



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Efficacia della ventilazione degli ambienti confinati per la mitigazione del rischio di diffusione di patogeni aerotrasmessi

Scuola di Dottorato in Fisica Tecnica
Dottorato di Ricerca in Ingegneria – XXXVI Ciclo

Mario SCIPIONE
Matricola 795086

Relatore
Prof. Emanuele Habib

A.A. 2024/2025

Abstract

The CoViD-19 pandemic has highlighted the importance of air conditioning systems in the airborne transmission of pathogens. In response to the emergency, numerous organizations (including WHO, ISS, ASHRAE, REHVA) have issued guidelines for the management of these systems. However, these recommendations have often been formulated on precautionary principles, not always supported by solid scientific evidence, leading to sometimes conflicting recommendations, especially regarding outdoor air supply, recirculation, and filter management.

This thesis collects and analyzes the available scientific evidence on the interactions between ventilation systems and airborne pathogens. The aim is to provide a basis for planning structural interventions and developing more efficient management strategies, improving the readiness to respond to future epidemics.

The analysis delves into transmission mechanisms, distinguishing between droplets and airborne (aerosol) transmission. It highlights how aerosols ($<10\text{ }\mu\text{m}$) can remain suspended in the air for long periods, travel long distances, and be significantly more infectious than larger particles. The traditional dimensional classification of particles is critically analyzed, demonstrating how air movements (generated by ventilation or human movement) can keep even larger particles (up to $20\text{ }\mu\text{m}$) suspended, contrary to what is assumed in conditions of still air.

Key factors such as human movement, which increases air mixing and the resuspension of deposited particles (mainly from the floor), and the impact of environmental conditions on pathogen transport are also examined. Finally, the paper compares different ventilation systems, noting that systems with non-uniform distribution tend to be more effective at removing contaminants.

Subsequently, a quantitative assessment of the effectiveness of ventilation airflow is developed, with the aim of determining the flow rate that is actually useful for limiting the

risk of transmission. Although it was not possible to obtain conclusive results, it was found that flow rates greater than four air changes per hour do not result in appreciable reductions in risk.

In addition, a simplified model was developed to assess the role of air recirculation through ventilation systems in the transmission of pathogens. It was found that in environments with high mixing, recirculation does not significantly alter the distribution of pathogens. On the other hand, in environments with reduced mixing, recirculation can lead to appreciable increases in the probability of pathogens being present in parts of the environment distant from the source.

Based on the technical literature reviewed and the further insights presented, it was possible to formulate general recommendations for the management of systems in the event of airborne epidemics and for their design to allow for more effective use in such circumstances.

La pandemia di CoViD-19 ha messo in luce la rilevanza degli impianti di climatizzazione nella trasmissione aerea dei patogeni. In risposta all'emergenza, numerose organizzazioni (tra cui WHO, ISS, ASHRAE, REHVA) hanno emanato linee guida per la gestione degli impianti. Tuttavia, queste raccomandazioni sono state spesso formulate su principi precauzionali, non sempre supportate da solide evidenze scientifiche, portando a indicazioni talvolta contrastanti, specialmente riguardo la portata d'aria esterna, il ricircolo e la gestione dei filtri.

Questa tesi raccoglie e analizza le evidenze scientifiche disponibili sulle interazioni tra impianti di ventilazione e patogeni aerotrasmessi. L'obiettivo è fornire una base per la pianificazione di interventi strutturali e per lo sviluppo di strategie di gestione più efficienti, migliorando la prontezza di reazione a future epidemie.

L'analisi approfondisce i meccanismi di trasmissione, distinguendo tra *droplet* (goccioline) e *airborne* (aerosol). Si evidenzia come gli aerosol ($<10\ \mu\text{m}$) possano rimanere sospesi nell'aria per lunghi periodi, percorrere lunghe distanze ed essere significativamente più infettivi delle particelle più grandi. La tradizionale classificazione dimensionale delle particelle è analizzata criticamente, dimostrando come i moti d'aria (generati dalla ventilazione o dal movimento umano) possano mantenere in sospensione anche particelle più grandi (fino a $20\ \mu\text{m}$), diversamente da quanto assunto in condizioni di aria immobile. Vengono inoltre esaminati fattori chiave come il movimento umano, che incrementa il mescolamento dell'aria e la risospensione delle particelle depositate (principalmente dal pavimento), e l'impatto delle condizioni ambientali sul trasporto dei patogeni. Infine, l'elaborato confronta diversi sistemi di ventilazione, rilevando che impianti con distribuzione non uniforme tendono a essere più efficaci nella rimozione dei contaminanti. Successivamente è sviluppata una valutazione quantitativa dell'efficacia della portata d'aria di ventilazione, con lo scopo di determinare la portata effettivamente utile per la limitazione del rischio di trasmissione. Nonostante non sia stato possibile ottenere risultati conclusivi. È stato rilevato che portate superiori a quattro ricambi orari non apportano apprezzabili riduzioni del rischio.

Inoltre, è stato sviluppato un modello semplificato per la valutazione del ruolo del ricircolo dell'aria attraverso impianti di ventilazione nella trasmissione dei patogeni. È stato rilevato che nel caso di ambienti con elevato mescolamento il ricircolo non altera in modo significativo la distribuzione dei patogeni. Per contro, in ambienti con ridotto mescolamento, il ricircolo può comportare apprezzabili incrementi della probabilità di presenza di patogeni in porzioni dell'ambiente distanti dalla sorgente.

Sulla base della letteratura tecnica esaminata e degli ulteriori approfondimenti esposti è stato possibile formulare delle raccomandazioni generali per la gestione degli impianti in caso di epidemie aerotrasmesse e per una progettazione degli stessi che ne consenta un utilizzo più efficace in tali circostanze.

Indice

Acronimi.....	7
Indice delle figure	9
Indice della tabelle	12
1 Introduzione	13
1.1 Motivazione	13
1.2 Le raccomandazioni formulate nell'emergenza	14
1.2.1 World Health Organization.....	15
1.2.2 Istituto Superiore di Sanità	17
1.2.3 Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations	18
1.2.4 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers 20	
1.2.5 Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione.....	22
1.3 Sintesi delle raccomandazioni.....	22
1.4 Organizzazione dell'elaborato	23
2 Modalità di trasmissione di patogeni per via aerea.....	25
2.1 Droplet vs. Airborne	25
2.1.1 Fattori ambientali	33
2.1.2 Fattori legati agli agenti patogeni	35
2.1.3 Fattori legati all'ospite	36
2.1.4 Fattori legati all'attività umana	37

2.1.5	Analisi critica del diametro massimo di aerosolizzazione.....	45
2.2	Trasmissione dei patogeni	47
3	Interazioni degli impianti	55
3.1	Ventilazione	55
3.2	Temperatura e umidità.....	64
3.3	Modalità di distribuzione dell'aria.....	71
3.3.1	Sistemi di ventilazione uniformi e costanti	72
3.3.2	Non-uniform steady-state ventilation systems.....	76
3.3.3	Unsteady ventilation systems	86
4	Approfondimenti	90
4.1	Portata d'aria esterna.....	90
4.2	Rilevanza della durata della permanenza negli ambienti.....	90
4.3	Utilizzo del ricircolo	93
5	Conclusioni e futuri sviluppi.....	100
5.1	Raccomandazioni	100
5.1.1	Portata d'aria esterna	100
5.1.2	Ricircolo.....	100
5.1.3	Aspirazione	101
5.1.4	Post-ventilazione	101
5.1.5	Pre-ventilazione.....	101
5.1.6	Recuperatore di calore.....	101
5.2	Futuri sviluppi e approfondimenti.....	102

6	Bibliografia	103
7	Codice Matlab	165

Acronimi

Acronimo	Denominazione estesa (in italiano o inglese)
ACE	Air change efficiency – Efficienza della ventilazione
ACH	Air Changes per Hour – Ricambi d’Aria per Ora
AICARR	Associazione Italiana Condizionamento dell’Aria, Riscaldamento e Refrigerazione
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BPCO	Broncopneumopatia Cronica Ostruttiva
BZ	Breathing Zone – Zona di Respirazione
CFD	Computational Fluid Dynamics – Fluidodinamica Computazionale
CJV	Confluent Jet Ventilation – Ventilazione a Getti Confluenti
COC	Concentration of Contaminants – Concentrazione di Contaminanti
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
CRE	Contaminant Removal Effectiveness – Efficacia di Rimozione dei Contaminanti
DCV	Diffuse Ceiling Ventilation – Ventilazione Diffusa dal Soffitto
DeV	Deflection ventilation – ventilazione a deflezione

Acronimo	Denominazione estesa (in italiano o inglese)
DV	Displacement Ventilation – Ventilazione a Dislocamento
HEPA	High Efficiency Particulate Air (Filtro ad Alta Efficienza per Particolato)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning – Riscaldamento, Ventilazione e Condizionamento dell’Aria
IAQ	Indoor Air Quality – Qualità dell’Aria Interna
IJV	Impinging Jet Ventilation – Ventilazione a Getto Impingente
ISS	Istituto Superiore di Sanità
IV	Intermittent ventilation – Ventilazione intermittente
LAF	Laminar airflow ventilation – ventilazione laminare
MAA	Mean age of air – Età media dell'aria
MERS-CoV	Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus
MERV	Minimum Efficiency Reporting Value (Indice di efficienza minima di filtrazione)
MV	Mixing Ventilation – Ventilazione a Miscelazione
NO_x	ossidi di azoto
OMS	Organizzazione Mondiale della Sanità (equivalente italiano di WHO)
PCR	reazione a catena della polimerasi
PFU	unità formanti placche
PM	Particolato
PM_{0,1}	Particelle ultrafini, dimensione inferiore a 0,1 µm
PM₁₀	Particelle ultrafini, dimensione inferiore a 10 µm
PM_{2,5}	Particelle ultrafini, dimensione inferiore a 2,5 µm

Acronimo	Denominazione estesa (in italiano o inglese)
POV	Protected Occupied-zone Ventilation – Ventilazione a Zona Occupata Protetta
qPCR	PCR quantitativa
qRT-PCR	PCR quantitativa con trascrizione inversa
REHVA	Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations
RH	Umidità relativa
RI	Rischio di Infezione (indice usato nelle simulazioni)
RSV	Respiratory Syncytial Virus – Virus Respiratorio Sinciziale
SARS-CoV	Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus
SARS-CoV-2	Coronavirus responsabile della pandemia di COVID-19
SO₂	anidride solforosa
SV	Stratum ventilation – Ventilazione stratificata (orizzontale)
UFAD	Under Floor Air Distribution – Distribuzione d’Aria dal Pavimento
UVGI	Ultraviolet Germicidal Irradiation – Irradiazione Germicida Ultravioletta
VMC	Ventilazione Meccanica Controllata
WAV	Wall-attached ventilation – Ventilazione adiacente alle pareti
WHO	World Health Organization – Organizzazione Mondiale della Sanità

Indice delle figure

Figura 1: Sintesi delle linee guida emanate durante la pandemia da Covid-19 (Moghadam et al., 2023).....	15
Figura 2: Dimensioni tipiche degli inquinanti ambientali (ASHRAE).....	26

Figura 3: Traiettorie tipiche delle particelle in base alle loro dimensioni (da Silva, 2020)...	27
Figura 4: Influenza del movimento umano sul flusso d'aria e la diffusione dei virus (Kek et al., 2023)	38
Figura 5: Dispersione delle gocce esalata (respiro) da una persona in movimento per effetto della scia (Sadeghi et al., 2025).....	40
Figura 6: Confronto tra il fattore di risospensione R e R0 delle particelle provenienti da (a) fonte locale e (b) intero terreno a tre velocità di camminata (0,4 m/s, 0,8 m/s e 1,6 m/s) in un tempo adimensionale (i marcatori solidi indicano l'arresto del movimento (Tao et al., 2017)	44
Figura 7: Rapporto tra forza di trascinamento e forza di gravità per diversi diametri e diverse velocità dell'aria.....	47
Figura 8: Limite di prevalenza delle forze di trascinamento ($R=10$) e limite di prevalenza della gravità ($R=0.1$)	47
Figura 9: Schematizzazione della penetrazione e deposizione degli aerosol nelle vie aeree (Hinds, 1999)	53
Figura 10: Variazioni nella carica virale elementari di SARS-CoV2 in ambiente per ogni persona infetta, per diversi valori di tasso di ventilazione	63
Figura 11: Carica virale media a regime in ambiente in relazione alla portata di ventilazione in presenza continuativa di un singolo soggetto infetto	64
Figura 12: Tempo di aerosolizzazione e di caduta delle particelle espettorate, valori per temperatura ambiente 18°C con U.R. 0%, (Xie et al., 2007).....	66
Figura 13: Diametro limite di aerosolizzazione per emissioni da parlato (velocità di emissione 5 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa	67

Figura 14: Diametro limite di aerosolizzazione per emissioni da tosse (velocità di emissione 20 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa	68
Figura 15: Diametro limite di aerosolizzazione per emissioni da starnuto (velocità di emissione 50 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa	68
Figura 16: Distribuzione media delle gocce di espettorato per classe dimensionale	69
Figura 17: Frazione di espettorato che aerosolizza per emissioni da parlato (velocità di emissione 5 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa	70
Figura 18: Frazione di espettorato che aerosolizza per emissioni da tosse (velocità di emissione 5 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa	70
Figura 19: Frazione di espettorato che aerosolizza per emissioni da starnuto (velocità di emissione 5 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa	71
Figura 20: Schematizzazione delle principali tipologie di sistemi di ventilazione	72
Figura 21: Influenza della posizione dei diffusori sul rischio di infezione in una sala riunioni in presenza di MV (Yan et al., 2023).....	75
Figura 22: Concentrazione normalizzata di particelle in uno spazio ufficio con cinque diversi sistemi di distribuzione dell'aria (Li et al., 2023)	84
Figura 23: carica virale in ambiente N_t per diversi periodi di permanenza, tasso di ventilazione 2 vol/h.....	91
Figura 24: carica virale in ambiente N_t per diversi periodi di permanenza, tasso di ventilazione 4 vol/h.....	91
Figura 25: Efficienza di filtrazione di diverse tipologie di mascherine (Feng et al., 2020)...	92
Figura 26: Rischio cumulato di trasmissione per esposizione prolungata ad una singola sorgente in relazione alla durata di permanenza della sorgente nell'ambiente e alla portata di ventilazione	93

Figura 27: evoluzione nel tempo della concentrazione di patogeni per ciascuna zona, sorgente in a1, elevato mescolamento assenza di ricircolo, ventilazione 1 vol/h.....	95
Figura 28: evoluzione nel tempo della concentrazione di patogeni per ciascuna zona, sorgente in a1, elevato mescolamento assenza di ricircolo, ventilazione 3 vol/h.....	95
Figura 29: evoluzione nel tempo della concentrazione di patogeni per ciascuna zona, sorgente in a1, elevato mescolamento assenza di ricircolo, ventilazione 6 vol/h.....	96
Figura 30: emittente nell'angolo, R rapporto tra la concentrazione nella zona di emissione e la concentrazione media.....	97
Figura 31: emittente nell'angolo, r rapporto tra la concentrazione minima e quella nella zona di emissione	97
Figura 32: emittente al centro, R rapporto tra la concentrazione nella zona di emissione e la concentrazione media.....	98
Figura 33: emittente al centro, r rapporto tra la concentrazione minima e quella nella zona di emissione	98

Indice della tabelle

Tabella 1: Sintesi delle raccomandazioni emanate durante la pandemia da Covid-19	24
Tabella 2: quantità e velocità di emissione di particelle in relazione alla tipologia di attività umana	30
Tabella 3: Comparazione delle principali tipologie di sistemi di ventilazione.....	88

1 Introduzione

1.1 Motivazione

Nel corso della pandemia di CoViD-19 è emersa la rilevanza degli impianti di climatizzazione per la trasmissione per via aerea dei virus. Nel corso dell'emergenza sono state emesse numerose linee guida in merito (WHO, ISS, ASHRAE, REHVA, AICARR) per rispondere in modo urgente all'esigenza di definire modalità di gestione degli impianti. Le raccomandazioni sono state formulate con riferimento alle specifiche caratteristiche del virus SARS-CoV-2 (reali o presunte nella contingenza) con un principio di prudenza che imponeva di attuare le azioni più efficaci. Peraltro, in gran parte derivavano da raccomandazioni già formulate per ambienti sanitari. D'altra parte, non tutte le raccomandazioni erano frutto di solide evidenze scientifiche.

In assenza di un'emergenza contingente è opportuno formulare valutazioni di efficienza delle possibili azioni di mitigazione della trasmissione di patogeni per via aerea, considerando anche interventi strutturali sugli impianti che se attuati in via preventiva possono consentire prestazioni migliori nel caso di un'eventuale futura epidemia.

In questo ambito nella presente tesi sono state raccolte e analizzate le evidenze disponibili in merito alle interazioni tra impianti di ventilazione con patogeni aerotrasmessi, approfondendo gli aspetti per i quali non vi siano evidenze conclusive, al fine di formulare considerazioni generali che possano essere di ausilio nella pianificazione degli interventi strutturali per il miglioramento della prontezza di reazione degli impianti ad un'eventuale futura epidemia e per la redazione di raccomandazioni di utilizzo degli impianti che permettano una maggiore efficacia ed efficienza.

1.2 Le raccomandazioni formulate nell'emergenza

Durante la pandemia di COVID-19, gli enti sanitari e le associazioni di categoria relative agli impianti di climatizzazione hanno elaborato specifiche linee guida per la gestione e manutenzione degli impianti di climatizzazione e ventilazione, al fine di ridurre il rischio di diffusione del SARS-CoV-2 negli ambienti indoor (Moghadam et al., 2023).

2014). In tale pubblicazione, l'OMS aveva già riconosciuto l'importanza della ventilazione adeguata come elemento cardine per la riduzione della trasmissione per via aerea di agenti patogeni, tra cui influenza, MERS-CoV e SARS-CoV negli edifici ad uso sanitario.

Il documento del 2014 raccomandava specificamente di assicurare un numero minimo di ricambi d'aria per ora nelle stanze di isolamento (almeno 12 ACH per isolamento a pressione negativa) e di garantire un flusso d'aria direzionale dai corridoi puliti verso le aree contaminate, evitando il ricircolo (WHO, 2014). Veniva inoltre sottolineato che i sistemi HVAC devono essere progettati e mantenuti per evitare perdite o flussi inversi, assicurando che i filtri e le guarnizioni siano regolarmente controllati e sostituiti.

Durante la pandemia di COVID-19, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha riconosciuto un ruolo crescente alla trasmissione per via aerea del virus SARS-CoV-2, in particolare in ambienti confinati e scarsamente ventilati (WHO, 2021a). Di conseguenza, la ventilazione — naturale o meccanica — è stata identificata come una misura fondamentale per ridurre la concentrazione di aerosol infettivi nell'aria e mitigare il rischio di contagio.

Le linee guida dell'OMS raccomandano, ove possibile, di massimizzare l'apporto di aria esterna nei sistemi di ventilazione meccanica, limitando l'uso del ricircolo di aria interna. Quando l'uso del ricircolo non può essere evitato, è necessario garantire un'adeguata filtrazione dell'aria, preferibilmente con filtri ad alta efficienza (MERV-14 o HEPA), compatibilmente con le specifiche tecniche del sistema (WHO, 2021a). L'obiettivo è ridurre la concentrazione di particelle sospese potenzialmente infettive e migliorare la qualità dell'aria negli ambienti condivisi.

Per gli impianti HVAC, l'OMS e l'Organizzazione Panamericana della Sanità (PAHO) raccomandano una manutenzione regolare di tutte le componenti, inclusi filtri, condotte, ventilatori e umidificatori, con pulizia periodica e sostituzione dei filtri secondo le indicazioni del produttore (PAHO, 2020). Inoltre, sottolineano l'importanza di verificare la tenuta delle canalizzazioni e la corretta posizione delle prese e degli scarichi d'aria, in

modo da evitare che l'aria potenzialmente contaminata venga reimpressa nei locali occupati.

La ventilazione naturale resta una soluzione efficace, soprattutto in edifici non dotati di sistemi meccanici. L'OMS raccomanda di aprire regolarmente porte e finestre per favorire lo scambio d'aria, in particolare negli spazi condivisi o affollati (WHO, 2021a). Tuttavia, in condizioni climatiche o strutturali che ne limitano l'efficacia, può essere utile integrare sistemi di ventilazione forzata o purificatori d'aria portatili dotati di filtri HEPA, come misura complementare (WHO, 2021b).

Le raccomandazioni includono anche il controllo dell'umidità e della temperatura, suggerendo di mantenere condizioni di comfort termico e un'umidità relativa moderata (tra il 40 e il 60%), per ridurre la stabilità dei virus aerotrasportati e migliorare la tollerabilità degli ambienti interni (WHO, 2021b). È inoltre sconsigliato l'uso di ventilatori direzionali che possono favorire il trasporto diretto di particelle respiratorie tra persone. Un elemento chiave delle linee guida è la valutazione della ventilazione in funzione della portata per persona negli ambienti non sanitari. Il documento **Roadmap to Improve and Ensure Good Indoor Ventilation in the Context of COVID-19** (WHO, 2021b) definisce soglie di riferimento e fornisce indicazioni per la progettazione o l'adeguamento degli impianti HVAC negli sanitari, non-residenziali e residenziali. In particolare, si raccomanda di garantire almeno 6 ricambi d'aria all'ora negli ambienti sanitari e un flusso direzionale controllato negli spazi dedicati all'isolamento.

1.2.2 Istituto Superiore di Sanità

L'Istituto Superiore di Sanità ha pubblicato specifiche indicazioni tecniche per la gestione degli impianti di ventilazione e climatizzazione, volte a ridurre il rischio di trasmissione per via aerea del virus in ambienti confinati. Il Rapporto ISS COVID-19 n. 5/2020 (*"Indicazioni ad interim per la prevenzione e la gestione degli ambienti indoor in relazione alla trasmissione dell'infezione da virus SARS-CoV-2"*) ha sottolineato il ruolo

fondamentale della qualità dell'aria indoor come misura di prevenzione ambientale, raccomandando di aumentare la ventilazione naturale o meccanica con aria esterna, mantenendo condizioni microclimatiche ottimali (temperatura e umidità relativa comprese tra il 40% e il 60%) per limitare la sopravvivenza dei virus aerodispersi (ISS, 2020a).

Successivamente, il Rapporto ISS COVID-19 n. 33/2020 ("Indicazioni sugli impianti di ventilazione/climatizzazione in strutture comunitarie non sanitarie e in ambienti domestici in relazione alla diffusione del virus SARS-CoV-2") ha fornito linee operative più dettagliate, raccomandando di mantenere in funzione i sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) per garantire un adeguato ricambio d'aria, riducendo o eliminando il ricircolo dell'aria interna non filtrata e incrementando l'apporto di aria esterna pulita (ISS, 2020b). È stata inoltre evidenziata la necessità di eseguire regolarmente la pulizia e la sostituzione dei filtri dell'aria, assicurando la tenuta dei pacchi filtranti e adottando filtri ad alta efficienza compatibili con l'impianto. L'ISS ha raccomandato di integrare, nei casi in cui non sia possibile assicurare una ventilazione adeguata, l'uso di purificatori d'aria dotati di filtri HEPA o tecnologie equivalenti, evitando dispositivi che rilascino ozono o altri agenti ossidanti. Entrambi i rapporti convergono nel considerare la ventilazione e la corretta gestione degli impianti HVAC parte integrante delle misure di prevenzione ambientale, da affiancare alle strategie comportamentali e sanitarie per la mitigazione del rischio di contagio (ISS, 2020a; ISS, 2020b).

1.2.3 Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations

Le indicazioni principali della REHVA riguardano l'aumento della ventilazione con aria esterna, l'eliminazione del ricircolo e l'estensione dei tempi di funzionamento degli impianti. È raccomandato di massimizzare l'apporto di aria esterna nei sistemi di ventilazione meccanica, mantenendo l'impianto in funzione almeno due ore prima e dopo

l'occupazione degli ambienti, e di evitare lo spegnimento completo anche durante i periodi di inattività, mantenendo un ricambio ridotto ma continuo (REHVA, 2021). Per i sistemi a portata variabile con controllo della CO₂ è raccomandata la riduzione del set-point; nella prima edizione delle linee guida (REHVA, 2020) è stato raccomandato un valore di 400 ppm; nella seconda edizione (REHVA, 2021) la raccomandazione è stata modificata in 550 ppm.

È raccomandata la disattivazione del ricircolo d'aria, salvo impedimenti, poiché può facilitare la redistribuzione di particelle virali tra ambienti diversi.

Nei sistemi dotati di recuperatori di calore rotativi o ruote entalpiche, viene raccomandato di verificare la tenuta del sistema e, in caso di perdite superiori al 5 %, di disattivare o bypassare il recuperatore per evitare contaminazioni incrociate (REHVA, 2020).

La REHVA sottolinea inoltre che la pulizia straordinaria dei condotti e l'umidificazione artificiale non rappresentano misure efficaci specificamente contro SARS-CoV-2, essendo il virus relativamente resistente alle variazioni di temperatura e umidità negli ambienti interni (REHVA, 2020; REHVA FAQ, 2021). La manutenzione ordinaria degli impianti deve tuttavia essere proseguita regolarmente, adottando dispositivi di protezione individuale per il personale tecnico.

Per quanto riguarda la distribuzione dell'aria, si raccomanda di evitare flussi diretti tra occupanti e di garantire un'adeguata estrazione continua nei locali di servizio, in particolare nei servizi igienici, dove è necessario mantenere una pressione negativa rispetto alle altre zone (REHVA, 2021).

Infine, la REHVA riconosce che l'aumento della ventilazione e la riduzione del ricircolo comportano un incremento dei consumi energetici, ma considera tali misure giustificate in contesti emergenziali, da bilanciare successivamente con strategie di efficienza energetica (REHVA, 2020).

Nel complesso, le linee guida REHVA rappresentano un riferimento tecnico di rilievo per la gestione degli impianti HVAC in condizioni epidemiche, sottolineando l'importanza del ricambio d'aria, della manutenzione controllata e dell'adattamento delle strategie impiantistiche al livello di rischio e alla tipologia di edificio.

1.2.4 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

Le linee guida si articolano in alcuni principi fondamentali. Il primo riguarda la ventilazione e il ricambio d'aria: ASHRAE ha inizialmente (ASHRAE, 2020) raccomandato di incrementare la portata di aria esterna immessa negli ambienti, compatibilmente con le condizioni di comfort termico e igrometrico. Successivamente (ASHRAE, 2021) ha rivisto la raccomandazione, specificando che è sufficiente il rispetto delle portate minime previste dallo Standard 62.1. Per il ricircolo è suggerito l'impiego di filtri ad alta efficienza, di classe almeno MERV 13 o superiore, in grado di trattenere particelle di dimensioni inferiori a un micron (ASHRAE, 2020).

Un secondo principio riguarda la messa in servizio e il funzionamento degli impianti. L'associazione statunitense sconsiglia la disattivazione totale degli impianti di climatizzazione e ventilazione, poiché tale pratica può portare a condizioni ambientali sfavorevoli – quali aumento dell'umidità, ristagno d'aria e accumulo di inquinanti indoor – che accrescono la vulnerabilità dei soggetti presenti. È invece consigliato mantenere i sistemi in funzione anche durante i periodi di bassa occupazione o chiusura, attivando cicli di ventilazione prolungati prima e dopo l'utilizzo degli ambienti (cosiddetto “flush period”), al fine di diluire e rimuovere eventuali contaminanti residui (ASHRAE, 2021).

La filtrazione e la purificazione dell'aria rappresentano un ulteriore pilastro delle raccomandazioni ASHRAE. Oltre ai filtri MERV 13, è suggerito, ove necessario, l'uso di filtri HEPA portatili, sistemi di irradiazione germicida ultravioletta (UVGI) o altri dispositivi di purificazione come misura aggiuntiva, specialmente in ambienti ad alto rischio o in spazi non serviti da ventilazione meccanica. Tuttavia, l'adozione di tali

tecnologie deve avvenire previa valutazione ingegneristica, per garantire l'efficacia e la sicurezza dei sistemi installati.

Un'attenzione particolare viene rivolta anche alla distribuzione dell'aria: è necessario evitare flussi d'aria diretti tra gli occupanti che possano favorire la trasmissione di particelle infettive, e verificare la corretta configurazione dei recuperatori di calore, assicurandosi che non vi siano perdite tra aria estratta e aria immessa. In presenza di recuperatori rotativi o ruote entalpiche con perdite significative, si raccomanda di disattivarli o bypassarli temporaneamente (ASHRAE, 2020).

Infine, le linee guida includono indicazioni per la manutenzione e la sicurezza del personale tecnico, che deve operare con adeguati dispositivi di protezione individuale e in condizioni di ventilazione controllata durante le operazioni sui filtri o sui condotti. ASHRAE suggerisce inoltre l'adozione di un "Epidemic Operating Plan", ovvero un piano di gestione straordinaria dell'edificio in contesto epidemico, comprendente la pianificazione delle modalità operative, la manutenzione preventiva e le procedure di emergenza (ASHRAE, 2021).

L'associazione riconosce che tali misure possono comportare un incremento dei consumi energetici e una riduzione dell'efficienza complessiva del sistema; tuttavia, ritiene che, in fase pandemica, la tutela della salute degli occupanti debba prevalere su considerazioni energetiche, raccomandando un successivo riequilibrio attraverso strategie di efficientamento. Le raccomandazioni ASHRAE costituiscono dunque un riferimento internazionale essenziale per la gestione sicura degli impianti HVAC in condizioni di emergenza sanitaria, e hanno contribuito a definire nuovi standard di progettazione e gestione orientati alla qualità dell'aria indoor e alla prevenzione della trasmissione aerea delle infezioni.

1.2.5 Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione

AICARR ha sottolineato l'importanza di mantenere attivi gli impianti di ventilazione meccanica controllata (VMC) e di climatizzazione, evitando la loro disattivazione, poiché questi sistemi contribuiscono al ricambio dell'aria e alla diluizione degli aerosol potenzialmente infetti. È stato raccomandato di aumentare la portata di aria esterna immessa negli ambienti, riducendo o eliminando il ricircolo dell'aria, e di utilizzare filtri ad alta efficienza (MERV 13 o superiori) per migliorare la qualità dell'aria. Inoltre, AICARR ha evidenziato la necessità di effettuare una manutenzione straordinaria degli impianti, comprendente la pulizia e la disinfezione approfondita dei componenti, per garantire un funzionamento ottimale e sicuro. Queste raccomandazioni si basano sul principio della massima precauzione, considerando la possibilità di trasmissione aerea del virus, e sono state integrate con le indicazioni dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e delle autorità sanitarie italiane.

1.3 Sintesi delle raccomandazioni

Nella Tabella 1.1 sono espone i principali aspetti delle raccomandazioni formulate dagli enti e dalle associazioni. ASHRAE e RHEVA hanno formulato alcune modifiche alle raccomandazioni nel 2021. L'ISS ha emanato due guide, non del tutto coerenti tra loro; il Rapporto n. 33 riporta raccomandazioni differenziate in base al rischio di contagio.

I principali aspetti considerati sono relativi alla portata d'aria esterna degli impianti di ventilazione e all'utilizzo del ricircolo. Inoltre, è stato affrontato l'utilizzo dei recuperatori di calore e delle apparecchiature con ventilatore in ambiente. Quasi tutti hanno ribadito l'esigenza di una corretta manutenzione e pulizia degli impianti. Solo l'ISS, nel Rapporto n. 5 ha raccomandato una maggiore frequenza della pulizia dei filtri. Infine, alcuni hanno affrontato il tema della posizione dei punti di presa ed espulsione aria.

I contrasti rilevabili su alcuni aspetti, anche molto rilevanti dal punto di vista energetico ed economico, evidenziano la necessità di un approfondimento delle evidenze a supporto delle raccomandazioni.

1.4 Organizzazione dell'elaborato

La tesi è strutturata introducendo preliminarmente gli aspetti generali di trasmissione aerea dei patogeni. Successivamente, sono presentati i dati disponibili in letteratura in merito alle interazioni con gli impianti di ventilazione e climatizzazione. Quindi, sono presentate le analisi sviluppate in base a tali evidenze. Infine, sono presentate le strategie più efficienti ed efficaci di gestione degli impianti. Nelle conclusioni sono illustrati i possibili sviluppi futuri evidenziando gli aspetti per cui sarà opportuno un approfondimento di ricerca.

Tabella 1: Sintesi delle raccomandazioni emanate durante la pandemia da Covid-19

		WHO	ISS				ASHRAE		RHEVA		AICARR
			Rapporto n. 5	Rapporto n. 33							
				Rischio Basso	Rischio Moderato	Rischio Alto	2020	2021	2020	2021	
Portata d'aria esterna		10 l/s/pp	Massima	massima	massima	massima	requisiti ASHRAE 62.1 (8.5 l/s/pp in ufficio)	massima		massima	
controllo CO2							Disabilitare		400 ppm		550 ppm
Ricircolo		al minimo	no, se possiibile	no	no	no	No		no		
Aspirazione				si, tranne che da aree comuni in impianti con molte zone	no da aree comuni	no da aree comuni	no da aree con possibile presenza di persone infette				
Pre-ventilazione		2 ore	2 ore				2 ore (o fino a 3 ricambi)	2 ore	2 ore (o fino a 3 ricambi)	continuativo	
Post-ventilazione		2 ore	2 ore				2 ore (o fino a 3 ricambi)	2 ore	2 ore (o fino a 3 ricambi)	continuativo	
Recuperatore di calore	Doppia batteria con fluido intermedio	ok		ok	ok	ok	Ok	Ok		ok	
	A piastre	ok se integri		no per impianti multizona	no per impianti multizona	no per impianti multizona	ok se integri	ok se integri		ok	
	Rotativo	ok se provvisti di tenuta (trafilamento <3%)		no per impianti multizona	no per impianti multizona	no per impianti multizona	ok previa verifica	ok se provvisti di tenuta (trafilamento <5%)		no	
Ventilazione locale (es. fan-coil, split, ventilatori da soffitto)		attivare, migliora il mescolamento	non utilizzare ventilatori a pale in presenza di più persone, nessun limite per terminali con ventilatori	limitare la velocità a 2 m/s se più di un occupante	limitare la velocità a 1 m/s se più di un occupante	limitare la velocità a 0.5 m/s se più di un occupante	evitare esposizione incrociata, tranne che se ambienti con scarso mescolamento e buona ventilazione	no, se più di un occupante		ok	
pulizia e manutenzione filtri		come da raccomandazione del produttore	ogni 4 settimane	come da raccomandazione del produttore	come da raccomandazione del produttore	come da raccomandazione del produttore	come da raccomandazione del produttore	come da raccomandazione del produttore			
distanza espulsione-persone		4 m		3 m	3 m	3 m	Verificare				
distanza presa - espulsione		2 m (espulsione sopra), 4 m (espulsione sotto)		3 m	3 m	3 m					

2 Modalità di trasmissione di patogeni per via aerea

Comprendere la diffusione dei virus presenti nell'aria negli ambienti interni è una sfida complessa a causa dell'interazione tra fattori fisici, ambientali e chimici. A causa delle loro proprietà chimico-fisiche, i virus respiratori possono essere trasmessi da un individuo infetto ad altri esseri umani attraverso tre vie principali, tra cui la via delle goccioline e la via aerea (trasmissione diretta) durante la tosse, gli starnuti, la conversazione o l'espiazione, nonché la via del contatto (trasmissione indiretta) (Memarbashì e Mahmoudi, 2021). Sebbene numerosi studi abbiano specificato singolarmente elementi quali il movimento umano, le strategie di ventilazione, l'umidità relativa, gli inquinanti atmosferici, la dimensione delle particelle e la velocità di espiazione, vi è una notevole carenza di analisi complete che integrino questi fattori, in particolare in scenari interni dinamici. Nel presente capitolo è esposta una revisione approfondita e una categorizzazione dei fattori chiave che influenzano il comportamento delle particelle respiratorie, con particolare attenzione a come il movimento umano altera i modelli di flusso d'aria, la turbolenza e le traiettorie delle particelle virali. Viene esaminato anche come il flusso di scia indotto dalla mobilità, la risospensione delle particelle e la maggiore diffusione dei patogeni influenzano la trasmissione virale. Dai risultati appare che gli aerosol contribuiscono in modo significativo al rischio di trasmissione, rappresentando il 23,1%, con particelle inferiori a 5-10 μm che sono fino a 100 volte più infettive delle particelle più grandi. Strategie di ventilazione efficaci, in particolare la ventilazione a dislocamento, sono fondamentali per mitigare questi rischi. Secondo gli studi, il movimento umano è un fattore importante, che aumenta lo scambio cumulativo di aria e aerosol di circa il 33% rispetto alle condizioni statiche, con la velocità di camminata che influisce in modo significativo sulla persistenza delle goccioline e sulle interruzioni del flusso d'aria.

2.1 Droplet vs. Airborne

Diversi studi di ricerca hanno compiuto grandi sforzi per indagare i vari fattori che influenzano la trasmissione per via aerea negli ambienti interni, quali la mobilità umana (Han et al., 2014), i tassi di ventilazione (Hasan et al., 2022), le condizioni ambientali (come la velocità dell'aria, l'umidità relativa, la temperatura e la pressione) (Sun e Zhai, 2020; Feng et al., 2020; Huang et al. 2020; Obeidat et al., 2021), la disposizione spaziale degli occupanti e degli oggetti (Ren et al., 2021), i livelli di occupazione (Jin et al. 2021), la qualità dell'aria (Santurun et al., 2022; Setti et al., 2020;

Comunian et al., 2020) e persino l'esposizione alla luce solare (Sharun et al., 2021). Diversi articoli si sono concentrati su aspetti specifici della trasmissione per via aerea, come il ruolo della ventilazione nella riduzione del rischio di infezione o l'impatto dell'umidità sulla sopravvivenza e la trasmissione del virus. Le interazioni intrecciate tra il movimento umano, le condizioni ambientali e il comportamento delle particelle sono discusse in modo inadeguato nella letteratura esistente. Inoltre, l'impatto dei fenomeni indotti dalla mobilità, come il flusso di scia, la risospensione delle particelle e la maggiore diffusione dei patogeni sul rischio di trasmissione virale, non è stato sistematicamente esaminato in tutti gli ambienti interni.

Ai fini dell'analisi è fondamentale comprendere i concetti fondamentali del comportamento delle particelle nell'aria interna. La figura 2 illustra gli intervalli di diametro dei principali tipi di particelle presenti negli ambienti interni, fornendo un confronto tra le varie dimensioni delle particelle, dai cluster molecolari e dai virus all'estremità più piccola dello spettro alle particelle più grandi, come la polvere e il polline.

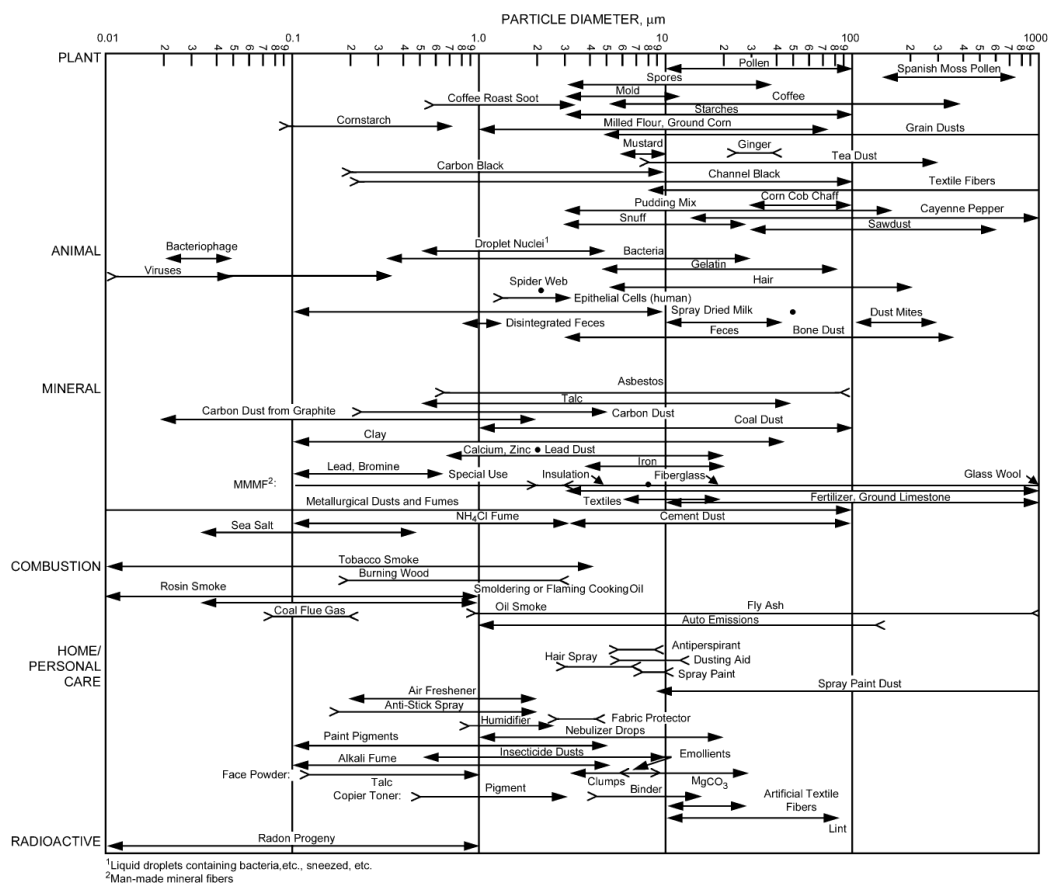


Figura 2: Dimensioni tipiche degli inquinanti ambientali (ASHRAE)

Comprendere queste gamme dimensionali è fondamentale poiché la dimensione delle particelle influenza in modo significativo il loro comportamento, il tempo di permanenza nell'aria e il potenziale di inalazione profonda nel tratto respiratorio. Il comportamento di queste particelle di dimensioni diverse nell'aria è ulteriormente illustrato nella Fig. 3, che mostra le traiettorie tipiche in base alla dimensione delle particelle (da Silva, 2020). Lo schema evidenzia come la dimensione delle particelle influisca notevolmente sul loro comportamento nell'aria. Le particelle più grandi ($>100\text{ }\mu\text{m}$) tendono a seguire traiettorie più dirette, dominate dalla gravità, e a depositarsi rapidamente a causa del loro peso. Le particelle di medie dimensioni ($10\text{-}100\text{ }\mu\text{m}$) presentano traiettorie più complesse, influenzate sia dalla gravità che dalle correnti d'aria. Le particelle più piccole ($<10\text{ }\mu\text{m}$), che includono molti aerosol respiratori, possono rimanere sospese nell'aria per lunghi periodi e seguire più da vicino le correnti d'aria.

