

MODELLAZIONE SU SCALA DI LABORATORIO DEI CAMPI DI VELOCITÀ E CONCENTRAZIONE IN UN AMBIENTE REALE A GEOMETRIA COMPLESSA

Agnese Pini¹, Giovanni Leuzzi¹, Armando Pelliccioni², Giorgio Querzoli³ & Paolo Monti¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, Università di Roma “La Sapienza”

(2) INAIL (Monteporzio Catone, Roma)

(3) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura, Università di Cagliari

ASPETTI CHIAVE

- *Apparato sperimentale idraulico con riproduzione in scala 1:20 di un'aula universitaria con struttura ad anfiteatro.*
- *Analisi del campo di velocità in condizioni neutre e di ventilazione naturale tramite tecniche di analisi di immagine.*
- *Modellazione della diffusione nell'ambiente confinato di inquinanti di provenienza outdoor ed indagine delle disomogeneità spaziali del campo di concentrazione indoor.*

1 INTRODUZIONE

Lo studio della qualità dell'aria indoor acquisisce crescente importanza e interesse a causa della quantità di tempo che trascorriamo in ambiente chiusi quali case, uffici, scuole, etc. In tali ambienti, infatti, le persone possono essere esposte a diverse tipologie di sostanze presenti nell'aria, con livelli di concentrazione molto variabili e conseguenti potenziali effetti nocivi sulla salute. Studi recenti sono stati condotti per valutare i livelli di concentrazione in diverse tipologie di ambienti (*Pelliccioni et al., 2020; Di Menno Di Bucchianico, 2021*), considerando sia la presenza di sostanze già individuate come inquinanti che quelle comunque legate al benessere indoor (*D'Amico et al., 2021*) e prendendo in considerazione i livelli raggiunti in ambienti contigui e simultanei. Nonostante il crescente interesse scientifico l'indagine delle concentrazioni di inquinanti che si rilevano negli ambienti confinanti rimane ad oggi problema aperto a causa delle numerose forzanti e dei complessi meccanismi che li determinano. La diffusione delle sostanze in questi ambienti è infatti strettamente legata alla circolazione dell'aria che si instaura in essi. Questa è di tipo complesso, influenzata da molteplici fattori: il campo fluidodinamico esterno, le modalità di scambio indoor-outdoor, le condizioni di temperatura e, non ultima, la geometria dello stesso ambiente indoor. Un ulteriore aspetto determinante è rappresentato dalla natura e posizione delle sorgenti di sostanze. Queste possono infatti trovarsi direttamente nell'ambiente indoor o, diversamente, in quello esterno ed essere caratterizzate da emissioni continue o transitorie. Vista la complessità nell'indagare il problema reale sul campo a causa dell'interazione e concomitanza di tali fattori, la modellazione diviene strumento fondamentale di indagine. Questa ha infatti il vantaggio di poter riprodurre casistiche semplificate attraverso le quali studiare influenza e peso dei suddetti fattori. La modellazione può essere affrontata, analogamente per quanto concerne il campo fluidodinamico e quello di dispersione, sia dal punto di vista numerico (*Shree et al., 2019*), tramite modelli CFD, che da quello sperimentale, in scala di laboratorio. In quest'ultimo caso risultano utili le tecniche di analisi di immagine in grado di ricostruire campi di velocità e di concentrazione (*Di Bernardino et al., 2018*).

Nel presente lavoro sono mostrati i risultati degli esperimenti condotti su un modello in scala ridotta di un'aula universitaria con lo scopo di indagare la circolazione dell'aria in condizioni di ventilazione naturale e la diffusione in tale ambiente confinato di un inquinante di provenienza esterna. Il modello sperimentale utilizzato riproduce un ambiente reale dell'Università di Roma “La Sapienza”, l'aula V. Giacomini (piano terra dell'edificio di Botanica e Genetica del Dipartimento di Biologia Ambientale, all'interno della città universitaria), che è sa sua volta stato oggetto delle campagne di misura condotte nell'ambito del Progetto VIEPI (Integrated Evaluation of Indoor Particulate Exposure) tra i cui obiettivi principali figura la valutazione della qualità dell'aria indoor (*Pelliccioni et al., 2020*). Negli esperimenti realizzati si è condotta un'analisi del campo di velocità utilizzando la tecnica del *Feature Tracking* mentre i campi di concentrazione sono stati indagati tramite la tecnica *PLIF, Planar Laser-Induced Fluorescence*.

