

VENTILAZIONE DI UN CANYON URBANO CON RISCALDAMENTO DELLE PARETI O CON PRESENZA DI VEGETAZIONE

Sofia Fellini¹, Annika Vittoria Del Ponte^{1,2}, Massimo Marro², Luca Ridolfi¹ & Pietro Salizzoni²

(1) Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente, il Territorio e le Infrastrutture, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italia.; (2) Université de Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, INSA, LMFA, UMR5509, 69130, Ecully, Francia.

ASPETTI CHIAVE:

- Le misurazioni sperimentali di concentrazione e di velocità permettono di comprendere la ventilazione di un canyon urbano indotta da un vento sovrastante i tetti e di valutare l'esposizione dei cittadini agli inquinanti.
- L'aumento della temperatura sulla parete di valle in un canyon stretto genera una seconda cella di circolazione d'aria che rallenta il trasporto degli inquinanti fuori dal canyon.
- Nei canyon urbani vegetati si osservano variazioni spaziali significative nella distribuzione degli inquinanti, con picchi di concentrazione alternati lungo il canyon.

1 INTRODUZIONE

Nonostante i recenti progressi nella legislazione ambientale, l'inquinamento dell'aria nelle città rimane il principale rischio ambientale per la salute (WHO, 2018). Questo rischio è particolarmente accentuato nei canyon urbani, soprattutto quando sono orientati perpendicolarmente alla direzione prevalente del vento (Salizzoni et al., 2011). In queste zone, gli inquinanti si accumulano a livello stradale, aumentando il pericolo per la salute dei residenti.

Per affrontare questi problemi e sviluppare strategie di pianificazione urbana efficaci, è essenziale comprendere i processi di trasporto di inquinanti tra i canyon urbani e l'atmosfera sovrastante, adottando approcci propri della meccanica dei fluidi. Nonostante la crescente disponibilità di studi numerici con simulazioni CFD (Computational Fluid Dynamics), la ricerca sperimentale su questo tema è ancora limitata, pur essendo fondamentale per comprendere i fenomeni e validare i modelli (Zhao et al. 2023).

Questo lavoro presenta i risultati più rilevanti emersi dalle recenti campagne sperimentali condotte nella galleria del vento del laboratorio LMFA dell'Ecole Centrale di Lione (Fellini et al. 2020, Fellini et al. 2022, Del Ponte et al. 2024).

Uno dei principali aspetti affrontati riguarda il ruolo della stratificazione termica sulla ventilazione del canyon (Carpentieri et al. 2019). I flussi termici generano condizioni di galleggiamento che hanno un'influenza rilevante, soprattutto in condizioni di vento debole. Questi effetti sono principalmente dovuti alla radiazione solare che induce differenze di temperatura tra le pareti del canyon. Una comprensione approfondita dell'interazione tra flussi di calore e ricircolazione del vento nelle strade è essenziale non solo per prevedere i livelli di inquinamento, ma anche per adottare tecniche di ventilazione naturale degli edifici, migliorare le loro prestazioni energetiche e mitigare l'isola di calore urbana. A tale scopo, qui valutiamo sperimentalmente come gli effetti combinati della geometria del canyon urbano e del riscaldamento differenziale delle facciate degli edifici influenzino la dispersione degli inquinanti all'interno del canyon.

Il secondo aspetto cruciale riguardo alla ventilazione di un canyon urbano è l'effetto degli alberi. La transizione verso città più verdi rappresenta una soluzione chiave per migliorare il microclima urbano e mitigare l'impatto dei cambiamenti climatici. Tuttavia, le conseguenze della presenza di alberi sulla dispersione degli inquinanti nelle strade è ancora un argomento dibattuto (Gromke et al. 2009) poiché gli alberi, agendo come ostacoli, possono inibire la circolazione d'aria, riducendo così la ventilazione del canyon e portando a concentrazioni più elevate di inquinanti a livello pedonale (Carlo et al. 2024). A questo scopo, modelliamo in galleria del vento un viale alberato e investighiamo l'effetto degli alberi sul campo di moto turbolento nel canyon e sulla concentrazione di inquinanti.

Questo studio si propone di comprendere i processi fluidodinamici alla base della ventilazione delle strade, al fine di sviluppare una parametrizzazione della velocità di scambio di inquinanti tra strada e atmosfera sovrastante da implementare in modelli a scala di città e di creare un insieme di dati misurati utili per la validazione di simulazioni numeriche CFD.