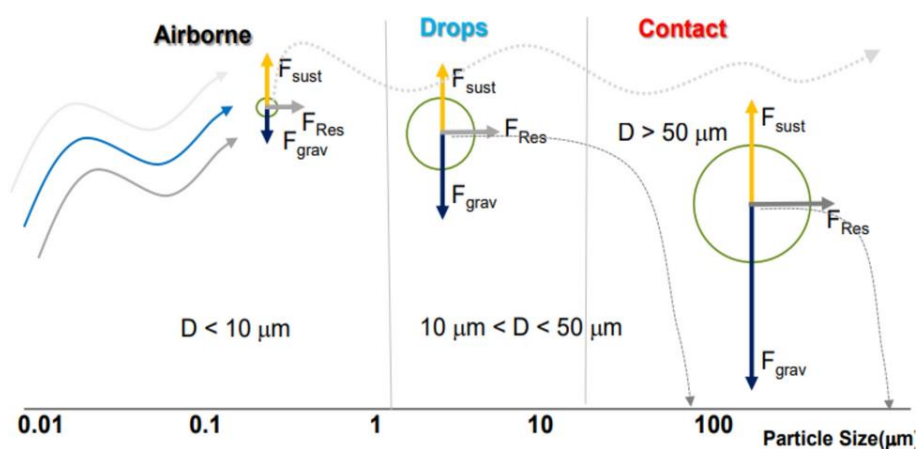


Figura 3: Traiettorie tipiche delle particelle in base alle loro dimensioni (da Silva, 2020)

Quindi, le particelle aerodisperse coinvolte nella trasmissione respiratoria sono classificate in due gruppi in base alle loro dimensioni e al loro comportamento nell'aria (Tellier et al., 2019; Smieszek et al., 2019; Ge et al., 2020). Il primo gruppo è costituito da particelle minuscole con diametro inferiore a $5\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$. Queste particelle sono considerate abbastanza leggere da essere trasportate dalle correnti d'aria, il che consente loro di percorrere sia brevi che lunghe distanze. Le particelle inferiori a $5\text{ }\mu\text{m}$ possono raggiungere le parti più

profonde dei polmoni, mentre quelle inferiori a 10 μm possono penetrare oltre le corde vocali (Tellier et al., 2019). Il secondo gruppo comprende goccioline di grandi dimensioni con diametro superiore a 20 μm . A differenza delle loro controparti più piccole, queste goccioline sono influenzate principalmente dalle forze gravitazionali, il che determina un percorso più diretto e discendente nell'aria. A causa delle loro dimensioni, queste goccioline non possono seguire i modelli naturali del flusso d'aria creati durante l'inalazione. Numerosi studi hanno identificato la trasmissione tramite aerosol come la modalità principale di diffusione dei virus presenti nell'aria. Azimi et al. (2021) hanno evidenziato che il 59% delle trasmissioni durante un'epidemia su una nave da crociera era dovuto all'inalazione di aerosol, rispetto al 41% dovuto a goccioline respiratorie più grandi. Xu et al. (2022) hanno rilevato che gli aerosol sono responsabili di circa il 23,1% del rischio di trasmissione, una percentuale notevolmente superiore a quella delle goccioline. Rabaan et al. (2021) hanno sottolineato che la trasmissione per via aerea rimane altamente virulenta ed è la via dominante di diffusione della SARS-CoV-2. A distanze inferiori a 0,5 m, la probabilità di infezione supera il 70%, ma scende a meno del 20% a 2 m (Bale et al., 2022), evidenziando il ruolo significativo delle goccioline a distanza ravvicinata. Anche la dimensione delle particelle gioca un ruolo cruciale, con l'80-90% delle particelle prodotte dalla respirazione e dalla parola che misurano circa 1 μm , classificabili come aerosol (Lelieveld et al., 2020). La maggior parte degli aerosol espirati ha un diametro inferiore a 5 μm , molti dei quali inferiori a 1 μm (Wang et al., 2021). Attività diverse producono particelle di dimensioni variabili, con la respirazione normale che rilascia fino a 7200 particelle di aerosol per litro di aria espirata (Zhuang et al., 2022). Teunis et al. (2010) hanno evidenziato che le probabilità di infezione tramite aerosol o goccioline sedimentate sono approssimativamente uguali, anche se le goccioline comportano un rischio leggermente più elevato a causa delle dosi più elevate. McCarthy et al. (2022) hanno indicato che le goccioline presentano un rischio di infezione più elevato a distanza

ravvicinata (fino a 1-1,8 m), mentre gli aerosol svolgono un ruolo più sostanziale nella trasmissione a lunga distanza.

Sebbene le dimensioni siano un fattore cruciale per distinguere tra goccioline e particelle aerodisperse, recenti ricerche hanno dimostrato che anche altre caratteristiche svolgono un ruolo significativo nel determinare il loro comportamento e il loro potenziale infettivo.

Questa comprensione è essenziale per valutare con precisione i rischi di trasmissione, in particolare nel contesto dei patogeni respiratori come il SARS-CoV-2. Tradizionalmente, come accennato in precedenza, le particelle sono state classificate come goccioline o aerosol in base principalmente alle loro dimensioni. Tuttavia, questa divisione di base non è in grado di cogliere adeguatamente le complesse dinamiche del comportamento e dell'infettività delle particelle. Gralton et al. (2011) hanno evidenziato che le particelle di dimensioni inferiori a 5-10 μm non solo sono più propense a raggiungere il tratto respiratorio inferiore, ma possono anche essere fino a 100 volte più infettive delle particelle più grandi. Questa maggiore infettività è dovuta a diversi fattori, tra cui una penetrazione più profonda nel sistema respiratorio, un tempo di sospensione nell'aria più lungo e dinamiche di evaporazione uniche. Particolarmente degno di nota è il ruolo delle particelle più piccole di 1 μm . Queste particelle submicroniche hanno una maggiore penetrazione nei polmoni rispetto alle particelle più grandi. Questa penetrazione più profonda può portare a infezioni più gravi o a manifestazioni diverse della malattia. Inoltre, possono rimanere sospese nell'aria per ore, di fatto indefinitivamente, viaggiando potenzialmente per lunghe distanze dalla fonte, e possono eludere più facilmente i meccanismi di difesa iniziali dell'organismo nel tratto respiratorio superiore.

A seconda del tipo di attività fisica e delle condizioni di salute delle persone, il sistema respiratorio umano genera un numero variabile di goccioline e aerosol con dimensioni e velocità iniziali molto diverse tra loro (Sadeghi et al., 2025), come illustrato in Tabella 2. Il diametro massimo delle particelle cresce con la velocità di emissione, ma anche il parlato

genera abitualmente gocce di diametro superiore a 20 μm . Per contro, la semplice respirazione abitualmente determina gocce di diametro inferiore a tale valore.

Tabella 2: quantità e velocità di emissione di particelle in relazione alla tipologia di attività umana

	Quantità	Velocità di emissione
<i>Respiro</i>	~15 per litro	1 m/s – 2 m/s
<i>Parlato</i>	100 – 7000 per litro d'aria	2 m/s – 6 m/s
<i>Starnuto</i>	40.000 per starnuto	fino a 30 m/s
<i>Tosse</i>	1000 – 3000 particelle per colpo di tosse	fino a 30 m/s

Diverse attività che comportano l'espulsione di aria dai polmoni, come respirare, tossire, starnutire o ridere, portano alla creazione di goccioline con concentrazioni e velocità di espulsione variabili. La traiettoria e il comportamento di queste goccioline/aerosol sono influenzati in modo significativo dalla velocità con cui vengono espulse. L'aumento della velocità di espirazione può estendere significativamente la distanza percorsa dalle goccioline dalla fonte, ampliando così la loro potenziale area di diffusione. Questo aumento della portata aumenta il rischio di trasmissione alle persone vicine alla persona infetta. Inoltre, velocità più elevate facilitano la dispersione di goccioline più piccole, portando a una zona di contaminazione più ampia. Queste goccioline più piccole, in grado di rimanere sospese nell'aria per periodi prolungati, possono coprire distanze maggiori prima di depositarsi sulle superfici o essere inalate da altre persone. L'interazione tra la velocità di espirazione e fattori ambientali quali correnti d'aria, umidità e temperatura complica ulteriormente la dispersione e il movimento delle goccioline cariche di virus nell'aria.

La respirazione ordinaria produce goccioline con velocità inferiori rispetto a quelle prodotte dagli starnuti e dalla tosse. Di conseguenza, le goccioline di dimensioni simili impiegano più tempo a scendere quando vengono espulse attraverso la respirazione normale. Le goccioline generate dagli starnuti, soggette a forze di resistenza significative, spesso si frammentano in particelle più piccole e ad alta velocità. Queste particelle minuscole, classificate come aerosol, possono rimanere sospese nell'aria per lunghi periodi a causa della loro massa e inerzia ridotte, facilitando una rapida dispersione. Shafaghi et al. (2020) indica che le goccioline provenienti dal respiro di un individuo infetto viaggiano in genere per meno di 1 m. Al contrario, le goccioline provenienti da tosse o starnuti possono percorrere distanze da 4 a 7 m. Inoltre, l'intensa forza di resistenza subita durante lo starnuto può causare la disintegrazione delle goccioline più grandi in goccioline più piccole, che possono persistere nell'aria per periodi prolungati.

La trasmissione dei virus respiratori è strettamente legata al comportamento delle goccioline cariche di virus nell'ambiente, dove la dimensione e la composizione delle particelle giocano un ruolo cruciale. Le attività espiratorie come la tosse, gli starnuti e il parlare producono goccioline di varie dimensioni, tradizionalmente classificate come aerosol ($<100\text{ }\mu\text{m}$) e goccioline più grandi. Questa distinzione è significativa in quanto influenza il loro comportamento aerodinamico e il potenziale di trasmissione. Infatti, gli aerosol possono rimanere sospesi nell'aria per lunghi periodi, rappresentando un rischio significativo in spazi scarsamente ventilati, mentre le goccioline più grandi tendono a depositarsi più rapidamente.

Le particelle di dimensioni comprese tra piccoli aerosol e goccioline fino a $100\text{ }\mu\text{m}$ possono essere inalate e le loro dimensioni influenzano non solo le loro proprietà aerodinamiche, ma anche le dinamiche di deposito all'interno delle vie respiratorie. Diversi meccanismi, tra cui l'impatto inerziale, la sedimentazione gravitazionale, l'intercettazione, la precipitazione elettrostatica e la diffusione guidata dalla turbolenza, determinano il punto in cui queste particelle si depositano nel sistema respiratorio. Sebbene il moto browniano

possa svolgere un ruolo fondamentale per le particelle ultrafini inferiori a $0,3\text{ }\mu\text{m}$, per la gamma respirabile ($0,5\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$) il meccanismo di dispersione dominante in ambienti chiusi è la diffusione turbolenta piuttosto che la diffusione molecolare. La turbolenza aumenta la miscelazione degli aerosol, prolunga il tempo di sospensione e crea punti di concentrazione localizzati, che possono aumentare significativamente il rischio di infezione. Il flusso d'aria turbolento proveniente dalla ventilazione può trasportare le particelle ben oltre il percorso diretto dell'espiazione, portando talvolta a livelli elevati di aerosol anche a distanze dove la gravità normalmente causerebbe il loro deposito. Allo stesso modo, le misurazioni in situ delle particelle espirate durante la respirazione normale confermano che la maggior parte delle particelle è inferiore a $5\text{ }\mu\text{m}$ e rimane sospesa nell'aria per lunghi periodi, con il loro destino determinato principalmente dalla turbolenza ambientale e dall'efficienza della ventilazione piuttosto che dal moto browniano. Ad esempio, gli aerosol di circa $5\text{ }\mu\text{m}$ si depositano principalmente nella regione rinofaringea attraverso l'impatto inerziale e la sedimentazione gravitazionale, mentre la loro distribuzione e permanenza negli spazi interni sono influenzate in modo significativo dai flussi d'aria turbolenti e dalla configurazione dei sistemi HVAC. Ovviamente, la dimensione di queste particelle influisce in modo significativo sul loro tempo di permanenza nell'aria, con gli aerosol più piccoli che tendono a rimanere sospesi nell'aria per periodi più lunghi rispetto alle goccioline più grandi.

La dinamica delle particelle presenti nell'aria in spazi confinati è un fenomeno complesso influenzato da una moltitudine di fattori interconnessi. Sulla base della letteratura scientifica, questi fattori possono essere classificati in quattro categorie principali: fattori ambientali, fattori legati agli agenti patogeni, fattori legati all'ospite e fattori legati all'attività umana. Comprendere l'interazione tra queste categorie è fondamentale per sviluppare strategie efficaci volte a mitigare la diffusione delle infezioni respiratorie negli ambienti interni.

2.1.1 Fattori ambientali

I fattori ambientali svolgono un ruolo fondamentale nelle dinamiche di trasmissione dei virus presenti nell'aria. Tra questi figurano la qualità dell'aria, i sistemi di ventilazione e le proprietà fisiche degli spazi interni. L'inquinamento atmosferico, in particolare la presenza di particolato (PM), influisce in modo significativo sulla trasmissione dei virus. Il PM_{2,5} e il PM₁₀ possono aggravare i sintomi del COVID-19 e aumentare la suscettibilità dei pazienti. La concentrazione di queste particelle varia nelle aree urbane, con particelle ultrafini (PM_{0,1}), particelle fini (PM_{2,5}) e particelle grossolane (PM₁₀) che hanno ciascuno effetti distinti sulla salute respiratoria.

L'umidità relativa (RH) e la temperatura sono fattori ambientali critici che influenzano il comportamento delle goccioline e la vitalità del virus. In ambienti con bassa umidità (20-50%) e temperature elevate (superiori a 25 °C), le goccioline respiratorie subiscono una rapida evaporazione, con conseguente formazione di particelle residue più piccole che rimangono sospese nell'aria più a lungo. Al contrario, livelli di umidità più elevati (circa l'80%) in condizioni più fresche (5-15 °C) rallentano l'evaporazione delle goccioline, portando a un più rapido deposito. Questi effetti dipendenti dall'umidità hanno un impatto notevole sul rischio di trasmissione delle infezioni aerotrasportate.

L'inquinamento atmosferico, in particolare il particolato (PM), svolge un ruolo fondamentale nella dispersione e nella trasmissione dei virus presenti nell'aria, specialmente in ambienti interni affollati. Questa relazione è complessa e multiforme, poiché l'inquinamento atmosferico non solo influisce sul trasporto e sulla sopravvivenza dei virus, ma può anche aggravare gli effetti delle infezioni virali sulla salute. Il particolato atmosferico, una componente chiave dell'inquinamento atmosferico, crea un ambiente che può favorire la trasmissione batterica e virale in spazi confinati. Il PM è una miscela complessa di particelle solide e goccioline liquide sospese nell'aria, provenienti da varie fonti antropiche e naturali quali la produzione di energia elettrica, il traffico, la combustione di biomasse e la polvere. Comprende una serie di composti tra cui carbonio

elementare, carbonio organico, solfati, nitrati e materiali cristallini. La composizione e la distribuzione dimensionale del PM possono influenzare in modo significativo il suo impatto sulla trasmissione dei virus e sulla salute umana. Nelle aree urbane, il PM è tipicamente classificato in tre frazioni dimensionali principali: particelle ultrafini (PM_{0,1}, <0,1 µm di diametro), particelle fini (PM_{2,5}, <2,5 µm di diametro) e particelle grossolane (PM₁₀, 2,5-10 µm di diametro). Queste distinzioni di dimensione sono fondamentali in quanto determinano la profondità con cui le particelle possono penetrare nel sistema respiratorio e interagire con i virus presenti nell'aria. Il PM_{2,5} e il PM₁₀, in particolare, sono stati collegati a una maggiore gravità dei sintomi del COVID-19 e a una maggiore suscettibilità dei pazienti.

L'interazione tra il particolato e i virus presenti nell'aria può avvenire in diversi modi. In primo luogo, le goccioline o gli aerosol carichi di virus possono attaccarsi al PM, prolungando potenzialmente il tempo di sopravvivenza del virus nell'aria e aumentando il suo raggio di trasmissione. Questo attaccamento può proteggere il virus da fattori di stress ambientali come le radiazioni UV e le fluttuazioni di temperatura. In secondo luogo, il PM può fungere da vettore per i virus, consentendo loro di viaggiare su distanze maggiori rispetto a quelle che percorrerebbero da soli, ampliando così l'area di potenziale infezione. Inoltre, la presenza di PM nell'aria può avere effetti diretti sulla salute respiratoria umana, rendendo gli individui più suscettibili alle infezioni virali. L'esposizione a lungo termine all'inquinamento atmosferico è stata collegata a un aumento della prevalenza delle malattie respiratorie e della mortalità. Il PM_{2,5} e il PM₁₀ possono penetrare in profondità nei polmoni, causando infiammazioni e compromettendo potenzialmente le difese naturali del sistema respiratorio contro le infezioni virali. Questa risposta infiammatoria può aumentare l'infiammazione polmonare, peggiorando potenzialmente i sintomi delle malattie virali respiratorie come il COVID-19.

La dimensione delle particelle di PM è particolarmente rilevante nel contesto della trasmissione dei virus. Le dimensioni relative di PM_{2,5} e PM₁₀ sono paragonabili a quelle

di molte goccioline respiratorie che possono trasportare virus. Questa somiglianza nelle dimensioni consente interazioni complesse tra le particelle inquinanti e le goccioline cariche di virus presenti nell'aria, influenzando potenzialmente il loro comportamento nell'aria e i modelli di deposito respiratorio. Oltre al particolato, anche altri componenti dell'inquinamento atmosferico come gli ossidi di azoto (NO_x), l'anidride solforosa (SO₂) e l'ozono possono influire sulla trasmissione virale e sulla gravità dell'infezione. Questi inquinanti possono causare stress ossidativo e infiammazione delle vie respiratorie, aumentando potenzialmente la suscettibilità alle infezioni virali ed esacerbando i sintomi. Dato il potenziale impatto del particolato e di altri inquinanti atmosferici sulla trasmissione del virus e sulla gravità dell'infezione, è fondamentale considerare la loro presenza nell'ambiente per gestire efficacemente la diffusione virale in spazi confinati. Ciò è particolarmente importante nelle aree urbane con alta densità di popolazione e livelli elevati di inquinamento atmosferico. Le strategie per mitigare la trasmissione virale in tali ambienti non dovrebbero concentrarsi solo su misure dirette di controllo del virus, ma anche sul miglioramento della qualità complessiva dell'aria per ridurre gli effetti sinergici dell'inquinamento e dei patogeni virali.

2.1.2 Fattori legati agli agenti patogeni

Le caratteristiche del virus stesso influenzano in modo significativo il suo potenziale di trasmissione. La dimensione e la composizione delle particelle sono fattori chiave in questa categoria. Le attività respiratorie producono goccioline che vanno dagli aerosol (<100 µm) a goccioline più grandi, ciascuna con comportamenti aerodinamici distinti. Gli aerosol più piccoli possono rimanere sospesi nell'aria per periodi prolungati e penetrare più in profondità nel sistema respiratorio, mentre le goccioline più grandi tendono a depositarsi più rapidamente.

D'altra parte, in un modello di equiprobabile distribuzione delle particelle virali nella saliva, la probabilità che una goccia contenga una particella virale aumenta con il cubo del diametro.

La composizione delle particelle cariche di virus, derivanti principalmente dalla saliva umana, influisce sul loro tasso di evaporazione e sulla loro dimensione finale. Le goccioline con un contenuto volatile più elevato evaporano più rapidamente, prolungando potenzialmente la loro permanenza nell'aria, mentre la presenza di soluti come i sali può rallentare l'evaporazione. Questo comportamento dipende dalla composizione influenza la traiettoria, la portata e i modelli di deposito delle particelle all'interno delle vie respiratorie dei potenziali ospiti.

2.1.3 Fattori legati all'ospite

I fattori legati all'ospite comprendono gli aspetti fisiologici e comportamentali degli individui che influenzano la loro suscettibilità ai virus presenti nell'aria e il loro potenziale di trasmissione. La velocità di espirazione è una dei principali discriminanti della espirazione di goccioline di saliva. Diverse attività respiratorie, come respirare, tossire, starnutire o ridere, producono goccioline con concentrazioni e velocità di espulsione variabili. Velocità di espirazione più elevate possono aumentare significativamente la distanza percorsa dalle goccioline, ampliando la loro potenziale area di diffusione. Anche la traiettoria e il comportamento delle goccioline espirate sono influenzati in modo significativo dalla velocità con cui vengono espulse. Ad esempio, le goccioline prodotte dalla respirazione normale percorrono in genere meno di 1 m, mentre quelle prodotte dalla tosse o dagli starnuti possono attraversare distanze da 4 m a 7 m. L'intensa forza di trascinamento esercitata durante lo starnuto può causare la disintegrazione delle goccioline più grandi in goccioline più piccole, che possono persistere nell'aria per periodi prolungati.

2.1.4 Fattori legati all'attività umana

Il movimento e il comportamento umano all'interno di spazi confinati sono emersi come fattori critici nella trasmissione dei virus per via aerea. Le correnti d'aria generate dal movimento possono disperdere i contaminanti, modificando la distribuzione degli inquinanti nell'aria fino a un minuto dopo la cessazione del movimento. I dati di letteratura indicano che un individuo in movimento può diffondere contaminanti su distanze fino a 7 m, espandendo potenzialmente la zona ad alto rischio di infezione da 1,5 m a oltre 3 m in spazi scarsamente ventilati.

Questo fattore è emerso come elemento critico nella comprensione dei modelli epidemici e nello sviluppo di interventi di salute pubblica. La capacità di tracciare e misurare i movimenti umani può migliorare sostanzialmente le capacità predittive e le strategie di controllo delle malattie infettive anche oltre i confini geografici.

Le correnti d'aria generate dal movimento possono disperdere i contaminanti, modificando la distribuzione degli inquinanti nell'aria fino a un minuto dopo la cessazione del movimento (Kek et al., 2023), come mostrato nella Fig. 4. Studi precedenti (Wu et al., 2022) indicano che un individuo in movimento può diffondere contaminanti su distanze fino a 7 m, espandendo potenzialmente la zona ad alto rischio di infezione da 1,5 m a oltre 3 m in spazi scarsamente ventilati.

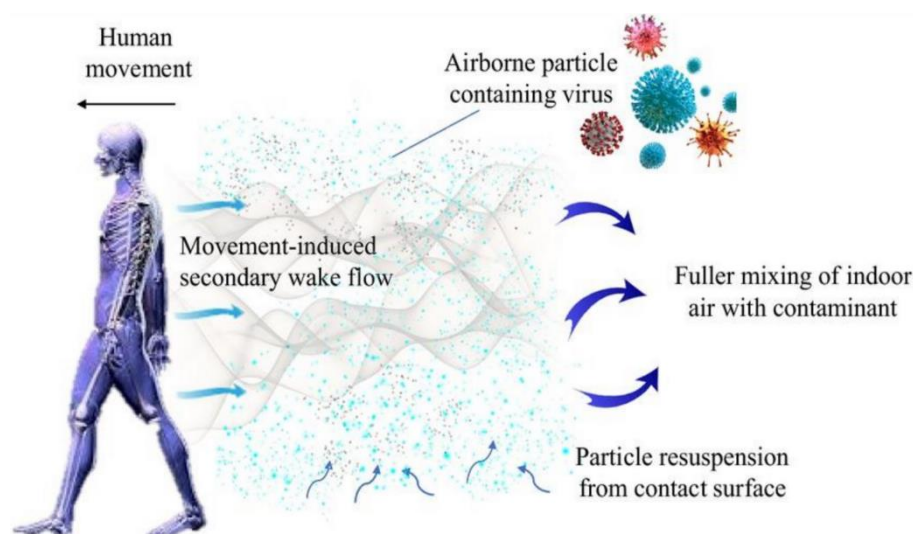


Figura 4: Influenza del movimento umano sul flusso d'aria e la diffusione dei virus (Kek et al., 2023)

Gli effetti del movimento umano sulla dinamica dell'aria interna sono complessi e vari. Può aumentare la circolazione dell'aria, migliorare la miscelazione dell'aria e delle particelle sospese e prolungare il tempo di permanenza delle particelle nell'aria. Questi fenomeni sono particolarmente rilevanti quando si esamina la trasmissione dei virus respiratori, poiché possono influenzare la diffusione delle goccioline contenenti virus in modi che i modelli di occupazione statici non riescono a indagare.

Attività come camminare, girarsi e piegarsi possono creare correnti d'aria complesse che alterano il percorso degli aerosol e delle goccioline. Paradossalmente, mentre il movimento umano può aumentare il trasporto verso il basso degli aerosol, può anche ridurre il tasso complessivo di deposito e rimozione delle particelle sospese, aumentando potenzialmente il rischio medio di infezione in ambienti confinati. Recenti studi sottolineano ulteriormente l'importanza del flusso secondario generato dal movimento umano. A differenza dei semplici disturbi del flusso d'aria, il flusso secondario si riferisce alle zone di ricircolo vorticoso che si formano a valle di un corpo in movimento e possono persistere anche dopo la cessazione del movimento. Zhao et al. (2022) hanno dimostrato che queste scie secondarie hanno un impatto notevole sull'evaporazione delle goccioline e sulla ridistribuzione degli aerosol, poiché i vortici che si formano dietro il busto e le gambe

spostano le particelle sia verticalmente che lateralmente, aumentando la durata della loro permanenza nella zona di respirazione.

Ad esempio, quando una persona cammina verso una parete con una presa d'aria, si formano due zone di ricircolo distinte: una vicina alla parte superiore della testa e un'altra intorno alla parte bassa della schiena. Questi vortici secondari differiscono dalla turbolenza primaria in quanto possono trascinare e intrappolare le particelle di aerosol, ritardandone la rimozione e consentendo il trasporto trasversale attraverso più file di persone in ambienti semi-confinati come i terminal aeroportuali. Inoltre, il movimento di un individuo può generare forti movimenti d'aria che disturbano lo strato limite che circonda il corpo umano, complicando ulteriormente la dinamica della dispersione delle particelle aerodisperse.

Il movimento umano genera flussi d'aria complessi e dinamici che influenzano in modo sostanziale la dispersione e la risospensione delle particelle negli ambienti interni. I corpi umani in movimento agiscono come oggetti ostacolanti, creando flussi di scia attraverso la separazione dell'aria. Queste scie formano un'area di miscelazione turbolenta in cui i vortici aspirano l'aria in un flusso circolatorio vicino al corpo, determinando un flusso d'aria instabile con caratteristiche specifiche che influenzano la qualità dell'aria e il movimento delle particelle, come descritto nella Fig. 5.

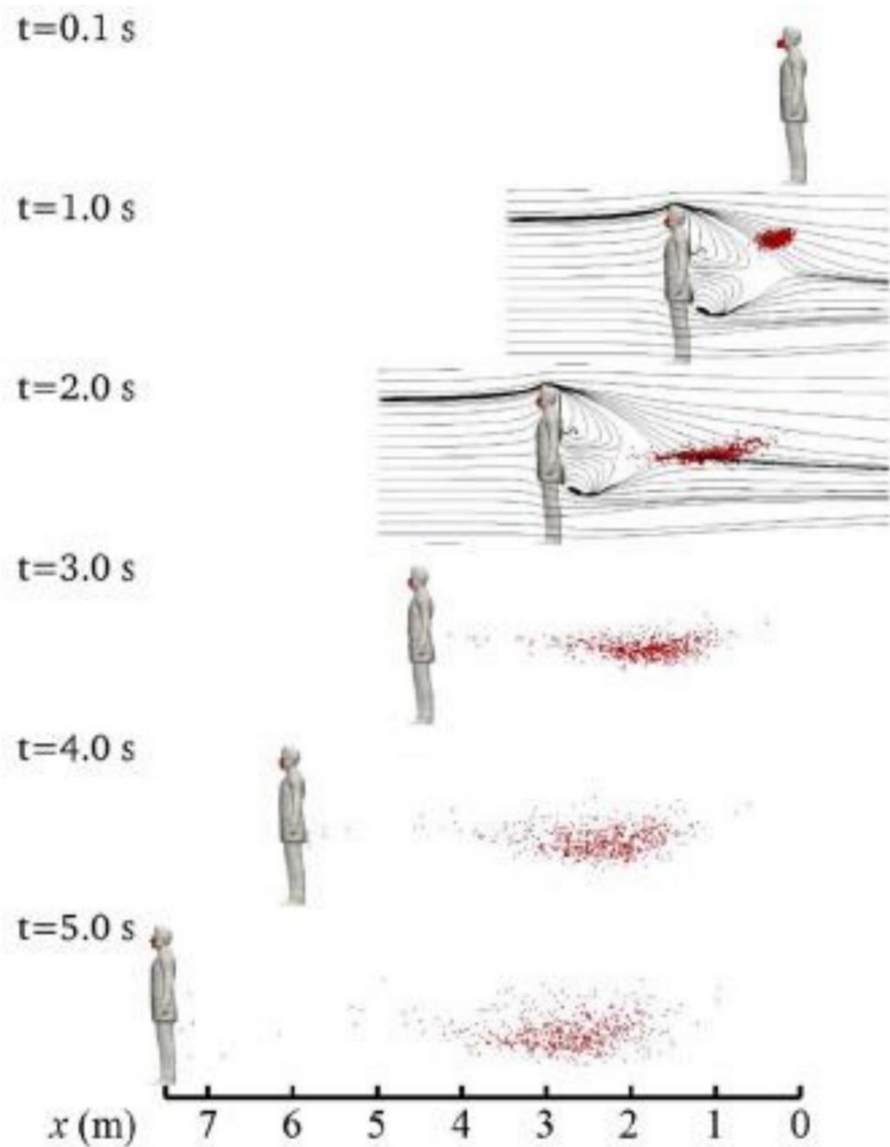


Figura 5: Dispersione delle gocce esalata (respiro) da una persona in movimento per effetto della scia (Sadeghi et al., 2025)

La struttura del flusso di scia è complessa, caratterizzata da una zona di ricircolo che si estende dalla testa alle gambe nella sua parte superiore. Ciò provoca una diffusione laterale della scia e di eventuali sostanze inquinanti dietro la parte inferiore del corpo. Tra le gambe si forma una sacca d'aria ferma, con vortici rotanti opposti nella zona di scia. I modelli di velocità in questi flussi sono influenzati da fattori quali la velocità di movimento, la distanza percorsa e la posizione nello spazio. Un movimento più veloce

comporta tempi di stabilizzazione più lunghi per il flusso d'aria, mentre le aree più lontane dal percorso del movimento subiscono una velocità dell'aria minore.

Il confronto tra il movimento rigido del corpo e il movimento naturale della camminata rivela differenze significative. La camminata crea campi di velocità irregolari e ciclici legati ai modelli di andatura, particolarmente evidenti intorno alle gambe. Ciò porta a una maggiore miscelazione e taglio dell'aria a causa delle interazioni tra le gambe in movimento e quelle ferme. Il movimento della camminata produce tipicamente velocità di picco più elevate, spesso 2-4 volte superiori a quelle dei movimenti rigidi in aree simili. Mentre il busto crea generalmente la scia più forte, la parte inferiore del corpo mostra le differenze più marcate tra i movimenti rigidi e quelli della camminata. Le simulazioni con movimento rigido, come quella esposta in Fig. 6, evidenziano velocità dell'aria deboli nella parte inferiore del corpo, mentre la camminata produce movimenti dell'aria molto più forti e ritmici dovuti al movimento degli arti.

Il calore corporeo aggiunge ulteriore complessità a questi flussi. Sebbene il contributo delle spinte di galleggiamento sia minimo durante il movimento, diventa significativo se si considera la dinamica della scia dopo l'arresto, specialmente nella parte superiore del corpo dove si formano pennacchi di calore. L'interazione tra l'aria calda ascendente e il flusso discendente dal corpo può restringere la scia rispetto a situazioni senza differenze di temperatura.

Questi flussi indotti dall'uomo influenzano in modo significativo il comportamento delle particelle, disturbando quelle sospese nell'aria e sollevando quelle depositate sui pavimenti, aumentando così l'esposizione agli inquinanti (Tao et al., 2017). La velocità di camminata è un fattore chiave in questo processo. Camminare più lentamente provoca una minore risospensione delle particelle, ma porta a una dispersione più diffusa negli spazi interni a causa dei tempi di interazione più lunghi tra il corpo e le particelle. Ciò può creare concentrazioni di particelle più elevate vicino al livello respiratorio. Al contrario, camminare più velocemente solleva inizialmente più particelle, ma comporta una minore

diffusione, con particelle che salgono a quote inferiori. Infatti, l'impatto della velocità di camminata sulla diffusione delle goccioline contenenti virus è un argomento complesso che ha recentemente suscitato notevole interesse scientifico. I nostri movimenti in spazi chiusi generano complesse correnti d'aria che influenzano in modo significativo la diffusione e la densità delle particelle sospese nell'aria, comprese quelle che possono trasportare agenti infettivi.

La letteratura disponibile indica costantemente che camminare più velocemente tende a ridurre l'esposizione ai contaminanti presenti nell'aria vicino al viso. Questo effetto deriva da vari fattori interconnessi. Camminare a passo svelto crea un movimento d'aria più forte verso il basso davanti alla persona, formando una sorta di scudo protettivo che aiuta a impedire alle particelle a livello del pavimento di salire dove potrebbero essere inalate. I modelli dell'aria intorno a un individuo in movimento sono complessi. Un movimento più rapido genera un flusso d'aria verso l'alto davanti e un rapido flusso verso il basso dietro. Ciò si traduce in una sacca d'aria immobile tra le gambe e correnti d'aria vorticosi nella scia della persona, che influenzano il modo in cui le particelle si muovono intorno a chi cammina. Un notevole vantaggio di una camminata più veloce è il contatto più breve tra l'individuo e l'aria circostante. Il movimento rapido attraverso un'area riduce il tempo trascorso in un determinato punto, diminuendo l'esposizione alle particelle sospese nell'aria in luoghi specifici. Questa interazione abbreviata contribuisce a ridurre l'esposizione complessiva ai contaminanti per coloro che si muovono più rapidamente. Il fenomeno della scia è fondamentale per comprendere in che modo la velocità di camminata influisca sulla trasmissione delle particelle e modifichi il gradiente di pressione attorno alla persona in movimento (un gradiente di pressione di circa 0,5-1 Pa). Come riportato da Tao et al. (2017), dietro una persona che cammina si forma una scia triangolare (area di bassa pressione) che aumenta di dimensioni con l'aumentare della velocità e disturba in modo significativo l'aria circostante.

È interessante notare che quest'aria disturbata continua il suo movimento in avanti per inerzia anche dopo che la persona si è fermata, mentre la scia stessa si contrae. Le diverse parti del corpo creano modelli di flusso d'aria distinti. La parte superiore del corpo tende a spingere l'aria verso l'alto davanti a sé, sollevando potenzialmente le particelle nella zona di respirazione. Tuttavia, crea anche un forte flusso verso il basso nella parte posteriore, facendo sì che le particelle seguano da vicino la superficie posteriore del corpo durante il movimento. La parte inferiore del corpo, in particolare le gambe, genera correnti d'aria verso l'alto che svolgono un ruolo chiave nel sollevare le particelle a livello del pavimento. Gli studi dimostrano che camminare più velocemente può limitare efficacemente la diffusione delle goccioline trasportate dall'aria dalla tosse. Questo effetto si estende oltre l'area circostante, con ricerche che indicano una riduzione del trasferimento di particelle dalle aree contaminate a quelle pulite quando le persone si muovono più rapidamente. La diminuzione della concentrazione di particelle non è dovuta solo alla velocità, ma anche all'aumento della turbolenza dell'aria e agli effetti elettrostatici causati dal camminare. Sebbene camminare più velocemente riduca generalmente l'esposizione immediata alle particelle trasportate dall'aria nella zona di respirazione, disturba anche in modo significativo le particelle depositate sul pavimento. Questo disturbo può far sì che le particelle precedentemente depositate tornino a essere trasportate dall'aria, aumentando potenzialmente il numero complessivo di particelle sospese in una stanza e complicando le dinamiche della trasmissione per via aerea. Pertanto, si può concludere che camminare più velocemente crea condizioni che in genere riducono l'esposizione immediata ai contaminanti vicino al viso, principalmente generando flussi d'aria protettivi e abbreviando il tempo di interazione con l'aria potenzialmente contaminata, come mostrato nella Fig. 6. Tuttavia, queste velocità più elevate aumentano anche il disturbo complessivo dell'aria, portando a modelli di dispersione delle particelle più complessi negli ambienti interni.

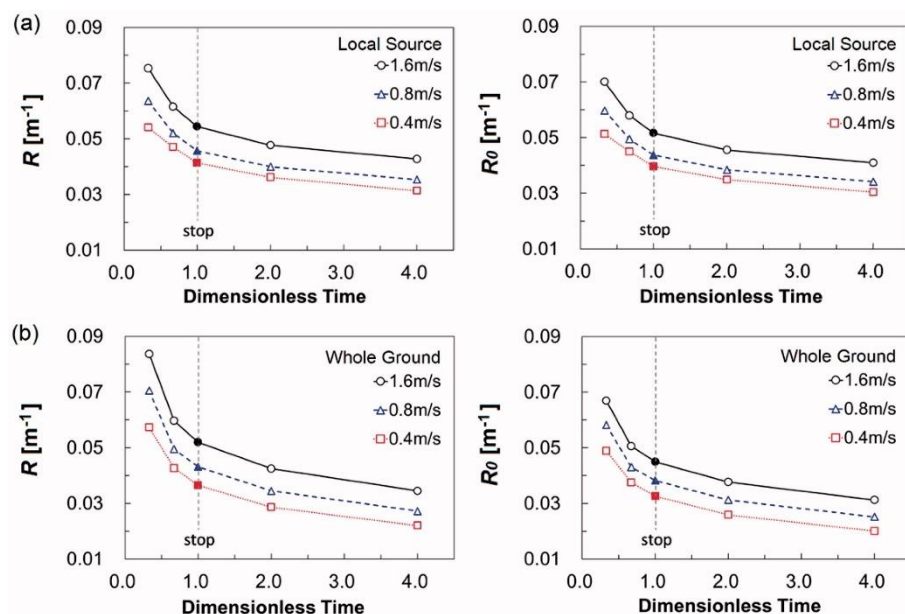


Figura 6: Confronto tra il fattore di risospensione R e R_0 delle particelle provenienti da (a) fonte locale e (b) intero terreno a tre velocità di camminata (0,4 m/s, 0,8 m/s e 1,6 m/s) in un tempo adimensionale (i marcatori solidi indicano l'arresto del movimento (Tao et al., 2017))

Il movimento umano svolge un ruolo significativo nel determinare la qualità dell'aria interna attraverso il processo di risospensione delle particelle (Sadeghi et al., 2025). Questo complesso fenomeno si verifica quando le particelle depositate vengono reintrodotte nell'aria a causa delle strutture di scia create dal movimento umano. L'impatto di questo processo sugli ambienti interni è sostanziale e multifforme, influenzato da una varietà di fattori, tra cui le proprietà delle particelle e del pavimento, le condizioni ambientali e la natura dell'attività umana all'interno dello spazio.

La meccanica della risospensione delle particelle è governata da molteplici forze, tra cui quelle di gravità e di resistenza aerodinamica che svolgono un ruolo primario. Quando le persone si muovono all'interno di uno spazio interno, creano strutture di scia che possono superare le forze di adesione che mantengono le particelle depositate sulle superfici, in particolare sui pavimenti. Precedenti studi hanno costantemente dimostrato che la maggior parte delle particelle risospese proviene dalle superfici dei pavimenti (oltre il 60% delle particelle risospese), sottolineando il ruolo fondamentale che la pulizia dei pavimenti svolge nel mantenimento di una buona qualità dell'aria interna.

È importante sottolineare che le dinamiche della risospensione delle particelle non sono semplici e possono essere controintuitive. Ad esempio, alcuni studi hanno dimostrato che aumentare il numero di persone che camminano in uno spazio può aumentare il tasso complessivo di risospensione. Ciò è probabilmente dovuto all'effetto cumulativo di più strutture di scia e all'aumento del disturbo dell'aria. Tuttavia, la relazione tra la velocità di camminata e la risospensione delle particelle presenta un quadro più complesso. È stato osservato che velocità di camminata più elevate inducono una forza discendente più forte intorno alla parte inferiore del corpo. Questa maggiore forza discendente può effettivamente sopprimere la sospensione delle particelle ad altezze inferiori (Tao et al., 2017b). Di conseguenza, camminare più velocemente può aiutare a ridurre il numero di particelle risospese che raggiungono la zona di respirazione. Inoltre, l'interazione tra abbigliamento e pelle è stata identificata come un fattore che contribuisce alla presenza di particelle biologiche aerosol nell'aria interna. Ciò aggiunge un ulteriore livello di complessità alla questione, poiché introduce una fonte di particelle direttamente associata agli occupanti umani stessi, piuttosto che solo all'ambiente costruito.

2.1.5 Analisi critica del diametro massimo di aerosolizzazione

Per quanto esposto, la valutazione del limite di aerosolizzazione, con i consueti riferimenti di $<10\ \mu\text{m}$ (aerosol vero e proprio) e $>50\ \mu\text{m}$ (droplet con moto balistico), è fuorviante. Infatti, tali valutazioni sono formulate con riferimento ad aria immobile. Per contro, come esposto, l'espulsione delle particelle, il movimento delle persone e i sistemi di ventilazione e i terminali di climatizzazione con ventilazione forzata (ad esempio ventilconvettori, sistemi split, diffusori d'aria, ecc.) generano moti dell'aria nella stanza che interagiscono con le gocce. L'entità di tale interazione dipende dalla dimensione delle goccioline e dalla velocità dell'aria, come illustrato nella Figura 3. Infatti, il rapporto tra la forza di resistenza aerodinamica e la forza di gravità è definito come (Salmanzadeh et al., 2012):

$$\frac{f_D}{f_G} = \frac{1+0.15 Re_d^{0.687}}{\tau} \frac{\|\vec{u}\|}{\|\vec{g}\|} \quad (1)$$

dove g è l'accelerazione di gravità, u è la velocità relativa dell'aria nella posizione della goccia, Re_d è il numero di Reynolds basato sulla velocità di scorrimento della goccia nel flusso e sulla viscosità cinematica del fluido, e τ è il tempo di rilassamento della goccia definito come:

$$\tau = \frac{S d^2 C_c}{18 \nu} \quad (2)$$

dove S è il rapporto tra la densità delle goccioline e la densità dell'aria, ν è la diffusività della massa d'aria e C_c è il fattore di correzione dello slittamento di Stokes-Cunningham dato da:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} (1.257 + 0.4 e^{-\frac{1.1 d}{2\lambda}}) \quad (3)$$

in cui k è il percorso molecolare medio in aria.

I risultati sono illustrati in figura 4 per diversi diametri delle gocce da 1 μm a 1 mm e flussi d'aria di diversa velocità da 0,1 m/s a 10 m/s. Se si considera preponderante una forza con intensità di un ordine di grandezza superiore, si osserva che ad una velocità inferiore a 0,1 m/s è possibile il trascinamento di particelle fino a 20 μm , per cui la classificazione di letteratura presuppone il deposito senza aerosolizzazione. Ne segue una maggiore rilevanza dei fenomeni di sospensione di particelle infette rispetto ai riferimenti ordinari di letteratura.