2 SETUP SPERIMENTALE

Lo studio è stato condotto utilizzando un apparato sperimentale (Fig.1) realizzato nel Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale della Sapienza. L'apparato è costituito da una riproduzione in scala 1:20 (pannello b) dell'aula inserita in un circuito idraulico (pannello d) atto a garantire circolazione e regolazione dell'acqua, individuata quale fluido di lavoro. La pavimentazione e gli arredi fissi (banchi e cattedra) presenti nell'aula sono stati riprodotti tramite stampa 3D. Diversamente, le pareti laterali e il soffitto sono stati realizzati con lastre di plexiglass trasparente di spessore pari a 1 cm per consentire l'accesso ottico dall'esterno. Sulla parete adiacente la cattedra sono state riprodotte le due porte, in comunicazione con l'esterno nell'ambiente reale. Attraverso tali aperture, nelle simulazioni condotte, sono garantiti i flussi in ingresso e uscita dall'aula rappresentativi delle condizioni di ventilazione naturale. Alle aperture delle due porte, entrambe di dimensioni pari a $8 \times 5 \text{ cm}^2$, sono connessi dei canali in plexiglass di medesima sezione trasversale e lunghezza, pari a 100 cm, utili a garantire stabilità e uniformità dei flussi in ingresso e uscita (pannello c). Il modello dell'aula ha dimensioni $65 \times 56.5 \times 27.5 \text{ cm}^3$. L'apparato idraulico, realizzato ad hoc e in grado di lavorare sia in circuito aperto che chiuso, è costituito da una pompa, condutture e serbatoi di carico e scarico. È inoltre presente un sistema di regolazione a rubinetti per consentire la variazione della portata d'acqua in ingresso e un flussimetro a monte del canale di ingresso per misurare tale grandezza. Il setup sperimentale è completato da quanto necessario al sistema di acquisizione delle immagini per utilizzare le tecniche di Feature Tracking e PLIF. In particolare, i) una sorgente lineare (circa 45 cm) di luce bianca, ii) una fotocamera in grado di acquisire immagini ad alta risoluzione spaziale e frequenza, iii) un dispositivo di registrazione delle immagini (pannello e). Infine, il sistema di acquisizione è completato dal software dedicato alla ricostruzione delle traiettorie delle particelle, i.e., impurità presenti nell'acqua trasportate passivamente dal fluido, dal punto di vista lagrangiano. Da queste sono poi ricavate le componenti di velocità, istantanee o mediate nel tempo, su griglie regolari, ovvero dal punto di vista euleriano. Tutte le prove condotte sono state realizzate in condizioni stazionarie del flusso in ingresso, con portata costante pari a 3300 l/h, e, allo scopo di rappresentare condizioni isoterme dell'ambiente confinato, mantenendo la temperatura dell'acqua in ingresso costante e coincidente con quella presente all'interno dell'aula. Le prove effettuate per indagare il campo di moto sono state condotte considerando dieci diversi piani, orizzontali e verticali, con l'intento di ottenere una rappresentazione quanto più tridimensionale del campo di velocità. Le prove sono state realizzate con frequenza di acquisizione delle immagini pari a 250 frame per secondo, fps, e durata pari a 120 s per ciascun piano di indagine. Per indagare la diffusione all'interno dell'aula è stata simulata la presenza di una sorgente esterna, trasportata dal flusso in ingresso, utilizzando un tracciante passivo, la fluoresceina, rilevabile nelle immagini riprese. Le prove sono state condotte realizzando un'immissione continua di fluoresceina a concentrazione nota, a monte del canale rettangolare connesso ad una delle porte, ed acquisendo immagini, con frequenza pari a 250 fps, sul piano verticale passante per la mezzeria della porta dove si verifica l'ingresso del fluido. In questo caso si sono realizzate acquisizioni utili a indagare la fase di riempimento e di svuotamento rispettivamente con durata pari a 100 e 180 s.