2 METODI

Gli esperimenti sono stati condotti in due diverse gallerie del vento ricircolanti presenti presso l'Ecole Centrale di Lione. Nella prima galleria, la sezione di prova, lunga 8 m, alta 1 m e larga 0,7 m, ospitava una serie di barre disposte perpendicolarmente rispetto alla direzione del vento e rappresentanti edifici urbani (Figura 1.a). Il canyon nel quale sono state effettuate le misure era caratterizzato da un rapporto di aspetto (rapporto tra profondità e larghezza della cavità, H/W) variabile e pareti laterali con resistenze termiche (Figura 1.b) in grado di generare, in prossimità della parete scaldata, un aumento di temperatura ΔT rispetto alla temperatura esterna T_0 . Nella seconda galleria, con una sezione di prova più ampia (lunga 12 m, alta 2 m e larga 3,5 m), è stata realizzata una geometria urbana regolare in scala 1:200 (Figura 1.d). Anche in questo caso, il canyon era orientato perpendicolarmente rispetto al vento e con un rapporto $H/W=0.5$. Qui sono stati disposti due filari laterali di modellini di alberi in plastica per simulare la vegetazione stradale (Figura 1.e). Questi modelli sono stati precedentemente caratterizzati dal punto di vista aerodinamico per garantire la loro similitudine con alberi reali. A questo scopo, sono stati misurati il loro coefficiente di drag e la loro porosità aerodinamica. In entrambi gli esperimenti le emissioni da traffico veicolare sono state simulate con una sorgente lineare di gas etano a livello stradale. Il campo di moto incidente è stato controllato e misurato al fine di rappresentare uno strato limite atmosferico urbano. Per la misurazione del campo di concentrazione nel canyon, è stato utilizzato un Flame Ionization Detector (FID), mentre per il campo di velocità sono state utilizzate due tecniche diverse: Particle Image Velocimetry nel primo studio e Laser Doppler Anemometer (LDA) nel secondo, quest'ultimo strumento accoppiato con il FID per misure sincrone di concentrazione e velocità. Il primo esperimento è caratterizzato da numero di Reynolds ($Re_H = U_H H / \nu$, con U_H velocità all'altezza H degli ostacoli) tra 5700 e 7200 e numero di Richardson ($gH\Delta T / (T_0 u_x^2)$) tra 3 e 10. Il secondo esperimento è caratterizzato da $Re_H = 12500$.

