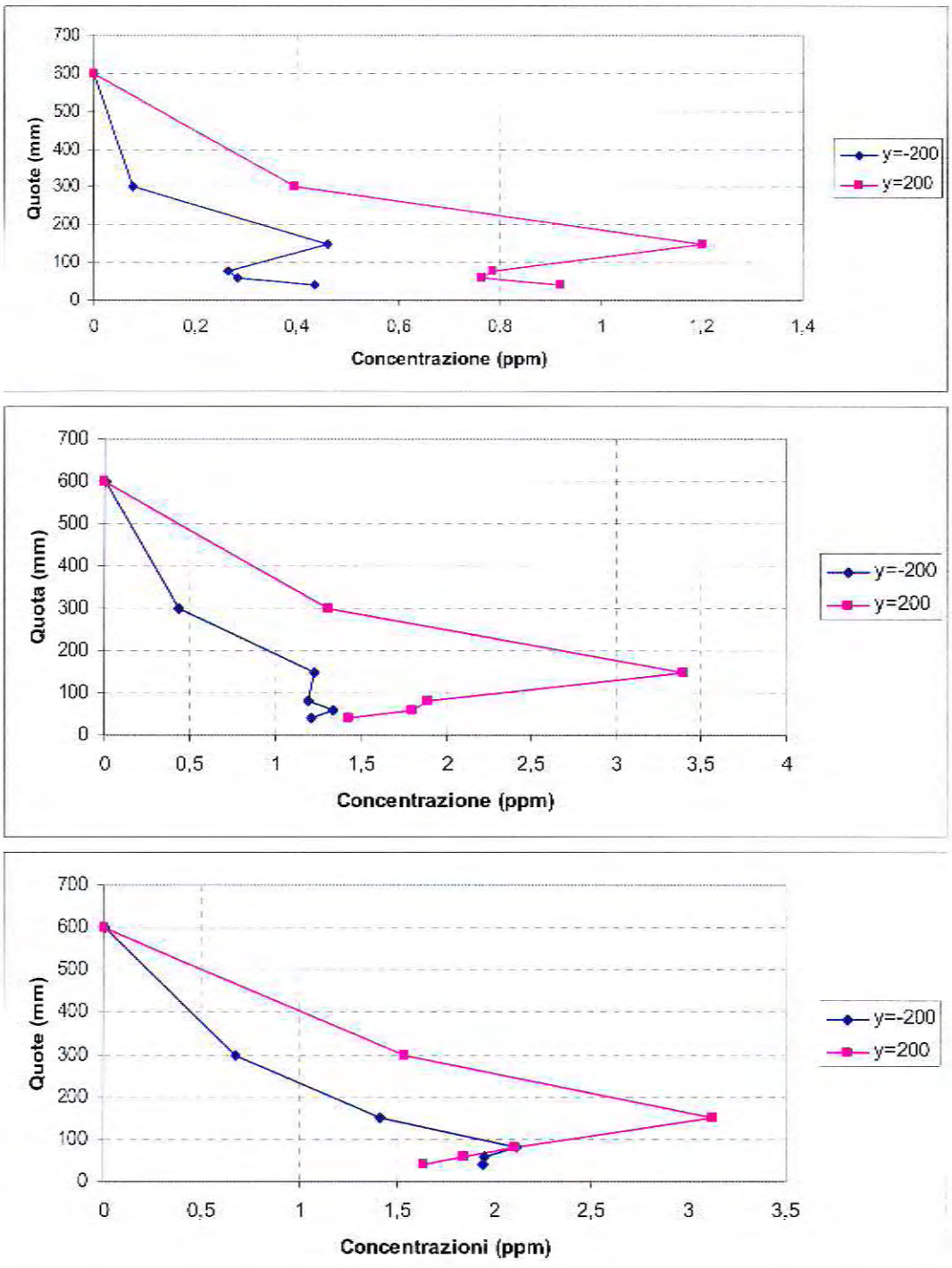


Fig.13. Profilo verticale di concentrazione nella configurazione riportata nell'all.3, ovvero una distanza tra i due blocchi pari a 125mm e la sorgente posta a quota 150mm. a) profili di concentrazione prima del blocco (x=13900). b) profili di concentrazione all'interno dello street canyon (x=14312). c) profili di concentrazione dopo lo street canyon (x=14725)