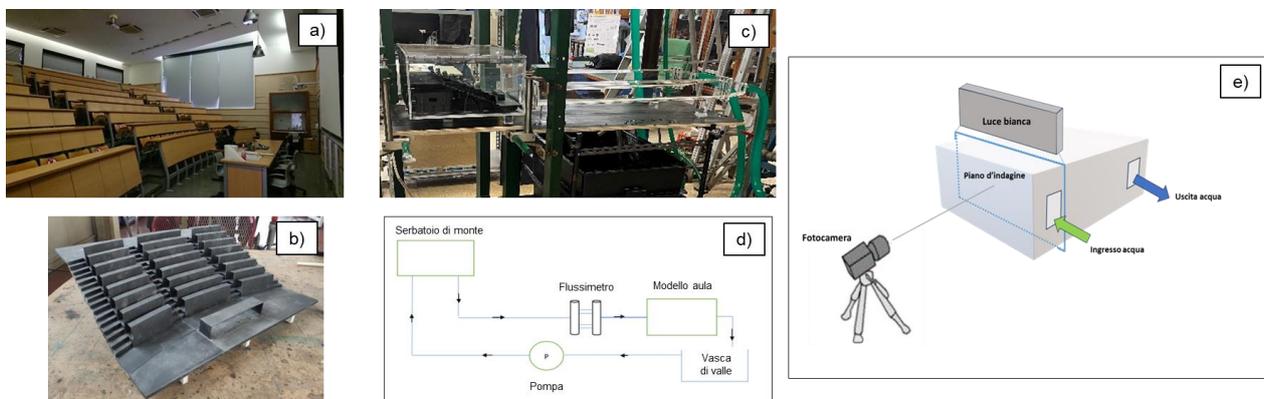


Figura 1. Immagini fotografiche dell'aula, del modello 1:20 e dell'apparato sperimentale rispettivamente nei pannelli (a), (b) e (c). Nei pannelli (d) ed (e) rappresentazione schematica semplificata dell'apparato sperimentale e del sistema di acquisizione delle immagini.

3 RISULTATI

A partire dalle immagini acquisite sui dieci piani considerati (Fig. 2, pannello inferiore) sono state ricavate diverse grandezze utili a caratterizzare il campo di moto in esame, tra cui campi medi di velocità, varianza ed energia cinetica turbolenta. In Figura 2 sono mostrate le linee di corrente relative al campo medio ricavato, per alcuni dei piani considerati. Osservando il piano A, passante per la mezzeria della porta da cui viene immesso il fluido, è evidente la presenza della corrente in ingresso all'aula, caratterizzata da una velocità media pari a circa 20 cm/s. Questa si mantiene orizzontale a valle della porta per poi deviare e disporsi parallela alla struttura dei banchi confermando quindi l'influenza del fattore geometrico dell'ambiente; lungo tale percorso l'intensità della corrente diminuisce. Sul medesimo piano, in prossimità del ballatoio superiore, il modulo della velocità risulta un ordine di grandezza inferiore rispetto al valore iniziale e si osserva la formazione di due zone di ricircolo, una in prossimità del soffitto e una del pavimento. Quest'ultima in particolare tende a propagarsi longitudinalmente lungo il ballatoio, ingrandendosi e stabilizzandosi, come è possibile rilevare sul piano C, passante per il centro dell'aula. Su questo piano è evidente anche la formazione di una grande struttura, ascendente lungo l'asse dei banchi e discendente verso della cattedra. Osservando il piano E, verticale per la mezzeria della porta di uscita, si nota una corrente discendente parallela ai banchi e sono invece assenti ricircoli nella zona del ballatoio. È da notare che la corrente risulta particolarmente lenta, circa 1.5 cm/s, su tutto il piano ed accelera solo in stretta prossimità dell'uscita. La struttura fortemente tridimensionale del campo di velocità, con strutture apparentemente stabili e disconnesse tra loro, sembra trovare ulteriore conferma osservando le linee di corrente sul piano orizzontale OR1, individuato a circa 4.5 cm dal soffitto nella scala del modello. In questo caso si osserva una zona di ricircolo ad asse verticale che, benché leggermente spostata verso la zona di ingresso del flusso, interessa tutta l'estensione dell'aula.