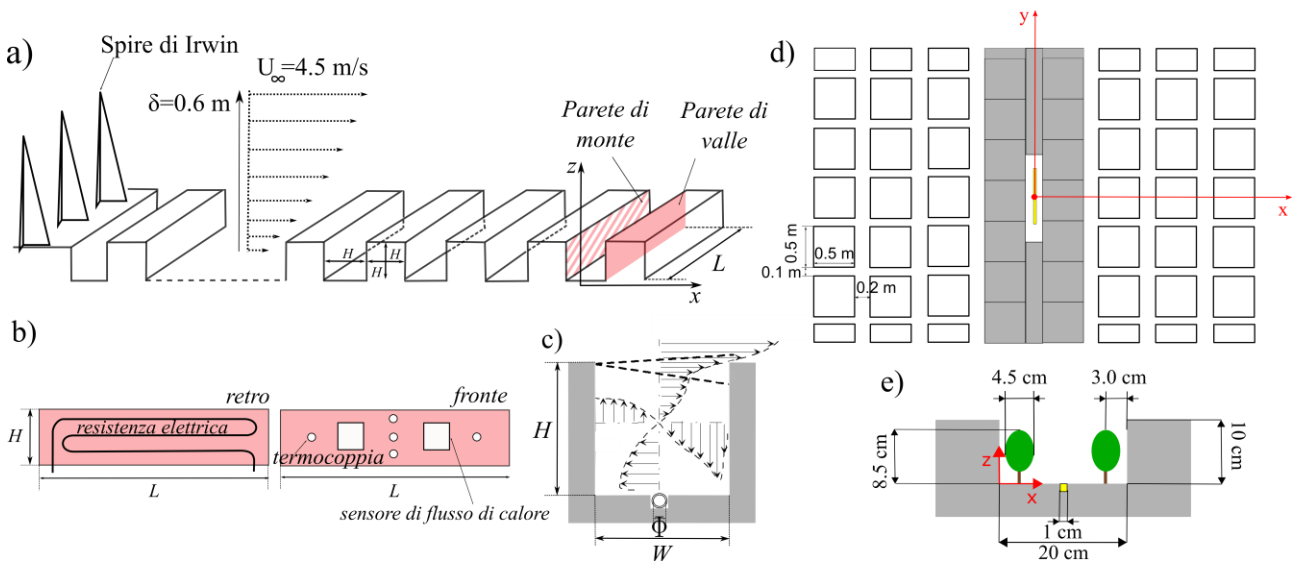


Figura 1: a) Apparato sperimentale per lo studio della ventilazione di un canyon urbano con riscaldamento delle pareti. b) Resistenze elettriche e sensori di misura della temperatura e dei flussi di calore sulle pareti laterali. c) Rappresentazione schematica del campo di moto nel canyon a sezione quadrata. d) Apparato sperimentale con geometria urbana per lo studio dell'effetto degli alberi sulla ventilazione di un canyon urbano. e) Rappresentazione schematica del canyon alberato.

3 RISULTATI

3.1 Effetto combinato della geometria e del riscaldamento delle pareti del canyon urbano

L'analisi del campo di velocità e concentrazione di scalare passivo all'interno del canyon ha evidenziato la complessità dell'interazione tra la geometria del canyon e il riscaldamento alternato delle pareti. Il riscaldamento della parete a monte del canyon ha esiti trascurabili sulla velocità media e sulle fluttuazioni

turbolente. Al contrario, il riscaldamento della parete a valle produce effetti contrastanti a seconda della configurazione geometrica del canyon. Nella cavità quadrata, i flussi termici non influenzano il campo di moto medio (Figura 2.a), ma hanno un impatto significativo sull'intensità dell'energia cinetica turbolenta (TKE), che registra un aumento in tutta la cavità (Figura 2.b-c). Tale incremento della TKE sembra correlato all'accelerazione del processo di ventilazione del canyon, con conseguente diminuzione della concentrazione di inquinanti. Con l'aumentare del rapporto tra altezza e larghezza della cavità (H/W), il riscaldamento della parete a valle mostra effetti crescenti sul campo medio di velocità (Figura 2.d-e) fino a favorire la formazione di una seconda cella nella parte inferiore del canyon (Figura 2.f), cella che ha l'effetto di rallentare il processo di ventilazione. Di conseguenza, gli inquinanti si accumulano a livello stradale, provocando un peggioramento della qualità dell'aria.