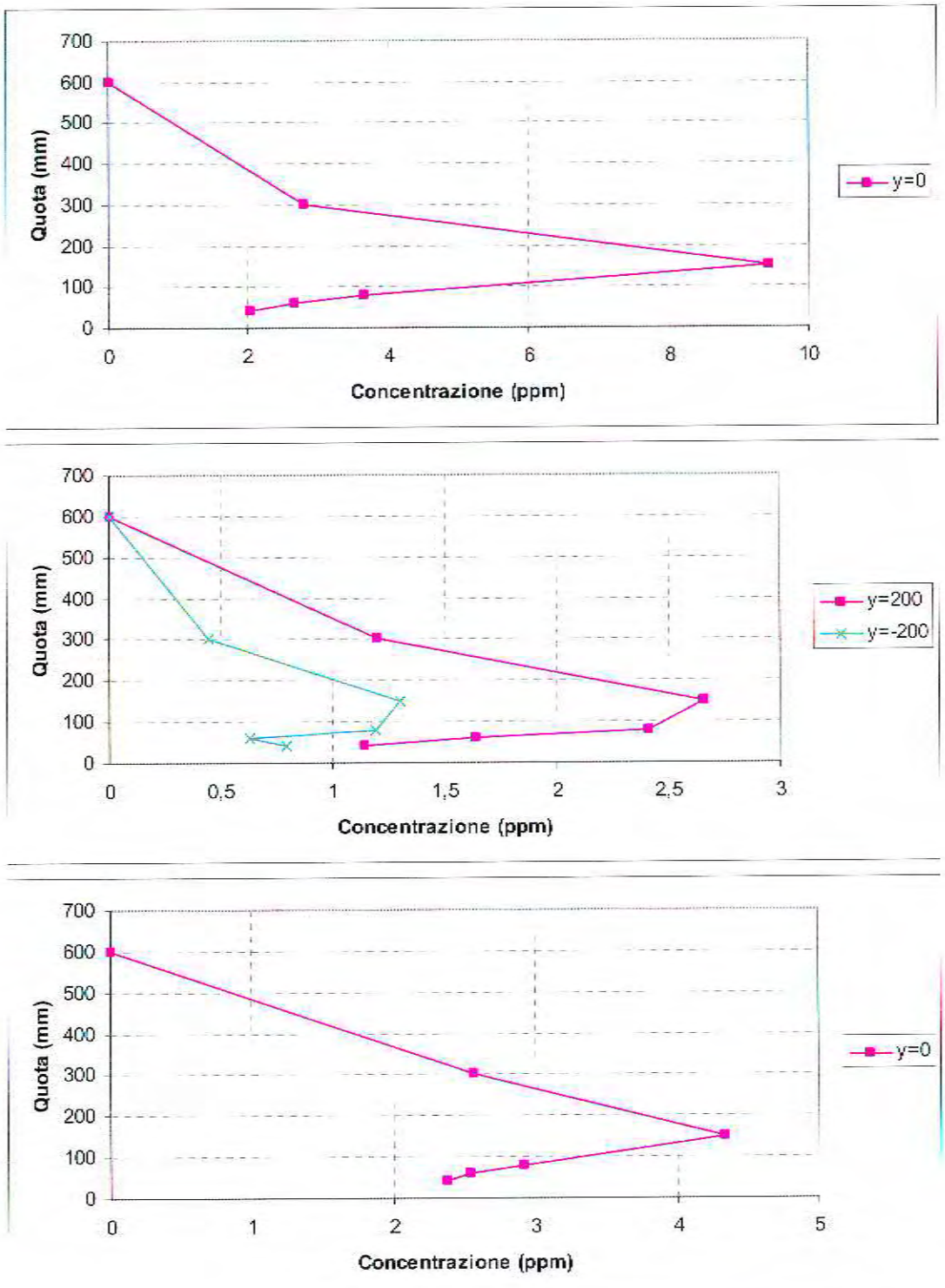


Fig.14. Profilo verticale di concentrazione nella configurazione riportata nell'all.4, ovvero una distanza tra i due blocchi pari a 250mm e la sorgente posta a quota 150mm. a) profili di concentrazione prima del blocco (x=13900). b) profili di concentrazione all'interno dello street canyon (x=14375). c) profili di concentrazione dopo lo street canyon (x=14850)

Profili Verticali

In Fig.13 a), b) e c) possiamo vedere il profilo verticale di concentrazione sulla center line del pennacchio generato, precisamente nei punti #2, #3, #5, #6, #8, #9, #11, #12, #14 e #15 riportati nell'all.3, in una configurazione con due blocchi distanti tra di loro 125mm e la sorgente posta a quota 150mm. In questo caso si ottiene un rapporto Hs/Ws pari a 1.

In Fig.14 a), b) e c) possiamo vedere il profilo verticale di concentrazione sulla center line del pennacchio generato, precisamente nei punti #2, #4, #6, #7, #9 e #11 riportati nell'all.4, in una configurazione con due blocchi distanti tra di loro 250mm e la sorgente posta a quota 150mm. In questo caso abbiamo un rapporto Hs/Ws pari a 0.5.

Sia nella prima configurazione che nella seconda sono stati ricavati i profili laterali della velocità del vento, di concentrazione e dei flussi verticali turbolenti alla quota di z=100 nei punti #17, #18 e #19 dell'all.3 e nei punti #13, #14 e #15 dell'all.4

Tutte le misure sono state ripetute in una configurazione in cui la quota della sorgente viene portata a 300mm secondo lo schema di misura riportato nell'all.5 e all.6.