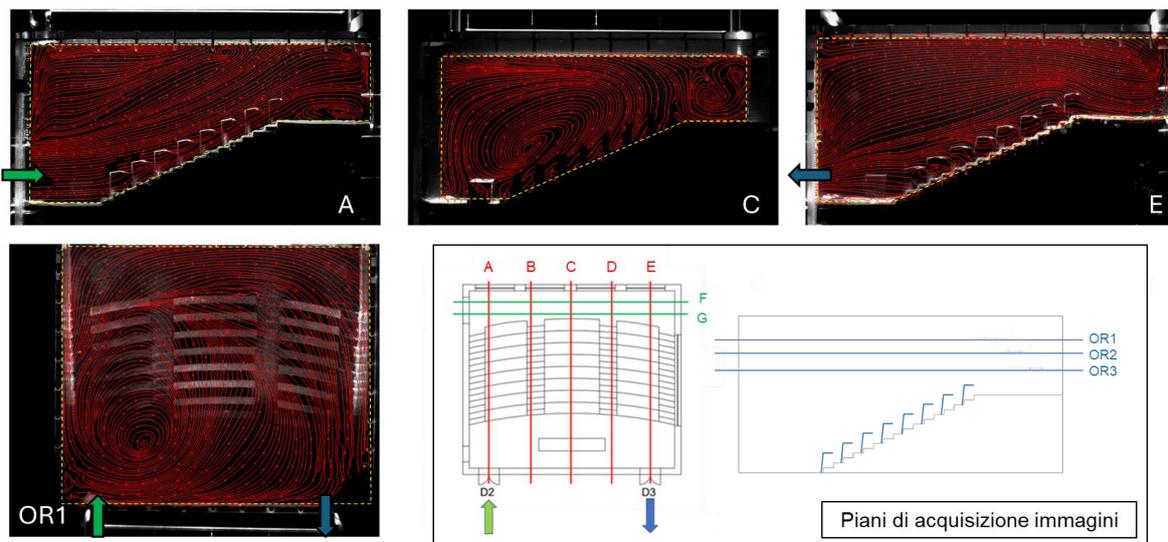


Figura 2. Linee di corrente relative al campo medio di velocità sui piani di acquisizione verticali (A, C ed E) e orizzontale (OR1). Nel pannello inferiore destro, schema di tutti i piani di acquisizione delle immagini realizzati.

In Figura 3 sono mostrati alcuni dei risultati ottenuti dalle prove atte a stimare i campi di concentrazione. Nel pannello (a) sono mostrate le immagini riprese durante l'immissione del tracciante e il successivo svuotamento tramite immissione di acqua pulita. La stima della concentrazione è stata effettuata a partire dal livello di luminosità rilevato nelle immagini, risultando questo linearmente proporzionale alla concentrazione. Gli andamenti temporali della concentrazione sono stati ricavati per diversi punti giacenti sul piano A, definiti recettori, relativamente alle due fasi di riempimento e svuotamento (rispettivamente pannello (c) e (d)). I valori di concentrazione sono stati normalizzati con il valore massimo osservato e mostrati in funzione del tempo, normalizzato col valore scala $T_S=L_S/U_S=140$ s, dove L_S e U_S corrispondono rispettivamente alla scala spaziale, assunta pari alla diagonale dell'aula in pianta, ed alla scala della velocità, scelta pari alla velocità media nella zona di ricircolo presente nella regione superiore dell'aula. In entrambe le fasi le curve mostrano analoghi andamenti di crescita e decadimento coerenti con il fenomeno in corso. Per i diversi punti si osservano però, nella fase di riempimento, tempi di risposta rispetto all'inizio dell'emissione e rapidità di crescita della curva differenti. I recettori in prossimità della porta sono i primi a registrare l'arrivo dell'inquinante e raggiungono

in brevissimo tempo il valore asintotico. Diversamente i recettori posti nella zona alta del piano (#5, #9, #10 e #11) sono raggiunti dall'inquinante per ultimi, circa 15 s dopo, con una rapidità di crescita della concentrazione decisamente più lenta. Osservazioni speculari possono essere tratte dagli andamenti durante la fase di svuotamento. Durante questa fase l'andamento di recettori posti alla stessa quota rispetto il piano cattedra (#2, #4, #6 e #10) decadono in maniera diversa. I due posti sul ballatoio (#2 e #4) decrescono con legge esponenziale dopo un'iniziale brusca diminuzione; diversamente, quelli (#6 e #10) posti nella zona alta dell'aula, dove si è osservata la struttura ad asse verticale (cfr. piano OR1, Fig. 2), mostrano un decremento lineare direttamente a partire dal valore asintotico iniziale.