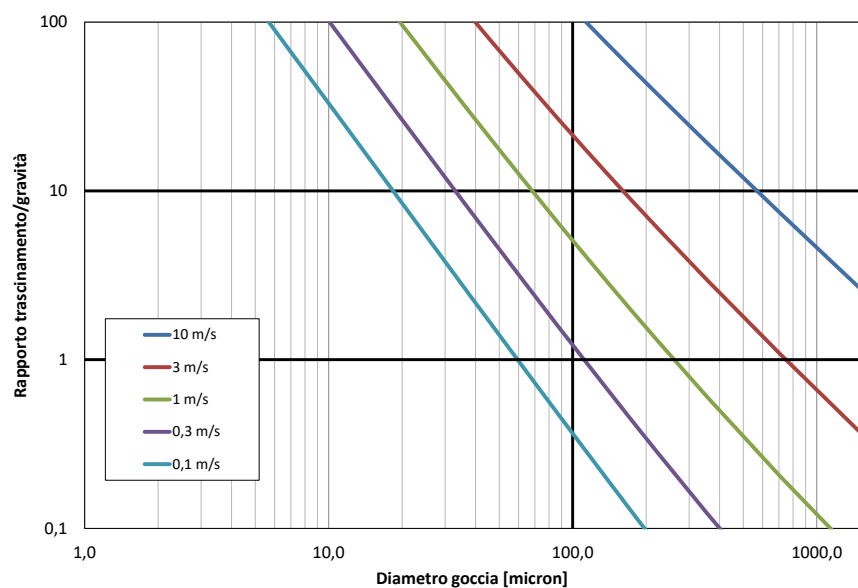


Figura 7: Rapporto tra forza di trascinamento e forza di gravità per diversi diametri e diverse velocità dell'aria

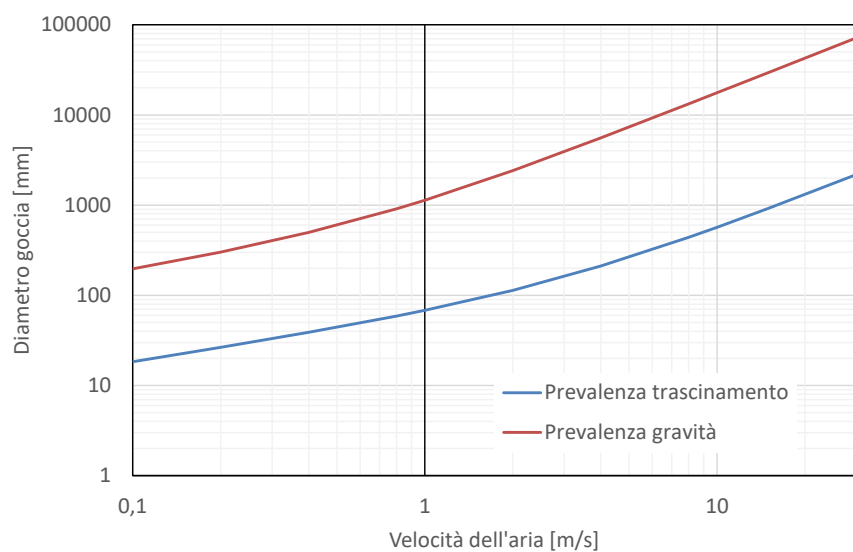


Figura 8: Limite di prevalenza delle forze di trascinamento ($R=10$) e limite di prevalenza della gravità ($R=0.1$)

2.2 Trasmissione dei patogeni

La trasmissione aerea degli agenti patogeni è stata ampiamente sottovalutata, principalmente a causa di una comprensione insufficiente del comportamento degli aerosol nell'aria e, almeno in parte, a causa dell'errata attribuzione di osservazioni aneddotiche. Data la mancanza di prove a sostegno della trasmissione tramite goccioline e

fomiti e le prove sempre più evidenti del ruolo degli aerosol nella trasmissione di numerosi virus respiratori, è stato riconosciuto che la trasmissione aerea è molto più diffusa di quanto si pensasse in precedenza.

Nel secolo scorso, si riteneva che i virus respiratori si diffondessero principalmente attraverso grandi goccioline respiratorie, prodotte dalla tosse e dagli starnuti delle persone infette, che si depositano sulle mucose degli occhi, del naso o della bocca dei potenziali ospiti (trasmissione tramite goccioline) o che si depositano sulle superfici che vengono poi toccate dai potenziali ospiti e trasferite alle mucose (trasmissione tramite fomiti). Si ritiene che tali goccioline cadano a terra entro 1-2 m dalla persona infetta: un presupposto fondamentale utilizzato dalla maggior parte delle agenzie di sanità pubblica per raccomandare una distanza di sicurezza dalle persone infette da virus respiratori.

Considerata meno comune, la trasmissione per via aerea si riferisce all'inalazione di aerosol infettivi o "nuclei di goccioline" (goccioline che evaporano nell'aria), spesso definiti come inferiori a 5 μm e che viaggiano a distanze superiori a 1-2 m dall'individuo infetto. Gli aerosol sono particelle microscopiche liquide, solide o semisolidi talmente piccole da rimanere sospese nell'aria. Gli aerosol respiratori sono prodotti durante tutte le attività espiratorie, tra cui la respirazione, il parlare, il cantare, il gridare, il tossire e lo starnutire, sia da individui sani che da quelli affetti da infezioni respiratorie (Duguid, 1946).

La carica virale degli aerosol è un fattore chiave nel determinare il contributo relativo della trasmissione per via aerea. Tuttavia, il campionamento e il rilevamento dei virus presenti nell'aria sono difficili a causa delle loro basse concentrazioni nell'aria e della loro suscettibilità alla distruzione e all'inattivazione durante il campionamento. I campioni d'aria vengono spesso analizzati per verificare la presenza di genomi virali mediante metodi di reazione a catena della polimerasi quantitativa (qPCR) o PCR quantitativa con trascrizione inversa (qRT-PCR), che sono altamente sensibili. Tuttavia, la sola presenza di materiale genetico non indica se il virus sia infettivo. La vitalità dei virus dipende

dall'integrità e dalla funzione del loro materiale genomico, delle nucleoproteine, del capside e/o dell'involucro. Sebbene alcuni studi abbiano tentato senza successo di coltivare virus dall'aria, l'uso di metodi più delicati, come un dispositivo di raccolta a condensazione liquida, ha permesso di rilevare numerosi virus respiratori vitali, tra cui i virus dell'influenza e il SARS-CoV-2 negli aerosol (Wang et al., 2021).

Molti virus sono stati isolati da campioni di aria espirata e aria interna, tra cui adenovirus, coxsackievirus, virus influenzali, rinovirus, virus del morbillo, RSV, SARS-CoV, MERS-CoV e SARS-CoV-2. La concentrazione di SARS-CoV-2 nell'aria di una stanza d'ospedale con due pazienti affetti da COVID-19 era compresa tra 6 e 74 TCID₅₀ per litro (dose infettiva mediana per litro in coltura tissutale). La distribuzione dei virioni in particelle di aerosol di diverse dimensioni è correlata al loro sito di generazione, al meccanismo di produzione e alla gravità dell'infezione nel sito di generazione, che varia a seconda dei diversi virus. Si presume comunemente che le concentrazioni virali nei campioni clinici (ad esempio, espettorato o saliva) si traducano direttamente nella concentrazione nelle goccioline e negli aerosol generati dal fluido respiratorio, ovvero che la carica virale sia proporzionale al volume iniziale delle goccioline e degli aerosol. Tuttavia, campioni di aerosol separati in base alle dimensioni raccolti nell'aria espirata da individui infetti da virus dell'influenza A o B, virus parainfluenzale, coronavirus, hRV o RSV e aria raccolta in vari ambienti mostrano che i virus sono più concentrati negli aerosol più piccoli. Nei campioni raccolti da pazienti affetti da influenza mentre respiravano, parlavano e/o tossivano, più della metà dell'RNA virale è stato trovato in aerosol <4-5 µm. Uno studio su diversi virus respiratori ha rilevato che l'RNA virale era più comune negli aerosol piccoli (<5 µm) che in quelli grandi. La distribuzione del virus dell'influenza e dell'RSV negli aerosol ambientali misurata in una clinica medica ha rivelato che il 42% dell'RNA del virus dell'influenza A, ma solo il 9% dell'RNA dell'RSV, era presente in aerosol ≤4 µm. In uno studio che ha raccolto aerosol in una clinica sanitaria, un asilo nido e aerei, più della metà dell'RNA del virus dell'influenza A è stato trovato in aerosol <2,5 µm. Uno studio ha

rilevato che un sottogruppo di pazienti affetti da COVID-19 rilascia fino a 105-107 copie del genoma SARS-CoV-2 all'ora nell'aria espirata, mentre altri non espirano virus rilevabili. L'ampia variabilità interpersonale sia nel numero di aerosol prodotti che nella loro carica virale può contribuire alla sovradisersione nella trasmissione del COVID-19, una componente cruciale negli eventi di superspreading.

Sebbene i virus infettivi siano presenti in quantità maggiore nei piccoli aerosol, resta ancora da determinare la relazione dose-risposta che regola la probabilità di infezione in seguito all'esposizione a un determinato numero di virioni. In un ospite suscettibile, la dose minima infettiva varia in base al tipo di virus e al sito di deposito all'interno delle vie respiratorie, per cui l'inalazione di aerosol più piccoli che si depositano più in profondità nei polmoni potrebbe richiedere una quantità minore di virus per dare inizio all'infezione. Studi sul virus dell'influenza hanno dimostrato che la dose necessaria per avviare l'infezione nell'uomo, in termini di unità formanti placche (PFU), è, per l'inalazione di aerosol, circa un centesimo della dose necessaria per l'inoculazione intranasale.

La sopravvivenza dei virus negli aerosol, nota anche come persistenza, stabilità o ritenzione dell'infettività, viene comunemente determinata sperimentalmente utilizzando un tamburo rotante, che consente agli aerosol di rimanere sospesi più a lungo rispetto a una camera fissa. Il decadimento del virus può essere descritto dalla cinetica di primo ordine:

$$C = C_0 e^{-k t} \quad (4)$$

dove C è la concentrazione di virus infettivi al tempo t, C_0 è la concentrazione iniziale di virus infettivi e k è la costante di velocità di inattivazione (Posada et al., 2010). La costante di velocità di inattivazione varia a seconda del virus e dipende da una serie di fattori, tra cui la temperatura, l'umidità, la radiazione UV e la composizione chimica del fluido da cui il virus è stato aerosolizzato. Questa dipendenza, in particolare dalla composizione del fluido respiratorio, rende difficile confrontare i risultati di studi diversi. Il tempo necessario per raggiungere il 99,99% di inattivazione varia da ore a mesi (Pirtle e Beran,

1991). Il tasso di decadimento può essere quantificato in termini di emivita, che è di circa 1-3 ore per SARS-CoV e SARS-CoV-2 in aerosol generati in laboratorio.

La temperatura è fondamentale nel determinare la sopravvivenza e la trasmissione dei virus negli aerosol, probabilmente influenzando la stabilità delle proteine, dei lipidi e del materiale genetico che compongono il virus. Il tratto respiratorio superiore è mantenuto a una temperatura di alcuni gradi inferiore rispetto ai polmoni, il che suggerisce una maggiore capacità di replicazione nel tratto respiratorio superiore. Il SARS-CoV, il SARS-CoV-2 e il virus dell'influenza sono più stabili a temperature più basse, forse a causa dei tassi di decadimento più lenti e del più forte ordinamento dei fosfolipidi per i virus avvolti da un involucro. Le prove epidemiologiche e gli studi sugli animali suggeriscono che la trasmissione dei virus respiratori noti per infettare le vie aeree superiori è favorita a temperature più basse.

Modulando il tasso di evaporazione e la dimensione di equilibrio degli aerosol, l'umidità relativa (RH) influisce sul loro trasporto e sulla vitalità dei virus che contengono. La stagionalità dei casi di virus influenzale, coronavirus umani che causano il raffreddore comune, RSV e altri è stata attribuita almeno in parte all'umidità relativa. La sensibilità di un virus all'umidità relativa può essere influenzata dagli effetti correlati all'umidità relativa sulla persistenza del virus nell'ambiente e/o sulle difese immunitarie. La clearance mucociliare non è altrettanto efficiente a bassa umidità relativa. Studi condotti su animali hanno dimostrato che la trasmissione del virus dell'influenza è favorita da una bassa umidità relativa; tuttavia, uno studio sul virus dell'influenza pandemica A (H1N1) del 2009 in un mezzo più fisiologicamente realistico ha riportato che il virus è rimasto altamente stabile e infettivo in un ampio intervallo di umidità relativa compreso tra il 20% e il 100% (Kormuth et al., 2018). Uno studio ha esaminato la sensibilità di 11 virus presenti nell'aria all'umidità relativa e ha scoperto che, sebbene alcuni virus a RNA sopravvivevano meglio a bassa umidità relativa, altri virus sopravvivevano meglio ad alta umidità relativa (Songer, 1967). La relazione tra umidità relativa e vitalità dei virus nelle

goccioline e negli aerosol è caratteristica del virus, modulata sia dalle proprietà fisico-chimiche intrinseche del virus stesso sia dall'ambiente circostante.

La radiazione UV è da tempo riconosciuta come un approccio efficace per inattivare i virus presenti nell'aria, compresi il virus dell'influenza, il SARS-CoV e altri coronavirus umani.

Le radiazioni UV inattivano rapidamente il SARS-CoV-2 nei terreni di coltura e negli aerosol alle lunghezze d'onda presenti nella luce solare a livello del suolo. Le radiazioni UV danneggiano il materiale genetico, portando all'inattivazione del virus.

Una volta inalati, gli aerosol carichi di virus possono depositarsi nel tratto respiratorio di un potenziale ospite. Anche in questo caso, la dimensione degli aerosol è fondamentale per determinare il sito di deposito, sebbene numerosi fattori anatomici, fisiologici e aerodinamici (tra cui la struttura anatomica delle vie aeree, i modelli respiratori, l'aerodinamica del trasporto degli aerosol nel tratto respiratorio e le proprietà fisico-chimiche degli aerosol inalati) influenzino il modello di deposito. L'infezione può avere inizio nel sito di deposito se il virus rimane infettivo e sono presenti recettori appropriati. Gli aerosol fino a 100 μm possono essere inalati. A seconda delle loro dimensioni, si depositano in diverse regioni delle vie respiratorie, in base a uno dei diversi meccanismi chiave, tra cui l'impatto inerziale, la sedimentazione gravitazionale, la diffusione browniana, la precipitazione elettrostatica e l'intercettazione. Una volta inalati, gli aerosol possono aumentare di dimensioni a causa della crescita igroscopica nel tratto respiratorio quasi saturo. Lo International Committee for Radiological Protection (ICRP) ha sviluppato un modello, basato sull'architettura polmonare umana, che quantifica l'efficienza di deposito in funzione delle dimensioni degli aerosol (Guha et al., 2014). Gli aerosol $>5 \mu\text{m}$ si depositano principalmente nella regione rinofaringea (87-95%), soprattutto attraverso l'impatto inerziale e la sedimentazione gravitazionale; sebbene anche gli aerosol $<5 \mu\text{m}$ si depositino in questa zona, essi possono anche penetrare più profondamente nei polmoni e depositarsi nel lume alveolare. La diffusione browniana è il meccanismo di deposito dominante delle particelle inalate $<0,1 \mu\text{m}$ nelle regioni bronchiolari e alveolari. Gli aerosol

che trasportano carica elettrostatica naturale possono essere attratti dalle pareti delle vie aeree. Se nel sito di deposito è presente un recettore cellulare, può avere inizio l'infezione. L'efficienza dell'infezione è ulteriormente regolata dalla distribuzione dei recettori cellulari lungo le vie respiratorie e dall'interazione virus-ospite.

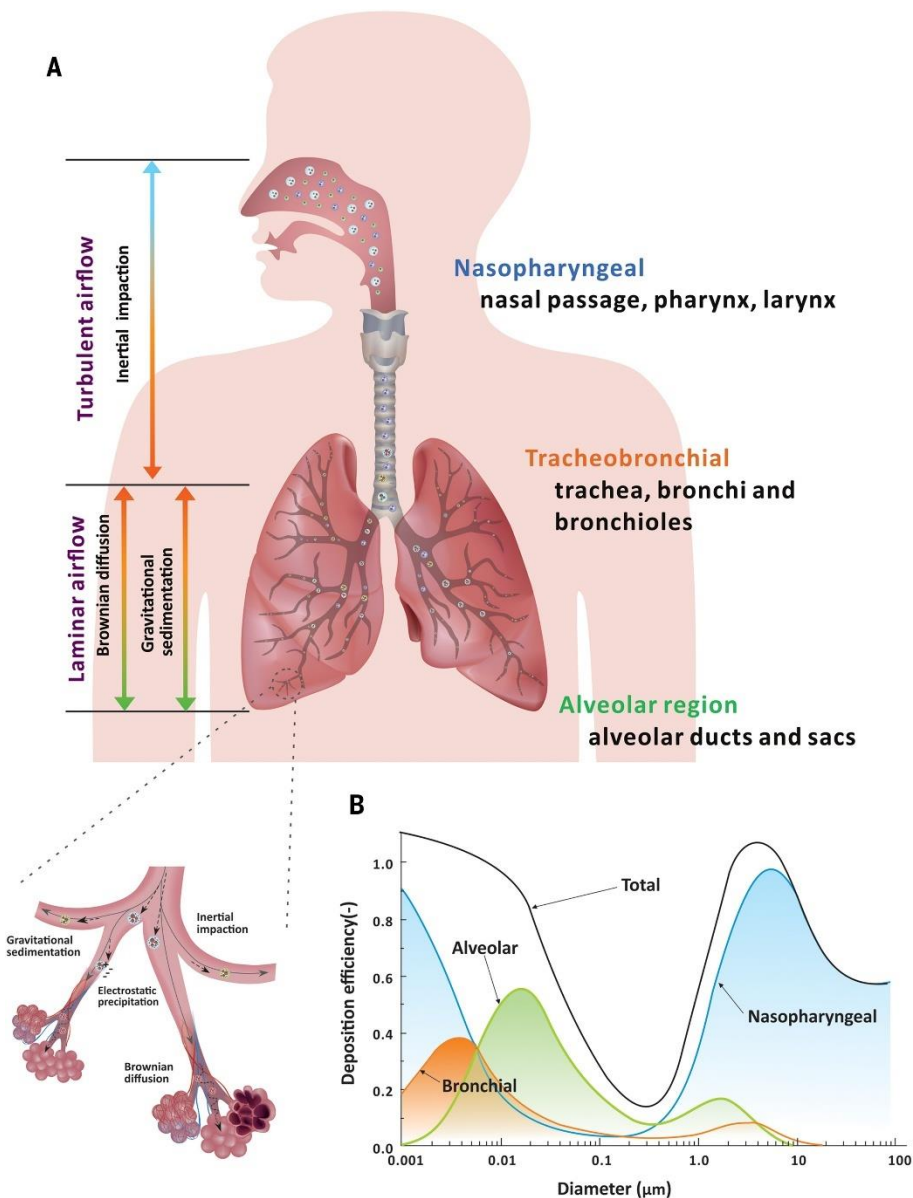


Figura 9: Schematizzazione della penetrazione e deposizione degli aerosol nelle vie aeree (Hinds, 1999)

Il deposito di aerosol nei polmoni malati può differire da quello nei polmoni normali a causa dei cambiamenti nella struttura della superficie delle vie aeree e dell'ostruzione da parte del muco. I cambiamenti nelle proprietà superficiali dell'epitelio respiratorio nelle

vie aeree asmatiche e il restringimento delle vie aeree a causa della broncopneumopatia cronica ostruttiva (BPCO) alterano il flusso d'aria e il comportamento aerodinamico degli aerosol inalati, modificandone così le dinamiche e i siti di deposito. Il deposito è generalmente più elevato nei pazienti con BPCO rispetto agli individui sani; il deposito bronchiale è più elevato nei pazienti con asma e bronchite cronica.

Poiché i virus sono concentrati in piccoli aerosol ($<5\ \mu\text{m}$), possono penetrare più in profondità e depositarsi nel tratto respiratorio inferiore. È stato riportato che la carica virale del SARS-CoV-2 è più elevata e che il virus persiste più a lungo nel tratto respiratorio inferiore rispetto al tratto respiratorio superiore. L'insorgenza di un'infezione nel tratto respiratorio inferiore aggiunge difficoltà tecniche alla diagnosi dei pazienti, poiché gli screening di più semplice attuazione prevedono il prelievo di campioni dalla cavità nasofaringea o orale mediante tamponi.

3 Interazioni degli impianti

Gli impianti di ventilazione e di climatizzazione interagiscono con la diffusione dei patogeni con diverse modalità: l'immissione di aria priva di cariche patogene comporta la fuoriuscita dell'aria contaminata da aerosol determinando una diluizione e conseguente riduzione del rischio di trasmissione; la temperatura e l'umidità relativa, oltre ad incidere sulla vitalità dei patogeni, modificano l'evoluzione delle gocce, modificandone l'evaporazione e la conseguente aerosolizzazione; la distribuzione dell'aria altera le traiettorie dei patogeni, ostacolando oppure favorendo la trasmissione interpersonale, nonché promuovendo gradienti di concentrazione.

3.1 Ventilazione

I sistemi di ventilazione svolgono un ruolo fondamentale nella gestione della qualità dell'aria interna e nella riduzione del rischio di trasmissione di virus presenti nell'aria, in particolare in ambienti ad alta densità di occupazione.

La ventilazione è l'apporto di aria a un edificio, o a uno spazio all'interno di un edificio, per fornire ossigeno agli occupanti e rimuovere l'anidride carbonica espirata. Consente inoltre di controllare la temperatura e l'umidità che determinano la qualità dell'aria interna. La ventilazione trasporta anche gli inquinanti dall'esterno all'interno di un edificio e distribuisce e rimuove gli inquinanti interni. Sia negli edifici ventilati naturalmente che in quelli ventilati meccanicamente, nel contesto dell'esposizione personale e del comfort, vi sono due aspetti da considerare: il tasso di ricambio e la conformazione del flusso.

Entrambi questi aspetti sono determinati dalla posizione delle prese d'aria e delle bocchette di scarico, dalla geometria interna, dalla forma e dall'intensità delle fonti interne di calore e di inquinanti e dagli stessi occupanti.

Il calore viene generato internamente attraverso i guadagni solari, gli occupanti, le attrezzature e i dispositivi di riscaldamento. Sebbene lo scambio di calore si verifica anche

attraverso l'involucro dell'edificio, negli edifici moderni ben isolati i guadagni di calore interni vengono contrastati dalla ventilazione, tranne che in alcune parti del mondo con climi più estremi. Inoltre, poiché l'aria calda è soggetta ad una spinta di galleggiamento, salendo sotto forma di pennacchio turbolento, l'aria all'interno di una stanza è quasi sempre stratificata in modo stabile, con l'aria più calda vicino al soffitto e quella più fredda vicino al pavimento.

La presenza di stratificazione ha un'influenza profonda sul flusso. In presenza di una singola apertura quando non c'è troppo vento, ad esempio una porta o una finestra in una stanza altrimenti sigillata, l'aria calda uscirà dalla parte superiore e l'aria più fredda entrerà dalla parte inferiore dell'apertura (Dalziel & Lane-Serff 1991). Se la parte superiore dell'apertura è al di sotto del soffitto, si forma uno strato superiore caldo che è scarsamente ventilato e può intrappolare gli inquinanti (Davies Wykes et al. 2020). Si cerca di evitare questa situazione, ad esempio introducendo aria fredda al soffitto in una stanza climatizzata: quest'aria fredda scende come un pennacchio ed è progettata per mescolarsi con l'aria della stanza. Tuttavia, si tratta di un classico flusso "a tampone" (Baines & Turner 1969) che porta a una stratificazione stabile debole, e la conseguente diluizione dell'aria fredda (fresca) riduce il suo impatto sulla composizione e sulla temperatura dello spazio. I sistemi a basso consumo energetico, come la ventilazione naturale o meccanica a dislocamento e i sistemi di climatizzazione a pavimento (Liu & Linden 2006), sfruttano questa stratificazione utilizzando le forze di galleggiamento associate per favorire il flusso. Questi sistemi introducono aria fresca e/o fredda a livelli bassi e rimuovono l'aria calda inquinata a livelli alti, utilizzando forze di pressione naturali o forzature meccaniche (Linden et al. 1990, Linden 1999). Questa forma di stratificazione porta a una variabilità spaziale ancora maggiore della temperatura e della "età" dell'aria all'interno di uno spazio (Vouri et al. 2023).

Nonostante l'ubiquità delle variazioni di densità, molti modelli di esposizione personale presuppongono che gli interni delle stanze siano ben miscelati, il che consente di calcolare

le proprietà degli interni come se non vi fossero variazioni spaziali e dipendessero solo dalla velocità di ventilazione complessiva. Sebbene si tratti di un'approssimazione utile che può fornire stime di primo ordine dell'esposizione, è importante tenere presente che non rappresenta tutto il fenomeno. La variazione delle proprietà dell'aria all'interno degli spazi rende molto difficile da calcolare la meccanica dei fluidi degli spazi interni. La geometria è complicata, i flussi dipendono dal tempo, i numeri di Reynolds sono elevati e, anche senza convezione naturale, il flusso può essere tutt'altro che semplice. Ad esempio, il caso apparentemente semplice della ventilazione trasversale isoterma guidata dal vento attraverso finestre uguali sui lati opposti di un edificio può portare a forti zone di ricircolo che possono intrappolare gli inquinanti (Carrilho da Graça et al. 2015).

Nella sua forma più semplice, la concentrazione φ di un inquinante obbedisce alla seguente equazione

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\mathbf{u} - W_s \hat{\mathbf{z}}) \cdot \nabla \varphi = S_\varphi(\mathbf{x}, t) \quad (5)$$

dove $S_\varphi(\mathbf{x}, t)$ rappresenta le fonti e i pozzi dell'inquinante e W_s è la sua velocità di sedimentazione, considerata pari a $W_s = 0$ se l'inquinante è gassoso. Nell'equazione sono trascurati l'effetto inerziale e la diffusione molecolare, mentre la spinta di galleggiamento influenza l'equazione della quantità di moto. Per un inquinante passivo (che non influisce sulla densità del flusso d'aria) la linearità dell'equazione (5) può semplificare alcuni aspetti; infatti, per la trasmissione delle malattie un modello lineare tra esposizione e rischio di infezione è sufficientemente affidabile. Per il particolato, anche la distribuzione delle dimensioni è importante perché può avere un impatto significativo sulla distanza che le particelle possono percorrere nel sistema respiratorio e sul fatto che le particelle si depositino lì o vengano semplicemente espulse. Inoltre, l'età di un contaminante può svolgere un ruolo chiave, in particolare quando il contaminante ha un'origine biologica o una componente volatile.

Si noti che $W_s \neq 0$ complica notevolmente l'analisi, non solo nella modellizzazione, ma anche per qualsiasi esperimento o misurazione in situ. La sedimentazione gravitazionale introduce un'irreversibilità o una direzione preferenziale al flusso e modifica il modo in cui possono essere formulati semplici argomenti di conservazione della massa. La velocità verticale w del flusso d'aria in uno spazio diventa molto importante perché le particelle non rimangono mescolate nel flusso se $w < W_s$. Anche se $w \gg W_s$ all'interno della stanza, vicino al pavimento (o altra superficie adatta), w diminuirà e consentirà alle particelle di sedimentare. Pertanto, anche per una stanza ben miscelata dove $w \gg W_s$ all'interno, ci sarà un flusso di deposizione per unità di superficie.

Quando il volume di una stanza V è ben miscelato e ventilato con portata Q_f con aria esterna contenente una concentrazione di inquinanti gassosi φ_0 , la concentrazione (assunta uniforme) φ all'interno dell'ambiente soddisfa

$$V \frac{\partial \varphi}{\partial t} = Q_f (\varphi_0 - \varphi) \quad (6)$$

il che implica che, se inizialmente $\varphi = \varphi_i$, la concentrazione interna evolve come

$$\varphi(t) = \varphi_0 + (\varphi_i - \varphi_0) e^{-\frac{1}{V} \int Q_f dt} \quad (7)$$

fino a raggiungere lo stato stazionario $\varphi = \varphi_0$.

Per un inquinante particellare monodisperso con velocità di sedimentazione delle particelle W_s , ci sarà un flusso di deposito sul pavimento (e su altre superfici orizzontali rivolte verso l'alto) di $Q_d = \varphi A_f W_s$ aggiunto al lato destro dell'equazione 2. Per un Q_f costante, la concentrazione interna è definita dalla seguente equazione:

$$\varphi(t) = \frac{Q_f}{Q_f + A_f W_s} \left(\varphi_0 + (\varphi_i - \varphi_0) e^{-\frac{Q_f + A_f W_s}{V} t} \right) \quad (8)$$

riducendo sia la concentrazione allo stato stazionario (rispetto al valore esterno φ_0) sia la scala temporale dell'evoluzione.

Invece di uno spazio ben miscelato, si consideri una stanza con superficie A_f e altezza H stratificata in due strati. Supponiamo che una portata volumetrica Q_f di aria esterna sia miscelata nello strato inferiore di profondità h contenente la concentrazione φ_L e che lo stesso flusso volumetrico di aria sia estratto dallo strato superiore ben miscelato di profondità $H - h$ e concentrazione φ_U . Supponiamo inoltre che i processi all'interno della stanza comportino un flusso Q_{LU} di aria dallo strato inferiore a quello superiore. La conservazione della massa si esprime:

$$A_f \cdot h \frac{\partial \varphi}{\partial t} = Q_f \varphi_0 - Q_{LU} \varphi_L + W_s \cdot A_f \cdot (\varphi_U - \varphi_L) \quad (9)$$

$$A_f \cdot (H - h) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = Q_{LU} \varphi_L - Q_f \varphi_U - W_s \cdot A_f \cdot \varphi_U \quad (10)$$

È possibile raggiungere uno stato stazionario con $0 < h < H$ se $Q_{LU} = Q_f$. Nel caso in cui $W_s = 0$, le variazioni di φ_0 causeranno una variazione di φ_L (solitamente lo strato occupato) più rapida rispetto a quando lo spazio è ben miscelato, a causa del suo volume inferiore. Nel caso di particolato introdotto attraverso il sistema di ventilazione, allo stato stazionario la presenza di un flusso discendente di particelle attraverso l'interfaccia significa che lo strato inferiore conterrà una concentrazione di particelle maggiore rispetto allo strato superiore. Per comprendere le esigenze di ventilazione, è importante determinare in che modo essa influisca sul rischio rispetto ad altri interventi (ad esempio, uso di mascherine, limiti di occupazione) e valutare quanta ventilazione sia necessaria per ottenere un effetto significativo sul rischio di trasmissione.

Come punto di partenza, ipotizziamo che le particelle infettive con una concentrazione numerica φ_n siano distribuite uniformemente in uno spazio. Una persona all'interno dello spazio inalerà quindi particelle infettive ad un tasso proporzionale alla portata d'aria di respirazione. Alcune di queste particelle saranno semplicemente espirate di nuovo; altre atterreranno all'interno del tratto respiratorio in punti in cui la particella non è in grado di infettare; solo un sottoinsieme di particelle atterrerà in un sito vulnerabile dove l'infezione può attecchire. Per un'infezione virale, le particelle devono atterrare su un recettore

attraverso il quale il virus può entrare nella cellula, consentendogli di prendere il controllo del meccanismo riproduttivo della cellula. Supponiamo che la probabilità che una particella inalata si leghi con successo a un recettore sia Γ . Se ci sono N particelle identiche indipendenti e Γ è costante, se N è grande e il numero atteso di depositi infettivi $D = \Gamma \cdot N$ è piccolo, possiamo approssimare questa probabilità con la distribuzione di Poisson, essendo J il numero di particelle che raggiungono un recettore:

$$P(J|N) = \frac{Q^J \cdot e^{-D}}{J!} \quad (11)$$

Se l'infezione si verifica a seguito di un singolo atterraggio riuscito, allora:

$$P(J \geq 1|N) = 1 - P(J = 0|N) = 1 - e^{-D} \quad (12)$$

Per procedere, dobbiamo determinare il numero di particelle infettive che un individuo può inalare (il che richiede la conoscenza di J) e Γ . Entrambi sono difficili da misurare direttamente. Tuttavia, determinare $D = \Gamma \cdot N$ è più semplice secondo le statistiche degli studi comparativi (ad esempio, Wells 1955) o i dati epidemiologici. Pertanto, è conveniente scalare introducendo il concetto di quantum di infezione come $D = \Gamma \cdot N$, in modo tale che $P(\text{infezione}) = 1 - e^{-D}$, e notare che con $D = 1$ si prevede che una frazione $1 - e^{-1} \approx 0,63$ delle persone venga infettata (Wells 1955). Per ricollegare i quanti presenti nella stanza al numero di individui infettivi presenti nella stanza, definiamo quindi il tasso di generazione dei quanti q (con unità di per unità di tempo) dalla media della popolazione del tasso al quale si verificano le infezioni.

La ventilazione svolge quindi un ruolo nel collegare q a D in un dato spazio. Supponiamo che ci siano n_i persone infette in una stanza con una portata di ventilazione Q_i . Se ogni persona infetta genera quanti al tasso q , allora la concentrazione di quanti allo stato stazionario è

$$\varphi_q = \frac{I \cdot q}{Q_f} \quad (13)$$

Sostituendo a Q il prodotto di φ_q per il volume d'aria inalato da un individuo nel tempo t si ottiene l'equazione di Wells-Riley (Wells 1955, Riley et al. 1978):

$$P(t|n_i) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{I \cdot q \cdot p}{Q_f} \quad (15)$$

In cui p è la portata d'aria inalata da una persona. In questo caso, un evento di trasmissione è definito come il risultato in cui un determinato individuo viene infettato attraverso l'inalazione di particelle infettive, con una probabilità pari a $P(D \geq 1)$. Il parametro λ può essere considerato come il tasso di trasmissione previsto dello spazio che tiene conto del numero di persone infette n_i e del tasso di ventilazione Q_f . Questo tasso ha dimensioni di quanti per unità di tempo (tenendo presente che il quanto è un numero, λ può essere espresso in s^{-1} o h^{-1} , ad esempio).

Il ridimensionamento statistico utilizzato nelle definizioni di D e q consente di confrontare la contagiosità delle malattie in termini di quest'ultimo. Il tasso di generazione q è influenzato da fattori quali il tipo e la variante dell'agente patogeno, e la determinazione di questi valori dai dati epidemiologici comporta notevoli incertezze. Ciononostante, q è fondamentale per modellare la trasmissione delle malattie negli spazi interni. Per le varianti Alpha, Delta e Omicron del COVID-19, i valori di q riportati sono rispettivamente 89-165, 312-935 e 557-2.345 (Cheng et al. 2022, Dai & Zhao 2023). In confronto, per altre malattie q è 570-5.600 per il morbillo (Sze To & Chao 2010), 10-300 per la SARS (OMS 2003, Liao et al. 2005), 6-140 per la MERS (sindrome respiratoria mediorientale) (OMS 2019, Dai & Zhao 2020) e 150-500 per l'influenza (Rudnick & Milton 2003, Beggs et al. 2010). Si noti, tuttavia, che sia la velocità con cui le particelle infettive vengono generate da una persona infetta sia la suscettibilità delle altre persone presenti nella stanza variano.

La concentrazione di virus va diluita il più possibile aumentando la portata di aria esterna di rinnovo. Negli ambienti indoor la ventilazione dei locali è un elemento di prevenzione

che si aggiunge alla distanza di sicurezza di un metro. Quest'ultima, come ben evidente in ambienti ospedalieri, da sola non è una condizione sufficiente per contrarre il coronavirus.

Utilizzando la formula messa a punto da Knibbs e coll (2011):

$$N_t = \frac{q \cdot I}{n} + \left(N_0 - \frac{q \cdot I}{n} \right) * e^{-n \cdot t} \quad (16)$$

dove

I = numero di persone infette;

n = tasso di ventilazione (ricambi orari), cioè rapporto tra la portata d'aria esterna di rinnovo e il volume dell'ambiente, h⁻¹ (volumi/h);

t = tempo, h;

N₀ = numero di cariche virali elementari presenti all'istante 0;

è possibile calcolare il numero complessivo delle cariche virali elementari nel tempo t (N_t)

Da questa equazione deriva che maggiore è la portata d'aria di rinnovo, maggiore è il tasso di ventilazione, minore è il numero di cariche virali elementari presenti in ambiente. Per poter calcolare il numero di cariche virali al tempo t consideriamo il numero di copie di virus che sono necessarie per causare un'infezione (D₅₀), che per l'influenza è pari a 720 (Schröder 2020) e che per il SARS-CoV-2 è pari a 316 (Lelieveld 2020), otteniamo un rapporto pari a 2.5. Considerando, inoltre, quanto accade per l'influenza, che presenta un valore di q = 67/h, e il valore di q per il SARS-CoV2 pari a 26,8/h, e si ottengono le variazioni osservate nella Figura 10.

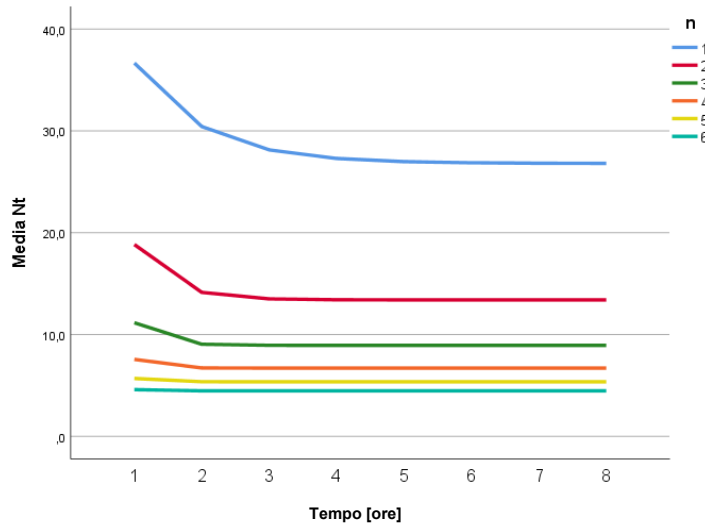


Figura 10: Variazioni nella carica virale elementari di SARS-CoV2 in ambiente per ogni persona infetta, per diversi valori di tasso di ventilazione

Con un tasso di ventilazione pari a 1 volumi/h, il numero di cariche virali elementari comincia a stabilizzarsi dopo la quarta ora su valori pari a circa 28 cariche virali elementari. Aumentando la portata di aria esterna fino a raggiungere un tasso di ventilazione $n = 3$ volumi/h, il numero di cariche virali elementari si stabilizza dalla seconda ora, con valori al di sotto di 10 cariche virali elementari. Migliori performance si ottengono aumentando ancora la portata di aria esterna fino a ottenere $n = 6$ volumi/h, tipico degli impianti a tutta aria in configurazione free-cooling, il numero finale di cariche virali elementari dopo 2 ore è di 4,46 e rimane costante.

La ventilazione degli ambienti (con aria esterna) garantisce la diluizione delle sostanze generate in ambiente. Come illustrato dall'eq. (16), l'incremento della portata di ventilazione comporta una riduzione della carica virale in ambiente a parità di carica iniziale, di generazione in ambiente (numero di soggetti infetti) e di carica virale iniziale. In particolare, la carica virale a regime, in presenza continuativa di un numero costante di soggetti infetti è inversamente proporzionale alla portata di ventilazione, come illustrato dall'eq. (16) e dalla Figura 11:

$$N_{regime} = \lim_{t \rightarrow \infty} N_t = \frac{q \cdot I}{n} \quad (17)$$

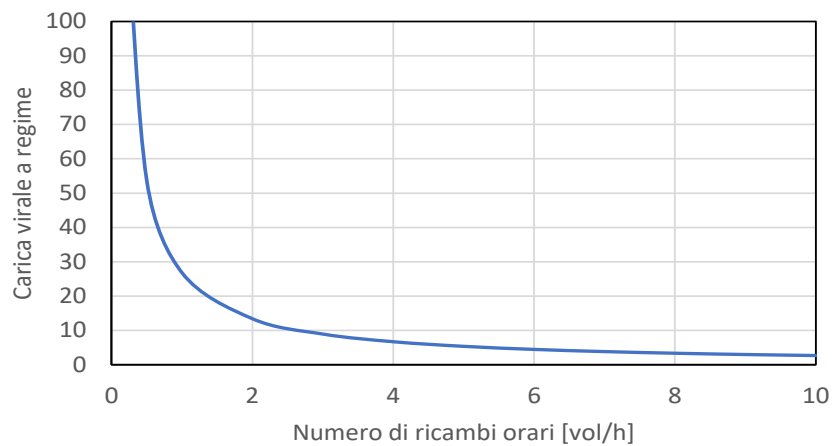


Figura 11: Carica virale media a regime in ambiente in relazione alla portata di ventilazione in presenza continuativa di un singolo soggetto infetto

Si osserva che con ridotta ventilazione, inferiore a 2 vol/h, si ha un rapido incremento della carica virale in ambiente. Per contro, incrementi della portata oltre i 4 vol/h comportano un vantaggio marginale. In particolare, poiché la carica virale non è distribuita in modo uniforme in ambiente, portate d'aria superiori non garantiscono di per sé una riduzione della concentrazione della carica virale.

Ai fini della ventilazione è necessario che l'aria immessa in ambiente sia priva di cariche patogene. Ciò è generalmente realizzabile mediante l'utilizzo di aria esterna. In alternativa, è possibile il ricircolo di aria ambiente opportunamente filtrata e sterilizzata.

3.2 Temperatura e umidità

La rilevanza delle condizioni di temperatura e umidità relativa ambiente sulla sopravvivenza del virus sono controverse, senza effetti apprezzabili entro gli intervalli di valori compatibili con il benessere. Inoltre, il tempo di sopravvivenza è piuttosto prolungato, con tempo di dimezzamento dell'ordine di 1 ora (Doremalen et al. 2020), tanto da rendere tale aspetto marginale rispetto all'asportazione per ventilazione.

Per contro, le condizioni di temperatura e umidità relativa dell'aria ambiente possono favorire o ostacolare l'evaporazione delle gocce di espettorato, aumentando o diminuendo la quantità di aerosol formato a parità di altre condizioni.

È stato quindi sviluppato un modello di trascinamento ed evaporazione delle gocce espettorate sulla base delle impostazioni del modello di Miller et al. (1998) per l'evaporazione di gocce d'acqua, con le correzioni necessarie per le differenze esistenti tra la composizione dell'acqua e della saliva e con il modello semplificato di getto non isoterma introdotto da Xie et al. (2007).

3.2.1.1 Modello di simulazione

La simulazione è stata realizzata risolvendo le seguenti equazioni differenziali:

$$\frac{dV_x}{dt} = \left(\frac{f_1}{\tau_d}\right) (V_{a,x} - V_x) \quad (18)$$

$$\frac{dV_y}{dt} = \left(\frac{f_1}{\tau_d}\right) (V_{a,y} - V_y) + g \quad (19)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{3} \frac{Nu c_a}{Pr c_w \tau_d} (T_a - T) - \frac{1}{3} \frac{\lambda_v Sh H_M}{Sc c_w \tau_d} \quad (20)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{1}{3} \frac{Sh H_M}{Sc c_w \tau_d} m \quad (21)$$

In cui V , T ed m sono, rispettivamente, velocità, temperatura e massa della goccia, V_a e T_a sono velocità e temperatura dell'aria circostante, g è l'accelerazione di gravità, t è il tempo, λ_v è il calore latente di evaporazione, c_a e c_w sono i calori specifici a pressione costante di acqua e aria. Gli altri simboli sono così definiti:

$$f_1 = \frac{1+0.545 Re+0.1 Re^{\frac{1}{2}}(1-0.03 Re)}{1+a Re^b} \quad (22)$$

$$a = 0.09 + 0.077 e^{-0.4 Re}$$

$$b = 0.4 + 0.77 e^{-0.04 Re}$$

$$\tau_d = \frac{\rho_w d^2}{18 \mu \Phi} \quad (23)$$

$$\Phi = 1 + 0.15 Re^{0.687} \quad (24)$$

$$Re = \frac{\rho_a |V - V_a| d}{\mu} \quad (25)$$

$$Nu = 2 + 0.552 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

$$Pr = \frac{\mu c_a}{k_a} \quad (27)$$

$$Sh = 2 + 0.552 Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho_a \Gamma} \quad (29)$$

$$H_M = \ln \left(1 + \frac{x - x_a}{1 - x} \right) \quad (30)$$

$$x = 0.622 \frac{p_d}{p_a - p_d} \quad (31)$$

$$p_d = \frac{p_{sat}(T)}{1 + \frac{m_s M_w l}{m M_s \rho_w}} \quad (32)$$

Il sistema di equazioni differenziali (18-21) è risolto unitamente alle equazioni (22-32) con formulazione implicita del primo ordine e parametri calcolati iterativamente al valore medio del passo temporale. La validazione del modello con i dati sperimentali di letteratura riportati in Xie et al. (2007) ha dato esito positivo.