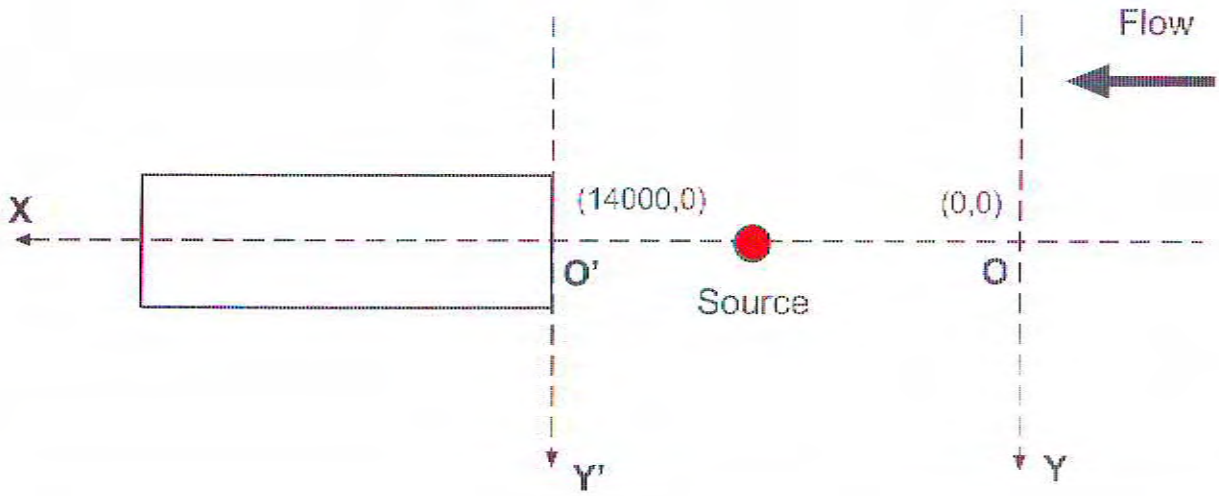
Lecce, 11/02/2007

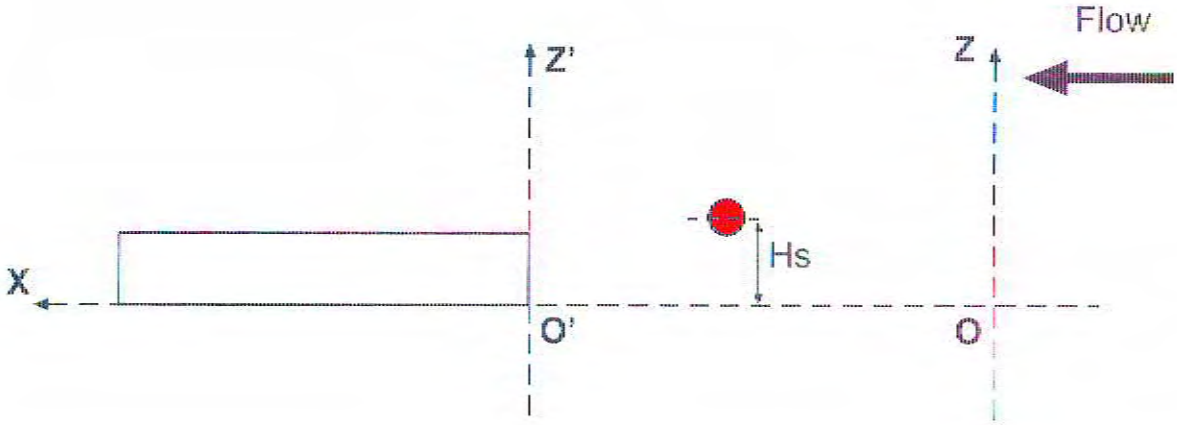
Prof. Franco Prodi

dr. Antonio Donateo

All.0

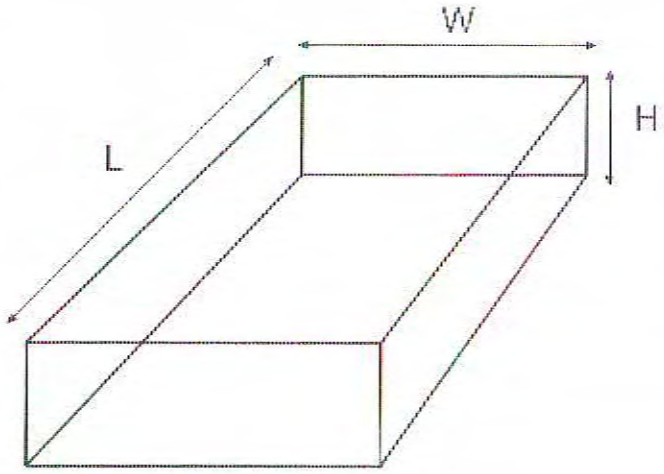
Geometrical Reference System



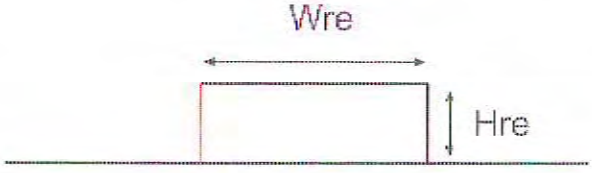


Intervallo valori:
X: 12000 - 16000
Y: -500 - 500
Z: 20 - 800

Hs Height of the source



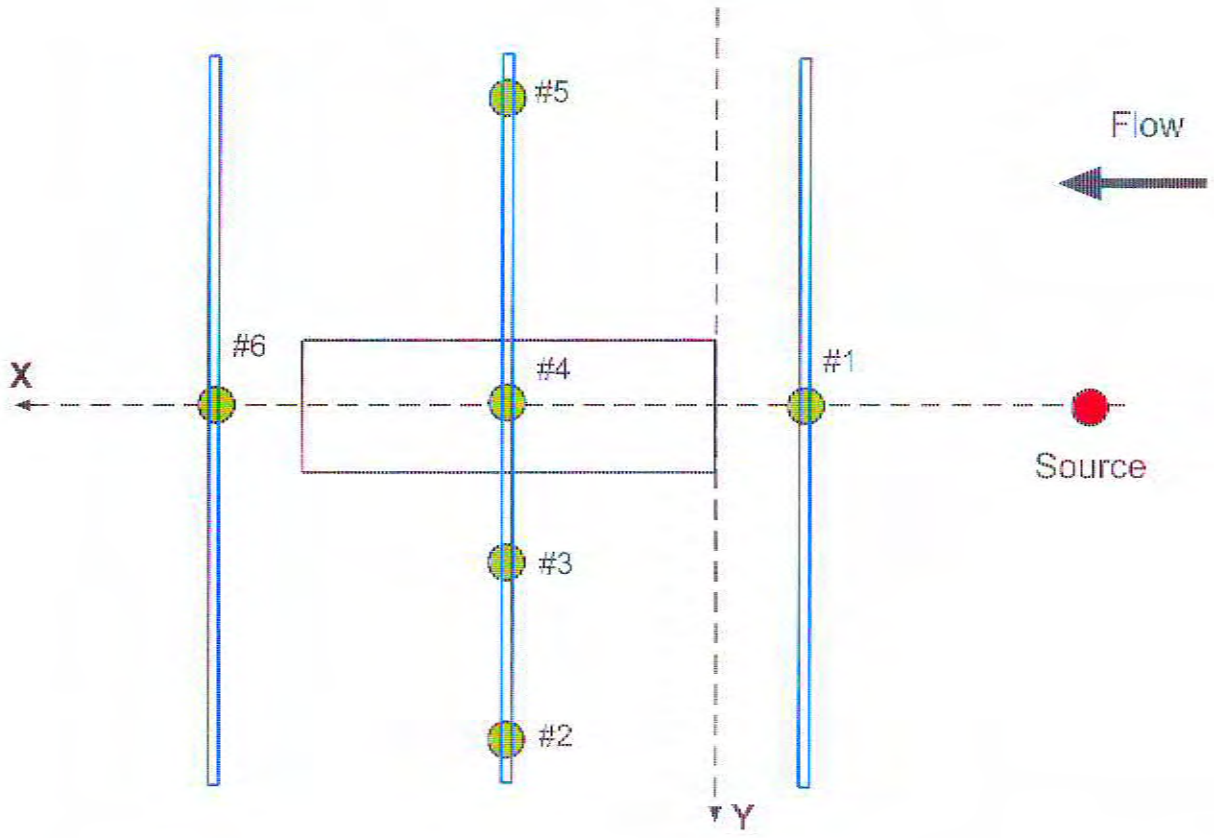
Dimensioni Building:
L= 500 mm
W= 250 mm
H= 125 mm