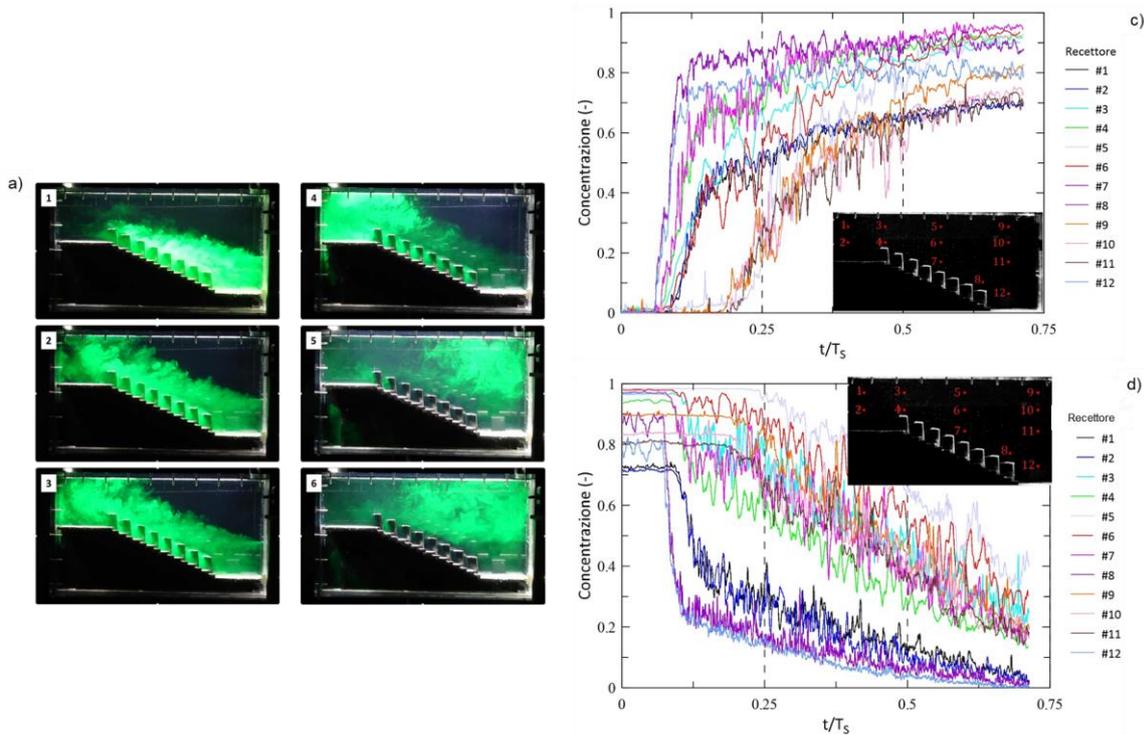


Figura 3. Immagini acquisite durante la sequenza di riempimento (1-3) e svuotamento (4-6), pannello (a). Nei pannelli (c) e (d) storie temporali delle concentrazioni normalizzate, rispettivamente per la fase di riempimento e svuotamento, misurate nei 12 recettori.

4 CONCLUSIONI

Le analisi relative al campo di moto hanno evidenziato una circolazione complessa, fortemente influenzata dalla struttura geometrica dell'aula, con diverse strutture vorticosi stabili presenti sui diversi piani e apparentemente disconnesse. Tali osservazioni, unitamente a quelle relative agli andamenti della concentrazione, suggeriscono la necessità di approfondire l'indagine della diffusione in ambienti reali e complessi. Tali strutture possono infatti contribuire a creare e mantenere zone di accumulo delle sostanze con conseguente innalzamento dei livelli di concentrazione ed esposizione. Tali criticità potrebbero inoltre risultare ulteriormente aggravate nel caso, oltremodo plausibile nel caso reale, di stratificazione termica presente nell'aula. Tale casistica sarà infatti certamente oggetto di ulteriori e future prove con il modello utilizzato.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Pelliccioni, A., et al. Integrated Evaluation of Indoor Particulate Exposure: The VIEPI Project, *Sustainability*, 2020, 12, 9758.
- Di Menno Di Bucchianico, A., Cusano, M., Gaddi, R., Gaeta, A., Leone, G., Bocconi, F., Ferrante, R., Pelliccioni, A. & Cattani, G. Indoor and Outdoor Particle Number Concentration in the Sapienza University Campus of Rome, *Sustainability*, 2021, 13, 9126.
- D'Amico, A., Pini, A., Zazzini, S., D'Alessandro, D., Leuzzi, G. & Currà, E. Modelling VOC emissions from building materials for healthy building design, *Sustainability*, 2021, 13, 1-26
- Shree, V., Marwaha, B.M. & Awasthi, P. Assessment of indoor air quality in buildings using CFD: A brief review. *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.* 2019, 4, 1154–1168.
- Di Bernardino, A., Monti, P., Leuzzi, G. & Querzoli, G. Pollutant fluxes in two-dimensional street canyons, *Urban Climate*, 2018, 24, 80-93.