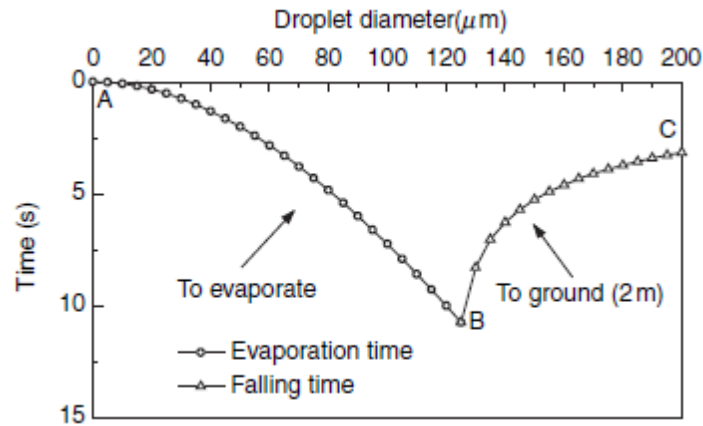


Figura 12: Tempo di aerosolizzazione e di caduta delle particelle espettorate, valori per temperatura ambiente 18°C con U.R. 0%, (Xie et al., 2007)

Le gocce sono considerate emesse isotachiche e isoterme con l'aria espirata. Il getto espirato è a 33°C pressoché saturo. Si presume che gocce di diametro inferiore a 5 μm abbiano formato aerosol. Inoltre, si presume che le gocce siano emesse ad un'altezza dal suolo di 1.6 metri. Una volta raggiunta la quota del pavimento si presume che la goccia aderisca al pavimento senza formazione di gocce secondarie.

Tale modello fornisce dati in accordo con quanto rilevato da Xie et al. (2007) con aerosolizzazione delle particelle di piccolo diametro e adesione al suolo di particelle di

diametro maggiore, come illustrato in Figura 12. Si osserva l'esistenza di un diametro limite che separa il "destino" delle particelle: la formazione di aerosol o la caduta al suolo. Il valore di tale diametro limite dipende dalle condizioni ambientali. Le simulazioni svolte hanno evidenziato che il diametro massimo di aerosolizzazione dipende in modo diretto dalla temperatura e inverso dall'umidità relativa, come illustrato nelle Figure 13-15.

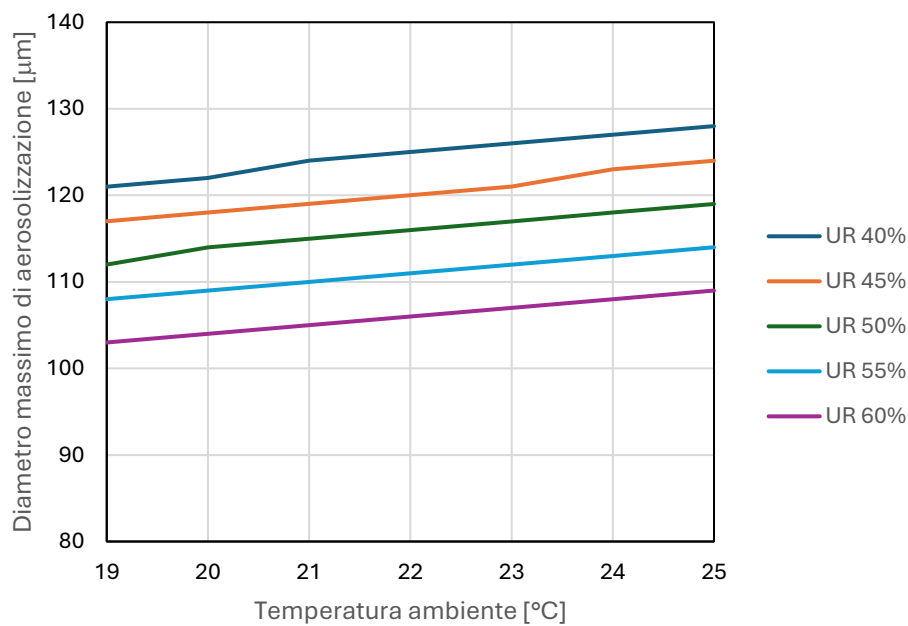


Figura 13: Diametro limite di aerosolizzazione per emissioni da parlato (velocità di emissione 5 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa

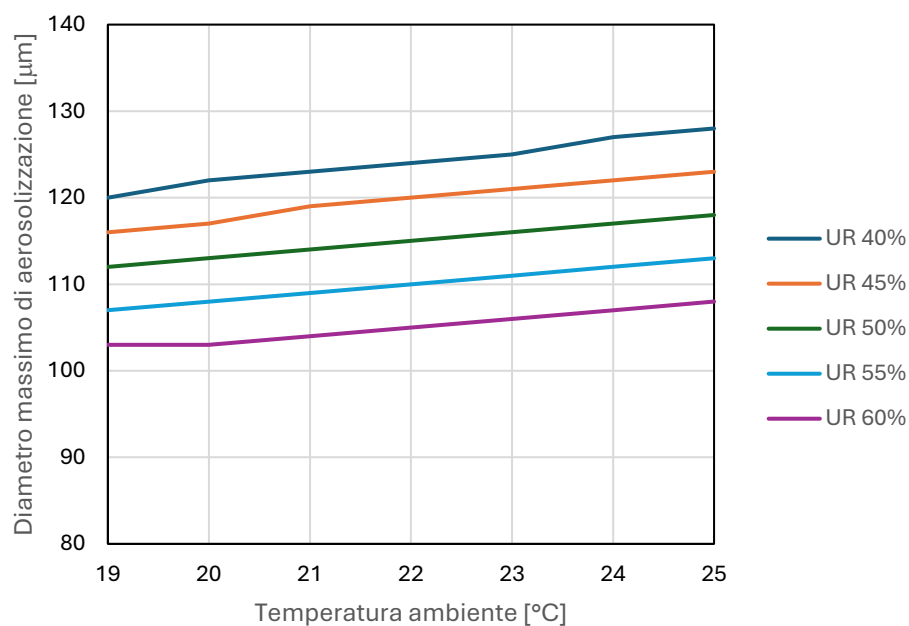


Figura 14: Diametro limite di aerosolizzazione per emissioni da tosse (velocità di emissione 20 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa

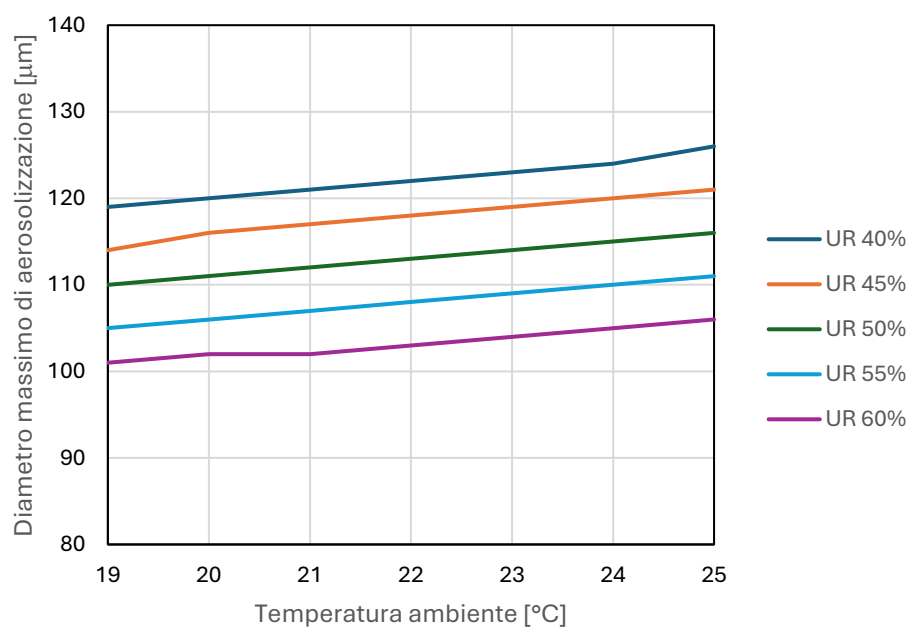


Figura 15: Diametro limite di aerosolizzazione per emissioni da starnuto (velocità di emissione 50 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa

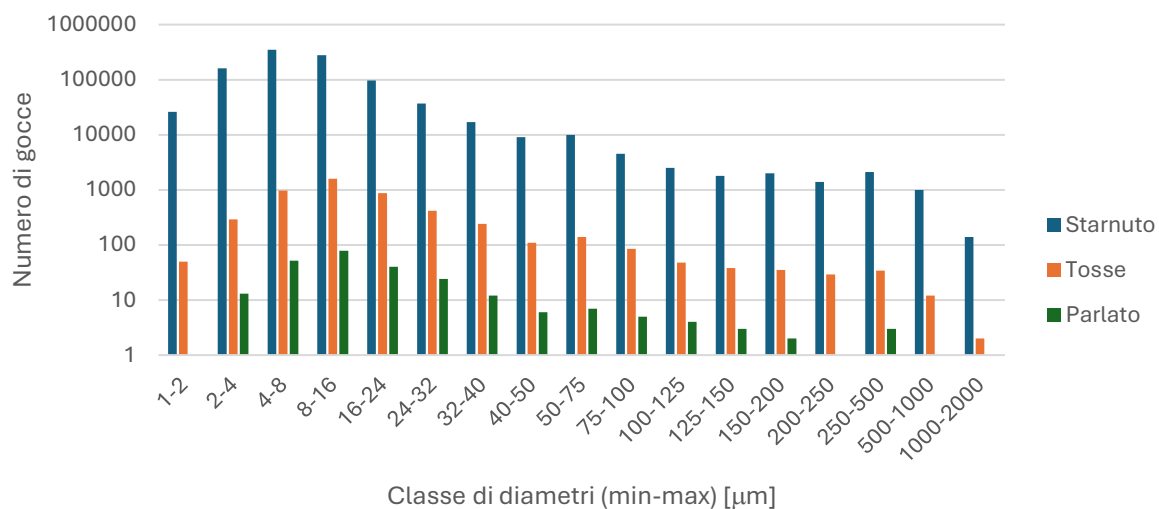


Figura 16: Distribuzione media delle gocce di espettorato per classe dimensionale

Dalla letteratura tecnica (Duguid e Hyg, 1946) è nota la distribuzione delle gocce di espettorato nei diversi diametri per diverse modalità di emissione, illustrata in figura 16. Combinando tali informazioni e considerato che il volume delle particelle è proporzionale al loro diametro, è possibile valutare la frazione di espettorato che aerosolizza per ciascuna modalità di emissione in relazione alle condizioni ambientali, come illustrato nelle figure 12-14. Si osserva che la frazione di aerosol generata per ogni modalità di emissione è pari ad una frazione modesta, inferiore al 3%. Considerata una distribuzione uniforme dei virioni emessi da un soggetto infetto, la frazione aerosolizzata esprime la probabilità che un virione emesso diventi airborne (aerotrasportato).

Ciononostante, poiché tali eventuali virioni possono persistere in ambiente a lungo, la probabilità di infezione deriva dalla durata dell'esposizione. Peraltro, tali particelle sono direttamente influenzate dagli impianti di climatizzazione.

Dalle figure si osserva inoltre che un incremento dell'umidità relativa è favorevole alla riduzione della carica virale, riducendo la rilevanza della temperatura. Per contro, a basse umidità relative, la temperatura è di maggiore importanza.

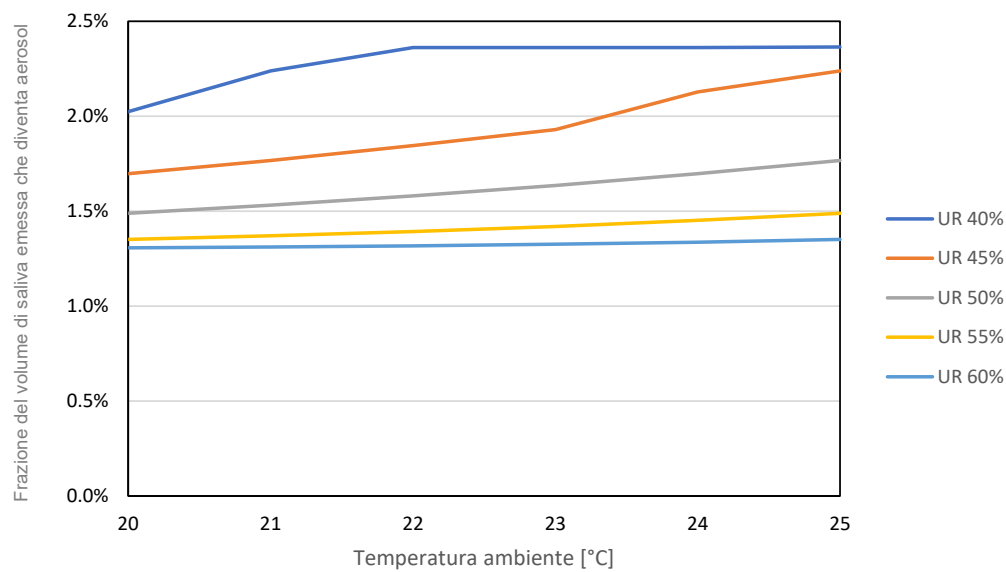


Figura 17: Frazione di espettorato che aerosolizza per emissioni da parlato (velocità di emissione 5 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa

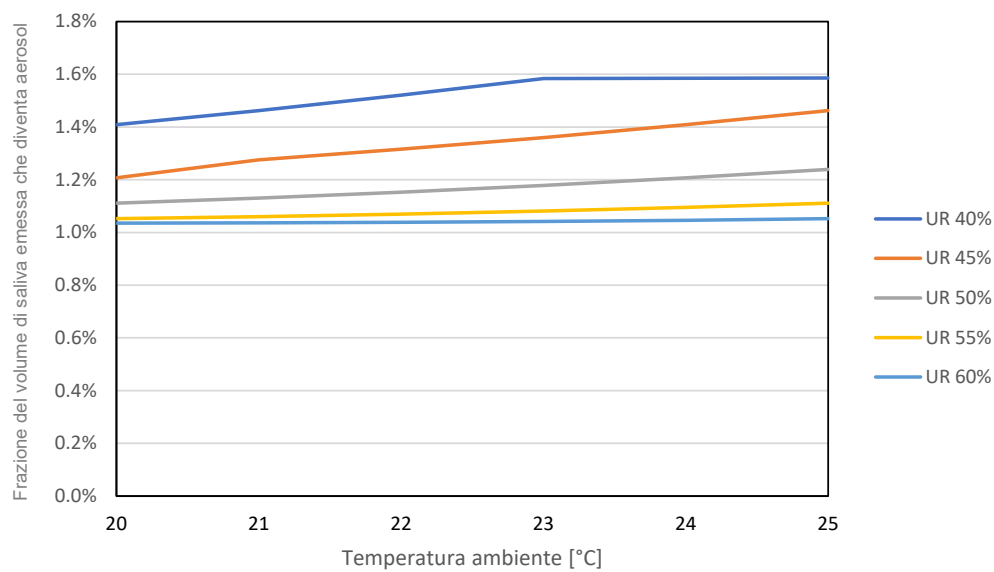


Figura 18: Frazione di espettorato che aerosolizza per emissioni da tosse (velocità di emissione 5 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa

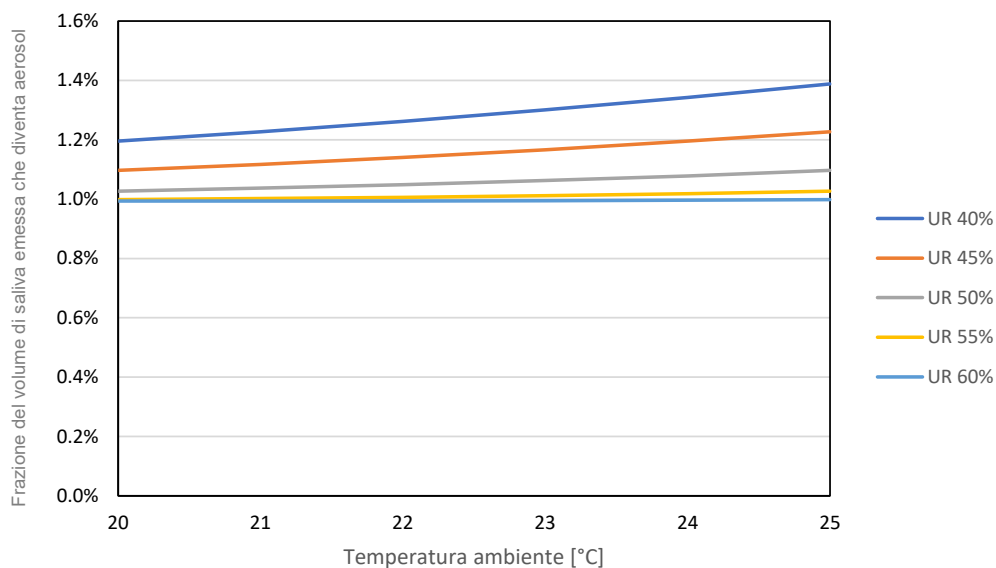


Figura 19: Frazione di espettorato che aerosolizza per emissioni da starnuto (velocità di emissione 5 m/s) in funzione della temperatura per diversi valori di umidità relativa

3.3 Modalità di distribuzione dell'aria

I sistemi di ventilazione meccanica o i sistemi a volume d'aria totale possono avere un effetto significativo sulla trasmissione delle particelle (Al Rikabi et al. 2024). I sistemi di distribuzione meccanica dell'aria possono essere classificati come uniformi-stabili, non uniformi-stabili e instabili. Il termine “ambiente interno uniforme e stabile” si riferisce alla consistenza e alla stabilità delle concentrazioni di contaminanti, dell'umidità, della temperatura e di altri fattori in tutta la stanza. Il termine “ambiente interno non uniforme e stabile” si riferisce all'ambiente interno che presenta disparità nei parametri dell'aria, tra cui temperatura, umidità, velocità e concentrazione di inquinanti. Il termine “ambiente interno instabile” significa che la velocità dell'aria, la temperatura, l'umidità e le concentrazioni variano nel tempo all'interno dello spazio interno. La figura 20 mostra diversi tipi di sistemi a volume d'aria totale. Il meccanismo dei diversi sistemi di ventilazione meccanica e la loro efficacia nel controllare la trasmissione dei contaminanti presenti nell'aria sono riassunti nella tabella 3.

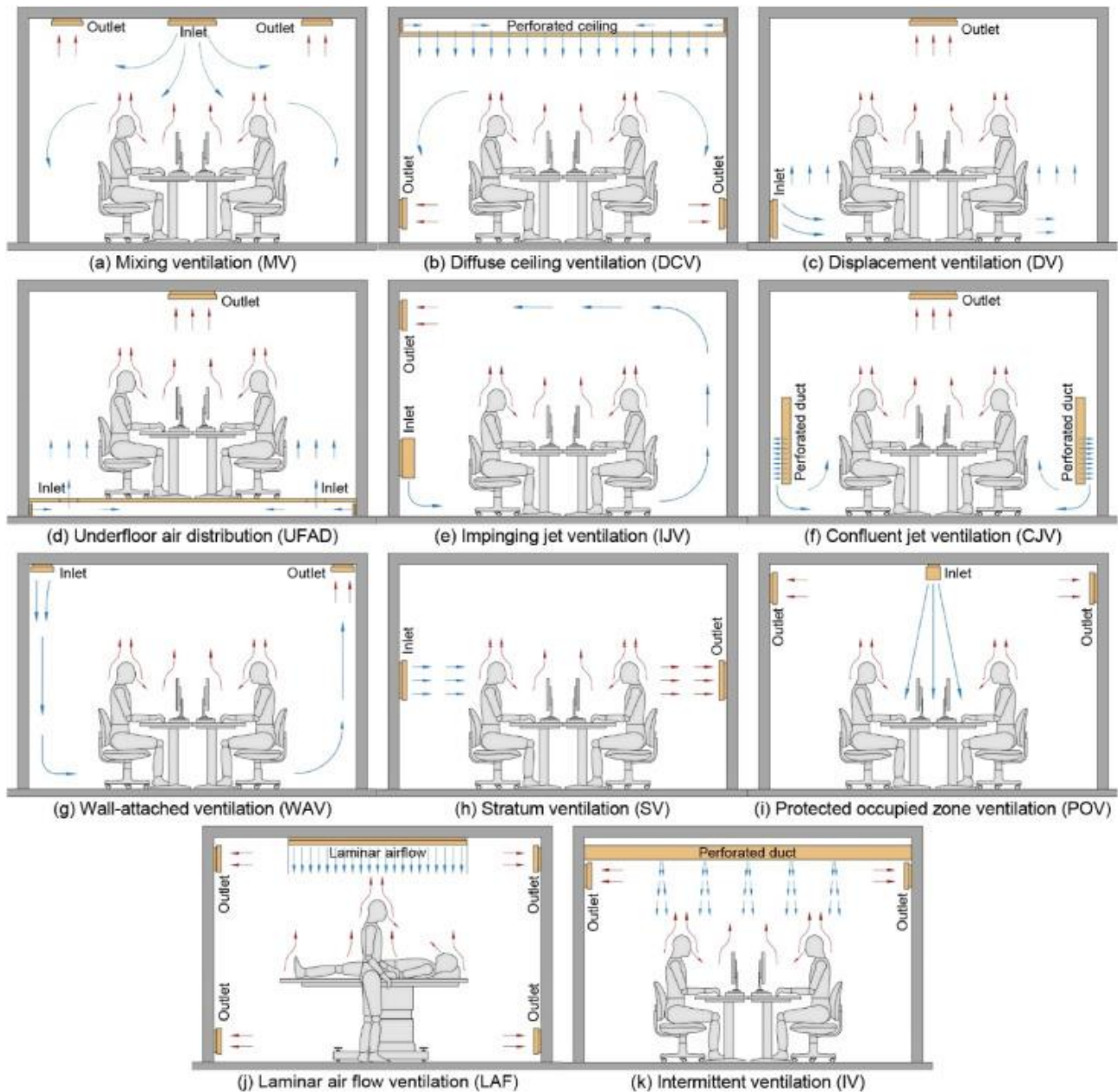


Figura 20: Schematizzazione delle principali tipologie di sistemi di ventilazione

3.3.1 Sistemi di ventilazione uniformi e costanti

3.3.1.1 *Mixing ventilation (MV)*

La MV è il metodo principale per creare un clima interno costante e stabile. Il concetto fondamentale della MV prevede l'immissione di aria ad alta velocità, che in genere proviene da diffusori di aria posizionati strategicamente sul soffitto per facilitare un'efficace miscelazione dell'aria. Nel contesto della MV, gli occupanti si trovano immersi

in un'aria con una distribuzione relativamente omogenea della contaminazione, che è simile a quella di una vasca da bagno piena di acqua contaminata. Questo perché il sistema diluisce solo le concentrazioni nell'ambiente interno e crea alti livelli di turbolenza; di conseguenza, può aumentare il rischio di infezione.

Diversi ricercatori hanno valutato l'efficacia della ventilazione meccanica controllata (VMC) sulla qualità dell'aria interna (IAQ). Wei et al. (2023) hanno studiato numericamente gli effetti della velocità di ventilazione e della posizione seduta sull'esposizione alle goccioline respiratorie in una stanza di 100 m³ ventilata con MV. Hanno osservato che durante le conversazioni faccia a faccia, l'IF delle goccioline respiratorie e le frazioni di deposito sul viso e sulla mucosa facciale dell'individuo suscettibile erano rispettivamente del 4,96%, 2,14% e 0,12%, sottolineando l'inalazione come via primaria di esposizione. Il passaggio dalla posizione faccia a faccia a quella faccia a schiena ha ridotto l'esposizione alle goccioline piccole dell'88,0% durante il parlato e del 66,2% durante la respirazione. Tuttavia, tassi di ventilazione elevati potrebbero ridurre il rischio di goccioline piccole, ma potenzialmente aumentare il rischio di trasmissione di goccioline medie attraverso una maggiore evaporazione. Jiao et al. (2019) hanno valutato numericamente l'impatto di diverse configurazioni di ingresso e uscita MV (7 diversi casi di progettazione) sulla concentrazione di contaminanti in un'officina di 500 m³. I loro risultati rivelano che l'ingresso vicino al pavimento con un'uscita vicino al soffitto situata sulla stessa parete mostra un'efficacia ottimale. Il design più efficiente era quello con due ingressi vicino al pavimento uno di fronte all'altro e un'uscita vicino al soffitto. Inoltre, quando è necessaria una protezione complessiva, due ingressi vicino al pavimento con un'uscita vicino al soffitto situata sulla stessa parete. Inoltre, quando è richiesta una protezione totale, due prese d'aria vicine al pavimento con un'uscita vicino al soffitto situata sulla stessa parete hanno dimostrato le migliori prestazioni tra tutti i casi. Alkhalaf et al. (2023) hanno studiato numericamente l'effetto del tasso di ventilazione e delle posizioni di scarico sulla IAQ all'interno di sale operatorie di 56 m³ che utilizzano MV. Il

loro studio ha rilevato che l'aumento della portata non migliora in modo consistente il CRE (Contaminant Removal Effectiveness). Inoltre, la posizione dell'uscita ha avuto un impatto notevole sulla rimozione degli inquinanti. La configurazione più efficace, che ha raggiunto il CRE più elevato, prevedeva il posizionamento dell'entrata e dell'uscita una di fronte all'altra, con l'uscita posizionata vicino al livello del pavimento.

Cho (2019) ha studiato numericamente e sperimentalmente l'effetto della configurazione del diffusore MV sull'esposizione ai contaminanti in una camera di isolamento di 42 m³. I risultati indicano che la ventilazione meccanica che utilizza il metodo di "estrazione a basso livello" si rivela più efficiente nel rimuovere gli inquinanti all'interno della zona di respirazione (BZ) degli occupanti rispetto ad altri metodi (scarico a soffitto e scarico a parete). Dao e Kim (2022) hanno studiato numericamente l'effetto delle posizioni di scarico sulle goccioline di tosse in una camera di isolamento di 36 m³. Il loro studio ha riportato che il posizionamento dell'uscita di scarico sopra la testa del paziente produce le migliori prestazioni di ventilazione, raggiungendo un'efficienza di rimozione delle goccioline del 99% entro 90 secondi. Yan et al. (2023) hanno studiato numericamente le caratteristiche spazio-temporali della trasmissione per via aerea in una sala riunioni ventilata con MV con una superficie di 58 m². Il loro studio ha confrontato l'effetto di due configurazioni MV sulla trasmissione di particelle aerodisperse durante la tosse e la conversazione (Fig. 21). Hanno concluso che i rischi medi di infezione a una distanza di 3,5 m dall'infettante (occupante in piedi) erano compresi tra il 5,7 % e il 22,9 % e tra l'1,09 % e il 15,45 % rispettivamente per MV1 e MV2. Ye et al. (2023) hanno esaminato la trasmissione di aerosol in scenari di code e pasti all'interno di mense ventilate da un sistema MV. Hanno riferito che l'aumento dell'ACH del sistema MV era efficace nel ridurre la concentrazione di fondo degli aerosol, mentre non aveva alcun effetto sulla loro concentrazione locale.

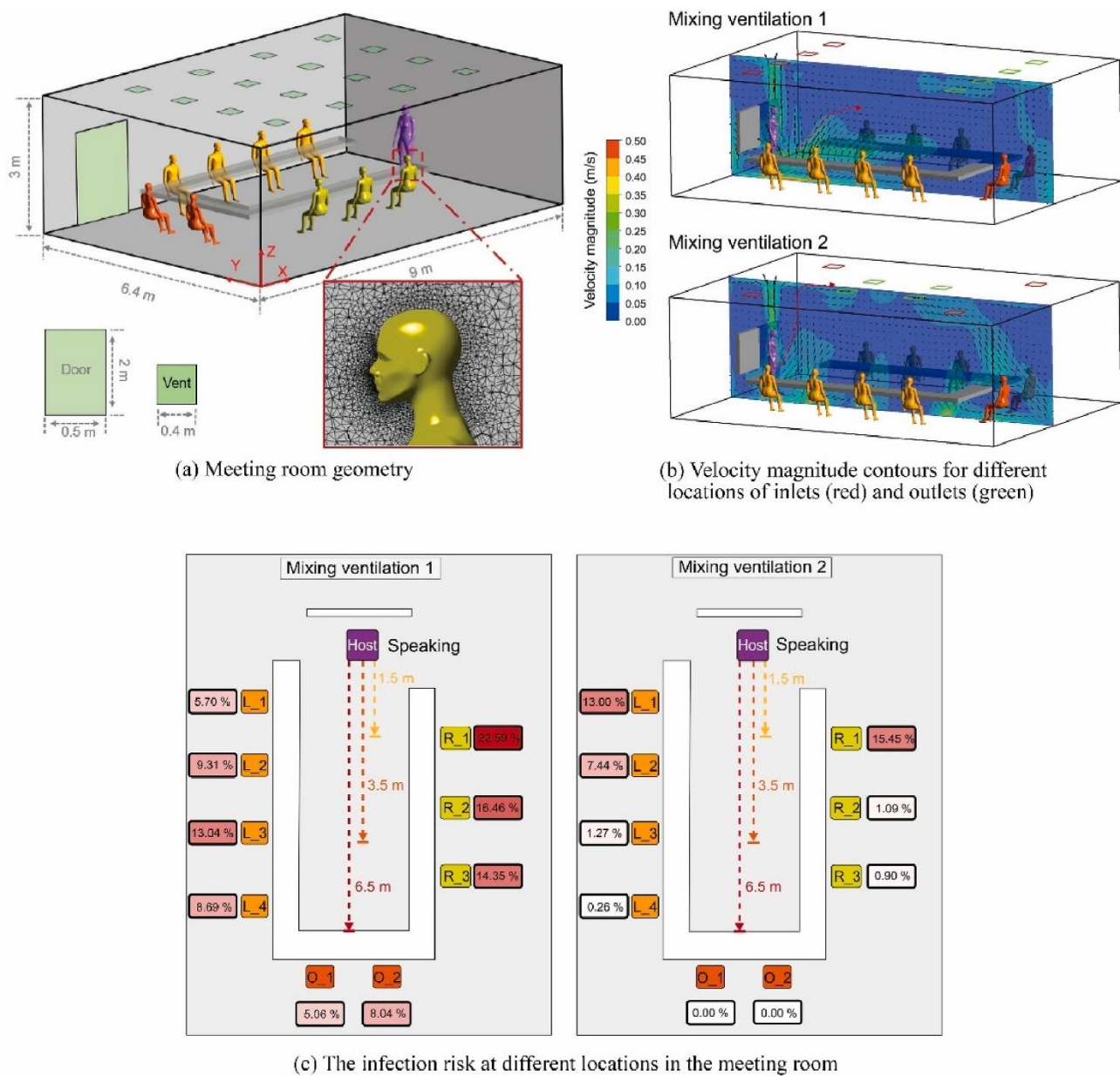


Figura 21: Influenza della posizione dei diffusori sul rischio di infezione in una sala riunioni in presenza di MV (Yan et al., 2023)

3.3.1.2 Diffuse ceiling ventilation (DCV)

Il DCV è un sistema di ventilazione in cui l'aria fresca proveniente dall'esterno viene immessa nello spazio occupato attraverso diffusori a soffitto. Questo metodo consente di introdurre aria fresca, in particolare nelle zone fredde e secche come quelle dell'Europa centrale e settentrionale. La distribuzione del flusso d'aria in uno spazio con DCV è equivalente a quella dell'MV. Solo pochi studi hanno valutato in modo specifico le

prestazioni del DCV sulla IAQ. Kristensen et al. (2017) hanno condotto uno studio sperimentale sull'effetto del DCV sul COC in aule di 134 m³. Hanno riferito che, a causa del flusso bidirezionale, potrebbe verificarsi ricircolo dei contaminanti nella zona occupata. Peng et al. (2021) hanno valutato l'efficienza del DCV nella rimozione dei contaminanti in diverse condizioni operative in uno spazio ufficio di 38 m³. La loro analisi ha rivelato che il carico termico interno può influenzare il livello di miscelazione del DCV.

3.3.2 Non-uniform steady-state ventilation systems

I sistemi di ventilazione uniformi e costanti possono aumentare il rischio di infezione e consumare molta energia. Pertanto, sono stati progettati altri sistemi di ventilazione che consentono di risparmiare energia riducendo al contempo la trasmissione di particelle negli spazi interni. Ciò può essere ottenuto creando spazi interni non uniformi, che negli ultimi anni hanno suscitato un crescente interesse in quanto riducono la miscelazione tra l'aria di ventilazione immessa e quella interna.

3.3.2.1 *Displacement ventilation (DV)*

Questa categoria di sistemi di ventilazione eroga aria a una temperatura relativamente più bassa, in genere leggermente più fredda dell'aria ambiente, utilizzando una bassa velocità. L'obiettivo è quello di diffondere l'aria a livello del pavimento e facilitare lo spostamento verso l'alto dei contaminanti, spinti dalle forze di galleggiamento originate dalle fonti di calore interne, compresi gli occupanti. Successivamente, i contaminanti vengono espulsi a livello del soffitto. Pertanto, la sostituzione della MV con la DV può contribuire a limitare l'esposizione ai contaminanti presenti nell'aria, mantenendo gli inquinanti lontani dalla zona di respirazione degli occupanti, oltre a consentire un risparmio energetico rispetto alla MV e alla DCV.

Diversi studi hanno valutato l'efficacia della DV nella rimozione dei contaminanti indoor. Liu et al. (2022) hanno condotto un'indagine numerica e sperimentale completa sull'efficienza del DV rispetto al MV nell'eliminazione delle particelle sospese nell'aria

all'interno di uno spazio ufficio di 124 m³. I loro risultati hanno rivelato che aumentando la portata di ventilazione da 2 ACH a 4 ACH e 6 ACH con il sistema MV, la concentrazione di particelle si è ridotta rispettivamente del 20% e del 60%. Al contrario, per il sistema DV, la concentrazione di particelle è diminuita solo del 10% e del 40% a 4 ACH e 6 ACH. L'efficienza di ventilazione si è avvicinata a 1,0 per MV, ma l'ha superata in modo significativo per DV. Di conseguenza, il DV ha mostrato prestazioni superiori rispetto al MV. Pei et al. (2021) hanno eseguito un'analisi numerica per studiare l'impatto dei sistemi di ventilazione, dei modelli respiratori e del distanziamento sociale sull'esposizione alle particelle aerodisperse in uno spazio ufficio di 58 m³. Hanno riferito che mantenere distanze sociali di 1-2 m potrebbe essere inadeguato per evitare la diffusione di aerosol aerodispersi di 10 µm in spazi ventilati con DV. Il loro studio ha anche scoperto che a bassi valori di ACH (0,6 h⁻¹), la concentrazione di aerosol virali nella zona di contaminazione (BZ) derivante dal parlare può superare di sette volte quella della MV con la DV. Inoltre, aumentando l'ACH da 0,6 a 3 nel DV, la concentrazione nel BZ è diminuita del 90%. Wu et al. (2023) hanno studiato numericamente l'efficienza del DV combinato con un sistema di riscaldamento a pavimento in un'aula di 86,4 m³. Il loro studio ha riportato che il DV ha ridotto il COC ((Concentration of contaminant) del 50% rispetto all'assenza di un sistema di ventilazione. Zhang et al. (2019) hanno confrontato numericamente le prestazioni del DV rispetto al MV su aerosol di goccioline sospese, depositate e fuoriuscite in una stanza di 157 m³. Il loro studio ha riportato che il numero di agenti patogeni sospesi eliminati dalla DV era doppio rispetto a quello della MV. Li e Fang (2023) hanno studiato le prestazioni di tre sistemi di ventilazione (DV, MV e barriera d'aria) nel mitigare la trasmissione di aerosol di goccioline di tosse in una cabina di ascensore. Il loro studio ha rilevato che la percentuale di particelle aerodisperse inalate da un occupante sano in presenza di DV, MV e barriera d'aria era rispettivamente dello 0,071%, dello 0,049% e dello 0,016%. Chakroun et al. (2019) hanno studiato numericamente e sperimentalmente l'effetto di diverse configurazioni DV sulle particelle risospese in uno spazio ufficio di 52

m³. Hanno raccomandato di invertire il modello di flusso d'aria del sistema DV tradizionale, in cui l'alimentazione proviene dal soffitto e lo scarico è vicino al livello del pavimento. Inoltre, il loro studio ha rilevato che la concentrazione di particelle da 1 µm a una portata di 50 L/s con il DV invertito era inferiore del 44,8% rispetto al MV.

Diversi ricercatori hanno valutato la capacità del DV di mitigare il rischio di infezione. Ad esempio, Su et al. (2022) hanno riferito che la probabilità media di infezione con il DV era circa 4-8 volte inferiore rispetto al sistema MV. Lu et al. (2022) hanno studiato numericamente l'effetto del tasso di ACH e del modello di ventilazione sul rischio di infezione in un reparto di isolamento di 40 m³. Hanno riportato che la probabilità media di infezione dell'MV era inferiore a quella del DV a tassi di ACH più bassi (6 h⁻¹ e 9 h⁻¹), mentre a tassi di ACH più elevati (12 h⁻¹), il rischio medio di infezione del DV era superiore a quello dell'MV. Yoo et al. (2023) hanno condotto uno studio numerico per indagare la trasmissione di particelle aerodisperse di un passeggero che tossisce nella cabina di un autobus in condizioni di MV e DV e con due densità di passeggeri (70 e 30 passeggeri). I loro risultati hanno mostrato che, nel caso della DV, più della metà dei passeggeri presentava un rischio ridotto di infezione da SARS-CoV-2 rispetto alla MV. Xie et al. (2023) hanno studiato numericamente l'effetto delle fonti di calore alimentari sui rischi di infezione incrociata in una sala di ristorante di 38 m³. Il loro studio ha riportato che in condizioni di MV, le fonti di calore a bassa temperatura e l'assenza di fonti di calore comportano rischi di infezione inferiori rispetto al DV. Tuttavia, con una fonte di calore ad alta temperatura, il DV riduce significativamente il rischio di infezione.

Diversi studi hanno esaminato l'influenza della DV sulla deposizione di particelle indoor in una camera climatica e negli uffici. Ad esempio, Zhou et al. (2017) hanno osservato che la deposizione di particelle sul pavimento in condizioni di DV era significativamente inferiore rispetto alla MV. Lv et al. (2019) hanno confrontato le prestazioni di MV e DV in termini di deposito e risospensione delle particelle in condizioni di stasi e di movimento. Il loro studio ha riportato che in condizioni di stasi, il deposito di particelle piccole (0,5-1,0

μm) e grandi ($3,0\text{-}5,0\ \mu\text{m}$) in condizioni di DV era rispettivamente circa 1,46 volte e 1,47 volte inferiore rispetto a quello in condizioni di MV. Cetin et al. (2020) hanno studiato l'impatto della posizione dello scarico del DV sulla frazione di deposizione delle particelle. I risultati hanno indicato che la frazione di deposizione più bassa è stata ottenuta quando l'uscita del DV era posizionata al centro della stanza.

3.3.2.2 *Underfloor air distribution system (UFAD)*

L'UFAD eroga aria pulita da un diffusore montato a pavimento installato su un pavimento flottante. Pertanto, l'aria condizionata fluisce attraverso una camera di distribuzione che di solito è collocata tra il pavimento in cemento e il pavimento sopraelevato prima di raggiungere la presa d'aria. Diversi studi hanno valutato le prestazioni dell'UFAD sulla qualità dell'aria interna. Chen et al. (2014) hanno studiato sperimentalmente e numericamente le prestazioni dell'UFAD rispetto al MV in uno spazio ufficio di $50\ \text{m}^3$. I loro risultati hanno indicato una riduzione del 20% nella trasmissione di contaminanti da persona a persona con l'UFAD rispetto all'MV. Taheri et al. (2021) hanno condotto un'indagine numerica sull'impatto dell'angolo di rotazione dell'ingresso dell'UFAD e sul posizionamento della deposizione di particelle nell'aria interna in un ufficio di $45\ \text{m}^3$. Hanno scoperto che la frazione di deposizione raggiungeva il suo valore minimo quando il sistema UFAD era posizionato vicino alle pareti con un angolo di rotazione di 90 gradi. Fan et al. (2017) hanno condotto uno studio numerico sull'influenza dell'altezza dell'uscita dell'UFAD sulla concentrazione di contaminanti in un ambiente di ufficio di $47\ \text{m}^3$. I loro risultati suggeriscono che l'altezza ideale della presa di aspirazione per l'UFAD rientra nell'intervallo $1,05\ \text{m}\text{-}1,3\ \text{m}$ per mitigare la concentrazione di contaminanti nella zona di respirazione degli occupanti. Cao e Li (2022) hanno condotto uno studio numerico e sperimentale per valutare le prestazioni dell'UFAD con particelle di diverse dimensioni in uno spazio ufficio di $118\ \text{m}^3$. Hanno riferito che le particelle submicroniche venivano facilmente sospese dall'UFAD, mentre quelle superiori a $2,5\ \mu\text{m}$ erano influenzate in misura minima, depositandosi principalmente sul pavimento. Chang et al. (2023) hanno

condotto uno studio CFD confrontando MV e UFAD in uno spazio ufficio di 36 m³. Hanno scoperto che, rispetto a MV, UFAD aumentava la concentrazione di CO₂ nella stanza di circa il 38%. Cheong et al. (2021) hanno valutato numericamente l'efficacia dell'UFAD e dell'MV nel mitigare i contaminanti interni in un'aula di 177 m³. Il loro studio ha rivelato che, rispetto all'MV, l'UFAD offre prestazioni superiori nel ridurre la concentrazione di agenti patogeni aerodispersi in aree distanti dalla fonte. Hanno proposto di posizionare terminali di uscita dell'aria tra i gruppi di occupanti per limitare la dispersione degli agenti patogeni aerodispersi.

3.3.2.3 Impinging jet ventilation (IJV)

IJV eroga aria ad alta velocità, che viene diretta verso il basso, colpendo e diffondendosi sul pavimento per generare uno strato di taglio molto sottile con un ampio raggio d'azione. L'ingresso dell'aria del sistema IJV è tipicamente posizionato sulla parete laterale più alta per facilitare la rimozione dell'aria contaminata. Generalmente, il dispositivo terminale di scarico dell'aria in IJV si trova vicino al livello del soffitto.

La maggior parte degli studi precedenti ha esaminato le prestazioni dell'IJV nella riduzione della concentrazione di contaminanti e dell'età dell'aria. Ye et al. (2020) hanno condotto uno studio numerico sull'impatto dell'altezza della bocchetta di ritorno IJV sulla concentrazione di contaminanti in uno spazio ufficio di 41 m³. Hanno osservato che all'aumentare dell'altezza dell'uscita dell'aria, sia l'età dell'aria che la concentrazione di CO₂ diminuivano. Inoltre, la loro ricerca ha raccomandato di posizionare il dispositivo di uscita dell'aria IJV entro un intervallo di altezza compreso tra 1,2 e 1,5 m. Yamasawa et al. (2022) hanno condotto uno studio sperimentale sulle prestazioni dell'IJV rispetto al DV sul CRE in una camera climatica di 75 m³. Hanno riportato che il CRE dell'IJV era leggermente inferiore a quello del DV. Inoltre, è stata sviluppata un'equazione empirica per prevedere il CRE in una stanza con IJV. Ye et al. (2019) hanno confrontato numericamente le prestazioni dell'IJV e dell'MV nella riduzione del COC in uno spazio di grande altezza. Hanno scoperto che le concentrazioni di particelle nella zona occupata sotto l'IJV sono

circa tre volte inferiori a quelle dell'MV. Wang et al. (2021) hanno condotto uno studio numerico sull'effetto dell'IJV e dell'MV nella rimozione delle particelle sospese nell'aria da una camera di isolamento di 110 m³. I loro risultati hanno indicato che l'IJV ha mostrato un'efficacia circa doppia rispetto all'MV nell'eliminazione delle particelle fini. Inoltre, l'IJV ha ridotto l'IF dell'84,45 % rispetto all'MV.