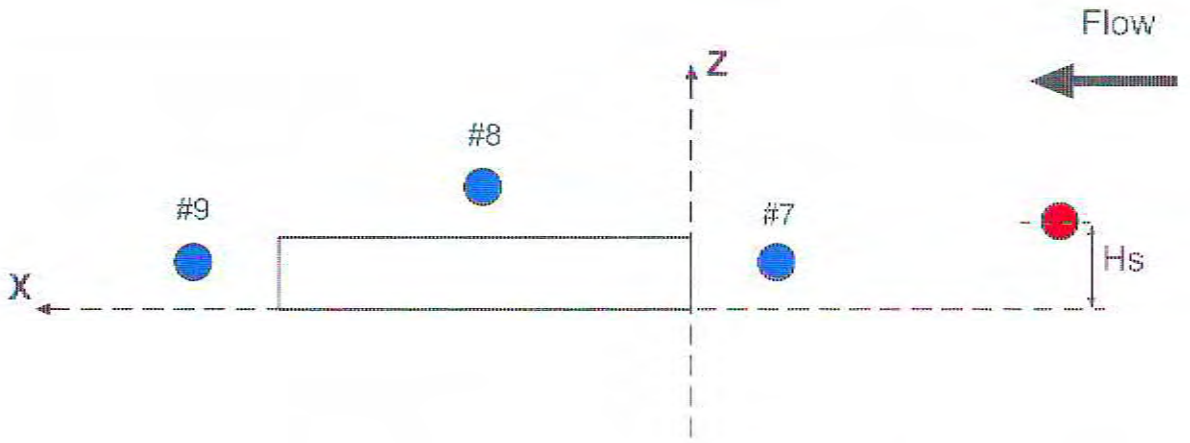


Roughness Element:
Wre = 80 mm
Hre = 20 mm

AII.1

Wind Tunnel - 1 Block - 150HS - 0°





Vertical Profile

Lateral Profile

Hs Height of the source

#1 - (13900,0)

#2 - (14250,450)

#3 - (14250,225)

#4 - (14250,0)

#5 - (14250,-450)

#6 - (14600,0)

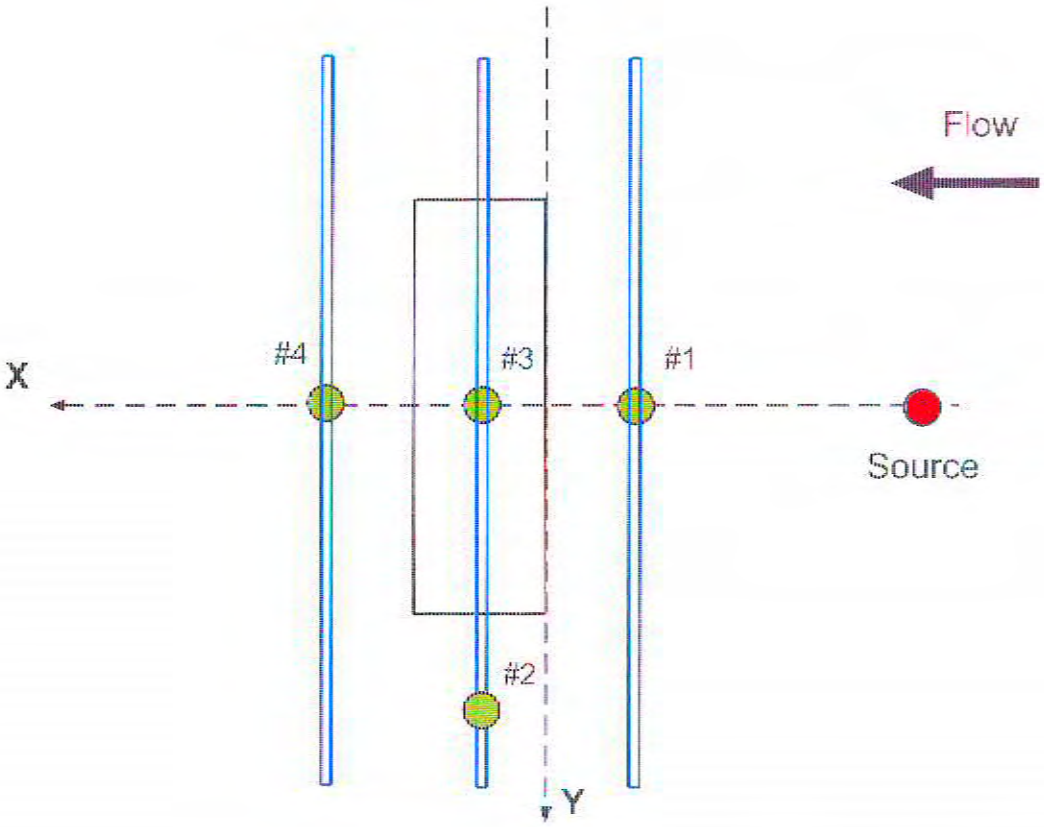
#7 - (13900,...,100)