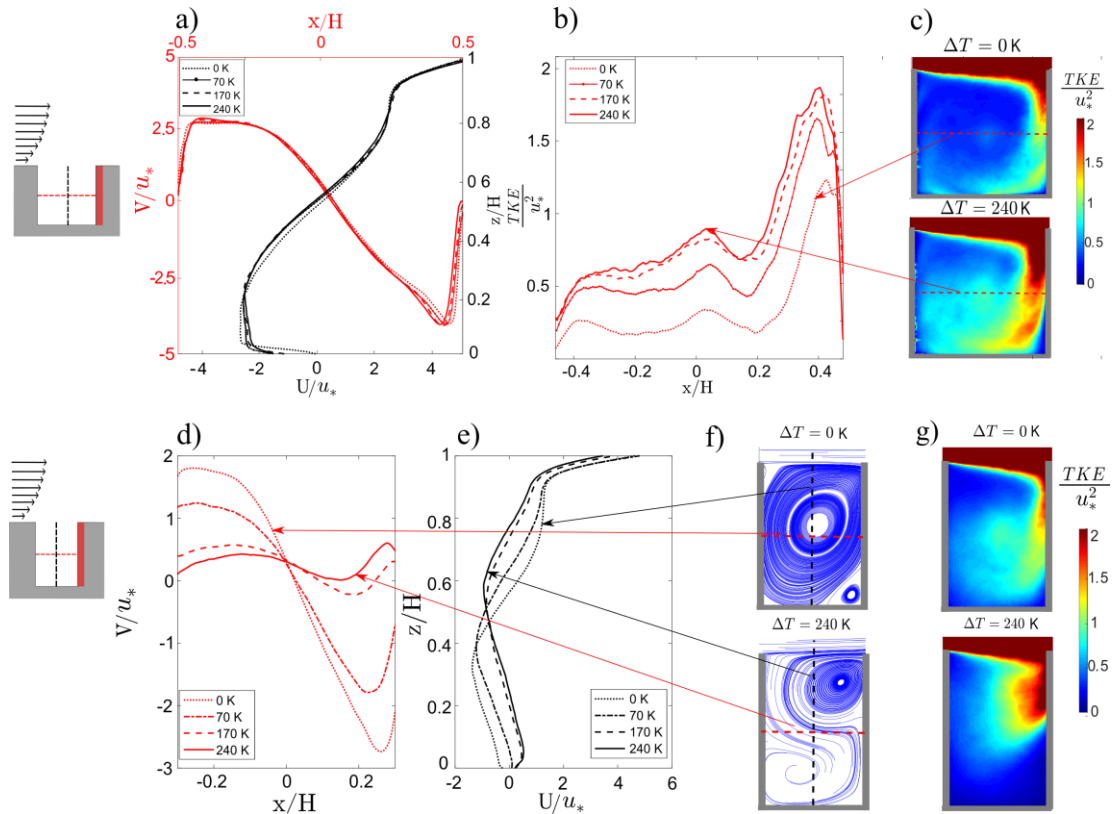


Figura 2: (a) Profili di velocità media e (b) di energia cinetica turbolenta (TKE) in un canyon urbano quadrato ($H/W=1$) con parete di valle scaldata. (c) Campo di TKE nell'intera sezione nel caso isoterma e in quello scaldato. (d-e) Profili di velocità media, (f) linee di flusso e (g) campo di TKE in un canyon urbano stretto ($H/W=1.5$) con riscaldamento della parete di valle.

3.2 Effetto della vegetazione

Le misurazioni di concentrazione e velocità all'interno di un canyon largo ($H/W=0.5$) con due filari di alberi laterali hanno permesso di approfondire le dinamiche di ventilazione di un tipico viale alberato. I risultati evidenziano che nelle strade con vegetazione la distribuzione spaziale del campo di concentrazione è nettamente tridimensionale (Figura 3.a1-a3). In particolare, si osservano picchi di concentrazione alternati a regioni poco inquinate, soprattutto nella porzione inferiore del canyon, suggerendo una variazione spaziale significativa nell'esposizione dei pedoni. Nonostante l'importante influenza degli alberi sulla distribuzione spaziale degli inquinanti, la concentrazione media nell'intero volume del canyon non mostra una correlazione con la densità degli alberi. L'analisi del campo di moto e dei flussi di massa indica che lo scambio verticale al tetto è influenzato sia dal moto medio sia dalle fluttuazioni turbolente ma la sua intensità globale non cambia con la densità di alberi. Si osserva invece una diminuzione indotta dalla vegetazione sui flussi di massa turbolenti all'interno del canyon (Figura 3.b1-b3) che motiva l'eterogeneità osservata per la concentrazione di scalare. Inoltre, l'analisi spettrale della velocità verticale e dei flussi di massa turbolenti ha rivelato che il contenuto energetico delle strutture di larga scala diminuisce con l'aumento della densità degli alberi.

4 DISCUSSIONE

La ricerca ha preso in esame la complessa dinamica del campo di moto e della dispersione all'interno di un canyon urbano, considerando gli effetti della vegetazione e del riscaldamento delle pareti. Questo tipo di studi è cruciale per la progettazione di città più vivibili e sostenibili, dove l'integrazione del verde e l'ottimizzazione dell'architettura urbana possono mitigare l'intensità delle isole di calore. Le misurazioni hanno permesso (i) di descrivere in dettaglio la distribuzione spaziale degli inquinanti, migliorando la nostra comprensione dell'esposizione al rischio dei cittadini, e (ii) di valutare la velocità di ventilazione del canyon, informazione essenziale per modellare la qualità dell'aria a scala di città. Questi risultati evidenziano il ruolo cruciale della meccanica dei fluidi nello sviluppo di soluzioni realmente efficaci alle sfide poste dagli ambienti urbani; ambienti nei quali convivono e interagiscono in modo complesso diversi processi fisici a molte scale spaziali.