Per quanto riguarda la valutazione dei rischi di infezione indotti dall'uso dell'IJV, Su et al. (2022) hanno riferito che la probabilità media di infezione con l'IJV è circa 5 volte inferiore rispetto all'MV, a seconda della posizione dell'agente infettivo. Qin et al. (2023) hanno valutato numericamente le prestazioni dell'IJV e dell'MV nella riduzione del rischio di infezione in uno spazio densamente occupato di 409 m³. Hanno riportato che, a seconda della posizione dell'occupante infetto, l'IJV ha ridotto il rischio medio di infezione dallo 0,047% allo 0,027% e dallo 0,035% allo 0,024% rispetto all'MV.

L'influenza dell'IJV e dell'MV sulla deposizione delle particelle nell'aria interna è stata studiata da Wang et al. (2021). Hanno riferito che la frazione di deposito di piccole particelle (5 µm) sulla pelle del paziente ricevente sotto IJV era circa 2 volte inferiore rispetto a MV. Al contrario, le particelle di grandi dimensioni si depositavano principalmente sull'occupante infetto e sui letti, dove il 24% e il 94% si depositavano su tutti i letti sotto IJV e MV, rispettivamente.

3.3.2.4 Confluent jet ventilation (CJV)

I getti confluenti sono diversi getti circolari rilasciati da ugelli circolari situati in posizioni parallele sullo stesso piano; i getti si uniscono e viaggiano come un unico getto a una certa distanza a valle. La maggior parte degli studi precedenti ha esaminato le prestazioni dei CJV sulla qualità dell'aria interna negli uffici, mentre solo uno studio è stato condotto in un'aula scolastica. Arghand et al. (2015) hanno condotto un confronto sperimentale delle prestazioni tra CJV, MV e UFAD in un ufficio open space di 161 m³. I loro risultati hanno mostrato che l'IF era inferiore di circa il 2,8 % per il CJV rispetto al MV e superiore del 10,28 % rispetto all'UFAD. Larsson e Moshfegh (2017) hanno condotto un confronto

sperimentale delle prestazioni tra CJV, MV e DV all'interno di una camera climatica di 31 m³. Hanno osservato che il CJV con gli ugelli impostati a 2,2 m offre la massima efficienza di ricambio dell'aria, tra il 50% e il 52%, seguito dal DV (50%) e dall'MV (47%).

Vachaparambil et al. (2018) hanno valutato numericamente le prestazioni di CJV e MV sull'età media dell'aria in uno spazio ufficio aperto di 161 m³. Il loro risultato indica che il MAA con CJV è inferiore di circa il 16% rispetto a MV. Andersson et al. (2020) hanno confrontato sperimentalmente l'efficienza di CJV e MV sull'ACE in aule di 163 m³. Hanno rilevato che l'ACE medio per CJV è circa il 14% superiore a quello di MV.

3.3.2.5 Wall-attached ventilation (WAV)

Il WAV fornisce aria pulita attraverso prese d'aria lineari fissate alla superficie di una parete laterale o di un pilastro. Grazie all'effetto Coanda, l'aria fornita dal WAV si muove verso il basso, urtando e diffondendosi sul pavimento. Il concetto di WAV combina tre sistemi di ventilazione, ovvero MV, DV e IJV.

Diversi ricercatori hanno studiato le prestazioni del WAV sulla qualità dell'aria interna. Su et al. (2022) hanno riferito che il rischio medio di infezione con il WAV era circa 1,4 volte inferiore rispetto al MV. Li et al. (2023) hanno riportato che l'efficienza di rimozione dei contaminanti del WAV era superiore di circa l'11,35 % e il 2,55 % rispetto rispettivamente al MV e all'IJV. Yin et al. (2021) hanno studiato numericamente e sperimentalmente le prestazioni del WAV e del MV sull'esposizione ai contaminanti interni in un centro commerciale di 576 m³. Hanno scoperto che l'ACE con il WAV era superiore di circa il 18% rispetto all'MV. Zhang et al. (2022) hanno condotto una simulazione CFD sull'effetto di tre sistemi di ventilazione (WAV, MV con alimentazione a soffitto e MV con alimentazione laterale) sulla IAQ in una camera di isolamento di 54 m³. Hanno riportato che il WAV ha ridotto il COC del 15%-47% rispetto all'MV.

3.3.2.6 Stratum ventilation (SV)

SV fornisce aria fresca in orizzontale, determinando un'elevata velocità dell'aria nella zona di respirazione. Per garantire che l'aria pulita venga fornita direttamente alla zona di

respirazione, l'uscita dell'aria di SV dovrebbe essere installata sulla parete laterale ad un'altezza di 1,2 m nel caso di occupanti seduti.

Diversi studi hanno valutato le prestazioni di SV nella riduzione del COC e dell'età dell'aria. Li et al. (2023) hanno condotto confronti numerici della dispersione di particelle espirate con diametri variabili in diversi sistemi di distribuzione dell'aria di riscaldamento in uno spazio ufficio aperto di 83 m³. Le loro simulazioni hanno riguardato cinque diversi scenari di distribuzione dell'aria (MV, SV, IJV, WAV e DeV), con quest'ultimo che utilizzava deflettori per l'erogazione di aria raffreddata alla zona occupata (Fig. 22).

Hanno rilevato che le concentrazioni di contaminanti erano 0,56 % (SV), 0,67 % (DeV), 1,36 % (IJV), 1,41 % (WAV) e 4,45 % (MV). Inoltre, il CRE era pari al 61,86% (DeV), 52,43% (SV), 38,95% (WAV), 36,4% (IJV) e 27,61% (MV).

Lu e Lin (2022) hanno valutato numericamente le prestazioni di tre sistemi di ventilazione (MV, DV e SV) sulla dispersione delle goccioline in un reparto di isolamento di 44 m³.

Hanno scoperto che, a differenza dei sistemi DV e MV, il sistema SV mostra un controllo superiore sulle goccioline di diametro superiore a 50 µm grazie all'elevata velocità del flusso d'aria, che aumenta il deposito di tali goccioline. Lu et al. (2020) hanno confrontato numericamente e sperimentalmente l'efficienza di tre sistemi di ventilazione (SV, MV e DV) sull'esposizione ai contaminanti in un reparto ospedaliero di isolamento di 40 m³. I

loro risultati hanno indicato che il CRE di SV ha superato MV e DV rispettivamente di

circa l'80,55 % e il 22,64 %. Li et al. (2020) hanno condotto valutazioni sperimentali

dell'impatto dell'SV e del riscaldamento a pavimento radiante sulla IAQ all'interno di

un'aula di 96 m³. I loro risultati hanno rivelato che l'SV ha ridotto le concentrazioni di

contaminanti del 28,25 %-58,75 % rispetto agli scenari senza SV. Lu et al. (2023) hanno

condotto uno studio sperimentale sull'effetto delle modalità di alimentazione della SV sul

COC in una camera climatica di 110 m³. Hanno scoperto che negli scenari in cui la fonte di

contaminanti risiede all'interno della zona di miscelazione, l'utilizzo della SV con portate

d'aria elevate e direzioni d'aria regolabili riduce efficacemente le concentrazioni di

contaminanti. Nazari et al. (2023) hanno confrontato numericamente le prestazioni di tre sistemi di ventilazione (SV, DV e MV) in termini di efficienza di rimozione delle particelle in una cabina ascensore di 8 m³. I risultati hanno evidenziato che l'SV aveva il CRE più basso (3,97%) rispetto al DV (42,77%) e all'MV (74,79%).

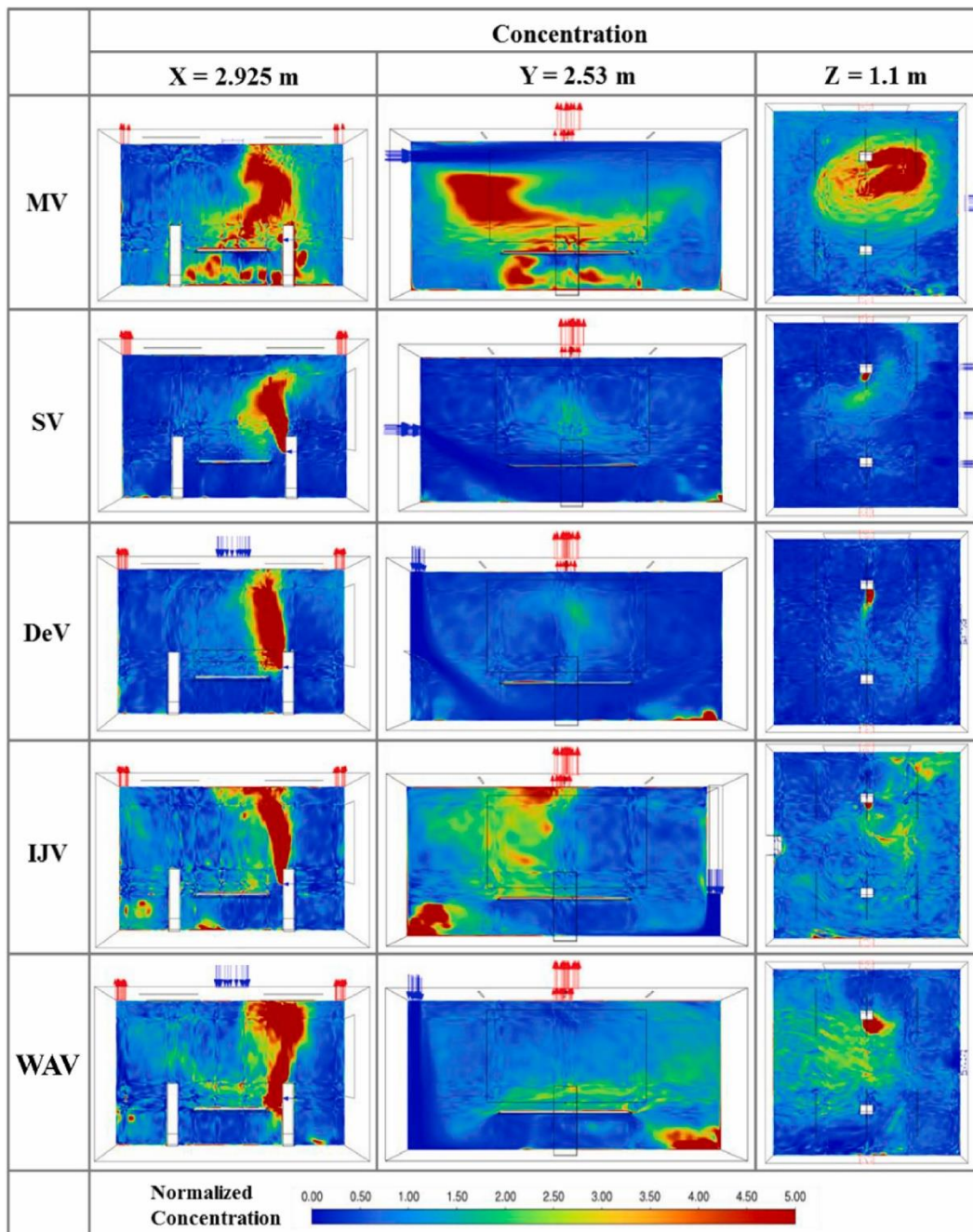


Figura 22: Concentrazione normalizzata di particelle in uno spazio ufficio con cinque diversi sistemi di distribuzione dell'aria (Li et al., 2023)

Pochi studi hanno esaminato l'efficacia di questo sistema nel ridurre il rischio di infezione. Su et al. (2022) hanno scoperto che, a seconda della posizione dell'infettante, la probabilità di infezione con SV in un ampio spazio ufficio aperto era circa 1,75-4,6 volte inferiore rispetto a MV. Ren et al. (2022) hanno condotto uno studio numerico sulle prestazioni di tre sistemi di ventilazione (SV, DV e MV) in relazione al rischio di infezione in un ufficio open space di 316 m³. Hanno scoperto che il rischio di infezione con SV, DV e MV era rispettivamente del 17,9%, 22,5% e 19,7%.

3.3.2.7 Protected occupied-zone ventilation (POV)

Lo scopo del POV è quello di dividere uno spazio interno in una serie di sottozone attraverso l'utilizzo di getti piani a bassa turbolenza. Il POV può proteggere gli occupanti sani dai contaminanti virali respiratori e ridurre il rischio di infezioni crociate.

Diversi studi hanno valutato le prestazioni del POV nella riduzione della concentrazione di contaminanti. Cao et al. (2014) hanno valutato sperimentalmente le prestazioni del POV nella riduzione della concentrazione di contaminanti in uno spazio ufficio di 21 m³. Hanno scoperto che l'efficienza di protezione del POV varia dall'8% al 50%. Questo intervallo dipende da fattori quali la posizione del diffusore, la velocità dell'aria di mandata e la presenza di divisori. Cao et al. (2015) hanno confrontato numericamente le prestazioni del POV e dell'MV in termini di esposizione ai contaminanti interni in una camera climatica di 26 m³. Hanno scoperto che il COC con il POV era inferiore del 40% rispetto all'MV.

Aganovic e Cao (2019) hanno studiato sperimentalmente l'effetto del POV sulla riduzione dei contaminanti in un reparto di isolamento di 26 m³. Hanno riferito che il POV riduce drasticamente il rischio di infezione rispetto all'uso del MV. Zhang et al. (2022) hanno studiato le prestazioni di un nuovo POV denominato ventilazione adattiva basata su moduli multi-vent (MAV) sulla trasmissione di particelle aerodisperse generate da un occupante che tossiva in uno spazio ufficio aperto di 180 m³. I loro risultati hanno indicato che la MAV ha ridotto le concentrazioni massime di inquinanti nel microambiente degli occupanti del 12 % rispetto alla MV. Inoltre, hanno osservato che, a differenza della

modalità incrociata, le modalità verticale e parallela hanno portato a una riduzione media della concentrazione di contaminanti rispettivamente del 23,7 % e del 36,5 %.

3.3.2.8 Laminar airflow ventilation (LAF)

Il principio del LAF consiste nel convogliare l'aria verticalmente o orizzontalmente in tutto lo spazio interno con bassa intensità di turbolenza e bassa velocità (di solito 0,2-0,3 m/s) per generare un flusso “a pistone”. Il LAF è generalmente utilizzato nelle sale operatorie e negli ospedali. Diversi studi hanno esaminato l'efficienza di questo sistema sulla IAQ. Cheng et al. (2021) hanno condotto valutazioni sperimentali e numeriche per studiare l'impatto della velocità dell'aria di mandata del LAF sulla IAQ all'interno di una camera climatica di 25 m³. I loro risultati hanno indicato che il CRE più elevato è stato ottenuto dal LAF quando la velocità dell'aria di mandata è stata impostata a 0,3 m/s. Risultati simili sono stati riportati da Amiraslanpour et al. (2021) e Jeong et al. (2022). Wong et al. (2022) hanno studiato le prestazioni di LAF di diverse dimensioni (4,3 m², 5,7 m² e 15,9 m²) sul deposito di particelle sul corpo del paziente in una sala operatoria. Il loro studio ha riportato che aumentando l'area di apertura del LAF da 4,3 m² a 5,7 m² si riduceva il deposito di particelle sul corpo del paziente del 39%, mentre aumentando l'apertura del LAF da 5,7 m² a 15,9 m² si riduceva il deposito di particelle solo del 2%. Katsumata et al. (2021) e Romano et al. (2015) hanno riportato che il LAF è potenzialmente efficace nella rimozione di particelle submicroniche ($\geq 0,3 \mu\text{m}$).

3.3.3 Unsteady ventilation systems

3.3.3.1 Intermittent ventilation (IV)

Per migliorare il comfort a temperature macroclimatiche moderate, alcuni studi suggeriscono un apporto intermittente di aria nell'ambiente. Questo approccio riduce il consumo energetico del sistema HVAC e migliora la turbolenza nell'ambiente, con conseguente aumento dell'efficienza del ricambio d'aria locale. La ventilazione intermittente (IV) rappresenta la forma prevalente di sistemi di ventilazione instabili, caratterizzata dal profilo periodico di immissione/interruzione dell'aria nella stanza. L'IV è

caratterizzata da diversi parametri, quali la durata dell'impulso, la lunghezza del periodo e la velocità media.

Diversi studi hanno esaminato le prestazioni della ventilazione intermittente (IV) sulla qualità dell'aria interna (IAQ). Ad esempio, van Hoof e Blocken (2017) hanno scoperto che, rispetto a una modalità di ventilazione costante, la ventilazione intermittente riduceva la concentrazione di inquinanti fino al 50%. Lichtner et al. (2016) hanno riferito che in condizioni di ventilazione non costante, il 50% della concentrazione è stato rimosso in meno di 5 minuti, mentre in scenari di ventilazione costante ci sono voluti circa 7 minuti. Kong et al. (2023) hanno valutato sperimentalmente l'impatto dell'IV insieme al riscaldamento a pavimento radiante a bassa temperatura e al riscaldamento a pavimento radiante convenzionale sulla IAQ all'interno di un'aula di 92 m³. I loro risultati hanno rivelato che l'efficienza di rimozione dei contaminanti di una combinazione di IV e riscaldamento a pavimento radiante a bassa temperatura era superiore di circa 1,15 volte rispetto a una combinazione di MV e riscaldamento a pavimento radiante convenzionale. Tuttavia, il tempo necessario per ottenere un rischio di infezione inferiore all'1 % con IV e riscaldamento a pavimento radiante a bassa temperatura era 5,45 volte più lungo rispetto al MV con riscaldamento a pavimento radiante convenzionale. Tuttavia, l'aspetto intermittente del sistema IV può aumentare la turbolenza all'interno dello spazio, portando ad un aumento del rischio di contaminazione incrociata, che necessita di ulteriori indagini.

Tabella 3: Comparazione delle principali tipologie di sistemi di ventilazione

Sistema di distribuzione	Principio di funzionamento	Efficienza nel controllo della trasmissione di contaminanti aerotrasportati
Mixing ventilation (MV)	Il diffusore immette l'aria ad alta velocità per promuovere il mescolamento in prossimità del soffitto.	L'efficienza di rimozione degli inquinanti è limitata alla diluizione.
Diffuse ceiling ventilation (DCV)	I diffusori immettono l'aria dal soffitto a bassa velocità, senza getti apprezzabili.	Può determinare una riduzione dell'efficienza di diluizione degli inquinanti, con formazione di zone a basso ricambio d'aria.
Displacement ventilation (DV)	I diffusori immettono l'aria in prossimità del pavimento. L'aria esausta è aspirata dalla porzione superiore dell'ambiente.	Alta efficienza di rimozione degli inquinanti, con riduzione del mescolamento e ridotto rischio di trasmissione tra occupanti.
Underfloor air distribution system (UFAD)	L'aria è immessa dal pavimento, si mescola con l'aria ambiente nella zona occupata e poi è aspirata dalla porzione superiore.	Buona efficienza di rimozione degli inquinanti, se le bocchette di immissione sono disposte opportunamente.
Impinging jet ventilation (IJV)	L'aria è immessa con un getto diretto verso il pavimento su cui si distribuisce. L'aspirazione avviene dalla porzione superiore dell'ambiente.	Migliore efficienza nella mitigazione dell'eposizione a inquinanti rispetto al perfetto mescolamento.
Confluent jet ventilation (CJV)	Come IJV ma l'aria è immessa in modo simmetrico dai lati opposti in modo da promuovere la formazione di un pennacchio di risalita nella porzione centra. L'aspirazione avviene nella porzione centrale superiore.	Prestazioni di poco migliori del perfetto mescolamento.

Sistema di distribuzione	Principio di funzionamento	Efficienza nel controllo della trasmissione di contaminanti aerotrasportati
Wall attached ventilation (WAV)	L'aria è immessa dall'alto con un getto adiacente ad una parete o pilastro che ne promuove la penetrazione fino al pavimento.	Prestazioni di poco migliori del perfetto mescolamento.
Stratum ventilation (SV)	L'aria è immessa orizzontalmente e aspirata dal lato opposto per realizzare un flusso ordinato.	Elevata efficienza nella prevenzione della trasmissione in assenza di flussi tra sorgente e recettore.
Protected occupied zone ventilation (POV)	L'aria è immessa con getti diretti verso le zone di utilizzazione. L'aspirazione è realizzata a distanza.	Migliore efficienza nella prevenzione della trasmissione rispetto al mescolamento.
Laminar airflow ventilation (LAF)	L'aria è immessa da ampie superfici a bassa velocità (e turbolenza) con ampie superfici di aspirazione, in modo da realizzare moti laminari all'interno dell'ambiente.	Elevata efficienza nella prevenzione della trasmissione.
Intermittent ventilation (IV)	L'aria è immessa in modo intermittente con getti ad alta velocità.	Migliore efficienza di mescolamento rispetto a MV.

4 Approfondimenti

Gli studi sull'interazione della diffusione di patogeni con gli impianti di ventilazione e climatizzazione sono stati numerosi nel periodo successivo alla pandemia, affrontando molteplici aspetti. Ciononostante, è emersa l'assenza di considerazioni in merito alla portata d'aria esterna richiesta, in merito a cui non vi era consenso nelle raccomandazioni, e in merito all'utilizzo del ricircolo, che non è stato affrontato nella letteratura esaminata. Nel presente capitolo sono quindi affrontati questi due aspetti.

4.1 Portata d'aria esterna

I modelli di diluizione con perfetto mescolamento comportano una correlazione inversa tra portata d'aria e concentrazione degli inquinanti a regime. Ciò implica una riduzione progressiva dell'efficacia incrementale di un aumento della portata. Per contro, l'incremento della portata d'aria esterna comporta un aumento lineare del fabbisogno energetico per i trattamenti dell'aria esterna. Pertanto, formulando un vincolo di ottimizzazione è possibile determinare la massima portata opportuna d'aria esterna. D'altra parte, la formulazione del vincolo impone una valutazione più ampia, dovendo confrontare la riduzione di un rischio sanitario con l'incremento di un costo economico, energetico e ambientale. Ciò comporta una significativa difficoltà di formulazione delle condizioni di ottimo. Pertanto, le considerazioni in merito a tale aspetto non sono state conclusive.

4.2 Rilevanza della durata della permanenza negli ambienti

Una questione accessoria emersa è stata la portata ottimale in condizioni di bassa probabilità di presenza di una sorgente e di permanenza limitata degli occupanti. Tali circostanze sono comuni nelle aree di transito delle stazioni dei mezzi pubblici (aeroporti, stazioni ferroviarie, ecc.) e nelle aree di transito di ambienti con pluralità di utenti (hall di albergo, ecc.). Presupponendo che il monitoraggio sanitario garantisca l'allontanamento di

eventuale personale stanziale infetto, in condizioni di limitata incidenza della epidemia sulla popolazione, è possibile presumere che la sorgente di patogeni permanga un tempo limitato nell'ambiente, pari al tempo di transito degli altri passeggeri/utenti.

In base all'equazione (16) sono state calcolate le curve di evoluzione della carica virale in ambiente per i diversi tempi di permanenza, nell'ipotesi di carica iniziale nulla e una sola sorgente come illustrato in Figure 23-24.

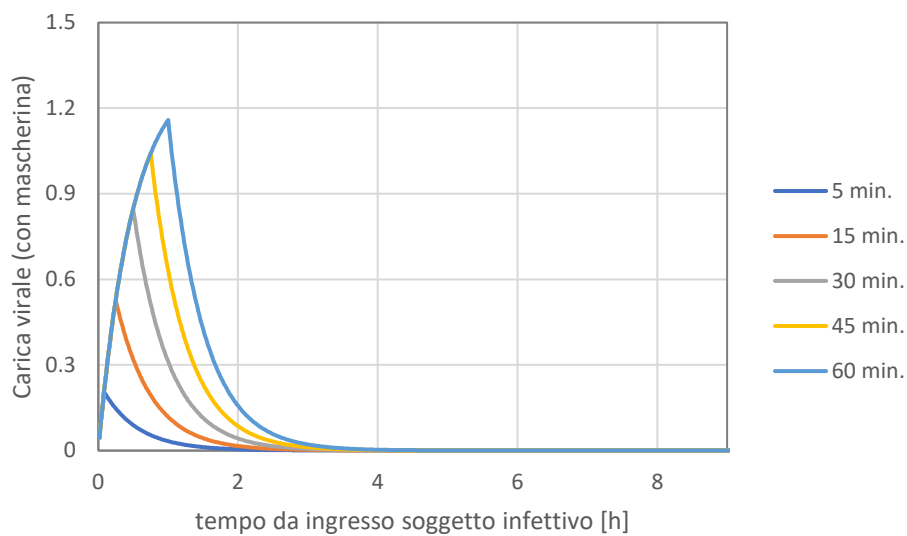


Figura 23: carica virale in ambiente Nt per diversi periodi di permanenza, tasso di ventilazione 2 vol/h

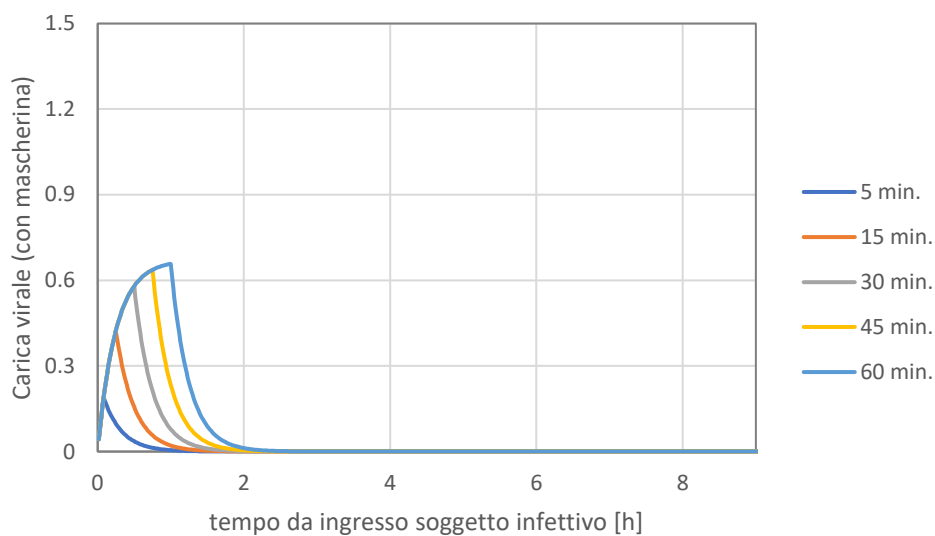


Figura 24: carica virale in ambiente Nt per diversi periodi di permanenza, tasso di ventilazione 4 vol/h

Il rischio di contagio è correlato all'esposizione dalla ben nota espressione:

$$RI = 1 - e^{-k \int_{t_i}^{t_f} N_t dt} \quad (33)$$

Il coefficiente k che compare nell'espressione deve essere valutato in relazione alle specifiche caratteristiche del virus in esame. Nel caso del SARS-CoV-2 è possibile ricavare tale valore dalle rilevazioni dell'episodio di diffusione avvenuto a Guangzhou, Cina, il 24 Gennaio 2020 (Lu et al. 2020) in cui è stata rilevata una probabilità di contagio di 1/7 a fronte di una permanenza di 73 minuti in un locale climatizzato. Dalle caratteristiche descrittive dell'ambiente è possibile presumere un tasso di ventilazione di 0.5 vol/h (valutazione per eccesso), da cui deriva un coefficiente k pari a 5.57×10^{-3} . Nell'episodio di diffusione citato non erano in uso mascherine (trattandosi peraltro di un ristorante). Dai dati riportati in Feng et al. (2020) si deriva che l'uso di mascherine di tipo "comunitario" garantisce una riduzione del 90% delle particelle emesse con diametro superiore a $10 \mu\text{m}$, come illustrato in Figura 25.

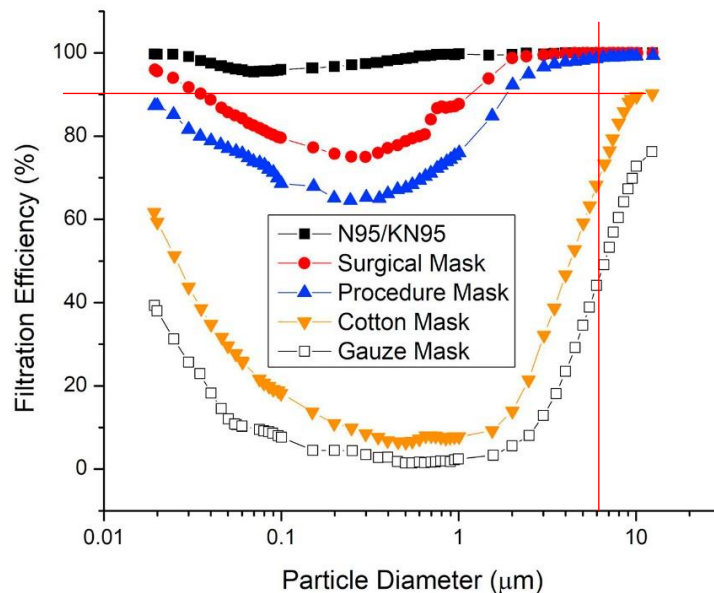


Figura 25: Efficienza di filtrazione di diverse tipologie di mascherine (Feng et al., 2020)

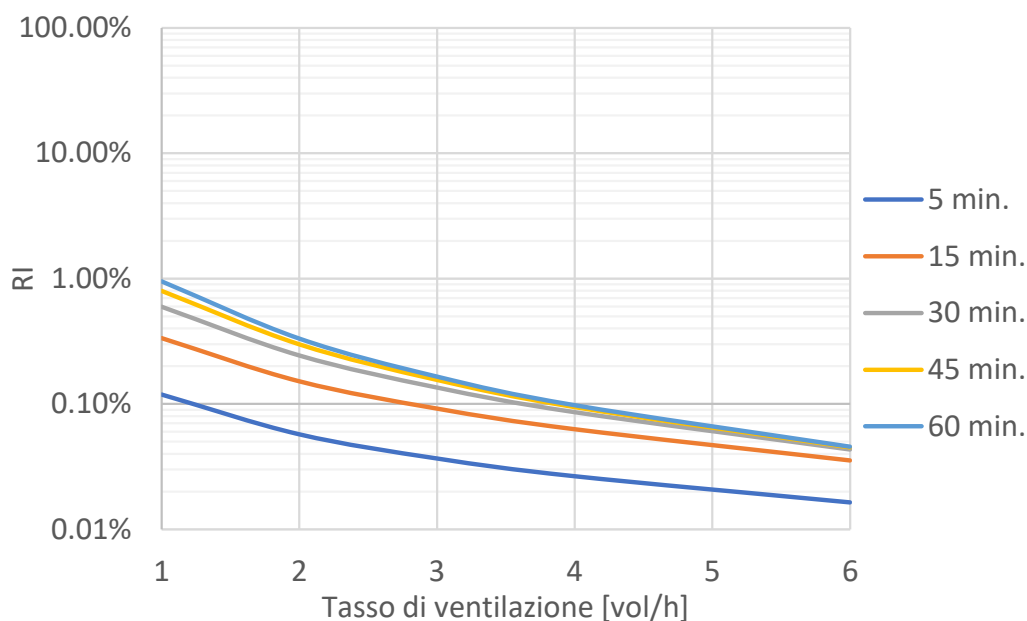


Figura 26: Rischio cumulato di trasmissione per esposizione prolungata ad una singola sorgente in relazione alla durata di permanenza della sorgente nell'ambiente e alla portata di ventilazione

Sulla base di tale valutazione sono state costruite le curve di rischio per esposizione prolungata (es. operatori delle arre di transito) ipotizzando un periodo di esposizione di 8 ore a partire dall'inizio della generazione. Ovviamente, l'indice di rischio RI si riduce al ridursi del tempo di permanenza e all'aumentare del tasso di ventilazione, come illustrato in Figura 26. Considerato che l'eq. (16) è lineare, per valori ridotti del rischio, la presenza di una maggiore numerosità di sorgenti comporta incrementi quasi lineari del rischio. Considerato che il valore del rischio dipende dalla trasmissibilità del patogeno, la valutazione della portata opportuna deve essere riferita alle specifiche circostanze e non è possibile una generalizzazione.

4.3 Utilizzo del ricircolo

Come illustrato nell'introduzione, durante la pandemia la maggior parte degli enti ha raccomandato l'esclusione del ricircolo. Tale valutazione è stata oggetto di contestazione da parte degli operatori del settore, ma in letteratura non sono disponibili approfondimenti in materia.

Nel caso di sistemi di ventilazione con distribuzione non uniforme (Paragrafo 3.3.2) i vantaggi rilevati sono conseguenti alla riduzione del mescolamento tra la porzione d'ambiente interessata dalla sorgente e gli eventuali recettori. È quindi evidente che un ricircolo comporterebbe la perdita di tale vantaggio.

Per contro, negli impianti a mescolamento, il ricircolo implica il prelievo di aria a condizioni di carica patogena ambiente e reintroduzione nello stesso. Ciò implicherebbe l'assenza di variazioni della carica virale. D'altra parte, anche negli impianti a mescolamento, specie se in ambienti di dimensioni apprezzabili, la migrazione dei patogeni è comunque limitata, generandosi gradienti di concentrazione.

Pertanto, al fine di valutare l'effetto di un ricircolo, è stato formulato un modello con separazione di un ambiente in porzioni discrete, presumendo una distribuzione uniforme degli impianti e un perfetto mescolamento all'interno di ciascuna zona. Per contro, la circolazione dell'aria tra una zona e l'altra è stata assunta limitata. Inoltre, è stato ipotizzato che l'aria di ricircolo sia prelevata in modo uniforme da tutte le zone.

Assumendo una concentrazione iniziale nulla, l'eq. (16) diventa

$$N_{t,i} = \frac{1}{n} \left(q \cdot I + n_R \cdot \left(\frac{1}{Z} \cdot \sum_j N_{t,j} - N_{t,i} \right) + \sum_j n_{m,ij} \cdot (N_{t,j} - N_{t,i}) \right) \cdot (1 - e^{-n \cdot t}) \quad (34)$$

In cui, n_R è la portata di ricircolo moltiplicata per il complemento dell'efficienza di filtrazione; $n_{m,ij}$ è la portata di mescolamento tra ciascuna coppia di zone adiacenti. La formulazione del modello garantisce una concentrazione complessiva indipendente dal numero di zone considerate.

Il modello è stato applicato ad un ambiente di forma regolare suddividendolo in 9 settori con una matrice 3x3. È stata valutata la presenza di una singola sorgente alternativamente in una posizione d'angolo o in una posizione centrale. La portata di ricircolo n_R è stata valutata come frazione della portata di ventilazione. Il mescolamento $n_{m,ij}$ tra zone adiacenti è stato valutato come frazione della portata di ventilazione, assumendo due valori: 1% basso mescolamento, 10% elevato mescolamento.

Si riportano nelle figure 27-29 le evoluzioni nel tempo delle concentrazioni di patogeni nel caso di emittente nell'angolo in assenza di ricircolo ed elevato mescolamento

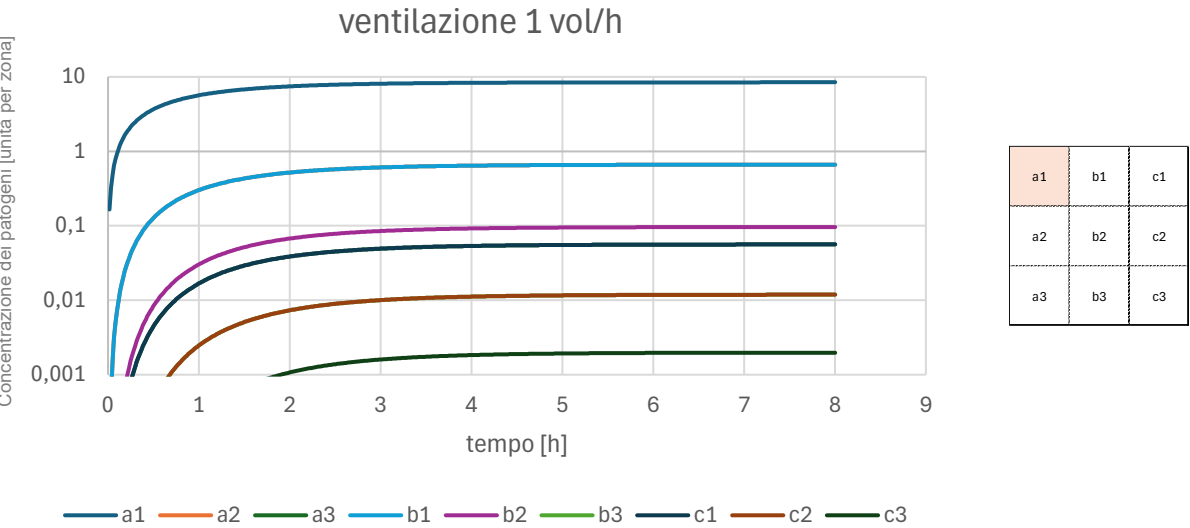


Figura 27: evoluzione nel tempo della concentrazione di patogeni per ciascuna zona, sorgente in a1, elevato mescolamento assenza di ricircolo, ventilazione 1 vol/h

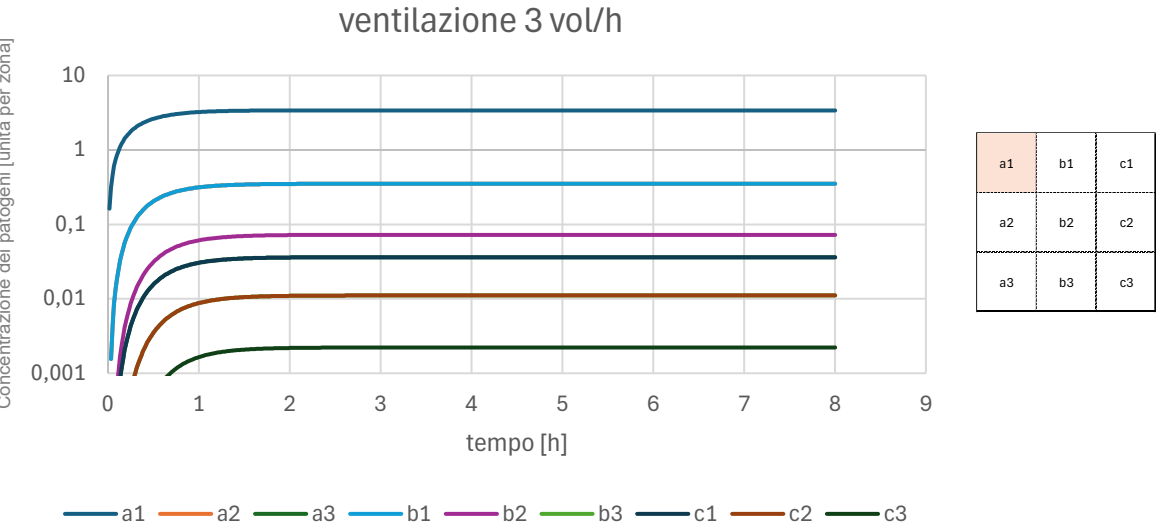


Figura 28: evoluzione nel tempo della concentrazione di patogeni per ciascuna zona, sorgente in a1, elevato mescolamento assenza di ricircolo, ventilazione 3 vol/h

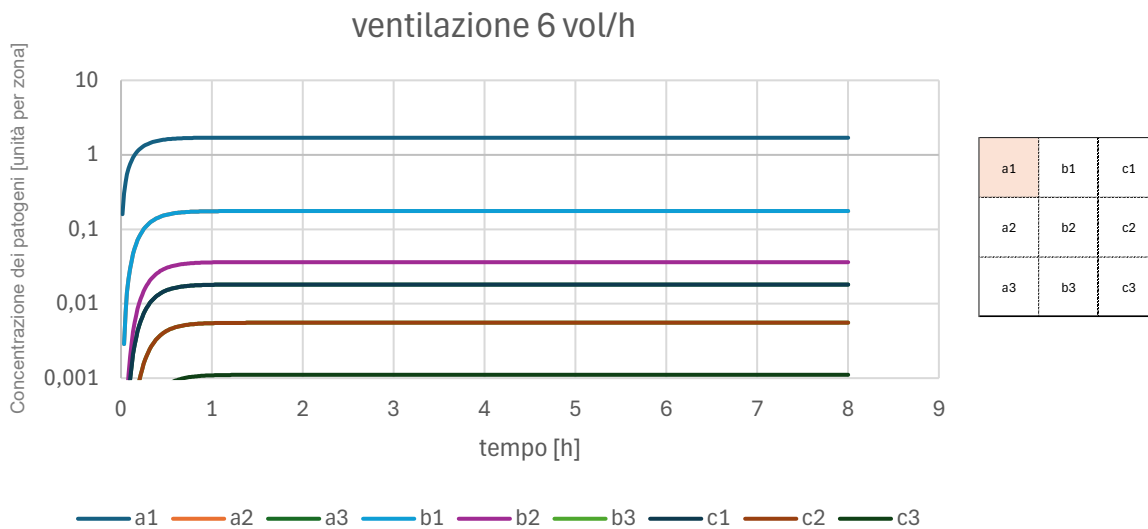


Figura 29: evoluzione nel tempo della concentrazione di patogeni per ciascuna zona, sorgente in a1, elevato mescolamento assenza di ricircolo, ventilazione 6 vol/h

Ai fini della comparazione dei risultati sono stati valutati due parametri. R , rapporto tra la concentrazione nella zona di emissione e la concentrazione media; r , rapporto tra la minima concentrazione e quella nella zona di emissione. Di fatto, R esprime l'omogeneità del rischio di diffusione, mentre r esprime la riduzione del rischio di diffusione nelle condizioni più favorevoli (massima distanza tra ricevente e sorgente).