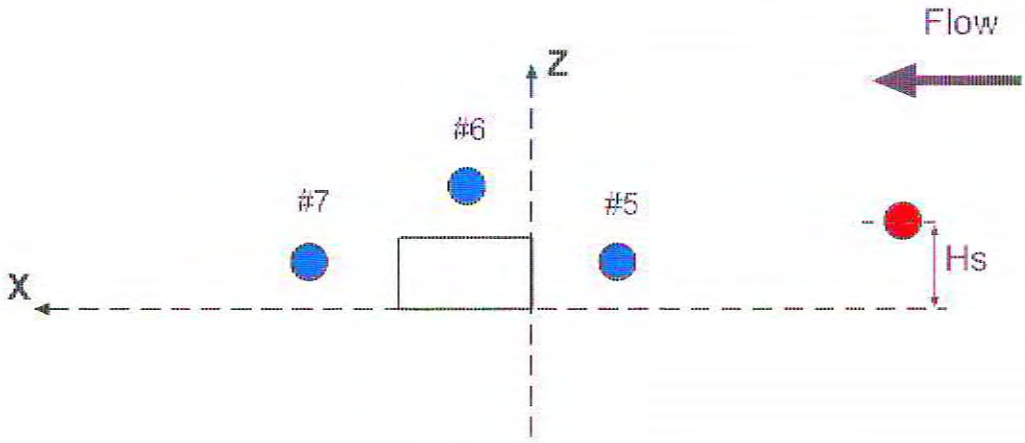
#8 - (14250,...,150)

#9 - (14600,...,100)

All.2

Wind Tunnel - 1 Block - 150HS - 90°





Vertical Profile

Lateral Profile

Hs Height of the source

#1 - (13900,0)

#2 - (14125,350)

#3 - (14125,0)

#4 - (14350,0)

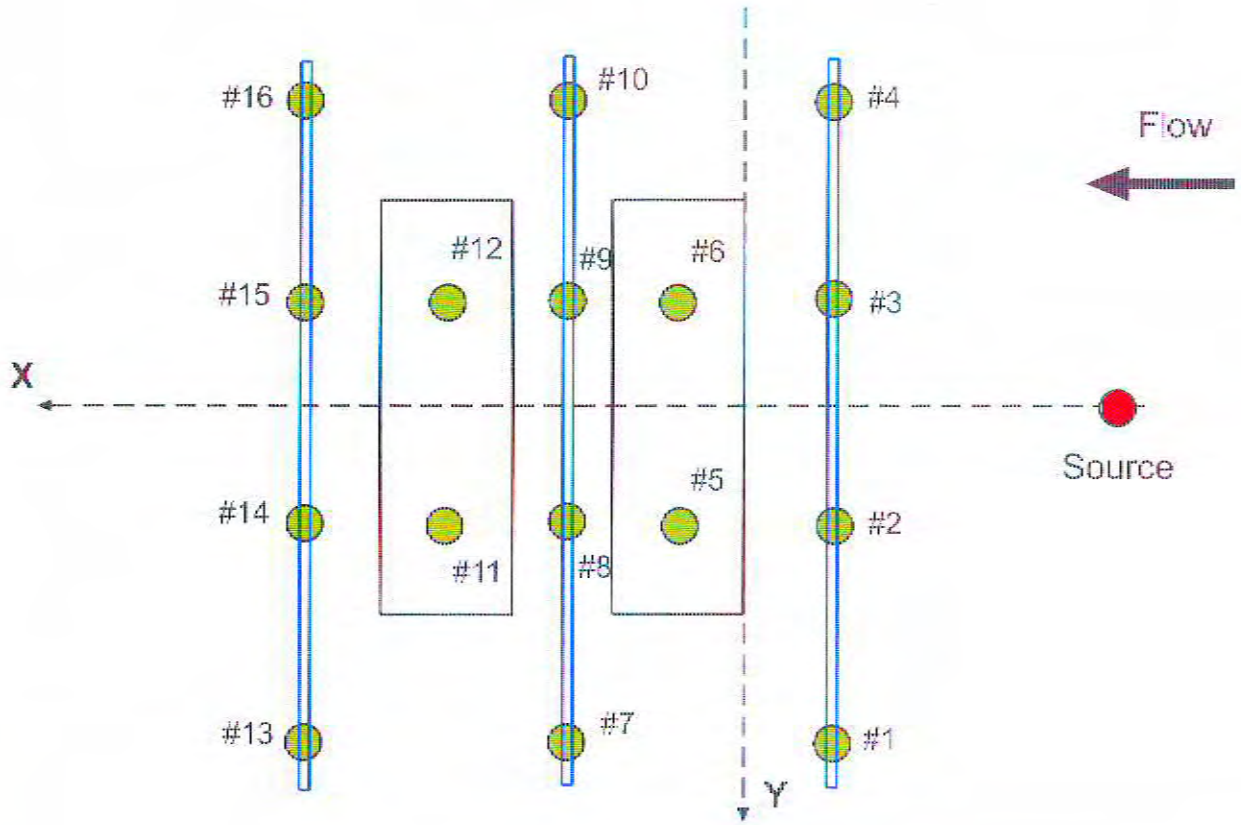
#5 - (13900,...,100)

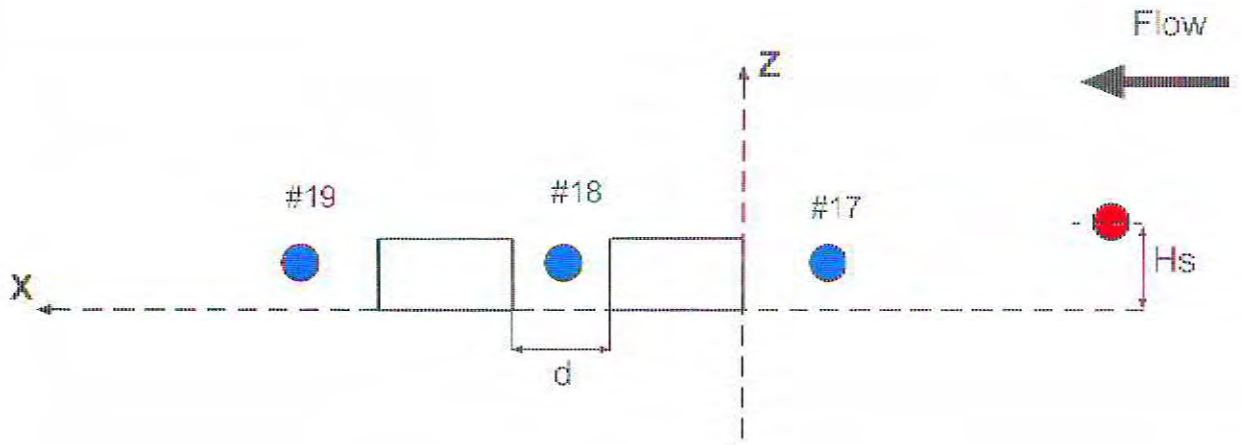
#6 - (14125,...,150)