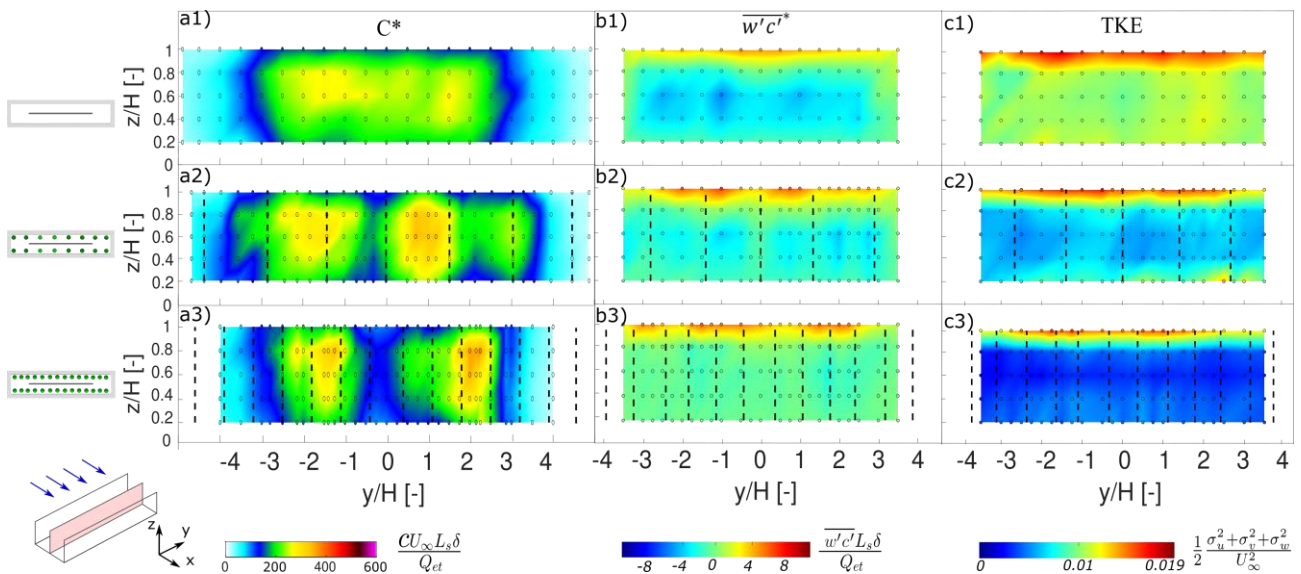


Figura 3: Campi di concentrazione e di velocità nella sezione centrale del canyon per crescente numero di alberi nelle file laterali. (a1-a3) Campo di concentrazione media. (b1-b3) Flussi di massa turbolenti verticali. (c1-c3) Campo di energia cinetica turbolenta.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- WHO (2018). Ambient (outdoor) air quality and health. Disponibile in: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- Salizzoni, P., Marro, M., Soulhac, L., Grosjean, N., & Perkins, R. J. Turbulent transfer between street canyons and the overlying atmospheric boundary layer, 2011, *Boundary-layer meteorology*, 141(3), 393-414.
- Zhao, Y., Chew, L. W., Fan, Y., Gromke, C., Hang, J., Yu, Y., ... & Carmeliet, J. Fluid tunnel research for challenges of urban climate. *Urban Climate*, 2023, 51, 101659.
- Fellini, S., Ridolfi, L. & Salizzoni, P. Street canyon ventilation: combined effect of cross-section geometry and wall heating, *Q J R Meteorol Soc*, 2020, 146(730):2347-2367.
- Fellini, S., Marro, M., Del Ponte, A.V., Barulli, M., Soulhac, L., Ridolfi, L. & Salizzoni, P. High resolution wind-tunnel investigation about the effect of street trees on pollutant concentration and street canyon ventilation, 2022, *Building and Environment*, 226(109):763.
- Del Ponte, A.V., Fellini, S., Marro, M., van Reeuwijk, M., Ridolfi, L. & Salizzoni, P. Influence of Street Trees on Turbulent Fluctuations and Transport Processes in an Urban Canyon: A Wind Tunnel Study, 2024, *Boundary-Layer Meteorology*, 190:6.
- Marucci, D. and Carpentieri, M. Effect of local and upwind stratification on flow and dispersion inside and above a bi-dimensional street canyon. *Building and Environment*, 2019, 156, 74-88.
- Gromke, C. & Ruck, B. On the Impact of Trees on Dispersion Processes of Traffic Emissions in Street Canyons, *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, 131(1):19-34.
- Carlo, O. S., Fellini, S., Palusci, O., Marro, M., Salizzoni, P., & Buccolieri, R. Influence of obstacles on urban canyon ventilation and air pollutant concentration: An experimental assessment, 2024, *Building and Environment*, 250, 111143.