Gli esiti per le configurazioni con emittente nell'angolo (a1) e con emittente in posizione centrale (b2) sono illustrati nelle figure 30-33

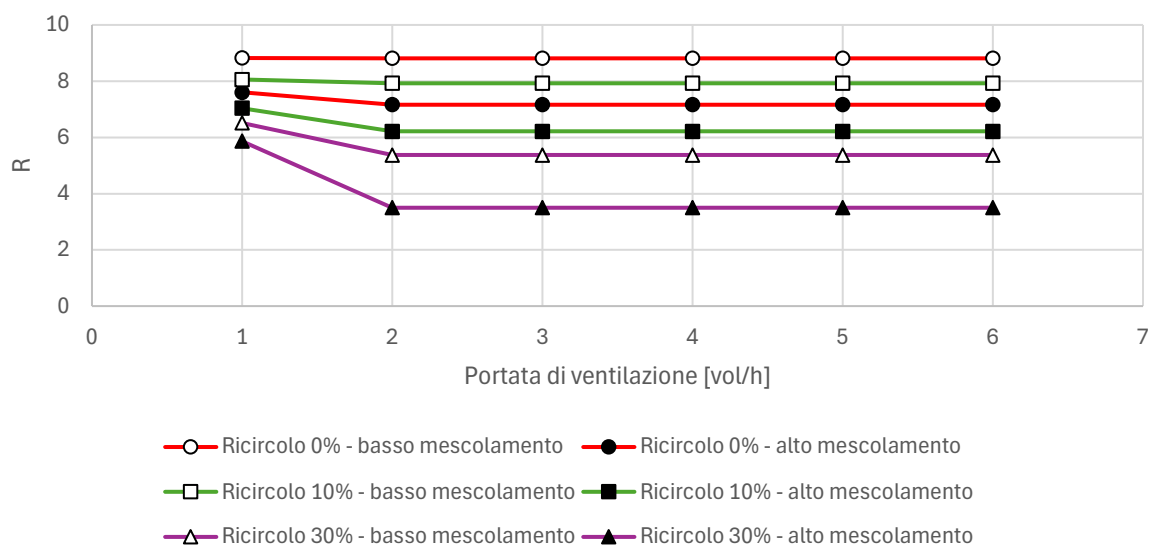


Figura 30: emittente nell'angolo, R rapporto tra la concentrazione nella zona di emissione e la concentrazione media

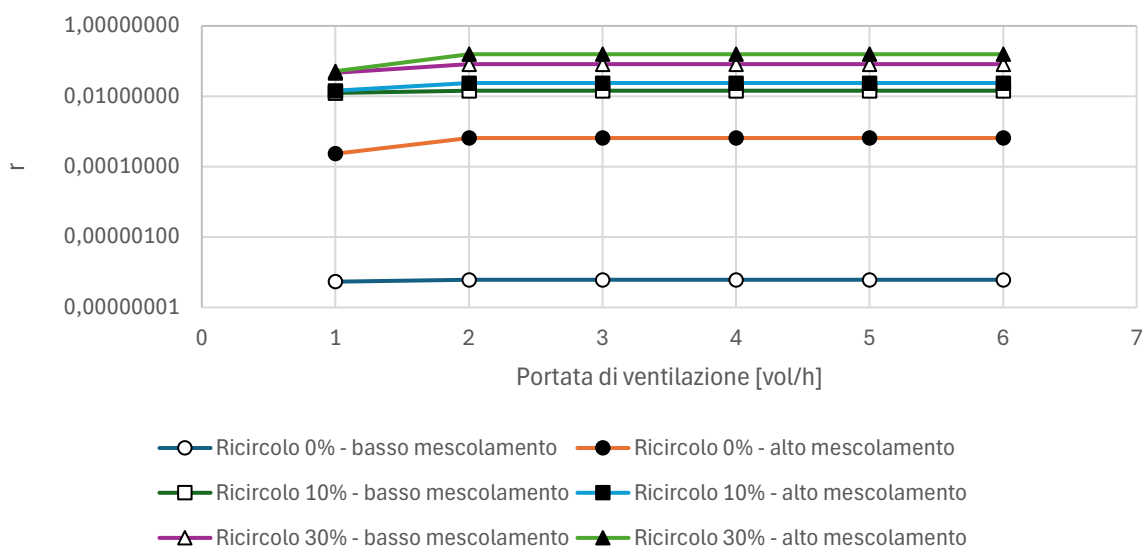


Figura 31: emittente nell'angolo, r rapporto tra la concentrazione minima e quella nella zona di emissione

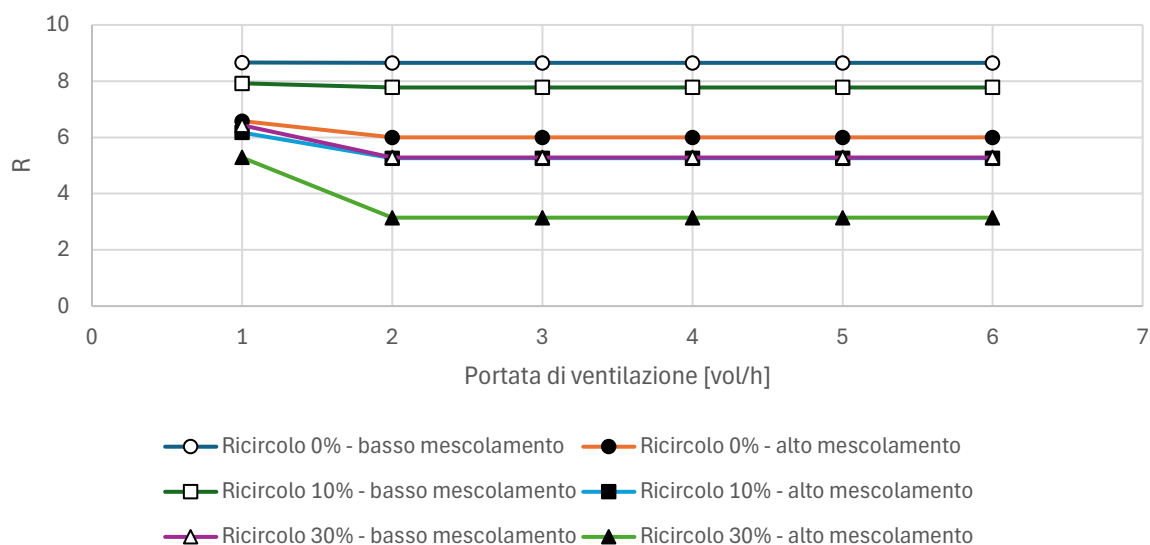


Figura 32: emittente al centro, R rapporto tra la concentrazione nella zona di emissione e la concentrazione media

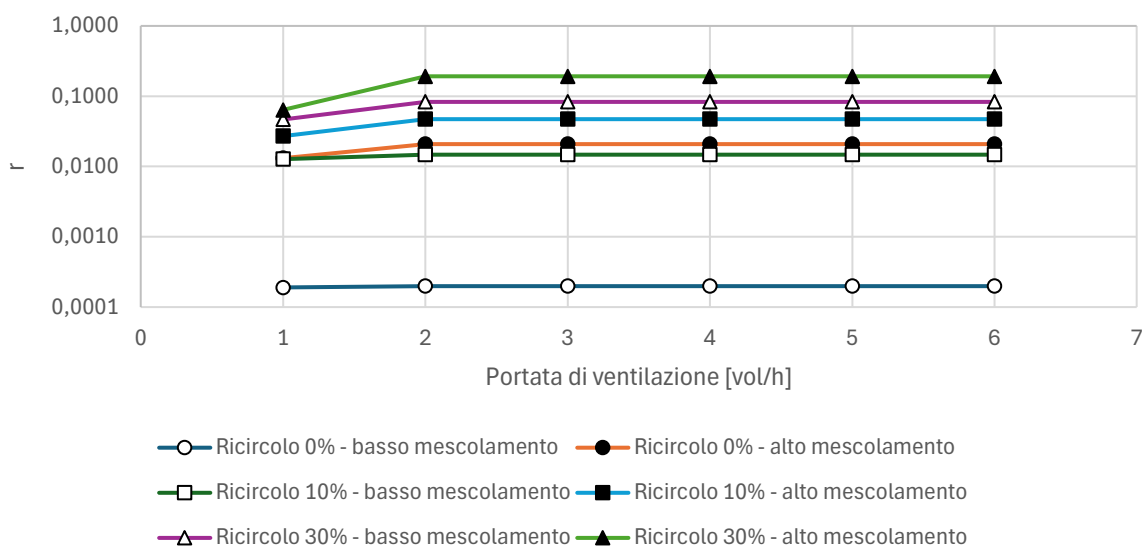


Figura 33: emittente al centro, r rapporto tra la concentrazione minima e quella nella zona di emissione

Si osserva che per tassi di ventilazione superiori a 2 vol/h, l'entità della ventilazione non modifica la distribuzione relativa all'interno degli ambienti. Per quanto attiene al ricircolo si osserva che ha una rilevanza maggiore rispetto al mescolamento. D'altra parte, in presenza di elevato mescolamento la concentrazione relativa in assenza di ricircolo si approssima al valore con ricircolo. Ne segue che:

- In presenza di impianti con distribuzione omogenea e con limitazione degli spostamenti degli occupanti, potendo limitare l'entità del mescolamento, l'adozione del ricircolo comporta un incremento del rischio di diffusione.
- In presenza di impianti con distribuzione disomogenea e/o in presenza di elevati spostamenti degli occupanti, l'utilizzo del ricircolo può essere accettabile.

5 Conclusioni e futuri sviluppi

Dall'analisi delle evidenze scientifiche è stato possibile trarre le seguenti conclusioni in merito alle principali azioni di mitigazione della diffusione di patogeni aerotrasmessi, con riferimento alle azioni di cui alla Tabella 1.

5.1 Raccomandazioni

5.1.1 Portata d'aria esterna

La ventilazione deve garantire non meno di 2 ACH. Tale dovrebbe essere il minimo di progetto.

Valori superiori, fino a 4 ACH, sono di ausilio, garantendo diluizioni più significative.

Ulteriori incrementi presentano vantaggi incrementali decrescenti. Le valutazioni dovranno essere sviluppate in modo specifico in relazione alle condizioni di rischio limite.

In caso di permanenza limitata di potenziali sorgenti, 4 ACH risulta adeguato per una mitigazione del rischio.

5.1.2 Ricircolo

L'utilizzo del ricircolo è inappropriato per tutti gli impianti di ventilazione che determinano una segregazione delle zone, che si tratti di impianti che servono ambienti fisicamente distinti oppure di impianti con distribuzione disomogenea in ambiente.

Per tali tipologie di impianto sarà opportuno che in fase di progettazione sia prevista la possibilità di esercizio a tutt'aria esterna in caso di future esigenze, dimensionando in modo opportuno le batterie di scambio e le centrali.

Le uniche applicazioni in cui l'utilizzo del ricircolo non determina apprezzabili incrementi del rischio sono ambienti con elevato mescolamento interno e/o elevata mobilità delle persone. In tali casi, l'utilizzo del ricircolo, una volta realizzata la massima portata d'aria esterna possibile, non comporta apprezzabili variazioni delle concentrazioni dei patogeni.

5.1.3 Aspirazione

Nelle applicazioni con ridotta mobilità delle persone è opportuno che le aspirazioni degli impianti siano disposte in modo da non promuovere il mescolamento dell'aria in ambiente. Ciò consente di ridurre il rischio di trasmissione all'interno di un ambiente, anche in presenza di impianto a mescolamento.

5.1.4 Post-ventilazione

La durata di esercizio dell'impianto di ventilazione deve essere protratta per promuovere l'aspirazione di eventuali patogeni in sospensione, riducendone la deposizione in ambiente nel periodo di inattività dell'impianto. La durata di tale attività dipende dall'entità della ventilazione. La raccomandazione di garantire 3 ricambi complessivi è coerente con i modelli di diluizione, garantendo una riduzione del 95% dei patogeni in sospensione. Per una riduzione del 99% sono necessari 5 ricambi complessivi; per il 99,9% sono necessari 7 ricambi complessivi.

La durata della post-ventilazione potrà essere valutata in relazione al grado di rischio residuo accettabile.

5.1.5 Pre-ventilazione

In presenza di una post-ventilazione la pre-ventilazione non modifica la concentrazione di patogeni in ambiente. Ovviamente, in presenza di attività di pulizia degli ambienti prima del loro utilizzo, che può determinare la risospensione dei patogeni, è opportuna una post-ventilazione dell'attività di pulizia stessa.

5.1.6 Recuperatore di calore

Le limitazioni all'utilizzo dei recuperatori di calore sono conseguenti al rischio di ricircolo spontaneo. La valutazione della possibilità di utilizzo deve essere formulata con riferimento al rischio di trafilamenti di aria tra espulsione e presa d'aria esterna e all'accettabilità del ricircolo.

In fase di progettazione è opportuno che sia selezionata una tipologia di recuperatore che ne garantisca la possibilità di utilizzo anche in condizioni di esclusione del ricircolo.

5.2 Futuri sviluppi e approfondimenti

La prolungata e articolata ricerca bibliografica condotta ha evidenziato l'ampia raccolta di evidenze sviluppate in letteratura, specie dopo la pandemia.

L'aspetto di maggiore interesse da approfondire è l'individuazione di un vincolo di ottimizzazione della portata di aria esterna che tenga conto dei costi economici, energetici e ambientali a fronte del vantaggio sanitario e sociale raggiungibile.

Tale formulazione dovrà essere articolata in relazione alla tipologia di pandemia, richiedendo quindi una preliminare definizione delle caratteristiche salienti utili ad indentificarne le maggiori conseguenze. Si tratta di un'attività interdisciplinare certamente complessa ma molto rilevante ai fini della progettazione degli impianti di ventilazione e della loro gestione in condizioni di emergenza.

6 Bibliografia

Jacob EH. 1894. Notes on the Ventilation and Warming of Houses, Churches, Schools and Other Buildings London: Soc. Promot. Christ. Knowl.

J. P. Duguid, The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *Epidemiol. Infect.* 44, 471–479 (1946).

W.F. Wells, Airborne Contagion and Air Hygiene: an Ecological Study of Droplet Infections, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1955.

Morton B, Taylor GI, Turner JS. 1956. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. R. Soc. A* 234:11961–23

Prych EA, Harty FR Jr., Kennedy JF. 1964. Turbulent wakes in density stratified fluids of finite extent Tech. Rep. 65 MIT Hydrodyn. Lab. Cambridge, MA:

J. R. Songer, Influence of relative humidity on the survival of some airborne viruses. *Appl. Microbiol.* 15, 35–42 (1967).

Baines W, Turner J. 1969. Turbulent buoyant convection from a source in a confined region. *J. Fluid Mech.* 37:151–80

Riley, E. C., Murphy, G., & Riley, R. L. (1978). Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *American Journal of Epidemiology*, 107(5), 421–432.
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112560>

Linden PF. 1979. Mixing in stratified fluids. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* 13:13–23

List E. 1982. Turbulent plumes and jets. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 14:189–212

R.L. Riley, Indoor airborne infection, *Environ. Int.* 8 (1–6) (1982) 317–320,
[https://doi.org/10.1016/0160-4120\(82\)90043-5](https://doi.org/10.1016/0160-4120(82)90043-5).

- Linden PF, Lane-Serff G, Smeed D. 1990. Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation. *J. Fluid Mech.* 212:309–35
- Dalziel S, Lane-Serff GF. 1991. The hydraulics of doorway exchange flows. *Build. Environ.* 26:2121–35
- E. C. Pirtle, G. W. Beran, Virus survival in the environment. *Rev. Sci. Tech.* 10, 733–748 (1991).
- Lane-Serff GF, Linden PF, Hillel M. 1993. Forced, angled plumes. *J. Hazard. Mater.* 33:175–99
- Brohus H, Nielsen PV. 1996. Personal exposure in displacement ventilated rooms. *Indoor Air* 6:3157–67
- Cooper P, Linden PF. 1996. Natural ventilation of an enclosure containing two buoyancy sources. *J. Fluid Mech.* 311:153–76
- Miller R. S., Harstad K., Bellan J., 1998, Evaluation of equilibrium and non-equilibrium evaporation models for many-droplet gas-liquid flow simulations, *International Journal of Multiphase Flow* 24 (1998) 1025-1055
- Linden PF. 1999. The fluid mechanics of natural ventilation. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 31:201–38
- W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* (Wiley, ed. 2, 1999).
- Dalziel SB, Hughes GO, Sutherland BR. 2000. Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren. .' *Exp. Fluids* 28:4322–35

- Filippelli M, Pellegrino R, Iandelli I, Misuri G, Rodarte JR et al. 2001. Respiratory dynamics during laughter. *J. Appl. Physiol.* 90:41441–46
- Mundt E. 2001. Non-buoyant pollutant sources and particles in displacement ventilation. *Build. Environ.* 36:7829–36
- Xing H, Hatton A, Awbi HB. 2001. A study of the air quality in the breathing zone in a room with displacement ventilation. *Build. Environ.* 36:7809–20
- Bjørn E, Nielsen PV. 2002. Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms. *Indoor Air* 12:3147–64
- J.W. Axley, S.J. Emmerich, A method to assess the suitability of a climate for natural ventilation of commercial buildings, *Proc. Indoor Air* (2002).
- T. Karimipannah, H.B. Awbi, Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation, *Build. Environ.* 37 (12) (2002) 1329–1342, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00117-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00117-2).
- AICARR. Protocollo per la riduzione del rischio da diffusione del SARS-CoV2-19 mediante gli impianti di climatizzazione e ventilazione esistenti. Disponibile al sito www.aicarr.org/Documents/News/200318_SCHEMA_GESTIONE_HVAC_SARSCoV219_DEF.pdf
- Rudnick S, Milton DK. 2003. Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air* 13:3237–45
- Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13(3), 237–245.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>

WHO (World Health Organ.). 2003. Consensus document on the epidemiology of severe acute respiratory syndrome (SARS) Tech. Rep. WHO Geneva:

X. Ji, G. Li, Z. Dai, The research advance of influence factors and prediction evaluation for indoor thermal environment comfort, *J. Hyg. Res.* 32 (2) (2003) 295–298.

A.K. Melikov, Personalized ventilation, *Indoor Air* 14 (Suppl 7) (2004) 157–167, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00284.x>.

Liao CM, Chang CF, Liang HM. 2005. A probabilistic transmission dynamic model to assess indoor airborne infection risks. *Risk Anal* 25:51097–107

Lin Z, Chow T, Tsang C, Fong K, Chan L. 2005. CFD study on effect of the air supply location on the performance of the displacement ventilation system. *Build. Environ.* 40:81051–67

M. Nicas, W.W. Nazaroff, A. Hubbard, Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens, *J. Occup. Environ. Hyg.* 2 (3) (2005) 143–154, <https://doi.org/10.1080/15459620590918466>.

W. Zhang, Prediction and Visualizing Validation of Downward Directed Vertical Wall Jets and Air Lake Phenomena, Xi An University of Architecture and Technology, 2005.

Z. Lin, T.T. Chow, C.F. Tsang, Stratum Ventilation? A Conceptual Introduction, *Proceeding of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Beijing, China, 2005, pp. 3260–3264.

Liu Q, Linden PF. 2006. The fluid dynamics of an underfloor air distribution system. *J. Fluid Mech.* 554:323–41

Noakes CJ, Beggs CB, Sleigh PA, Kerr KG. (2006). Modelling the transmission of airborne infections in enclosed spaces. *Epidemiology and Infection*. (Citato in Risultato 2.2)

R. Tellier, Review of aerosol transmission of influenza A virus, *Emerg. Infect. Dis.* 12 (11) (2006) 1657–1662, <https://doi.org/10.3201/eid1211.060426>.

Zhu, S., Kato, S., & Yang, J. H. (2006). Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment. *Building and Environment*, 41(12), 1691–1702. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.06.021>

Bolster D, Linden P. 2007. Contaminants in ventilated filling boxes. *J. Fluid Mech.* 591:97–116

CDC, Guideline for isolation precautions preventing transmission of infectious agents in healthcare settings, Available from.

<http://www.cdc.gov/hicpac/2007IP/2007isolationPrecautions.html>, 2007. (Accessed 25 January 2023).

Kaye N, Hunt G. 2007. Heat source modelling and natural ventilation efficiency. *Build. Environ.* 42:41624–31

Li Y, Leung GM, Tang JW, Yang X, Chao CYH et al. 2007. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment? A multidisciplinary systematic review. *Indoor Air* 17:12–18

Siegel JD, Rhinehart E, Jackson M, Chiarello L; Health Care Infection Control Practices Advisory Committee. (2007). Guideline for isolation precautions: preventing transmission of infectious agents in healthcare settings. *Am J Infect Control*; 35(10 Suppl 2):S65-164. (Citato in Risultati 1.2, 1.3)

T. Karimipannah, B. Moshfegh, On the performance of confluent jets ventilation system in office space, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms (Roomvent 2007)*, Finland, Helsinki, 2007, p. 13 –5.

- Xie X., Li Y., Chwang A. T. Y., Ho P. L., Seto W. H., 2007, How far droplets can move in indoor environments – revisiting the Wells evaporation–falling curve, *Indoor Air* 2007; 17: 211–225
- Y. Li, G.M. Leung, J.W. Tang, X. Yang, C.Y.H. Chao, J.Z. Lin, et al., Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment – a multidisciplinary systematic review, *Indoor Air* 17 (1) (2007) 2–18, <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2006.00445.X>.
- YY. Li, G. M. Leung, J. W. Tang, X. Yang, C. Y. H. Chao, J. Z. Lin, J. W. Lu, P. V. Nielsen, J. Niu, H. Qian, A. C. Sleight, H.-J. J. Su, J. Sundell, T. W. Wong, P. L. Yuen, Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review, *Indoor Air*, 17 (2007), pp. 2-18, 10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x
- A. Li, S. Qui, G. Wang, in: Vertical Wall Attached Airflow and Air Lake Mode Ventilation System. China Patent, ZL, 2008, 200810017349 0 (in Chinese).
- Bolster DT, Linden PF. 2008a. Particle transport in low energy ventilation systems. Part 1: Theory of steady states. *Indoor Air* 19:122–29
- Bolster DT, Linden PF. 2008b. Particle transport in low energy ventilation systems. Part 2: Transients and experiments. *Indoor Air* 19:130–44
- Choi JI, Edwards JR. 2008. Large eddy simulation and zonal modeling of human-induced contaminant transport. *Indoor Air* 18:3233–49
- G.N. Sze To, M.P. Wan, C.Y.H. Chao, F. Wei, S.C.T. Yu, J.K.C. Kwan, A methodology for estimating airborne virus exposures in indoor environments using the spatial distribution of expiratory aerosols and virus viability characteristics, *Indoor Air* 18 (5) (2008) 425–438, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00544.x>.

Ivey G, Winters K, Koseff J. 2008. Density stratification, turbulence, but how much mixing?. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40:169–84

W.W. Nazaroff, Inhalation intake fraction of pollutants from episodic indoor emissions, *Build. Environ.* 43 (3) (2008) 269–277, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.021>.

Y. Cho, H.B. Awbi, T. Karimipannah, Theoretical and experimental investigation of wall confluent jets ventilation and comparison with wall displacement ventilation, *Build. Environ.* 43 (6) (2008) 1091–1100, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.006>.

A. Liberati, D.G. Altman, J. Tetzlaff, C. Mulrow, P.C. Gotzsche, J.P.A. Ioannidis, et al., The PRISMA statement for reporting systematic reviews and metaanalyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration, *BMJ* 339 (2009) b2700, <https://doi.org/10.1136/bmj.b2700>.

Gao X, Li Y, Leung GM. (2009). Ventilation Control of Indoor Transmission of Airborne Diseases in an Urban Community. *Indoor and Built Environment*, Vol. 18, Issue. 3, p. 205. (Citato in Risultato 2.2)

Li Y. et al. (2009). Airborne transmission of disease in hospitals. *Journal of The Royal Society Interface*. (Citato in Risultato 2.5)

Noakes, C. J., & Sleight, P. A. (2009). Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in enclosed spaces. *Journal of the Royal Society Interface*, 6(Suppl 6), S791–S808. <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0221.focus>

To, G. N. S., et al. (2009). Review and comparison between the Wells–Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases. (PMC, classico sulle modellizzazioni). (PMC)

Z.D. Bolashikov, A.K. Melikov, Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens, *Build. Environ.* 44 (7) (2009) 1378–1385, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.001>.

Beggs CB, Shepherd SJ, Kerr KG. 2010. Potential for airborne transmission of infection in the waiting areas of healthcare premises: stochastic analysis using a Monte Carlo model. *BMC Infect. Dis.* 10:247

Gupta JK, Lin CH, Chen Q. 2010. Characterizing exhaled airflow from breathing and talking. *Indoor Air* 20:131–39

J. A. Posada, J. Redrow, I. Celik, A mathematical model for predicting the viability of airborne viruses. *J. Virol. Methods* 164, 88–95 (2010).

R. Padilla-Perez, Rodriguez H. Schilman A, Respiratory Health Effects of Indoor Air Pollution, International Union Against Tuberculosis and Lung Disease, 2010.

Sze To GN, Chao CYH 2010. Review and comparison between the Wells–Riley and dose–response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases. *Indoor Air* 20:12–16

Teunis PF, Brien N, Kretzschmar ME (2010) High infectivity and pathogenicity of influenza A virus via aerosol and droplet transmission. *Epidemics* 2(4):215–222

C. Buratti, R. Mariani, E. Moretti, Mean age of air in a naturally ventilated office: experimental data and simulations, *Energy Build.* 43 (8) (2011) 2021–2027, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.015>.

Gralton J, Tovey E, McLaws ML, Rawlinson WD (2011) The role of particle size in aerosolised pathogen transmission: a review. *J Infect* 62(1):1–13

J. Gralton, E. Tovey, M.-L. McLaws, W.D. Rawlinson, The role of particle size in aerosolised pathogen transmission: a review, *J. Infect.* 62 (1) (2011) 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2010.11.010>.

Knibbs LD, Morawska L, Bell SC, Grybowski P. Room ventilation and the risk of airborne infection transmission in 3 health care settings within a large teaching hospital. *American Journal of Infection Control* 2011; 39: 866-872.

L. Xiaoping, N. Jianlei, G. Naiping, Spatial distribution of human respiratory droplet residuals and exposure risk for the co-occupant under different ventilation methods, *HVAC R Res.* 17 (4) (2011) 432–445, <https://doi.org/10.1080/10789669.2011.578699>.

B.R. Hughes, J.K. Calautit, S.A. Ghani, The development of commercial wind towers for natural ventilation: a review, *Appl. Energy* 92 (2012) 606–627, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>.

Gao N, He Q, Niu J. 2012. Numerical study of the lock-up phenomenon of human exhaled droplets under a displacement ventilated room. *Build. Simul.* 5:51–60

J. Yu, Q. Ouyang, Y. Zhu, H. Shen, G. Cao, W. Cui, A comparison of the thermal adaptability of people accustomed to air-conditioned environments and naturally ventilated environments, *Indoor Air* 22 (2) (2012) 110–118, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00746.x>.

Lindsley WG, Pearce TA, Hudnall JB, Davis KA, Davis SM, Fisher MA, Khakoo R, Palmer JE, Clark KE, Celik I, Coffey CC, Blachere FM, Beezhold DH. (2012). Quantity and size distribution of cough-generated aerosol particles produced by influenza patients during and after illness. *J. Occup Environ Hyg*; 9:443-9. (Citato in Risultato 1.3)

M. Salmanzadeh, G. Ahmadi, M. Rahnema, Transport and deposition of evaporating droplets in a ventilated environment, *Part. Sci. Technol.* 30 (1) (2012) 17–31, <https://doi.org/10.1080/02726351.2010.544015>.

W. Liu, X.-Y. You, Transportation and risk analysis of influenza indoor and outdoor transportation and exposure risk analysis of influenza aerosol, *Indoor Built Environ.* 21 (5) (2012) 614–621, <https://doi.org/10.1177/1420326X11426164>.

ASHRAE, Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, GA, 2013.

B. Cao, Q. Shang, Z. Dai, Y. Zhu, The impact of air-conditioning usage on sick building syndrome during summer in China, *Indoor Built Environ.* 22 (3) (2013) 490–497, <https://doi.org/10.1177/1420326X12443246>.

C.A. Hviid, S. Svendsen, Experimental study of perforated suspended ceilings as diffuse ventilation air inlets, *Energy Build.* 56 (2013) 160–168, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.010>.

Cowling BJ, Ip DK, Fang VJ, Suntarattiwong P, Olsen SJ et al. 2013. Aerosol transmission is an important mode of influenza A virus spread. *Nat. Commun.* 4:1935

Gratton J Tovey TR, McLaws M-L, Rawlinson WD. Respiratory Virus RNA is detectable in airborne and droplet particles. *J Med Virol.* 2013;85:2151-9.

J. Fan, C.A. Hviid, H. Yang, Performance analysis of a new design of office diffuse ceiling ventilation system, *Energy Build.* 59 (2013) 73–81, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.001>.

- J.M. Villafruela, F. Castro, J.F. San Jose, J. Saint-Martin, Comparison of air change efficiency, contaminant removal effectiveness and infection risk as IAQ indices in isolation rooms, *Energy Build.* 57 (2013) 210–219, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.053>.
- L. Morawska, A. Afshari, G.N. Bae, G. Buonanno, C.Y.H. Chao, O. Hanninen, et al., Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment, *Indoor Air* 23 (6) (2013) 462–487, <https://doi.org/10.1111/ina.12044>.
- M.-M. Liu, Da Wang, Y. Zhao, Y.-Q. Liu, M.-M. Huang, Y. Liu, et al., Effects of outdoor and indoor air pollution on respiratory health of Chinese children from 50 kindergartens, *J. Epidemiol.* 23 (4) (2013) 280–287, <https://doi.org/10.2188/jea.JE20120175>.
- Tang JW, Nicolle A, Pantelic J, Klettner CA, Su R et al. 2013. Different types of door-opening motions as contributing factors to containment failures in hospital isolation rooms. *PLOS ONE* 8:6e66663
- A.S.H. Abdallah, Y. Hiroshi, T. Goto, N. Enteria, M.M. Radwan, M.A. Eid, Parametric investigation of solar chimney with new cooling tower integrated in a single room for New Assiut city, Egypt climate, *Int. J. Energy Environ. Eng.* 5 (2–3) (2014), <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0092-6>.
- Bourouiba L, Dehandschoewercker E, Bush JW. 2014. Violent expiratory events: on coughing and sneezing. *J. Fluid Mech.* 745:537–63
- C. Habchi, K. Ghali, N. Ghaddar, A simplified mathematical model for predicting cross contamination in displacement ventilation air-conditioned spaces, *J. Aerosol Sci.* 76 (2014) 72–86, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.05.009>.
- C. Zhang, P. Heiselberg, P.V. Nielsen, Diffuse ceiling ventilation – a review, *Int. J. Vent.* 13 (1) (2014) 49–64, <https://doi.org/10.1080/14733315.2014.11684036>.

C. Zhou, Z. Wang, Q. Chen, Y. Jiang, J. Pei, Design optimization and field demonstration of natural ventilation for high-rise residential buildings, *Energy Build.* 82 (2014) 457–465, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.036>.

G. Cao, H. Awbi, R. Yao, Y. Fan, K. Siren, R. Kosonen, et al., A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings, *Build. Environ.* 73 (2014) 171–186, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.009>.

G. Cao, K. Siren, S. Kilpelainen, Modelling and experimental study of performance of the protected occupied zone ventilation, *Energy Build.* 68 (2014) 515–531, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.008>.

Han Z, Sze To GN, Fu SC, Chao CYH, Weng W, Huang Q (2014) Effect of human movement on airborne disease transmission in an airplane cabin: study using numerical modeling and quantitative risk analysis. *BMC Infect Dis* 14:1–19

J.K. Calautit, B.R. Hughes, Measurement and prediction of the indoor airflow in a room ventilated with a commercial wind tower, *Energy Build.* 84 (2014) 367–377, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.015>.

J.K. Calautit, D. O'Connor, B.R. Hughes, Determining the optimum spacing and arrangement for commercial wind towers for ventilation performance, *Build. Environ.* 82 (2014) 274–287, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.024>.

J.S. Park, N.-Y. Jee, J.-W. Jeong, Effects of types of ventilation system on indoor particle concentrations in residential buildings, *Indoor Air* 24 (6) (2014) 629–638, <https://doi.org/10.1111/ina.12117>.

P. Nielsen, J. Zajas, M. Litewnicki, R. Jensen, Breathing and cross-infection risk in the microenvironment around people, *Build. Eng.* 120 (2014) T1.

- P. Peng, M. Pomianowski, C. Zhang, R. Guo, R.L. Jensen, K.T. Jonsson, et al., Experimental investigation on the ventilation performance of diffuse ceiling ventilation in heating conditions, *Build. Environ.* 205 (2021) 108262, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108262>.
- S. Ghahremanian, K. Svensson, M.J. Tummers, B. Moshfegh, Near-field development of a row of round jets at low Reynolds numbers, *Exp. Fluid* 55 (8) (2014), <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1789-2>.
- S. Guha, P. Hariharan, M. R. Myers, Enhancement of ICRP's lung deposition model for pathogenic bioaerosols. *Aerosol Sci. Technol.* 48, 1226–1235 (2014).
- S.B. Thool, S.L. Sinha, Performance evaluation of conventional mixing ventilation systems for operating room in the view of infection control by numerical simulation, *IJBSBT* 6 (4) (2014) 87–98, <https://doi.org/10.14257/ijbsbt.2014.6.4.09>.
- V. Vakiloroyaya, B. Samali, A. Fakhar, K. Pishghadam, A review of different strategies for HVAC energy saving, *Energy Convers. Manag.* 77 (2014) 738–754, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.023>.
- World Health Organization. Infection Prevention and Control of Epidemic-and Pandemic-prone Acute Respiratory Infections in Health Care. Geneva; 2014 (disponibile al sito https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/112656/9789241507134_eng.pdf;jsessionid=41AA684FB64571CE8D8A453C4F2B2096?sequence=1).
- Y. Lin, T.Y. Tsai, An experimental study on a full-scale indoor thermal environment using an Under-Floor Air Distribution system, *Energy Build.* 80 (2014) 321–330, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.028>.

Y. Zhou, Q. Deng, Numerical simulation of inter-floor airflow and impact on pollutant transport in high-rise buildings due to buoyancy-driven natural ventilation, *Indoor Built Environ.* 23 (2) (2014) 246–258, <https://doi.org/10.1177/1420326X13516969>.

A. Jurelionis, L. Gagytė, T. Prasauskas, D. Čiužas, E. Krugly, L. Šeduikytė, et al., The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: the experimental approach, *Energy Build.* 86 (2015) 305–313, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.014>.

C. Zhang, P.K. Heiselberg, M. Pomianowski, T. Yu, R.L. Jensen, Experimental study of diffuse ceiling ventilation coupled with a thermally activated building construction in an office room, *Energy Build.* 105 (2015) 60–70, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.048>.

Carrilho da Graça G, Daish NC, Linden PF 2015. A two-zone model for natural cross-ventilation. *Build. Environ.* 89:72–85

F. Romano, L. Marocco, J. Gusten, C.M. Joppolo, Numerical and experimental analysis of airborne particles control in an operating theater, *Build. Environ.* 89 (2015) 369–379, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.003>.

G. Cao, P.V. Nielsen, R.L. Jensen, P. Heiselberg, L. Liu, J. Heikkinen, Protected zone ventilation and reduced personal exposure to airborne cross-infection, *Indoor Air* 25 (3) (2015) 307–319, <https://doi.org/10.1111/ina.12142>.

ISO 14644:2015. Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: classification of air cleanliness by particle concentration. (Citato in Risultati 1.2, 1.3)

Mingotti N, Woods AW. 2015a. On the transport of heavy particles through an upward displacement-ventilated space. *J. Fluid Mech.* 772:478–507

Mingotti N, Woods AW. 2015b. On the transport of heavy particles through a downward displacement–ventilated space. *J. Fluid Mech.* 774:192–223

Seto WH. (2015). Airborne transmission and precautions: facts and myths. *J Hosp Infect*; 89:225-8. (Citato in Risultati 1.2, 1.3)

Sharpe T, Farren P, Howieson S, Tuohy P, McQuillan J. 2015. Occupant interactions and effectiveness of natural ventilation strategies in contemporary new housing in Scotland, UK. *Int. J. Environ. Res. Public* 12:78480–97

T. Arghand, T. Karimipannah, H.B. Awbi, M. Cehlin, U. Larsson, E. Linden, An experimental investigation of the flow and comfort parameters for under-floor, confluent jets and mixing ventilation systems in an open-plan office, *Build. Environ.* 92 (2015) 48–60, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.019>.

Z.T. Ai, C.M. Mak, D.J. Cui, On-site measurements of ventilation performance and indoor air quality in naturally ventilated high-rise residential buildings in Hong Kong, *Indoor Built Environ.* 24 (2) (2015) 214–224, <https://doi.org/10.1177/1420326X13508566>.

A. Jurelionis, L. Gagyte, L. Seduikyte, T. Prasauskas, D. Ciuzas, D. Martuzevicius, Combined air heating and ventilation increases risk of personal exposure to airborne pollutants released at the floor level, *Energy Build.* 116 (2016) 263–273, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.011>.

A. Kabanshi, H. Wigo, M. Sandberg, Experimental evaluation of an intermittent air supply system – Part 1: thermal comfort and ventilation efficiency measurements, *Build. Environ.* 95 (2016) 240–250, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.025>.

A. Rackes, A.P. Melo, R. Lamberts, Naturally comfortable and sustainable: informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates, *Appl. Energy* 174 (2016) 256–274, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.081>.

C. Zhang, T. Yu, P.K. Heiselberg, M.Z. Pomianowski, P.V. Nielsen, Diffuse Ceiling Ventilation: Design Guide, Department of Civil Engineering, Aalborg University, 2016.

CIBSE (Chart. Inst. Build. Serv. Eng.). 2016. Guide B: heating, ventilating, air conditioning and refrigeration Tech. Rep. CIBSE London:

D.S. Thatiparti, U. Ghia, K.R. Mead, Computational fluid dynamics study on the influence of an alternate ventilation configuration on the possible flow path of infectious cough aerosols in a mock airborne infection isolation room, *Sci. Technol. Built Environ.* 23 (2) (2016) 355–366, <https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1222212>.

Di Mu, N. Gao, T. Zhu, Wind tunnel tests of inter-flat pollutant transmission characteristics in a rectangular multi-storey residential building, Part A: effect of wind direction, *Build. Environ.* 108 (2016) 159–170, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.032>.

F.J. Offermann, A. Eagan, A.C. Offermann, S.S. Subhash, S.L. Miller, L.J. Radonovich, Potential airborne pathogen transmission in a hospital with and without surge control ventilation system modifications, *Build. Environ.* 106 (2016) 175–180, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.029>.

H. Yin, A. Li, Z. Liu, Y. Sun, T. Chen, Experimental study on airflow characteristics of a square column attached ventilation mode, *Build. Environ.* 109 (2016) 112–120, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.006>.

L. Stabile, M. Dell’Isola, A. Frattolillo, A. Massimo, A. Russi, Effect of natural ventilation and manual airing on indoor air quality in naturally ventilated Italian classrooms, *Build. Environ.* 98 (2016) 180–189, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.009>.

- Luongo JC, Fennelly KP, Keen JA, Zhai ZJ, Jones BW, Miller SL, 2016. Role of mechanical ventilation in the airborne transmission of infectious agents in buildings. *Indoor Air* 25(6): 666-678
- N. Schultz, E. Lichtner, M. Kriegel, Unsteady displacement ventilation in office environments with varying thermal loads, in: CLIMA 2016 - Proceedings of the 12th REHVA World Congress, 2016.
- P. Nejat, J.K. Calautit, M.Z. Abd Majid, B.R. Hughes, I. Zeynali, F. Jomehzadeh, Wind tunnel and numerical data on the ventilation performance of windcatcher with wing wall, *Data Brief* 9 (2016) 448–452, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2016.09.007>.
- P. Nejat, J.K. Calautit, M.Z.A. Majid, B.R. Hughes, F. Jomehzadeh, Anti-short-circuit device: a new solution for short-circuiting in windcatcher and improvement of natural ventilation performance, *Build. Environ.* 105 (2016) 24–39, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.023>.
- P. Nejat, J.K. Calautit, M.Z.A. Majid, B.R. Hughes, F. Jomehzadeh, Data on the natural ventilation performance of windcatcher with anti-short-circuit device (ASCD), *Data Brief* 9 (2016) 252–256, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2016.08.042>.
- P.J. Irga, F.R. Torpy, Indoor air pollutants in occupational buildings in a sub-tropical climate: comparison among ventilation types, *Build. Environ.* 98 (2016) 190–199, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.012>.
- S. Kubba, *Handbook of Green Building Design and Construction*, second ed., Butterworth-Heinemann, USA, 2016.
- X. Jin, L. Yang, X. Du, Y. Yang, Numerical investigation of particle transport characteristics in an isolated room with single-sided natural ventilation, *Build. Simulat.* 9 (1) (2016) 43–52, <https://doi.org/10.1007/s12273-015-0235-6>.

- Y. Wu, J. Niu, Assessment of mechanical exhaust in preventing vertical cross-household infections associated with single-sided ventilation, *Build. Environ.* 105 (2016) 307–316, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.005>.
- Y. Zhu, Q. Ouyang, B. Cao, X. Zhou, J. Yu, Dynamic thermal environment and thermal comfort, *Indoor Air* 26 (1) (2016) 125–137, <https://doi.org/10.1111/ina.12233>.
- A. Di Gilio, J. Palmisani, M. Pulimeno, F. Cerino, M. Cacace, A. Miani, et al., CO₂ concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission, *Environ. Res.* 202 (2021) 111560, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>.
- Di Mu, C. Shu, N. Gao, T. Zhu, Wind tunnel tests of inter-flat pollutant transmission characteristics in a rectangular multi-storey residential building, Part B: effect of source location, *Build. Environ.* 114 (2017) 281–292, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.031>.
- F. Jomehzadeh, P. Nejat, J.K. Calautit, M.B.M. Yusof, S.A. Zaki, B.R. Hughes, et al., A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: indoor air quality and thermal comfort assessment, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 70 (2017) 736–756, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254>.
- G.K. Rencken, E.K. Rutherford, N. Ghanta, J. Kongoletos, L. Glicksman, Patterns of SARS-CoV-2 aerosol spread in typical classrooms, *Build. Environ.* 204 (2021) 108167, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108167>.
- J. Wang, T. Zhang, S. Wang, F. Battaglia, Gaseous pollutant transmission through windows between vertical floors in a multistory building with natural ventilation, *Energy Build.* 153 (2017) 325–340, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.025>.

- L. Stabile, M. Dell'Isola, A. Russi, A. Massimo, G. Buonanno, The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools, *Sci. Total Environ.* 595 (2017) 894–902, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.048>.
- Liu L, Wei J, Li Y, Ooi A. 2017. Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing. *Indoor Air* 27:1179–90
- M.H. Kristensen, J.S. Jensen, P.K. Heiselberg, Field study evaluation of diffuse ceiling ventilation in classroom during real operating conditions, *Energy Build.* 138 (2017) 26–34, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.017>.
- T. van Hooff, B. Blocken, Assessment of time-periodic mixing ventilation using a sine function and a step function, *Healthy Build. Eur.* (2017) 2-5 July 2017, Lublin, Poland 2017:1–2.
- Tao Y, Inthavong K, Tu J (2017) Computational fluid dynamics study of human-induced wake and particle dispersion in indoor environment. *Indoor Built Environ* 26(2):185–198
- Tao Y, Inthavong K, Tu JY (2017) Dynamic meshing modelling for particle resuspension caused by swinging manikin motion. *Build Environ* 123:529–542
- U. Larsson, B. Moshfegh, Comparison of ventilation performance of three different air supply devices: a measurement study, *Int. J. Vent.* 16 (3) (2017) 244–254, <https://doi.org/10.1080/14733315.2017.1299519>.
- Y. Fan, X. Li, Y. Yan, J. Tu, Overall performance evaluation of underfloor air distribution system with different heights of return vents, *Energy Build.* 147 (2017) 176–187, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.070>.

- Y. Zhou, Y. Deng, P. Wu, S.-J. Cao, The effects of ventilation and floor heating systems on the dispersion and deposition of fine particles in an enclosed environment, *Build. Environ.* 125 (2017) 192–205, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.049>.
- Z. Lei, C. Liu, L. Wang, N. Li, Effect of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort in dormitory during winter, *Build. Environ.* 125 (2017) 240–247, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.051>.
- C. Liang, X. Shao, A.K. Melikov, X. Li, Cooling load for the design of air terminals in a general non-uniform indoor environment oriented to local requirements, *Energy Build.* 174 (2018) 603–618, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.003>.
- C. Wang, S. Holmberg, S. Sadrizadeh, Numerical study of temperature-controlled airflow in comparison with turbulent mixing and laminar airflow for operating room ventilation, *Build. Environ.* 144 (2018) 45–56, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.010>.
- C. Zhang, R. Andersen, G. Christodoulou, M. Kubilius, P.K. Heiselberg, An experimental investigation into the ventilation effectiveness of diffuse ceiling ventilation, in: *Proceedings of the 39th AIVC Conference, 7th TightVent Conference and 5th Venticool Conference: Smart Ventilation for Buildings*, 2018, pp. 990–996.
- C.H. Cheong, S. Lee, Case study of airborne pathogen dispersion patterns in emergency departments with different ventilation and partition conditions, *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 15 (3) (2018), <https://doi.org/10.3390/ijerph15030510>.
- F.A. Berlanga, I. Olmedo, M.R. de Adana, J.M. Villafruela, J.S. Jose, F. Castro, Experimental assessment of different mixing air ventilation systems on ventilation performance and exposure to exhaled contaminants in hospital rooms, *Energy Build.* 177 (2018) 207–219, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.053>.