#7 - (14350,...,100)

All.3

Wind Tunnel 150HS_125d





Vertical Profile

Lateral Profile

d width of street canyon

Hs Height of the source

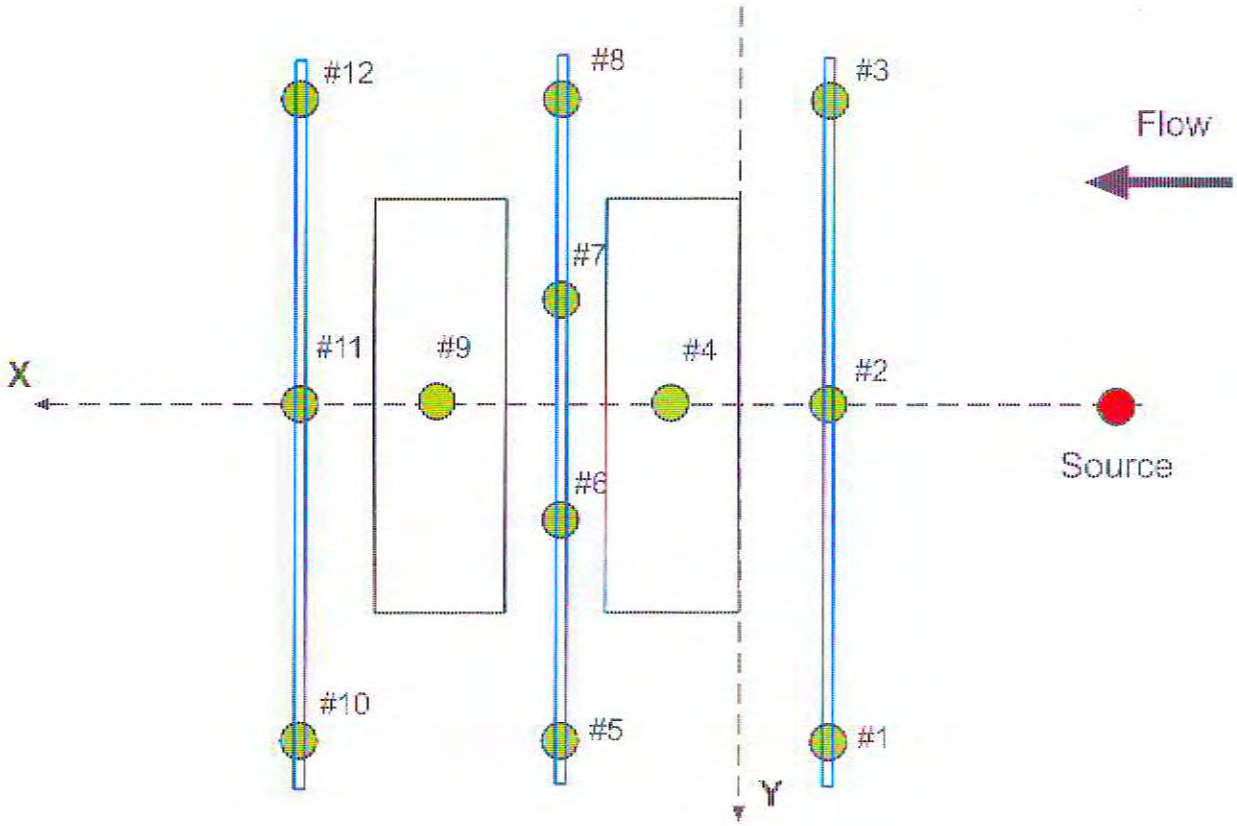
#1 - (13900,350)
#2 - (13900,200)
#3 - (13900,-200)
#4 - (13900,-350)
#4 - (13900,-350)
#5 - (14125, 200)
#6 - (14125, -200)

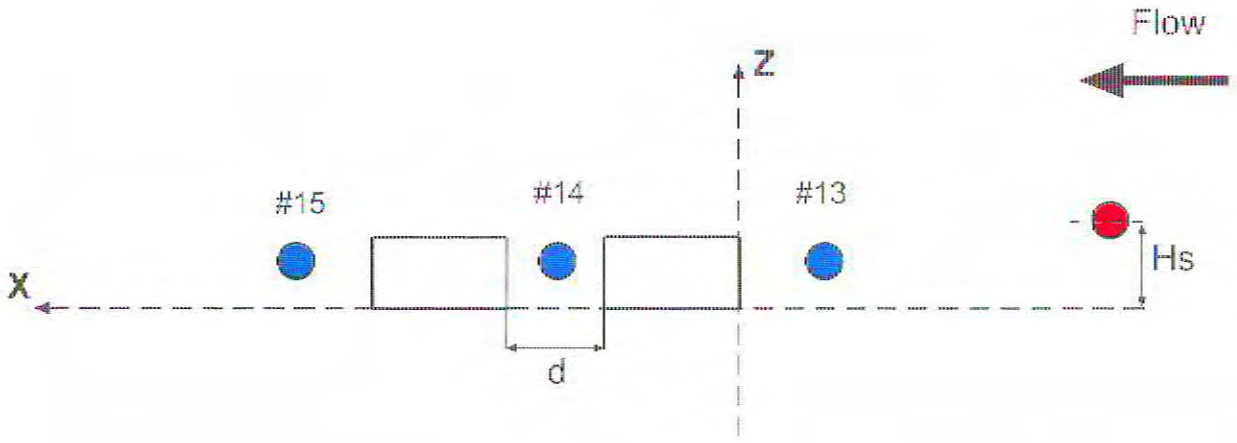
#7 - (14312,350)
#8 - (14312,200)
#9 - (14312,-200)
#10 - (14312,-350)
#11 - (1625,200)
#12 - (14625,-200)
#13 - (14725,350)