G. Cao, M.C.A. Storas, A. Aganovic, L.-I. Stenstad, J.G. Skogas, Do surgeons and surgical facilities disturb the clean air distribution close to a surgical patient in an orthopedic operating room with laminar airflow? *Am. J. Infect. Control* 46 (10) (2018) 1115–1122, <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2018.03.019>.

H. Ahn, D. Rim, L.J. Lo, Ventilation and energy performance of partitioned indoor spaces under mixing and displacement ventilation, *Build. Simulat.* 11 (3) (2018) 561–574, <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0410-z>.

H. Alsaad, C. Voelker, Performance assessment of a ductless personalized ventilation system using a validated CFD model, *J. Build. Perform. Simulat.* 11 (6) (2018) 689–704, <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1431806>.

H. Kim, K. Kang, T. Kim, Measurement of particulate matter (PM_{2.5}) and health risk assessment of cooking-generated particles in the kitchen and living rooms of apartment houses, *Sustainability* 10 (3) (2018) 843, <https://doi.org/10.3390/su10030843>.

H. Montazeri, F. Montazeri, CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: impact of outlet openings, *Renew. Energy* 118 (2018) 502–520, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.032>.

H. Qian, X. Zheng, Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings, *J. Thorac. Dis.* 10 (Suppl 19) (2018) S2295–S2304, <https://doi.org/10.21037/jtd.2018.01.24>.

J. Wang, J. Yang, J. Yu, F. Xiong, Comparative characteristics of relative pollution exposure caused by human surface chemical reaction under mixing and displacement ventilation, *Build. Environ.* 132 (2018) 225–232, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.044>.

- K. A. Kormuth, K. Lin, A. J. Prussin 2nd, E. P. Vejerano, A. J. Tiwari, S. S. Cox, M. M. Myerburg, S. S. Lakdawala, L. C. Marr, Influenza virus infectivity is retained in aerosols and droplets independent of relative humidity. *J. Infect. Dis.* 218, 739–747 (2018).
- K. Vachaparambil, M. Cehlin, T. Karimipannah, Comparative Numerical Study of the Indoor Climate for Mixing and Confluent Jet Ventilation Systems in an Open-Plan Office, *Proceedings of COBEE2018, Melbourne, Australia, 2018*, pp. 73–78.
- N. Zhang, Y. Li, Transmission of influenza A in a student office based on realistic person-to-person contact and surface touch behaviour, *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 15 (8) (2018), <https://doi.org/10.3390/ijerph15081699>.
- Q. Zhou, H. Qian, L. Liu, Numerical investigation of airborne infection in naturally ventilated hospital wards with central-corridor type, *Indoor Built Environ.* 27 (1) (2018) 59–69, <https://doi.org/10.1177/1420326X16667177>.
- S. Lestinen, S. Kilpelainen, R. Kosonen, J. Jokisalo, H. Koskela, A. Melikov, Flow characteristics in occupied zone – an experimental study with symmetrically located thermal plumes and low-momentum diffuse ceiling air distribution, *Build. Environ.* 128 (2018) 77–88, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.020>.
- A. Aganovic, G. Cao, Evaluation of airborne contaminant exposure in a single-bed isolation ward equipped with a protected occupied zone ventilation system, *Indoor Built Environ.* 28 (8) (2019) 1092–1103, <https://doi.org/10.1177/1420326X18823048>.
- A. Aganovic, M. Steffensen, G. Cao, CFD study of the air distribution and occupant draught sensation in a patient ward equipped with protected zone ventilation, *Build. Environ.* 162 (2019) 106279, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106279>.

- A. Kabanshi, B. Yang, P. Sorqvist, M. Sandberg, Occupants' perception of air movements and air quality in a simulated classroom with an intermittent air supply system, *Indoor Built Environ.* 28 (1) (2019) 63–76, <https://doi.org/10.1177/1420326X17732613>.
- A. Li, Extended Coanda effect and attachment ventilation, *Indoor Built Environ.* 28 (4) (2019) 437–442, <https://doi.org/10.1177/1420326X19833850>.
- A. Li, Y. Hou, J. Yang, Attached ventilation based on a curved surface wall, *Build. Simulat.* 12 (3) (2019) 505–515, <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0505-9>.
- A. Zivelonghi, M. Lai, Mitigating aerosol infection risk in school buildings: the role of natural ventilation, volume, occupancy and CO₂ monitoring, *Build. Environ.* 204 (2021) 108139, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108139>.
- A.R. Escombe, E. Ticona, V. Chavez-Perez, M. Espinoza, D.A.J. Moore, Improving natural ventilation in hospital waiting and consulting rooms to reduce nosocomial tuberculosis transmission risk in a low resource setting, *BMC Infect. Dis.* 19 (1) (2019) 88, <https://doi.org/10.1186/s12879-019-3717-9>.
- B. Yang, A.K. Melikov, A. Kabanshi, C. Zhang, F.S. Bauman, G. Cao, et al., A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions, *Energy Build.* 202 (2019) 109359, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109359>.
- C. Heracleous, A. Michael, Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period, *J. Build. Eng.* 26 (2019) 100917, <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100917>.
- Cheng V, Wong S, Chen J, Yip C, Chuang V, Tsang Yuen K. Escalating infection control response to the rapidly evolving epidemiology of the Coronavirus disease 2019 (COVID-

19) due to SARS-CoV-2 in Hong Kong. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 2020;1-24. doi:10.1017/ice.2020

EN 16798-1, Energy Performance of Buildings - Ventilation for Buildings - Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, first ed., European Committee for Standardization, Switzerland, 2019.

J. Cho, Investigation on the contaminant distribution with improved ventilation system in hospital isolation rooms: effect of supply and exhaust air diffuser configurations, *Appl. Therm. Eng.* 148 (2019) 208–218, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.023>.

J. Cho, Investigation on the contaminant distribution with improved ventilation system in hospital isolation rooms: effect of supply and exhaust air diffuser configurations, *Appl. Therm. Eng.*, 148 (2019), pp. 208-218, 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.023

K. Hess-Kosa, *Indoor Air Quality: the Latest Sampling and Analytical Methods*, CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, 2019.

L. Dietz, P.F. Horve, D.A. Coil, M. Fretz, J.A. Eisen, K. van den Wymelenberg, 2019 novel coronavirus (COVID-19) pandemic: built environment considerations to reduce transmission, *mSystems* 5 (2) (2020), <https://doi.org/10.1128/mSystems.00245-20>.

Leung NHL, Cowling BJ. (2019). Controversy around airborne versus droplet transmission of respiratory viruses: implication for infection prevention. *Curr Opin Infect Dis*; 32:372-9. (Citato in Risultati 1.2, 1.3)

P. Nejat, F. Jomehzadeh, Abd Majid Mzb, M.B. Mohd Yusof, I. Zeynali, Windcatcher as sustainable passive cooling solution for natural ventilation in hot humid climate of Malaysia, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 620 (1) (2019) 12087, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/620/1/012087>.

R. Tellier, Y. Li, B.J. Cowling, J.W. Tang, Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary, *BMC Infect. Dis.* 19 (1) (2019) 101, <https://doi.org/10.1186/s12879-019-3707-y>.

S. Park, Y. Choi, D. Song, E.K. Kim, Natural ventilation strategy and related issues to prevent coronavirus disease 2019 (COVID-19) airborne transmission in a school building, *Sci. Total Environ.* 789 (2021) 147764, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147764>.

Smieszek T, Lazzari G, Salathé M (2019) Assessing the dynamics and control of droplet- and aerosol-transmitted influenza using an indoor positioning system. *Sci Rep* 9(1):2185

Tellier R, Li Y, Cowling BJ, Tang JW (2019) Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. *BMC Infect Dis* 19:1–9

W. Chakroun, S. Alotaibi, C. Habchi, K. Ghali, N. Ghaddar, Comparison of removal effectiveness of mixed versus displacement ventilation during vacuuming session, *Build. Environ.* 155 (2019) 118–126, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.047>.

WHO (World Health Organ.). 2019. WHO MERS global summary and assessment of risk, July 2019 Doc. WHO/MERS/RA/19.1 WHO Geneva:

X. Kong, C. Xi, H. Li, Z. Lin, A comparative experimental study on the performance of mixing ventilation and stratum ventilation for space heating, *Build. Environ.* 157 (2019) 34–46, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.045>.

X. Liu, Z. Peng, X. Liu, R. Zhou, Dispersion characteristics of hazardous gas and exposure risk assessment in a multiroom building environment, *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 17 (1) (2019), <https://doi.org/10.3390/ijerph17010199>.

X. Ye, Y. Kang, F. Yang, K. Zhong, Comparison study of contaminant distribution and indoor air quality in large-height spaces between impinging jet and mixing ventilation

systems in heating mode, *Build. Environ.* 160 (2019) 106159, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106159>.

Y. Lv, H. Wang, Y. Zhou, H. Yoshino, H. Yonekura, R. Takaki, et al., The influence of ventilation mode and personnel walking behavior on distribution characteristics of indoor particles, *Build. Environ.* 149 (2019) 582–591, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.057>.

Y. Zhang, G. Feng, Y. Bi, Y. Cai, Z. Zhang, G. Cao, Distribution of droplet aerosols generated by mouth coughing and nose breathing in an air-conditioned room, *Sustain. Cities Soc.* 51 (2019) 101721, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101721>.

Y.W. Dai, C.M. Mak, Z.T. Ai, Computational fluid dynamics simulation of wind-driven inter-unit dispersion around multi-storey buildings: upstream building effect, *Indoor Built Environ.* 28 (2) (2019) 217–234, <https://doi.org/10.1177/1420326X17745943>.

Z. Jiao, S. Yuan, C. Ji, M.S. Mannan, Q. Wang, Optimization of dilution ventilation layout design in confined environments using Computational Fluid Dynamics (CFD), *J. Loss Prev. Process. Ind.* 60 (2019) 195–202, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.05.002>.

Z.T. Ai, T. Huang, A.K. Melikov, Airborne transmission of exhaled droplet nuclei between occupants in a room with horizontal air distribution, *Build. Environ.* 163 (2019) 106328, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106328>.

Adam DC, Wu P, Wong JY, Lau EHY, Tsang TK, Cauchemez S, Leung GM, Cowling BJ. Clustering and superspreading potential of SARS-CoV-2 infections in Hong Kong. *Nat Med.* 2020 Nov;26(11):1714-1719

Asadi S, Bouvier N, Wexler AS, Ristenpart WD. The coronavirus pandemic and aerosols: Does COVID-19 transmit via expiratory particles? *Aerosol Sci Technol.* 2020;54:635-8.

ASHRAE. (2020). ASHRAE Epidemic Task Force – Commercial C19 Guidance. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASHRAE. (2020). Guidance for Re-opening Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Bhagat RK, Davies Wykes MS, Dalziel SB, Linden PF 2020. Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. *J. Fluid Mech.* 903:F1

Biryukov J, Boydston JA, Dunning RA, Yeager JJ, Wood S, Reese AL, Ferris A, Miller D, Weaver W, Zeitouni NE, Phillips A, Freeburger D, Hooper I, Ratnesar-Shumate S, Yolitz J, Krause M, Williams G, Dawson DG, Herzog A, Dabisch P, Wahl V, Hevey MC, Altamura LA. Increasing Temperature and Relative Humidity Accelerates Inactivation of SARS-CoV-2 on Surfaces. *mSphere*. 2020 Jul 1;5(4):e00441-20. doi: 10.1128/mSphere.00441-20. PMID: 32611701; PMCID: PMC7333574.

Bourouiba L. 2020. Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: potential implications for reducing transmission of COVID-19. *JAMA* 323:181837–38

Bourouiba L. Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19. *JAMA*. 2020;323(18):1837-1838.

Buonanno G, Morawska L, Stabile L. 2020. Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications. *Environ. Int.* 145:106112

Buonanno, G., Stabile, L., & Morawska, L. (2020). Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS CoV 2 for infection risk assessment. *Environment International*, 141, 105794. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794>

C. Liang, X. Li, X. Shao, B. Li, Direct relationship between the system cooling load and indoor heat gain in a non-uniform indoor environment, *Energy* 191 (2020) 116490, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116490>.

Chin A, Chu J, Perera M, Hui K, Yen H-L, Chan M, Peiris M, Poon L. 2020. Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. *medRxiv preprint* doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.15.20036673>

Colaneri M, Seminari E, Novati S, Asperges E, Biscarini S, Piralla A, Percivalle E, Cassaniti I, Baldanti F, Bruno R, Mondelli MU; COVID19 IRCCS San Matteo Pavia Task Force. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 RNA contamination of inanimate surfaces and virus viability in a health care emergency unit. *ClinMicrobiol Infect.* 2020 Aug;26(8):1094.e1-1094.e5. doi: 10.1016/j.cmi.2020.05.009. Epub 2020 May 22. PMID: 32450255; PMCID: PMC7243766.

Coleman KK, Sigler WV. 2020. Airborne influenza A virus exposure in an elementary school. *Sci. Rep.* 10:1859

Comunian S, Dongo D, Milani C, Palestini P (2020) Air pollution and COVID-19: the role of particulate matter in the spread and increase of COVID-19's morbidity and mortality. *Int J Environ Res Public Health* 17(12):4487

Contini D, Costabile F. Does Air Pollution Influence COVID-19 Outbreaks? *Atmosphere* 2020, 11, 377; doi:10.3390/atmos11040377

Correia G, Rodrigues L, Gameiro da Silva M, Gonçalves T. Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission. *Med Hypotheses.* 2020 Aug;141:109781. doi: 10.1016/j.mehy.2020.109781.

D. Tan, B. Li, Y. Cheng, H. Liu, J. Chen, Airflow pattern and performance of wall confluent jets ventilation for heating in a typical office space, *Indoor Built Environ.* 29 (1) (2020) 67–83, <https://doi.org/10.1177/1420326X19842632>.

da Silva MG (2020) An analysis of the transmission modes of COVID-19 in light of the concepts of Indoor Air Quality. *REHVA J* 3:46–54

Dai H, Zhao B. 2020. Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. *Build. Simul.* 13:1321–27

Davies Wykes M, Chahour E, Linden P. 2020. The effect of an indoor-outdoor temperature difference on transient cross-ventilation. *Build. Environ.* 168:106447

Doremalen N, Bushmaker T, Morris D, Holbrook M, Gamble A, Williamson B, Tamin A, Harcourt J, Thornburg N, Gerber S, Lloyd-Smith J, de Wit E, Munster V, 2020. Aerosol and surface stability of HCoV-19 (SARS-CoV-2) compared to SARS-CoV-1. *medRxiv preprint* doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.09.20033217>

Du B, Tandoc MC, Mack ML, Siegel JA. 2020. Indoor CO₂ concentrations and cognitive function: a critical review. *Indoor Air* 30:61067–82

E. Mesenholler, P. Vennemann, J. Hussong, Unsteady room ventilation – a review, *Build. Environ.* 169 (2020) 106595, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106595>.

Feng Y, Marchal T, Sperry T, Yi H (2020) Influence of wind and relative humidity on the social distancing effectiveness to prevent COVID-19 airborne transmission: a numerical study. *J Aerosol Sci* 147:105585

G. Buonanno, L. Stabile, L. Morawska, Estimation of airborne viral emission: quantification of emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment, *Environ. Int.* 141 (2020) 105794, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794>.

- G. Wei, B. Chen, D. Lai, Q. Chen, An improved displacement ventilation system for a machining plant, *Atmos. Environ.* 228 (2020) 117419, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117419>.
- G.A. Somsen, C. van Rijn, S. Kooij, R.A. Bem, D. Bonn, Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission, *Lancet Respir. Med.* 8 (7) (2020) 658–659, [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30245-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30245-9).
- G.N. Sze To, C.Y.H. Chao, Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases, *Indoor Air* 20 (1) (2010) 2–16, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00621.x>.
- Ge ZY, Yang LM, Xia JJ, Fu XH, Zhang YZ (2020) Possible aerosol transmission of COVID-19 and special precautions in dentistry. *J Zhejiang Univ Sci B* 21(5):361
- H. Alsaad, C. Voelker, Performance evaluation of ductless personalized ventilation in comparison with desk fans using numerical simulations, *Indoor Air* 30 (4) (2020) 776–789, <https://doi.org/10.1111/ina.12672>.
- H. Alsaad, C. Voelker, Qualitative evaluation of the flow supplied by personalized ventilation using schlieren imaging and thermography, *Build. Environ.* 167 (2020) 106450, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106450>.
- H. Andersson, A. Kabanshi, M. Cehlin, B. Moshfegh, On the ventilation performance of low momentum confluent jets supply device in a classroom, *Energies* 13 (20) (2020) 5415, <https://doi.org/10.3390/en13205415>.
- H. Li, C. Xi, X. Kong, Z. Lin, L. Wang, A comparative experimental investigation on radiant floor heating system and stratum ventilation, *Sustain. Cities Soc.* 52 (2020) 101823, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101823>.

H. Yin, Y. Li, X. Deng, Y. Han, L. Wang, B. Yang, et al., Performance evaluation of three attached ventilation scenarios for tiny sleeping spaces, *Build. Environ.* 186 (2020) 107363, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107363>.

H.L. Gough, J.F. Barlow, Z. Luo, M.-F. King, C.H. Halios, C. Grimmond, Evaluating single-sided natural ventilation models against full-scale idealised measurements: impact of wind direction and turbulence, *Build. Environ.* 170 (2020) 106556, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106556>.

Huang Z, Huang J, Gu Q, Du P, Liang H, Dong Q (2020) Optimal temperature zone for the dispersal of COVID-19. *Sci Total Environ* 736:139487

Istituto Superiore di Sanità. (2020a). Indicazioni ad interim per la prevenzione e la gestione degli ambienti indoor in relazione alla trasmissione dell'infezione da virus SARS-CoV-2. Rapporto ISS COVID-19 n. 5/2020, Versione del 25 maggio 2020. Roma: ISS.

Istituto Superiore di Sanità. (2020b). Indicazioni sugli impianti di ventilazione/climatizzazione in strutture comunitarie non sanitarie e in ambienti domestici in relazione alla diffusione del virus SARS-CoV-2. Rapporto ISS COVID-19 n. 33/2020, Versione del 25 giugno 2020. Roma: ISS.

J. Conly, W.H. Seto, D. Pittet, A. Holmes, M. Chu, P.R. Hunter, Use of medical face masks versus particulate respirators as a component of personal protective equipment for health care workers in the context of the COVID-19 pandemic, *Antimicrob. Resist. Infect. Control* 9 (1) (2020) 126, <https://doi.org/10.1186/s13756-020-00779-6>.

J. Ding, C.W. Yu, S.-J. Cao, HVAC systems for environmental control to minimize the COVID-19 infection, *Indoor Built Environ.* 29 (9) (2020) 1195–1201, <https://doi.org/10.1177/1420326X20951968>.

- J. Wang, Q. Huo, T. Zhang, S. Wang, F. Battaglia, Numerical investigation of gaseous pollutant cross-transmission for single-sided natural ventilation driven by buoyancy and wind, *Build. Environ.* 172 (2020) 106705, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106705>.
- J.L. Domingo, M. Marques, J. Rovira, Influence of airborne transmission of SARS-CoV-2 on COVID-19 pandemic. A review, *Environ. Res.* 188 (2020) 109861, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109861>.
- Jayaweera M, Perera H, Gunawardana B, Manatunge J. (2020). Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy. *Environ. Res.* 188, 109819. (Citato in Risultato 2.7)
- Jimenez, J. L., Peng, Z., & Buonanno, G. (2020). COVID-19 aerosol transmission estimator and related modeling tools. (Tool / preprint). <https://tinyurl.com/covid-estimator> (Estimator & docs: <https://research-groups.colorado.edu/jujube/>)
- K. Tawackolian, E. Lichtner, M. Kriegel, Draught perception in intermittent ventilation at neutral room temperature, *Energy Build.* 224 (2020) 110268, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110268>.
- K. Xue, G. Cao, M. Liu, Y. Zhang, C. Pedersen, H.M. Mathisen, et al., Experimental study on the effect of exhaust airflows on the surgical environment in an operating room with mixing ventilation, *J. Build. Eng.* 32 (2020) 101837, <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101837>.
- Kampf G, Todt D, Pfaender S, Steinmann E. Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. *J Hosp Infect.* 2020 Mar;104(3):246-251. doi: 10.1016/j.jhin.2020.01.022. Epub 2020 Feb 6. Erratum in: *J Hosp Infect.* 2020 Jun 17; PMID: 32035997; PMCID: PMC7132493.

- Kim YI, Kim SG, Kim SM, Kim EH, Park SJ et al. 2020. Infection and rapid transmission of SARS-CoV-2 in ferrets. *Cell Host Microbe* 27:5704–9
- L. Anghel, C.-G. Popovici, C. Stătescu, R. Sascău, M. Verdeş, V. Ciocan, et al., Impact of HVAC-systems on the dispersion of infectious aerosols in a cardiac intensive care unit, *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 17 (18) (2020), <https://doi.org/10.3390/ijerph17186582>.
- L. Morawska, J. Cao, Airborne transmission of SARS-CoV-2: the world should face the reality, *Environ. Int.* 139 (2020) 105730, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>.
- L. Wang, X. Dai, J. Wei, Z. Ai, Y. Fan, L. Tang, et al., Numerical comparison of the efficiency of mixing ventilation and impinging jet ventilation for exhaled particle removal in a model intensive care unit, *Build. Environ.* 200 (2021) 107955, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107955>.
- Leclerc QJ, Fuller NM, Knight LE, Funk S, Knight GM et al. 2020. What settings have been linked to SARS-CoV-2 transmission clusters?. *Wellcome Open Res* 5:83
- Lelieveld J, Helleis F, Borrmann S, Cheng Y, Drewnick F, Haug G, Klimach T, Sciare J, Su H, Pöschl U (2020) Model calculations of aerosol transmission and infection risk of COVID-19 in indoor environments. *Int J Environ Res Public Health* 17(21):8114
- Lu J, Gu J, Li K, Xu C, Su W et al. 2020. COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerg. Infect. Dis.* 26:71628–31
- M. Klompas, M.A. Baker, C. Rhee, Airborne transmission of SARS-CoV-2: theoretical considerations and available evidence, *JAMA* 324 (5) (2020) 441–442, <https://doi.org/10.1001/jama.2020.12458>.

M. Schweiker, E. Ampatzi, M.S. Andargie, R.K. Andersen, E. Azar, V.M. Barthelmes, et al., Review of multi-domain approaches to indoor environmental perception and behaviour, *Build. Environ.* 176 (2020) 106804, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106804>.

Mingotti N, Wood R, Noakes C, Woods AW. 2020. The mixing of airborne contaminants by the repeated passage of people along a corridor. *J. Fluid Mech.* 903:A52

Mittal R, Ni R, Seo J-H. The flow physics of COVID-19. *J Fluid Mech.* 2020;894.

Morawska L, Milton D. 2020. It is time to address airborne transmission of COVID-19. *Clin. Infect. Dis.* 71:92311–13

Morawska, L., & Milton, D. K. (2020). It is time to address airborne transmission of COVID-19. *Clinical Infectious Diseases*, 71(9), 2311–2313.
<https://doi.org/10.1093/cid/ciaa939>

Ong SW, Tan YK, Chia PY, Lee TH, Ng OT, Wong MS, et al. Air, surface environmental, and personal protective equipment contamination by severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) from a symptomatic patient. *JAMA* 2020 Apr 28;323(16):1610-1612. doi: 10.1001/jama.2020.3227

P. Nejat, H.M. Hussen, F. Fadli, H.N. Chaudhry, J. Calautit, F. Jomehzadeh, Indoor environmental quality (IEQ) analysis of a two-sided windcatcher integrated with anti-short-circuit device for low wind conditions, *Processes* 8 (7) (2020) 840,
<https://doi.org/10.3390/pr8070840>.

PAHO. (2020). COVID-19: Recommendations for Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) in Healthcare Facilities. Pan American Health Organization.
<https://www.paho.org/en/documents/covid-19-recommendations-heating-ventilation-and-air-conditioning-healthcare-facilities>

Parker D, Burridge HC, Partridge J, Linden PF. 2020. A comparison of entrainment in turbulent line plumes adjacent to and distant from a vertical wall. *J. Fluid Mech.* 882:A4

Qian, H., Miao, T., Liu, L., Zheng, X., Luo, D., & Li, Y. (2020). Indoor transmission of SARS-CoV-2. *Indoor Air*, 31(3), 639–645. <https://doi.org/10.1111/ina.12766>

R.K. Bhagat, P.F. Linden, Displacement ventilation: a viable ventilation strategy for makeshift hospitals and public buildings to contain COVID-19 and other airborne diseases, *R. Soc. Open Sci.* 7 (9) (2020) 200680, <https://doi.org/10.1098/rsos.200680>.

REHVA. (2020). COVID-19 guidance document, version 2. Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations.

REHVA. How to operate and use building services in order to prevent the spread of the coronavirus disease (COVID-19) virus (SARS-CoV-2) in workplaces. April 3, 2020 disponibile al sito https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_ver2_20200403_1.pdf

S. Asadi, N. Bouvier, A.S. Wexler, W.D. Ristenpart, The coronavirus pandemic and aerosols: does COVID-19 transmit via expiratory particles? *Aerosol. Sci. Technol.* 0 (0) (2020) 1–4, <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1749229>.

S. Carlucci, M de Simone, S.K. Firth, M.B. Kjargaard, R. Markovic, M.S. Rahaman, et al., Modeling occupant behavior in buildings, *Build. Environ.* 174 (2020) 106768, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106768>.

S. Shokrollahi, M. Hadavi, G. Heidarinejad, H. Pasdarsahri, Multi-objective optimization of underfloor air distribution (UFAD) systems performance in a densely occupied environment: a combination of numerical simulation and Taguchi algorithm, *J. Build. Eng.* 32 (2020) 101495, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101495>.

Schröder I. COVID-19: A risk assessment perspective. *Chem. Health Saf.* 2020

Setti L, Passarini F, De Gennaro G, Barbieri P, Licen S, Perrone MG, Miani A (2020)

Potential role of particulate matter in the spreading of COVID-19 in Northern Italy: first observational study based on initial epidemic diffusion. *BMJ Open* 10(9):e039338

Shafaghi AH, Rokhsar Talabazar F, Koşar A, Ghorbani M (2020) On the effect of the respiratory droplet generation condition on COVID-19 transmission. *Fluids* 5(3):113

Sopeyin, A., et al. (2020). Transmission risk of respiratory viruses in natural and mechanical ventilation environments. *BMJ Global Health*, 5(8), e003522.

<https://doi.org/10.1136/bmjgh-2020-003522>

Stadnytskyi V, Bax CE, Bax A, Anfinrud P. 2020. The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. *PNAS* 117:2211875–77

Sun C, Zhai Z (2020) The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission. *Sustain Cities Soc* 62:102390

T. Lipinski, D. Ahmad, N. Serey, H. Jouhara, Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings, *Int. J. Thermofluids* (2020), 100045 <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100045>, 7-8.

V. Vuorinen, M. Aarnio, M. Alava, V. Alopaeus, N. Atanasova, M. Auvinen, et al., Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors, *Saf. Sci.* 130 (2020) 104866, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104866>.

van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, Holbrook MG, Gamble A, Williamson BN, Tamin A, Harcourt JL, Thornburg NJ, Gerber SI, Lloyd-Smith JO, de Wit E, Munster VJ.

Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS- CoV-1. *N Engl J Med.* 2020 Apr 16;382(16):1564-1567. doi: 10.1056/NEJMc2004973

W. Chen, N. Zhang, J. Wei, H.-L. Yen, Y. Li, Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact, *Build. Environ.* 176 (2020) 106859, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106859>.

WHO (World Health Organ.). 2020. Ventilation and air conditioning in public spaces and buildings and COVID-19 Q&A WHO Geneva:

WHO, Transmission of SARS-CoV-2: Implications for Infection Prevention Precautions, Available from, Scientific Brief, 2020.

<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/339857/9789240021280-eng.pdf?sequence=1>. (Accessed 10 November 2023).

World Health Organization. (2020, July 9). Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions (Scientific brief).

<https://apps.who.int/iris/handle/10665/332049>

World Health Organization. Infection Advice on the use of masks in the context of COVID-19. Interim guidance. Geneva: 2020 (disponibile al sito

[https://www.who.int/publications/i/item/advice-on-the-use-of-masks-in-the-community-during-home-care-and-in-healthcare-settings-in-the-context-of-the-novel-coronavirus-\(2019-ncov\)-outbreak](https://www.who.int/publications/i/item/advice-on-the-use-of-masks-in-the-community-during-home-care-and-in-healthcare-settings-in-the-context-of-the-novel-coronavirus-(2019-ncov)-outbreak))

X. Deng, Z. Tan, Numerical analysis of local thermal comfort in a plan office under natural ventilation, *Indoor Built Environ.* 29 (7) (2020) 972–986, <https://doi.org/10.1177/1420326X19866497>.

X. Tian, S. Zhang, H.B. Awbi, C. Liao, Y. Cheng, Z. Lin, Multi-indicator evaluation on ventilation effectiveness of three ventilation methods: an experimental study, *Build. Environ.* 180 (2020) 107015, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107015>.

X. Ye, Y. Kang, Z. Yan, B. Chen, K. Zhong, Optimization study of return vent height for an impinging jet ventilation system with exhaust/return-split configuration by TOPSIS method, *Build. Environ.* 177 (2020) 106858, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106858>.

Y. Bai, L. Yao, T. Wei, F. Tian, D.-Y. Jin, L. Chen, et al., Presumed asymptomatic carrier transmission of COVID-19, *JAMA* 323 (14) (2020) 1406–1407, <https://doi.org/10.1001/jama.2020.2565>.

Y. Lu, M. Oladokun, Z. Lin, Reducing the exposure risk in hospital wards by applying stratum ventilation system, *Build. Environ.* 183 (2020) 107204, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107204>.

Y. Lu, Z. Lin, Coughed droplet dispersion pattern in hospital ward under stratum ventilation, *Build. Environ.* 208 (2022) 108602, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108602>.

Y. Wen, J. Leng, F. Yu, C.W. Yu, Integrated design for underground space environment control of subway stations with atriums using piston ventilation, *Indoor Built Environ.* 29 (9) (2020) 1300–1315, <https://doi.org/10.1177/1420326X20941349>.

Y. Zhang, G. Cao, G. Feng, K. Xue, C. Pedersen, H.M. Mathisen, et al., The impact of air change rate on the air quality of surgical microenvironment in an operating room with mixing ventilation, *J. Build. Eng.* 32 (2020) 101770, <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101770>.

Y.E. Cetin, M. Avci, O. Aydin, Particle dispersion and deposition in displacement ventilation systems combined with floor heating, *Sci. Technol. Built Environ.* 26 (8) (2020) 1019–1036, <https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1760637>.

Y.K. Yang, M.Y. Kim, Y.W. Song, S.H. Choi, J.C. Park, Windcatcher louvers to improve ventilation efficiency, *Energies* 13 (17) (2020) 4459, <https://doi.org/10.3390/en13174459>.

Yu Feng, Thierry Marchal, Ted Sperry, Hang Yi, Influence of wind and relative humidity on the social distancing effectiveness to prevent COVID-19 airborne transmission: A numerical study, *Journal of Aerosol Science*, Volume 147, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105585>.

Zhang R, Li Y, Zhang AL, Wang Y, Molina MJ. 2020. Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. *PNAS* 117:2614857–63

A. Staveckis, A. Borodinecs, Impact of impinging jet ventilation on thermal comfort and indoor air quality in office buildings, *Energy Build.* 235 (2021) 110738, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110738>.

ASHRAE. (2021). ASHRAE Epidemic Task Force – Commercial C19 Guidance. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASHRAE. (2021). ASHRAE Statement on Airborne Transmission of SARS-CoV-2 and HVAC Systems. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASHRAE. (2021). Managing Air Quality During the Pandemic. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Auvinen, M., Kuula, J., Grönholm, T., Sührling, M., & Hellsten, A. (2021). High-resolution large-eddy simulation of indoor turbulence and its effect on airborne transmission of

respiratory pathogens: model validation and infection probability analysis [Preprint].
arXiv. <https://arxiv.org/abs/2110.14348>

Azimi P, Keshavarz Z, Cedeno Laurent JG, Stephens B, Allen JG (2021) Mechanistic transmission modeling of COVID-19 on the Diamond Princess cruise ship demonstrates the importance of aerosol transmission. *Proc Natl Acad Sci* 118(8):e2015482118

B.P.P. Barbosa, N de Carvalho Lobo Brum, Ventilation mode performance against airborne respiratory infections in small office spaces: limits and rational improvements for Covid-19, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 43 (6) (2021) 1–19, <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03029-x>.

Bazant, M. Z., & Bush, J. W. M. (2021). A guideline to limit indoor airborne transmission of COVID-19. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(17), e2018995118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2018995118> (PDF: <https://thales.mit.edu/bush/wp-content/uploads/2021/04/BazantBush-PNAS2021.pdf>)

Bluyssen PM, Ortiz M, Zhang D. 2021. The effect of a mobile HEPA filter system on ‘infectious’ aerosols, sound and air velocity in the SenseLab. *Build. Environ.* 188:107475

Bourouiba L. 2021. Fluid dynamics of respiratory infectious diseases. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 23:547–77

Buonanno, G., Morawska, L., & Stabile, L. (2021). Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 in indoor environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1009. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031009>

Burridge HC, Bhagat RK, Stettler ME, Kumar P, De Mel I et al. 2021. The ventilation of buildings and other mitigating measures for COVID-19: a focus on wintertime. *Proc. R. Soc. A* 477:224720200855

C.H. Cheong, B. Park, S.R. Ryu, Effect of under-floor air distribution system to prevent the spread of airborne pathogens in classrooms, *Case Stud. Therm. Eng.* 28 (2021) 101641, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101641>.

Centers for Disease Control and Prevention. (2021, May 7). Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission. U.S. Department of Health & Human Services. <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/105949>

Crawford, C., Vanoli, E., Decorde, B., Lancelot, M., Duprat, C., Josserand, C., ... Timsit, J.-F. (2021). Modeling of aerosol transmission of airborne pathogens in ICU rooms of COVID-19 patients with acute respiratory failure. *Scientific Reports*, 11, 11778. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91265-5>

D. Aviv, K.W. Chen, E. Teitelbaum, D. Sheppard, J. Pantelic, A. Rysanek, et al., A fresh (air) look at ventilation for COVID-19: estimating the global energy savings potential of coupling natural ventilation with novel radiant cooling strategies, *Appl. Energy* 292 (2021) 116848, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116848>.

Dbouk, T., & Drikakis, D. (2021). On airborne virus transmission in elevators and confined spaces. *Physics of Fluids*, 33(1), 011905. <https://doi.org/10.1063/5.0038180> (PDF: https://pubs.aip.org/aip/pof/article-pdf/doi/10.1063/5.0038180/20532373/011905_1_5.0038180.pdf)

E. Lepore, P. Aguilera Benito, C. Pina Ramirez, G. Viccione, Indoors ventilation in times of confinement by SARS-CoV-2 epidemic: a comparative approach between Spain and Italy, *Sustain. Cities Soc.* 72 (2021) 103051, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103051>.

Fierce, L., Robey, A., & Hamilton, C. (2021). Simulating near-field enhancement in transmission of airborne viruses with a quadrature-based model [Preprint]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2104.01219>

G. Pei, M. Taylor, D. Rim, Human exposure to respiratory aerosols in a ventilated room: effects of ventilation condition, emission mode, and social distancing, *Sustain. Cities Soc.* 73 (2021) 103090, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103090>.

Gao C. et al. (2021). On airborne virus transmission in elevators and confined spaces. PMC. (Citato in Risultato 2.3)

Greenhalgh, T., Jimenez, J. L., Prather, K. A., Tufekci, Z., Fisman, D., & Schooley, R. (2021). Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. *The Lancet*, 397(10285), 1603–1605. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00869-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00869-2)

Gregson FK, Watson NA, Orton CM, Haddrell AE, McCarthy LP et al. 2021. Comparing aerosol concentrations and particle size distributions generated by singing, speaking and breathing. *Aerosol Sci. Technol.* 55:6681–91

H. Alsaad, C. Voelker, Could the ductless personalized ventilation be an alternative to the regular ducted personalized ventilation? *Indoor Air* 31 (1) (2021) 99–111, <https://doi.org/10.1111/ina.12720>.

H. Yin, Y. Huo, Y. Wang, D. Ji, J. Wang, Z. Ma, et al., Numerical investigation on mechanisms and performance of column attachment ventilation for winter heating, *Build. Environ.* 202 (2021) 108025, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108025>.

H. Zhang, D. Yang, V.W. Tam, Y. Tao, G. Zhang, S. Setunge, et al., A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 141 (2021) 110795, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110795>.

I. Timor-Tritsch, D. Buca, D. Di Mascio, G. Cali, A. D'Amico, A. Monteagudo, et al., Outcome of cesarean scar pregnancy according to gestational age at diagnosis: a systematic review and meta-analysis, *Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol.* 258 (2021) 53–59, <https://doi.org/10.1016/j.ejogrb.2020.11.036>.

J. Ren, Y. Wang, Q. Liu, Y. Liu, Numerical study of three ventilation strategies in a prefabricated COVID-19 inpatient ward, *Build. Environ.* 188 (2021) 107467, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107467>.

J. Saif, A. Wright, S. Khattak, K. Elfadli, Keeping cool in the desert: using wind catchers for improved thermal comfort and indoor air quality at half the energy, *Buildings* 11 (3) (2021) 100, <https://doi.org/10.3390/buildings11030100>.

Jha NK, Frank D, Darracq L, Linden PF. 2021a. Contaminant transport by human passage through an air curtain separating two sections of a corridor. Part II: Two zones at different temperatures. *Energy Build* 236:110728

Jha NK, Frank D, Linden PF. 2021b. Contaminant transport by human passage through an air curtain separating two sections of a corridor. Part I: Uniform ambient temperature. *Energy Build* 236:110818

Jin H, Chen Y, Fu Q, Qu Q (2021) Occupational risk factors of contracting COVID-19 among health workers: a systematic review. *Work (Reading Mass)* 69(3):721–734

Jung H. et al. (2021). Transmission risks of respiratory infectious diseases in various confined spaces: A meta-analysis for future pandemics. *PubMed Central*. (Citato in Risultato 2.8)

K. Randall, E.T. Ewing, L.C. Marr, J.L. Jimenez, L. Bourouiba, How did we get here: what are droplets and aerosols and how far do they go? A historical perspective on the transmission of respiratory infectious diseases, *Interfac. Focus* 11 (6) (2021) 20210049, <https://doi.org/10.1098/rsfs.2021.0049>.

L. Bourouiba, Fluid dynamics of respiratory infectious diseases, *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 23 (2021) 547–577, <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-111820-025044>.

- L. Stabile, A. Pacitto, A. Mikszewski, L. Morawska, G. Buonanno, Ventilation procedures to minimize the airborne transmission of viruses in classrooms, *Build. Environ.* 202 (2021) 108042, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108042>.
- Leung, N. H. L., & Cowling, B. J. (2021). Transmissibility and transmission of respiratory viruses. *Nature Reviews Microbiology*, 19, 155–168. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00443-y>
- M. Amiraslanpour, J. Ghazanfarian, H. Nabaei, M.H. Taleghani, Evaluation of laminar airflow heating, ventilation, and air conditioning system for particle dispersion control in operating room including staffs: a non-Boussinesq Lagrangian study, *J. Build. Phys.* 45 (2) (2021) 236–264, <https://doi.org/10.1177/1744259120932932>.
- M. Bayoumi, Improving indoor air quality in classrooms via wind-induced natural ventilation, *Model. Simulat. Eng.* 2021 (2021) 1–14, <https://doi.org/10.1155/2021/6668031>.
- M. Taheri, S.A. Zolfaghari, M. Afzalian, H. Hassanzadeh, The influence of air inlet angle in swirl diffusers of UFAD system on distribution and deposition of indoor particles, *Build. Environ.* 191 (2021) 107613, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107613>.
- Marr, L. C., & Tang, J. W. (2021). Mechanistic insights into airborne transmission: particle physics and beyond. (Review chapter / article).
- Marr, L. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & others. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. *Science*, 373(6558), eabd9149. <https://doi.org/10.1126/science.abd9149>
- Memarbashi R, Mahmoudi SM (2021) A dynamic model for the COVID-19 with direct and indirect transmission pathways. *Math Methods Appl Sci* 44(7):5873–5887

- N. Shinohara, J. Sakaguchi, H. Kim, N. Kagi, K. Tatsu, H. Mano, et al., Survey of air exchange rates and evaluation of airborne infection risk of COVID-19 on commuter trains, *Environ. Int.* 157 (2021) 106774, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106774>.
- O. Han, A. Li, Velocity distribution of wall-attached jets in slotted-inlet ventilated rooms, *Build. Environ.* 194 (2021) 107708, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107708>.
- Obeidat B, Alrebei OF, Abdallah IA, Darwish EF, Amhamed A (2021) CFD analyses: the effect of pressure suction and airflow velocity on coronavirus dispersal. *Appl Sci* 11(16):7450
- P. Peng, M. Pomianowski, C. Zhang, R. Guo, R.L. Jensen, K.T. Jønsson, et al., Experimental investigation on the ventilation performance of diffuse ceiling ventilation in heating conditions, *Build. Environ.*, 205 (2021), Article 108262, 10.1016/j.buildenv.2021.108262
- Pöhlker, M. L., Krüger, O. O., Förster, J.-D., Berkemeier, T., Elbert, W., Fröhlich-Nowoisky, J., ... Bodenschatz, E. (2021). Respiratory aerosols and droplets in the transmission of infectious diseases. Preprint. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2103.01188>
- Qian H, Miao T, Li L, Zheng X, Luo D, Li Y. 2021. Indoor transmission of SARS-CoV-2. *Indoor Air* 31:3639–45
- R.J. Knudsen, S.M.N. Knudsen, T. Nymark, T. Anstensrud, E.T. Jensen, M.J. La Mia Malekzadeh, et al., Laminar airflow decreases microbial air contamination compared with turbulent ventilated operating theatres during live total joint arthroplasty: a nationwide survey, *J. Hosp. Infect.* 113 (2021) 65–70, <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.04.019>.
- Rabaan AA, Al-Ahmed SH, Al-Malkey M, Alsubki R, Ezzikouri S, Al-Hababi FH, Sah R, Al Mutair A, Alhumaid S, Al-Tawfiq JA, Al-Omari A, Al-Qaane AM, Al-Qahtani M, Tirupathi R, Al Hamad MA, Al-Baghli NA, Sulaiman T, Alsubait A, Mehta R, Abass E, Alawi M, Alshahrani F, Shrestha DB, Karobari MI, Pecho-Silva S, Arteaga-Livias K,

Bonilla-Aldana DK, Rodriguez-Morales AJ (2021) Airborne transmission of SARS-CoV-2 is the dominant route of transmission: droplets and aerosols. *Infez Med* 29(1):10–19

REHVA. (2021). COVID-19 Frequently Asked Questions. Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations.

REHVA. (2021). REHVA COVID-19 guidance document, version 4.1 (15 April 2021). Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations.

Ren C, Xi C, Wang J, Feng Z, Nasiri F, Cao SJ, Haghighat F (2021) Mitigating COVID-19 infection disease transmission in indoor environment using physical barriers. *Sustain Cities Soc* 74:103175

Sharun K, Tiwari R, Dhama K (2021) COVID-19 and sunlight: Impact on SARS-CoV-2 transmissibility, morbidity, and mortality. *Ann Med Surg* 66:102419

Shen, J., et al. (2021). Airborne transmission of SARS-CoV-2 in indoor environments: evidence and implications. *Environmental Research and Public Health*.
<https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1977693>

Vouriot CV, Burrridge HC, Noakes CJ, Linden PF. 2021. Seasonal variation in airborne infection risk in schools due to changes in ventilation inferred from monitored carbon dioxide. *Indoor Air* 31:41154–63

W. Cao, B. Sun, Y. Zhao, Q. Shi, Y. Wang, Study on the transmission route of virus aerosol particles and control technology of air conditioning in the enclosed space, *Eur. Phys. J. A* 136 (10) (2021) 1049, <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02058-8>.