#14 - (14725,200)
#15 - (14725,-200)
#16 - (14725,-350)
#17 - (13900,...,100)
#18 - (14312,..,100)
#19 - (14725,..,100)

All.4

Wind Tunnel 150HS_250d





Vertical Profile

Lateral Profile

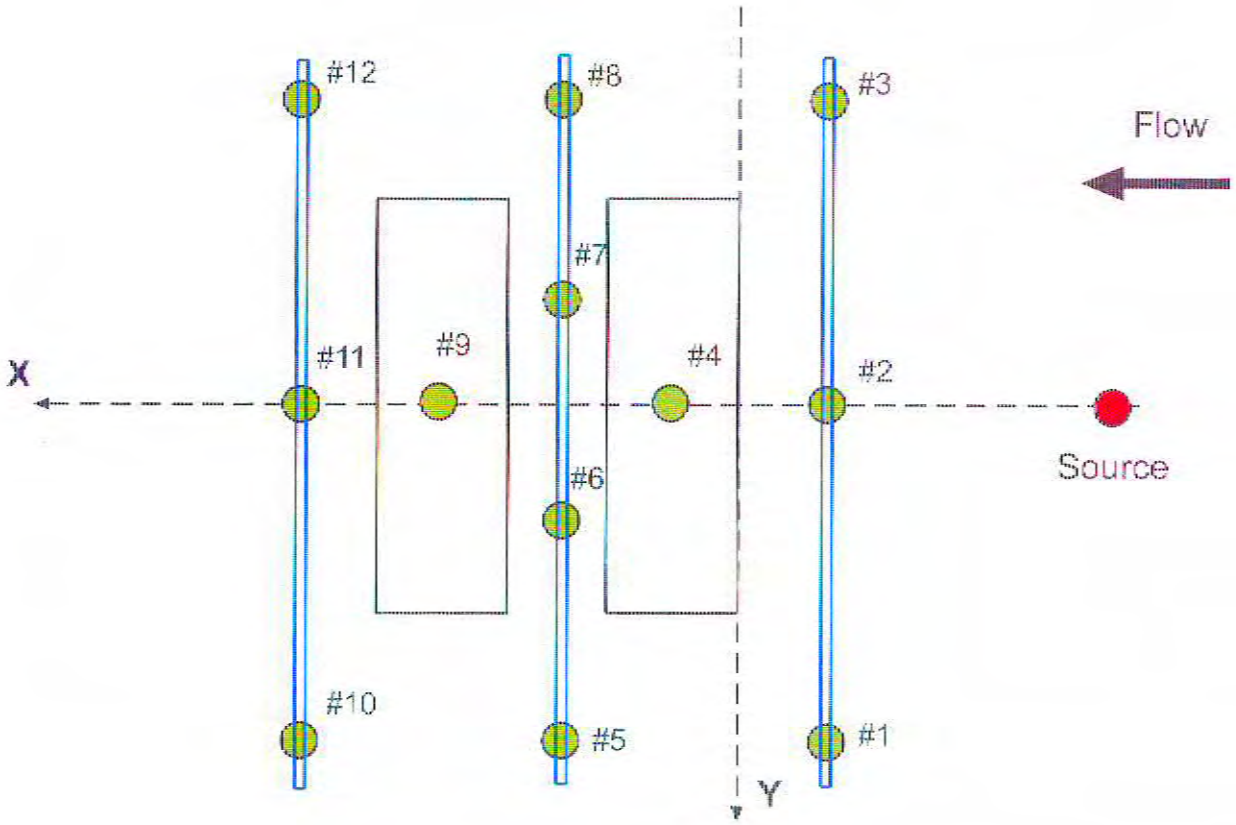
d width of street canyon

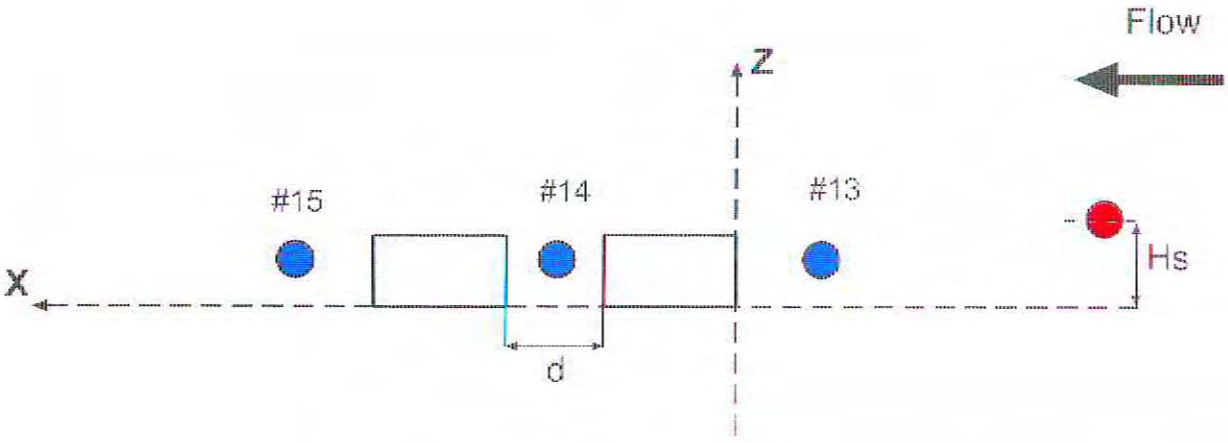
Hs Height of the source

#1 - (13900,350)
#2 - (13900,0)
#3 - (13900,-350)
#4 - (14125,0)
#5 - (14375,350)
#6 - (14375,200)
#7 - (14375,-200)
#8 - (14375,-350)
#9 - (14625,0)
#10 - (14850,350)
#11 - (14850,0)
#12 - (14850,-350)
#13 - (13900,...,100)
#14 - (14375,..,100)
#15 - (14850,..,100)