Wang CC, Prather KA, Sznitman J, Jimenez JL, Lakdawala SS, Tufekci Z, Marr LC (2021) Airborne transmission of respiratory viruses. *Science* 373(6558):eabd9149

Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. *Science*, 373(6558), eabd9149. <https://doi.org/10.1126/science.abd9149> (PMC PDF: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8721651/>)

WHO. (2021a). Coronavirus disease (COVID-19): Ventilation and air conditioning (Q&A). World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/coronavirus-disease-covid-19-ventilation-and-air-conditioning>

WHO. (2021b). Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280>

X. Deng, G. Gong, Investigation of exhaled pollutant distribution in the breathing microenvironment in a displacement ventilated room with indoor air stability conditions, *J. Environ. Sci.* 99 (2021) 336–345, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.06.025>.

X. Kong, C. Guo, Z. Lin, S. Duan, J. He, Y. Ren, et al., Experimental study on the control effect of different ventilation systems on fine particles in a simulated hospital ward, *Sustain. Cities Soc.* 73 (2021) 103102, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103102>.

X. Li, T.T. Zhang, M. Fan, M. Liu, Di Chang, Z.D. Wei, et al., Experimental evaluation of particle exposure at different seats in a single-aisle aircraft cabin, *Build. Environ.* 202 (2021) 108049, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108049>.

Y. Drossinos, T.P. Weber, N.I. Stilianakis, Droplets and aerosols: an artificial dichotomy in respiratory virus transmission, *Health Sci. Rep.* 4 (2) (2021) e275, <https://doi.org/10.1002/hsr2.275>.

Y. Jia, X. Zheng, J. Guan, X. Tan, S. Chen, B. Qi, et al., Investigation of indoor total volatile organic compound concentrations in densely occupied university buildings under natural

ventilation: temporal variation, correlation and source contribution, *Indoor Built Environ.* 30 (6) (2021) 838–850, <https://doi.org/10.1177/1420326X20914000>.

Y. Katsumata, M. Sano, H. Okawara, T. Sawada, D. Nakashima, G. Ichihara, et al., Laminar flow ventilation system to prevent airborne infection during exercise in the COVID-19 crisis: a single-center observational study, *PLoS One* 16 (11) (2021) e0257549, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257549>.

Y. Wu, N. Gao, J. Niu, J. Zang, Q. Cao, Numerical study on natural ventilation of the wind tower: effects of combining with different window configurations in a low-rise house, *Build. Environ.* 188 (2021) 107450, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107450>.

Z. Cheng, A. Aganovic, G. Cao, Z. Bu, Experimental and simulated evaluations of airborne contaminant exposure in a room with a modified localized laminar airflow system, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 28 (24) (2021) 30642–30663, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12685-4>.

A. Mikszewski, L. Stabile, G. Buonanno, L. Morawska, The airborne contagiousness of respiratory viruses: a comparative analysis and implications for mitigation, *Geosci. Front.* 13 (6) (2022) 101285, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101285>.

Bale R, Iida A, Yamakawa M, Li C, Tsubokura M (2022) Quantifying the COVID19 infection risk due to droplet/aerosol inhalation. *Sci Rep* 12(1):11186

Bourrianne P, Kaneelil PR, Abkarian M, Stone HA. 2022. Air flows in opera. *Phys. Rev. Appl.* 18:024042

C. Ren, H.-C. Zhu, S.-J. Cao, Ventilation strategies for mitigation of infection disease transmission in an indoor environment: a case study in office, *Buildings* 12 (2) (2022) 180, <https://doi.org/10.3390/buildings12020180>.

C. Ren, S.-J. Cao, F. Haghighat, A practical approach for preventing dispersion of infection disease in naturally ventilated room, *J. Build. Eng.* 48 (2022) 103921, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103921>.

Cheng VCC, Lung DC, Wong SC, Au AKW, Wang Q et al. 2022. Outbreak investigation of airborne transmission of Omicron (B.1.1.529)-SARS-CoV-2 variant of concern in a restaurant: implication for enhancement of indoor air dilution. *J. Hazard. Mater.* 430:128504

D. Jeong, H. Yi, J.-H. Park, H.W. Park, K. Park, A vertical laminar airflow system to prevent aerosol transmission of SARS-CoV-2 in building space: computational fluid dynamics (CFD) and experimental approach, *Indoor Built Environ.* 31 (5) (2022) 1319–1338, <https://doi.org/10.1177/1420326X211063422>.

E. Katramiz, N. Ghaddar, K. Ghali, Novel personalized chair-ventilation design integrated with displacement ventilation for cross-contamination mitigation in classrooms, *Build. Environ.* 213 (2022) 108885, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108885>.

E. Rivas, J.L. Santiago, F. Martin, A. Martilli, Impact of natural ventilation on exposure to SARS-CoV 2 in indoor/semi-indoor terraces using CO₂ concentrations as a proxy, *J. Build. Eng.* 46 (2022) 103725, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103725>.

G.M. Abbas, I. Gursel Dino, The impact of natural ventilation on airborne biocontaminants: a study on COVID-19 dispersion in an open office, *ECAM* 29 (4) (2022) 1609–1641, <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2020-1047>.

H. Andersson, M. Cehlin, B. Moshfegh, Numerical and experimental investigation of a confluent jets ventilation supply device in a conference room, *Energies* 15 (5) (2022) 1630, <https://doi.org/10.3390/en15051630>.

H. Yamasawa, T. Kobayashi, T. Yamanaka, N. Choi, M. Matsuzaki, Experimental investigation of difference in indoor environment using impinging jet ventilation and displacement ventilation systems, *Int. J. Vent.* 21 (3) (2022) 229–246, <https://doi.org/10.1080/14733315.2020.1864572>.

H. Zhang, W. Zhang, W. Zhang, Y. Xuan, Y. Yue, Multi-vent module-based adaptive ventilation to reduce cross-contamination among indoor occupants, *Build. Environ.* 212 (2022) 108836, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108836>.

H.K. Abdullah, H.Z. Alibaba, Open-plan office design for improved natural ventilation and reduced mixed mode supplementary loads, *Indoor Built Environ.* 31 (8) (2022) 2145–2167, <https://doi.org/10.1177/1420326x20953458>.

H.T. Dao, K.-S. Kim, Behavior of cough droplets emitted from Covid-19 patient in hospital isolation room with different ventilation configurations, *Build. Environ.* 209 (2022) 108649, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108649>.

H.-Y. Zhong, Y. Sun, J. Shang, F.-P. Qian, F.-Y. Zhao, H. Kikumoto, et al., Single-sided natural ventilation in buildings: a critical literature review, *Build. Environ.* 212 (2022) 108797, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108797>.

Hasan WK, Al-azzawi MM, Abdullah AR, Habeeb LJ (2022) CFD evaluation of air conditioning on the distribution and dispersion of COVID-19 virus in a room. *Int J Heat Technol* 40(2):627–633

I.J. Al Rikabi, M.A. Abuelnour, A.A.M. Omara, N.A. Ismail, F.N. Ani, A.A.A. Abuelnuor, A numerical study of the effect of facade opening on nighttime ventilation of a low-energy building, in: *Proceedings of the 8th International Engineering Conference on Sustainable Technology and Development (IEC)*, 2022, <https://doi.org/10.1109/IEC54822.2022.9807454>.

K.Y. Wong, H. Tan, B.B. Nyakuma, H.M. Kamar, W.Y. Tey, H. Hashim, et al., Effects of medical staff's turning movement on dispersion of airborne particles under large air supply diffuser during operative surgeries, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 29 (54) (2022) 82492–82511, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21579-y>.

Kemp GF, Davies Wykes MS, Bhagat RK, Linden PF. 2022. Fluid mechanics of sash windows. *Flow* 2:E3

Kumar P, Kalaiarasan G, Bhagat RK, Mumby S, Adcock IM et al. 2022. Active air monitoring for understanding the ventilation and infection risks of SARS-CoV-2 transmission in public indoor spaces. *Atmosphere* 13:122067

M. Fan, Z. Fu, J. Wang, Z. Wang, H. Suo, X. Kong, et al., A review of different ventilation modes on thermal comfort, air quality and virus spread control, *Build. Environ.* 212 (2022) 108831, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108831>.

M. Liu, J. Liu, Q. Cao, X. Li, S. Liu, S. Ji, et al., Evaluation of different air distribution systems in a commercial airliner cabin in terms of comfort and COVID-19 infection risk, *Build. Environ.* 208 (2022) 108590, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108590>.

M. Riediker, L. Briceno-Ayala, G. Ichihara, D. Albani, D. Poffet, D.-H. Tsai, et al., Higher viral load and infectivity increase risk of aerosol transmission for Delta and Omicron variants of SARS-CoV-2, *Swiss Med. Wkly.* 152 (2022) w30133, <https://doi.org/10.4414/SMW.2022.W30133>.

M.K. Fageha, A. Alaidroos, Performance optimization of natural ventilation in classrooms to minimize the probability of viral infection and reduce draught risk, *Sustainability* 14 (22) (2022) 14966, <https://doi.org/10.3390/su142214966>.

McCarthy JE, Dewitt BD, Dumas BA, Bennett JS (2022). Superposition of Droplet and Aerosol risk in the transmission of SARS-CoV-2. *medRxiv*, 2022–09.

McNeill, V. F., et al. (2022). Airborne transmission of SARS-CoV-2: evidence and implications for engineering. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 13, 449–472. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-092220-111631>

N. Ghaddar, K. Ghali, Ten questions concerning the paradox of minimizing airborne transmission of infectious aerosols in densely occupied spaces via sustainable ventilation and other strategies in hot and humid climates, *Build. Environ.* 214 (2022) 108901, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108901>.

P.K. Sangdeh, N. Nasrollahi, Windcatchers and their applications in contemporary architecture, *Energy Built Environ.* 3 (1) (2022) 56–72, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.10.005>.

Peng, Z., Bahnfleth, W., Buonanno, G., Dancer, S. J., Kurnitski, J., Li, Y., et al. (2022). Practical indicators for risk of airborne transmission in shared indoor environments and their application to COVID-19 outbreaks. *Environmental Science & Technology*, 56, 1125–1137. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06531> (preprint/PDF: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2021.04.21.21255898v3.full.pdf>)

Pineda Rojas AL, Kropff E. (2022). Practical Indicators for Risk of Airborne Transmission in Shared Indoor Environments and Their Application to COVID-19 Outbreaks. *Environmental Science & Technology*. (Citato in Risultato 2.9)

Q. Luo, C. Ou, J. Hang, Z. Luo, H. Yang, X. Yang, et al., Role of pathogen-laden expiratory droplet dispersion and natural ventilation explaining a COVID-19 outbreak in a coach bus, *Build. Environ.* 220 (2022) 109160, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109160>.

R. He, J. Zhang, G. Mainelis, Resuspension of particles deposited by nano-enabled consumer sprays: the role of product type, flooring material, and resuspension force, *Indoor Air* 32 (11) (2022) e13157, <https://doi.org/10.1111/ina.13157>.

- R. Kuwahara, H. Kim, Studying the indoor environment and comfort of a university laboratory: air-conditioning operation and natural ventilation used as a countermeasure against COVID-19, *Buildings* 12 (7) (2022) 953, <https://doi.org/10.3390/buildings12070953>.
- Ricolfi, L., Stabile, L., Morawska, L., Buonanno, G., & others. (2022). Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools: a retrospective cohort study in Italy's Marche region [Preprint]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2207.02678>
- S. Cao, F. Li, X. Li, Numerical study on settlement characteristics of inhalable particles in under-floor air distribution system, *J. Build. Eng.* 45 (2022) 103481, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103481>.
- S. Ferrari, T. Blazquez, R. Cardelli, G. Puglisi, R. Suarez, L. Mazzearella, Ventilation strategies to reduce airborne transmission of viruses in classrooms: a systematic review of scientific literature, *Build. Environ.* 222 (2022) 109366, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109366>.
- S. Liu, M. Koupriyanov, D. Paskaruk, G. Fediuk, Q. Chen, Investigation of airborne particle exposure in an office with mixing and displacement ventilation, *Sustain. Cities Soc.* 79 (2022) 103718, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103718>.
- Santurtún A, Colom ML, Fdez-Arroyabe P, Del Real A, Fernández-Olmo I, Zarrabeitia MT (2022) Exposure to particulate matter: direct and indirect role in the COVID-19 pandemic. *Environ Res* 206:112261
- Seyfert C, Rodríguez-Rodríguez J, Lohse D, Marin A. 2022. Stability of respiratory-like droplets under evaporation. *Phys. Rev. Fluids* 7:023603
- Stettler ME, Nishida RT, de Oliveira PM, Mesquita LC, Johnson TJ et al. 2022. Source terms for benchmarking models of SARS-CoV-2 transmission via aerosols and droplets. *R. Soc. Open Sci.* 9:5212022

Thornton, G. M., et al. (2022). A systematic review of ventilation and coronavirus. Environmental/indoor-air review (PMC). (PMC)

V. Hofer, M. Kriegel, Exposure of operating room surgical staff to surgical smoke under different ventilation schemes, *Indoor Air* 32 (1) (2022) e12947, <https://doi.org/10.1111/ina.12947>.

W. Che, J. Ding, L. Li, Airflow deflectors of external windowsto induce ventilation: towards COVID-19 prevention and control, *Sustain. Cities Soc.* 77 (2022) 103548, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103548>.

W. Su, B. Yang, A. Melikov, C. Liang, Y. Lu, F. Wang, et al., Infection probability under different air distribution patterns, *Build. Environ.* 207 (2022) 108555, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108555>.

Wu J, Geng J, Fu M, Weng W (2022) Multi-person movement-induced airflow and the effects on virus-laden expiratory droplet dispersion in indoor environments. *Indoor Air* 32(9):e13119

X. Fang, X. Li, Y. Yan, Y. Tao, Z. Chen, P. Yan, Analysis of occupants' exposure risk of cough-expelled droplets in the workspace with various mixing ventilation layouts, *Exp. Comput. Multiph Flow* 4 (4) (2022) 389–398, <https://doi.org/10.1007/s42757-022-0142-x>.

Xu C, Liu W, Luo X, Huang X, Nielsen PV (2022) Prediction and control of aerosol transmission of SARS-CoV-2 in ventilated context: from source to receptor. *Sustain Cities Soc* 76:103416

Y. Hu, Y. Wu, Q. Wang, J. Hang, Q. Li, J. Liang, et al., Impact of indoor-outdoor temperature difference on building ventilation and pollutant dispersion within urban communities, *Atmosphere* 13 (1) (2022) 28, <https://doi.org/10.3390/atmos13010028>.

Y. Lu, D. Niu, S. Zhang, H. Chang, Z. Lin, Ventilation indices for evaluation of airborne infection risk control performance of air distribution, *Build. Environ.* 222 (2022) 109440, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109440>.

Y. Peng, Y. Lei, Z.D. Tekler, N. Antanuri, S.-K. Lau, A. Chong, Hybrid system controls of natural ventilation and HVAC in mixed-mode buildings: a comprehensive review, *Energy Build.* 276 (2022) 112509, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112509>.

Y. Zhang, O. Han, A. Li, L. Hou, T. Olofsson, L. Zhang, et al., Adaptive wall-based attachment ventilation: a comparative study on its effectiveness in airborne infection isolation rooms with negative pressure, *Engineering* 8 (2022) 130–137, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.10.020>.

Zhao Y, Feng Y, Ma L (2022) Impacts of human movement and ventilation mode on the indoor environment, droplet evaporation, and aerosol transmission risk at airport terminals. *Build Environ* 224:109527

Zhuang X, Xu Y, Zhang L, Li X, Lu J (2022) Experiment and numerical investigation of inhalable particles and indoor environment with ventilation system. *Energy Build* 271:112309

A. Essa, T. Yamanaka, T. Kobayashi, N. Choi, Effect of source location on contaminant dispersion pattern and occupants inhaled air quality in lecture room under displacement ventilation, *Jpn. Architect. Rev.* 6 (1) (2023), <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12313>.

A. Nazari, C. Wang, R. He, F. Taghizadeh-Hesary, J. Hong, Numerical Investigation of Airborne Infection Risk in an Elevator Cabin under Different Ventilation Designs, 2023 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.01544>, arXiv preprint.

- A. O' Donovan, P.D. O' Sullivan, The impact of retrofitted ventilation approaches on long-range airborne infection risk for lecture room environments: design stage methodology and application, *J. Build. Eng.* 68 (2023) 106044, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106044>.
- C. Chen, J. Zhu, Z. Qu, C.-H. Lin, Z. Jiang, Q. Chen, Systematic study of person-to-person contaminant transport in mechanically ventilated spaces (RP-1458), *HVAC R Res.* 20 (1) (2014) 80–91, <https://doi.org/10.1080/10789669.2013.834778>.
- C. Qin, S.-Z. Zhang, Z.-T. Li, C.-Y. Wen, W.-Z. Lu, Transmission mitigation of COVID-19: exhaled contaminants removal and energy saving in densely occupied space by impinging jet ventilation, *Build. Environ.* 232 (2023) 110066, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110066>.
- C. Qin, Y. He, J. Li, W.-Z. Lu, Mitigation of breathing contaminants: exhaust location optimization for indoor space with impinging jet ventilation supply, *J. Build. Eng.* 69 (2023) 106250, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106250>.
- Dai H, Zhao B. 2023. Association between the infection probability of COVID-19 and ventilation rates: an update for SARS-CoV-2 variants. *Build. Simul.* 16:3–12
- H. Zhang, X. Ding, W. Zhang, W. Zhang, Y. Xuan, Optimising multi-vent module-based adaptive ventilation using a novel parameter for improved indoor air quality and health protection, *Build. Simulat.* (2023), <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1063-8>.
- I.H. Hatif, H. Mohamed Kamar, N. Kamsah, K.Y. Wong, H. Tan, Influence of office furniture on exposure risk to respiratory infection under mixing and displacement air distribution systems, *Build. Environ.* (2023) 110292, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110292>.

- I.H. Hatif, H.M. Kamar, N. Kamsah, K.Y. Wong, Comparative evaluation of air distribution systems for controlling the airborne infection risk in indoor environments, *J. Build. Eng.* 79 (2023) 107913, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107913>.
- I.J. Al-Rikabi, H. Alsaad, P. Nejat, C. Voelker, A comprehensive review on mitigating the risk of airborne particles using add-on systems, *Build. Environ.* (2023) 110983, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110983>.
- J. Hang, X. Yang, C.-Y. Ou, Z.-W. Luo, X.-D. Fan, X.-L. Zhang, et al., Assessment of exhaled pathogenic droplet dispersion and indoor-outdoor exposure risk in urban street with naturally-ventilated buildings, *Build. Environ.* 234 (2023) 110122, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110122>.
- J. Morewood, Building energy performance monitoring through the lens of data quality: a review, *Energy Build.* 279 (2023) 112701, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112701>.
- J. Wei, L. Wang, T. Jin, Y. Li, N. Zhang, Effects of occupant behavior and ventilation on exposure to respiratory droplets in the indoor environment, *Build. Environ.* 229 (2023) 109973, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109973>.
- J. Wu, L. Xu, J. Shen, Research on the cross-contamination in the confined conference room with the radiant floor heating system integrated with the downsupply ventilation, *Heliyon* 9 (3) (2023) e14389, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14389>.
- J. Ye, Z. Ai, Y. Chang, Aerosol transmission in queuing and dining scenarios in canteens and the effectiveness of control measures, *J. Build. Perform. Simulat.* (2023) 1–20, <https://doi.org/10.1080/19401493.2023.2193559>.
- Kek HY, Tan H, Othman MHD, Nyakuma BB, Goh PS, Wong SL, Wong KY (2023) Perspectives on human movement considerations in indoor airflow assessment: a

comprehensive data-driven systematic review. *Environ Sci Pollut Res* 30(58):121253–121268

L. Schumann, J. Lange, Y.E. Cetin, M. Kriegel, Experimental analysis of airborne contaminant distribution in an operating room with different ventilation schemes, *Build. Environ.* 244 (2023) 110783, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110783>.

M. Alkhalaf, A. Ilinca, M.Y. Hayyani, CFD investigation of ventilation strategies to remove contaminants from a hospital room, *Design* 7 (1) (2023) 5, <https://doi.org/10.3390/designs7010005>.

P. Nejat, J.K. Calautit, Y. Fekri, M. Sheikhshahrokhdehkordi, H. Alsaad, C. Voelker, Influence of terrain and atmospheric boundary layer on the ventilation and thermal comfort performance of windcatchers, *J. Build. Eng.* 73 (2023) 106791, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106791>.

Q. Luo, X. Yang, J. Hang, X. Fan, Z. Luo, Z. Gu, et al., Influence of natural ventilation design on the dispersion of pathogen-laden droplets in a coach bus, *Sci. Total Environ.* 885 (2023) 163827, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163827>.

R.K. Bhagat, S.B. Dalziel, M.S.D. Wykes, P.F. Linden, Building ventilation: the consequences for personal exposure, *Annu. Rev. Fluid Mech.* (Oct. 2023), 10.1146/annurev-fluid-120720-015857

S. Chang, P. Karunyasopon, M. Le, D.Y. Park, H. Chang, Airborne migration behaviour of SARS-CoV-2 coupled with varied air distribution systems in a ventilated space, *Indoor Built Environ.* (2023) 1420326X2211480, <https://doi.org/10.1177/1420326X221148084>.

S.-J. Yoo, A. Kurokawa, K. Matsunaga, K. Ito, Spatial distributions of airborne transmission risk on commuter buses: numerical case study using computational fluid and

particle dynamics with computer-simulated persons, *Exp. Comput. Multiph Flow* (2023) 1–15, <https://doi.org/10.1007/s42757-022-0146-6>.

T. Li, E.A. Essah, Y. Wu, Y. Cheng, C. Liao, Numerical comparison of exhaled particle dispersion under different air distributions for winter heating, *Sustain. Cities Soc.* 89 (2023) 104342, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104342>.

Talie T. Moghadam, Carlos E. Ochoa Morales, Maria J. Lopez Zambrano, Ken Bruton, Dominic T.J. O'Sullivan, Energy efficient ventilation and indoor air quality in the context of COVID-19 - A systematic review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2023) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113356>.

Vouriot CV, Higton TD, Linden PF, Hughes GO, van Reeuwijk M, Burrridge HC. 2023. Uniformly distributed floor sources of buoyancy can give rise to significant spatial inhomogeneities within rooms. *arXiv:2302.01008 [physics]*

X. Kong, Y. Chang, M. Fan, H. Li, Analysis on the thermal performance of low-temperature radiant floor coupled with intermittent stratum ventilation (LTRISV) for space heating, *Energy Build.* 278 (2023) 112623, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112623>.

X. Li, B. Feng, Transmission of droplet aerosols in an elevator cabin: effect of the ventilation mode, *Build. Environ.* 236 (2023) 110261, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110261>.

Y. Dai, D. Xu, H. Wang, F. Zhang, CFD simulations of ventilation and interunit dispersion in dormitory complex: a case study of epidemic outbreak in Shanghai, *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 20 (5) (2023), <https://doi.org/10.3390/ijerph20054603>.

Y. Dai, F. Zhang, H. Wang, Identification of source location in a single-sided building with natural ventilation: case of interunit pollutant dispersion, *J. Build. Eng.* 68 (2023) 106049, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106049>.

Y. Lu, J. Liu, Z. Lin, Impact of different supply modes of stratum ventilation on airflow and contaminant distribution characteristics, *Build. Environ.* 236 (2023) 110303, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110303>.

Y. Song, C. Yang, H. Li, H. Chen, S. Shen, Y. Hou, et al., Aerodynamic performance of a ventilation system for droplet control by coughing in a hospital isolation ward, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 30 (29) (2023) 73812–73824, <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27614-w>.

Y. Xie, Z. Ding, J. Ma, X. Zheng, F. Liu, Y. Ding, et al., The assessment of personal exposure in restaurants considering heat sources and ventilation strategies, *Energy Built Environ.* (2023), <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.05.005>.

Y. Yan, X. Li, X. Fang, Y. Tao, J. Tu, A spatiotemporal assessment of occupants' infection risks in a multi-occupants space using modified Wells-Riley model, *Build. Environ.* 230 (2023) 110007, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110007>.

Z.A. Firatoglu, The effect of natural ventilation on airborne transmission of the COVID-19 virus spread by sneezing in the classroom, *Sci. Total Environ.* 896 (2023) 165113, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165113>.

Amar Aganovic, Giorgio Buonanno, Guangyu Cao, Christian Delmaar, Jarek Kurnitski, Alex Mikszewski, Lidia Morawska, Lucie C. Vermeulen, Pawel Wargocki (2024).

Comparative assessment of airborne infection risk tools in buildings. *Science of the Total Environment*. (PMC PDF: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11655680/>)

Giri, A., et al. (2024). Quantifying airborne transmission in ventilated settings: review & recommendations. *Science of the Total Environment*.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.162450>

Ihab Jabbar Al-Rikabi, Jennifer Karam, Hayder Alsaad, Kamel Ghali, Nesreen Ghaddar, Conrad Voelker, The impact of mechanical and natural ventilation modes on the spread of indoor airborne contaminants: A review, *Journal of Building Engineering*, Volume 85, 15 May 2024, 108715

Marr, L. C., et al. (2024). Reducing transmission of airborne respiratory pathogens: modeling, mitigation, and practical recommendations. *Frontiers in Public Health*.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11086747/>

Benn, J., & Tian, L. (2025). Optimising Air Change Rates: A CFD Study on Mitigating Pathogen Transmission in Aircraft Cabins. *Fluids*, 10(3), 74.

<https://doi.org/10.3390/fluids10030074>

Hakim, L., Widodo, W. A., & Dwiyantoro, B. A. (2025). An Analysis of Air Conditioning System Operation Patterns on Droplet Particle Distribution in a Classroom-A CFD Approach. *CFD Letters*, 17(2), 115-135.

Henriques, A., et al. (2025). An integrated airborne transmission risk assessment model for indoor environments considering short- and long-range routes. *Journal of the Royal Society Interface*. <https://doi.org/10.1098/rsif.2024.0740>

Sadeghi, S., Aminossadati, S.M. & Leonardi, C. A Critical Review of Critical Factors Influencing Airborne Particle Transmission in Indoor Environments Under Stationary and Dynamic Scenarios. *Arch Computat Methods Eng* (2025). <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10403-8>

Szalański, Paweł and Cepiński, Wojciech, Combined Effect of Heat Load and Humidity on Airborne Viral Transmission Risk in an Exemplary Large Internal Auditorium. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5377090> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5377090>

7 Codice Matlab

```
% calcolo temperatura e diametro di una goccia fino al limite di
% aerosolizzazione
% formulazioni dinamiche basate su 1998 Miller Harstad Bellan
% equazione del getto da 2007 Xie et al

d0=[80:150]'; % [micron] diametro iniziale droplet
vg0 = 50; % [m/s] velocità del getto, orizzontale

% parametri
pa = 101325; % [Pa] pressione totale dell'aria
g = 9.806; % [m/s^2] accelerazione di gravità

% stato dell'aria ambiente inidisturbata
vax0 = 0; % [m/s] velocità all'aria, componente verticale (positiva verso il basso)
vay0 = 0; % [m/s] velocità all'aria, componente orizzontale
aTaC0 = [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]; % [°C] temperatura dell'aria
aURa = [0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6]; % [%] umidità relativa dell'aria
NT=max(size(aTaC0));
NUR=max(size(aURa));
mua = 1.79e-5; % [N*s/m] viscosità dell'aria
cpa=1006; % [J/kg K] calore specifico dell'aria
ka=0.025; % [W/m K] conducibilità termica dell'aria

% stato del getto d'aria
dg0=0.04; % [m] diametro iniziale del getto
rA0=sqrt(pi*dg0^2/4); % [m] lunghezza caratteristica della bocca
TgC0 = 33; % [°C] temperatura del getto
URg = 0.9; % [%] umidità relativa del getto

% proprietà dell'aria nel getto
mug = 1.79e-5; % [N*s/m] viscosità dell'aria
cpg=1006; % [J/kg K] calore specifico dell'aria
kg=0.025; % [W/m K] conducibilità termica dell'aria
Tg0 = TgC0+273.15; % [K] temperatura dell'aria
rog=pa/287/Tg0; % [kg/m^3] densità dell'aria
psatg0 = SatPW(TgC0); % [Pa] pressione di saturazione in ambiente
```

```

pvg0 = URg * psatg0; % [Pa] pressione del vapore in ambiente
xg0 = 0.622*pvg0/(pa-pvg0); % [kgv/kga] umidità specifica
Reg=rog*dg0*vg0/mug;

% proprietà della saliva
cw=4186; % [J/kg K] calore specifico dell'acqua
cseq=9*2*18.015/58.44; % [kg/m^3] densità equivalente del soluto nella saliva

% stato della goccia, isotachia con il getto
% parametri calcolati mediante interpolazione quadratica per acqua pura con
% temperatura compresa tra 15°C e 40°C
% d0=50;
alfa=0; % [rad] alzo di lancio iniziale della droplet rispetto all'orizzonte
vd0=vg0; % [m/s] velocità iniziale della droplet
h0=2; % [m] quota di partenza della droplet
y0=0; % [m] posizione iniziale della droplet
vdx0=-vd0*sin(alfa); % [m/s] componente verticale della velocità (positivo verso il
basso)
vdy0=vd0*cos(alfa); % [m/s] componente orizzontale della velocità
TwC0 = 33; % [°C] temperatura dell'acqua
row = 1./(6.4e-9*TwC0.^2-7.93e-8*TwC0+.0010009); % [kg/m^3] densità dell'acqua
m0=row*pi/6*(d0/1e6).^3; % [kg] massa iniziale delle droplet
rov = 1./(0.0708*TwC0.^2-6.1824*TwC0+154.21); % [kg/m^3] densità del vapore
d'acqua

% limite iterazioni
maxsim=1000000;
maxiter=10;
aerosol=zeros(NT,NUR);

for nT=1:NT
    TaC0=aTaC0(nT);
    for nUR=1:NUR
        URa=aURa(nUR);

% proprietà dell'aria indisturbata
Ta0 = TaC0+273.15; % [K] temperatura dell'aria
betaa=1/Ta0;
roa0=pa/287/Ta0; % [kg/m^3] densità dell'aria
psata0 = SatPW(TaC0); % [Pa] pressione di saturazione in ambiente

```

```
pva0 = URa * psata0; % [Pa] pressione del vapore in ambiente
xa0 = 0.622*pva0/(pa-pva0); % [kgv/kga] umidità specifica
```

```
Ar0=g*sqrt(pi)*betaa*(TgC0-TaC0)*dg0/vg0^2;
```

```
ndmax=max(size(d0));
```

```
% tic
```

```
for nd=1:ndmax
```

```
    % inizializzazione
```

```
    % disp(d0(nd));
```

```
    m=m0(nd);
```

```
    h=h0;
```

```
    hg=h0;
```

```
    y=y0;
```

```
    vdx=vdx0;
```

```
    vdy=vdy0;
```

```
    xa=xg0;
```

```
    Ta=Tg0;
```

```
    roa=pa/287/Ta;
```

```
    TwC=TwC0;
```

```
    vrx=0;
```

```
    vry=0;
```

```
    vr=0;
```

```
    gammaa=22.164e-6+0.1457e-6*TwC;
```

```
    Sc=mua./roa./gammaa;
```

```
    Pr=mua.*cpa./ka;
```

```
    row = 1./(6.4e-9*TwC.^2-7.93e-8*TwC+.0010009); % [kg/m^3] densità dell'acqua
```

```
    % mseq=cseq*m/row; % [kg] massa equivalente di soluto
```

```
    d=(m./row*6/pi).^(1/3); % [m] diametro della droplet
```

```
    Re=roa.*vr.*d./mua;
```

```
    Sh=2+0.552*Re.^0.5.*Sc.^(1/3);
```

```
    FI=1+0.15*Re.^0.687;
```

```
    taud=row.*d.^2./(18*mua.*FI);
```

```
    psatd = SatPW(TwC)/(1+cseq/row); % [Pa] pressione di saturazione alla goccia con
```

```
la concentrazione attuale di sali
```

```
    xd=0.622*psatd./(pa-psatd);
```

```
    HM=log(1+(xd-xa)./(1-xd));
```

```
    Nu=2+0.552*Re.^0.5.*Pr.^(1/3);
```

```
    lsat = (-2.3674*TwC+2501.5)*1000; % [J/kg] calore latente di evaporazione
```

```

Reb=Sh.*abs(HM).*m./(3.*Sc.*taud.*pi.*mua.*d);
a=0.09+0.077*exp(-0.4*Re);
b=0.4+0.77*exp(-0.04*Re);
f1=(1+0.545*Re+0.1*Re.^0.5.*(1-0.03*Re))/(1+a*Reb.^b);
out=0;
exit=0;

time=0;
nsim=0;
% iterazioni
while not(out)&&(nsim<maxsim)
    nsim=nsim+1;
    % time step
    dt=0.01*Sc*taud/(Sh*abs(HM)); % [s] intervallo di tempo
    if dt<=1e-6
        dt=1e-6;
    elseif dt>0.01
        dt=0.01;
    end
    % avanzamento tempo
    time=time+dt;
    % calcolo lo stato dell'aria
    if exit==1
        vax=vax0;
        vay=vay0;
        Ta=Ta0;
        xa=xa0;
    else
        hg=h0+0.354*Ar0*(y/rA0)^3*sqrt(Tg0/Ta0)*rA0;
        fig=atan(0.354*Ar0^3*(y/rA0)^2*sqrt(Tg0/Ta0));
        sg=y/cos(fig);
        if sg<6.8*dg0
            vg=vg0;
            if abs(hg-h)<=dg0
                vax=0;
                vay=vg;
            else
                eta=abs(hg-dg0-h)/y;
                %          vgc=vg*sech(10.4*eta);
            end
        end
    end
end

```

```

        %          vgr=vg*(0.0046*eta*(1+eta^2-
1.0075*(1+eta^2)^0.5))/((1+eta^2)*(1-1.0075*(1+eta^2)^0.5)^2);
        %          if vgr<0
        %          vgr=0;
        %          end
        %          vax=-vgc*sin(fig)+vgr*cos(fig);
        %          vay=vgc*cos(fig)+vgr*sin(fig);
        vay=vg*sech(10.4*eta);
        vax=vg*(0.0046*eta*(1+eta^2-1.0075*(1+eta^2)^0.5))/((1+eta^2)*(1-
1.0075*(1+eta^2)^0.5)^2);
        if vax <0
            vax=0;
        end
    end
else
    vg=vg0*6.8*dg0/sg;
    eta=abs(hg-h)/y;
    %          vgc=vg*sech(10.4*eta);
    %          vgr=vg*(0.0046*eta*(1+eta^2-1.0075*(1+eta^2)^0.5))/((1+eta^2)*(1-
1.0075*(1+eta^2)^0.5)^2);
    %          if vgr<0
    %          vgr=0;
    %          end
    %          vax=-vgc*sin(fig)+vgr*cos(fig);
    %          vay=vgc*cos(fig)+vgr*sin(fig);
    vay=vg*sech(10.4*eta);
    vax=vg*(0.0046*eta*(1+eta^2-1.0075*(1+eta^2)^0.5))/((1+eta^2)*(1-
1.0075*(1+eta^2)^0.5)^2);
    if vax <0
        vax=0;
    end
end
if (vax^2+vay^2)<0.01 % condizione di uscita dal getto, velocità inferiore a 0.1
m/s
    exit=1;
end
if sg<5*dg0
    if abs(hg-h)<=dg0
        Ta=Tg0;
        xa=xg0;

```

```

else
    Ta=Ta0;
    xa=xa0;
end
else
    Tg=Ta0+(Tg0-Ta0)*5*dg0/sg;
    xg=xa0+(xg0-xa0)*5*dg0/sg;
    eta=abs(hg-h)/y;
    Ta=Ta0+(Tg-Ta0)*exp(-eta^2*log(2)/0.11^2);
    xa=xa0+(xg-xa0)*exp(-eta^2*log(2)/0.11^2);
end
end
roa=pa/287/Ta;
Sc=mua./roa./gammaa;
Pr=mua.*cpa./ka;

% salvo i dati precedenti
mo=m;
TwCo=TwC;
vdxo=vdx;
vdyo=vdy;
% calcolo i coefficienti delle equazioni differenziali
Am=Sh*HM/(3*Sc*taud);
AT=Nu*cpa/(3*cw*taud*Pr);
BT=lsat*Sh*HM/(3*cw*taud*Sc);
Av=f1/taud;
% calcolo i nuovi valori delle variabili con metodo implicito
m=mo/(1+Am*dt);
if m<0
    warning('valore negativo m, d0 = %d',d0(nd));
end
if imag(m)~=0
    warning('valore immaginario m, d0= %d',d0(nd));
end
TwC=(TwCo+AT*dt*TaC0-BT*dt)/(1+AT*dt);
if imag(TwC)~=0
    warning('valore immaginario TwC, d0= %d',d0(nd));
end
vdx=(vdxo+Av*dt*vax+g*dt)/(1+Av*dt);
if imag(vdx)~=0

```

```

        warning('valore immaginario vdx, d0= %d',d0(nd));
    end
    vdy=(vdyo+Av*dt*vay)/(1+Av*dt);
    if imag(vdy)~=0
        warning('valore immaginario vdy, d0= %d',d0(nd));
    end
    % aggiorno iterativamente, utilizzando i valori medi dei parametri delle
equazioni differenziali
    % salvo i vecchi valori dei parametri
    Amo=Am;
    ATo=AT;
    BTo=BT;
    Avo=Av;
    % calcolo i valori dei parametri con la media tra i nuovi valori e i vecchi delle
variabili
    vrx=(vdx+vdxo)/2-vax;
    vry=(vdy+vdyo)/2-vay;
    vr=(vrx.^2+vry.^2).^0.5;
    row = 1./((6.4e-9*((TwC+TwCo)/2).^2-7.93e-8*(TwC+TwCo)/2+.0010009); %
[kg/m^3] densità dell'acqua
    d=((m+mo)/2./row*6/pi).^(1/3); % [m] diametro della droplet
    gammaa=22.164e-6+0.1457e-6*(TwC+TwCo)/2;
    Sc=mua./roa./gammaa;
    Re=roa.*vr.*d./mua;
    Sh=2+0.552*Re.^0.5.*Sc.^(1/3);
    FI=1+0.15*Re.^0.687;
    taud=row.*d.^2./(18*mua.*FI);
    psatd = SatPW((TwC+TwCo)/2)/(1+cseq/row); % [Pa] pressione di saturazione alla
goccia
    xd=0.622*psatd./(pa-psatd);
    HM=log(1+(xd-xa)./(1-xd));
    Nu=2+0.552*Re.^0.5.*Pr.^(1/3);
    lsat = (-2.3674*(TwC+TwCo)/2+2501.5)*1000; % [J/kg] calore latente di
evaporazione
    Reb=Sh.*abs(HM).*(m+mo)/2./(3.*Sc.*taud.*pi.*mua.*d);
    a=0.09+0.077*exp(-0.4*Re);
    b=0.4+0.77*exp(-0.04*Re);
    f1=(1+0.545*Re+0.1*Re.^0.5.*(1-0.03*Re))/(1+a*Reb.^b);
    % calcolo i coefficienti delle equazioni differenziali
    Am=Sh*HM/(3*Sc*taud);

```

```

AT=Nu*cpa/(3*cw*taud*Pr);
BT=lsat*Sh*HM/(3*cw*taud*Sc);
Av=f1/taud;
% confronto la variazione dei coefficienti delle equazioni differenziali
eAm=abs((Am-Amo)/Amo);
eAT=abs((AT-ATo)/ATo);
eBT=abs((BT-BTo)/BTo);
eAv=abs((Av-Avo)/Avo);
err=max([eAm,eAT,eBT,eAv]);
iter=0;

while (err>1e-3)&&(iter<maxiter)
    iter=iter+1;
    % calcolo i nuovi valori delle variabili con metodo implicito
    m=mo/(1+Am*dt);
    if m<0
        warning('valore negativo m, d0 = %d',d0(nd));
    end
    if imag(m)~=0
        warning('valore immaginario m, d0= %d',d0(nd));
    end
    TwC=(TwCo+AT*dt*TaC0-BT*dt)/(1+AT*dt);
    if imag(TwC)~=0
        warning('valore immaginario TwC, d0= %d',d0(nd));
    end
    vdx=(vdxo+Av*dt*vax+g*dt)/(1+Av*dt);
    if imag(vdx)~=0
        warning('valore immaginario vdx, d0= %d',d0(nd));
    end
    vdy=(vdyo+Av*dt*vay)/(1+Av*dt);
    if imag(vdy)~=0
        warning('valore immaginario vdy, d0= %d',d0(nd));
    end
    % salvo i vecchi valori dei parametri
    Amo=Am;
    ATo=AT;
    BTo=BT;
    Avo=Av;
    % calcolo i valori dei parametri con la media tra i nuovi valori e i vecchi delle

```

variabili

```

vrx=(vdx+vdxo)/2-vax;
vry=(vdy+vdyo)/2-vay;
vr=(vr2+vry2).0.5;
row = 1./(6.4e-9*((TwC+TwCo)/2).2-7.93e-8*(TwC+TwCo)/2+.0010009); %
[kg/m3] densità dell'acqua
d=((m+mo)/2./row*6/pi).(1/3); % [m] diametro della droplet
gammaa=22.164e-6+0.1457e-6*(TwC+TwCo)/2;
Sc=mua./roa./gammaa;
Re=roa.*vr.*d./mua;
Sh=2+0.552*Re.0.5*Sc.(1/3);
FI=1+0.15*Re.0.687;
taud=row.*d.2./(18*mua.*FI);
psatd = SatPW((TwC+TwCo)/2)/(1+cseq/row); % [Pa] pressione di saturazione
alla goccia
xd=0.622*psatd./(pa-psatd);
HM=log(1+(xd-xa)./(1-xd));
Nu=2+0.552*Re.0.5*Pr.(1/3);
lsat = (-2.3674*(TwC+TwCo)/2+2501.5)*1000; % [J/kg] calore latente di
evaporazione
Reb=Sh.*abs(HM).*(m+mo)/2./(3.*Sc.*taud.*pi.*mua.*d);
a=0.09+0.077*exp(-0.4*Re);
b=0.4+0.77*exp(-0.04*Re);
f1=(1+0.545*Re+0.1*Re.0.5*(1-0.03*Re))/(1+a*Reb.b);
% calcolo i coefficienti delle equazioni differenziali
Am=Sh*HM/(3*Sc*taud);
AT=Nu*cpa/(3*cw*taud*Pr);
BT=lsat*Sh*HM/(3*cw*taud*Sc);
Av=f1/taud;
% confronto la variazione dei coefficienti delle equazioni differenziali
eAm=abs((Am-Amo)/Amo);
eAT=abs((AT-ATo)/ATo);
eBT=abs((BT-BTo)/BTo);
eAv=abs((Av-Avo)/Avo);
err=max([eAm,eAT,eBT,eAv]);
end
% avanzamento nello spazio
% verifica immaginari
if imag(vdx)~=0
    warning('valore immaginario, d0= %d',d0(nd));
else

```

```

        h=h-vdx*dt;
        y=y+vdy*dt;
    end
    % verifica aerosol
    if (d<5e-6)%||((exit==1)&&(vdx<0.1))
        out=1;
        aerosol(nT,nUR)=d0(nd);
    elseif h<0
        out=1;
    else
        out=0;
    end
end
end
%   toc
%   loglog(d0,endtime)
end
end
end

```