All.5

Wind Tunnel 300HS_125d





Vertical Profile

Lateral Profile

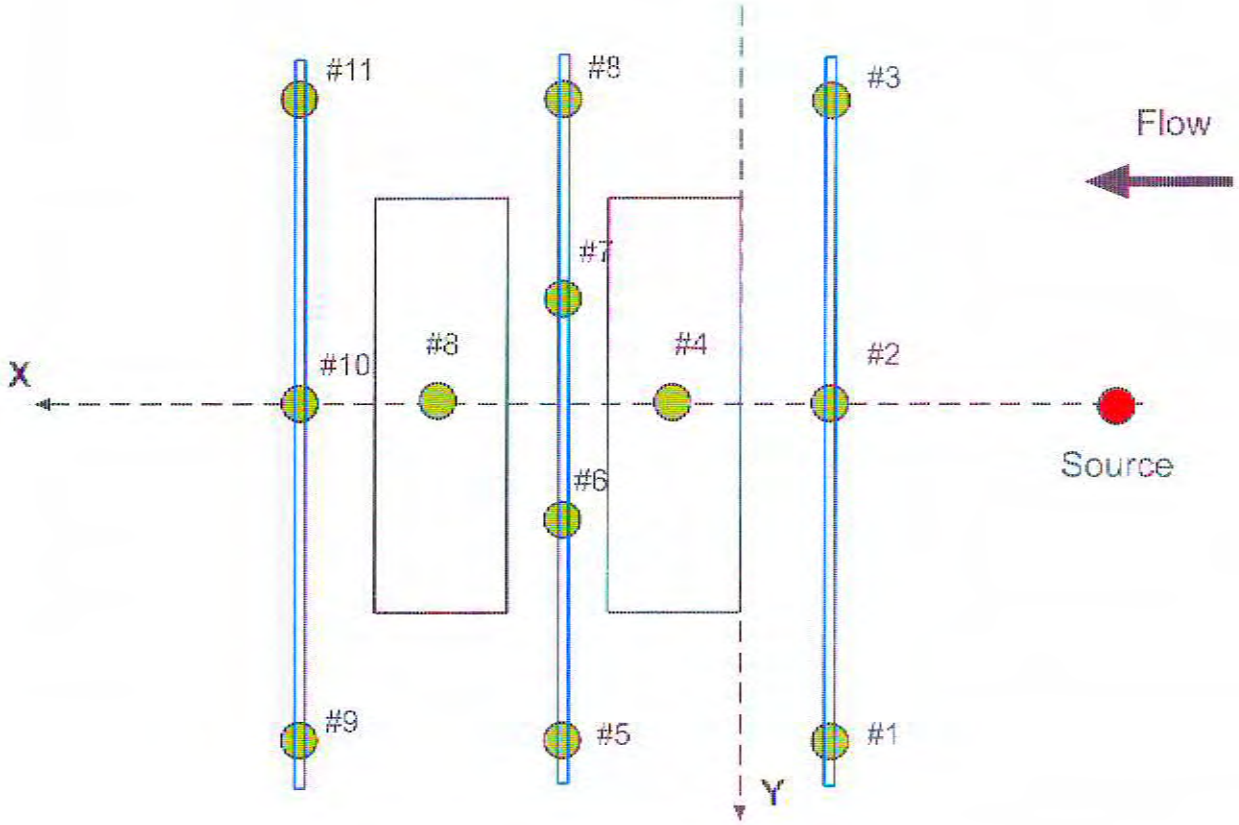
d width of street canyon

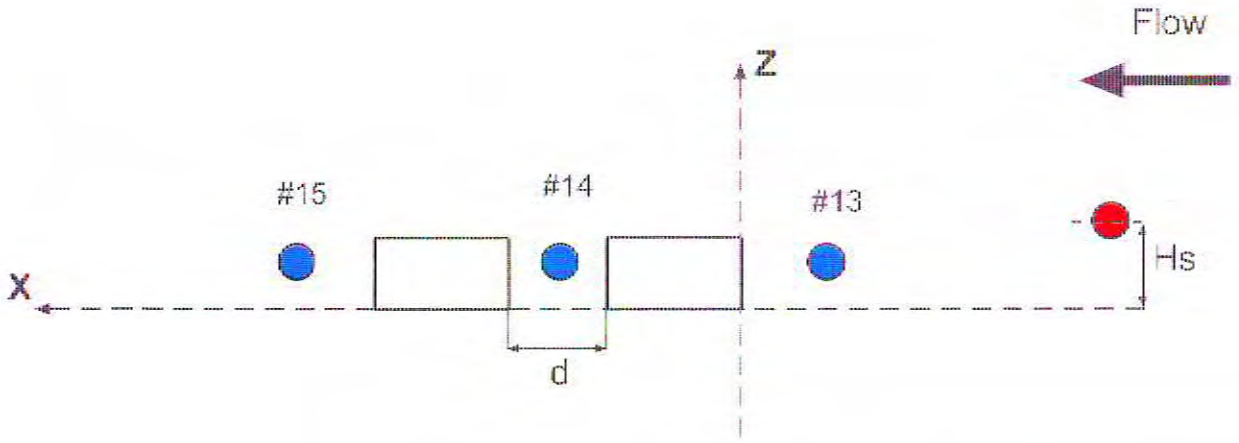
Hs Height of the source

#1 - (13900,350)
#2 - (13900,0)
#3 - (13900,-350)
#4 - (14125,0)
#5 - (14312,350)
#6 - (14312,200)
#7 - (14312,-200)
#8 - (14312,-350)
#9 - (14500,0)
#10 - (14725,350)
#11 - (14725,0)
#12 - (14725,-350)
#13 - (13900,...,100)
#14 - (14312,...,100)
#15 - (14725,...,100)

All.6

Wind Tunnel 300HS_250d





Vertical Profile

Lateral Profile

d width of street canyon

Hs Height of the source

#1 - (13900,350)
#2 - (13900,0)
#3 - (13900,-350)
#4 - (14125,0)
#5 - (14375,350)
#6 - (14375,200)
#7 - (14375,-200)
#8 - (14375,-350)

#9 - (14625,0)
#10 - (14850,350)
#11 - (14850,0)
#12 - (14850,-350)
#13 - (13900,..,100)
#14 - (14375,..,100)
#15 - (14850,..,100)