



**La qualità dell'aria indoor: attuale situazione nazionale e comunitaria.  
L'esperienza del Gruppo di Studio Nazionale Inquinamento Indoor  
Workshop 28 maggio 2014 Roma, Istituto Superiore di Sanità**

# **INFLUENZA DEI PARAMETRI MICROCLIMATICI SUGLI INQUINANTI INDOOR**

**Anna Santarsiero<sup>a</sup>, Annino Ricci<sup>b</sup>, Riccardo Merluzzi<sup>c</sup>**

**<sup>a</sup> Istituto Superiore di Sanità, Roma;**

**<sup>b</sup> Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma;**

**<sup>c</sup> Cattedra di Medicina del Lavoro, Università Tor Vergata , Roma;**

## SCOPO

fornire elementi che consentano di inquadrare :

- ❑ l'ambiente indoor come sistema edilizio con i relativi scambi termici e di acqua con l'ambiente esterno e quanto presente all'interno (presenze, attività, materiali ecc.);
- ❑ come gli scambi influiscono sui valori dei parametri microclimatici;
- ❑ i parametri microclimatici e relative influenze sugli inquinanti indoor (concentrazioni, emissioni secondarie, insorgenza di nuove sorgenti ecc.).

Tale inquadramento è di supporto, tramite misure di screening, sia alla scelta della strategia di monitoraggio inquinanti sia all'interpretazione dei risultati di analisi delle misure degli inquinanti indoor.

- **INQUADRAMENTO DELL'AMBIENTE INDOOR (SISTEMA EDILIZIO)**
  - **INTESO COME SISTEMA TERMODINAMICO APERTO CON SCAMBI TERMICI e DI ACQUA CON L'AMBIENTE ESTERNO E CON QUANTO PRESENTE ALL'INTERNO**
    - **E COME TALI SCAMBI INFLUISCONO SUI VALORI DEI PARAMETRI MICROCLIMATICI:**
      - **temperatura dell'aria ( $T_a$ ),**
      - **temperatura superfici ( $T_s$ ) e temperatura media radiante ( $T_{rm}$ );**
      - **umidità relativa (UR);**
      - **velocità dell'aria ( $V_{aria}$  , Ricambi d'aria);**
    - **COME TALI PARAMETRI MICROCLIMATICI INFLUISCONO SUGLI INQUINANTI**

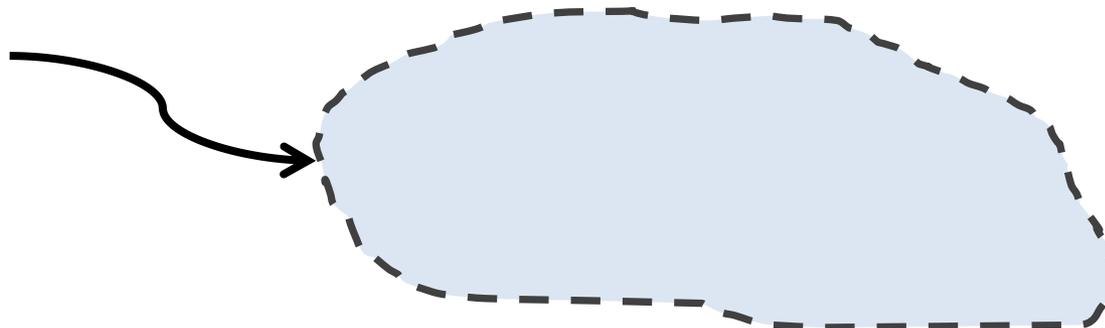
# AMBIENTE INDOOR DAL PUNTO DI VISTA DEGLI SCAMBI TERMICI E DI MASSA [acqua (liquido-vapore)]

**SISTEMA TERMODINAMICO APERTO:** separato dall'ambiente esterno mediante la superficie di controllo, costituita dalle pareti /involucro edilizio caratterizzata da due parametri essenziali:

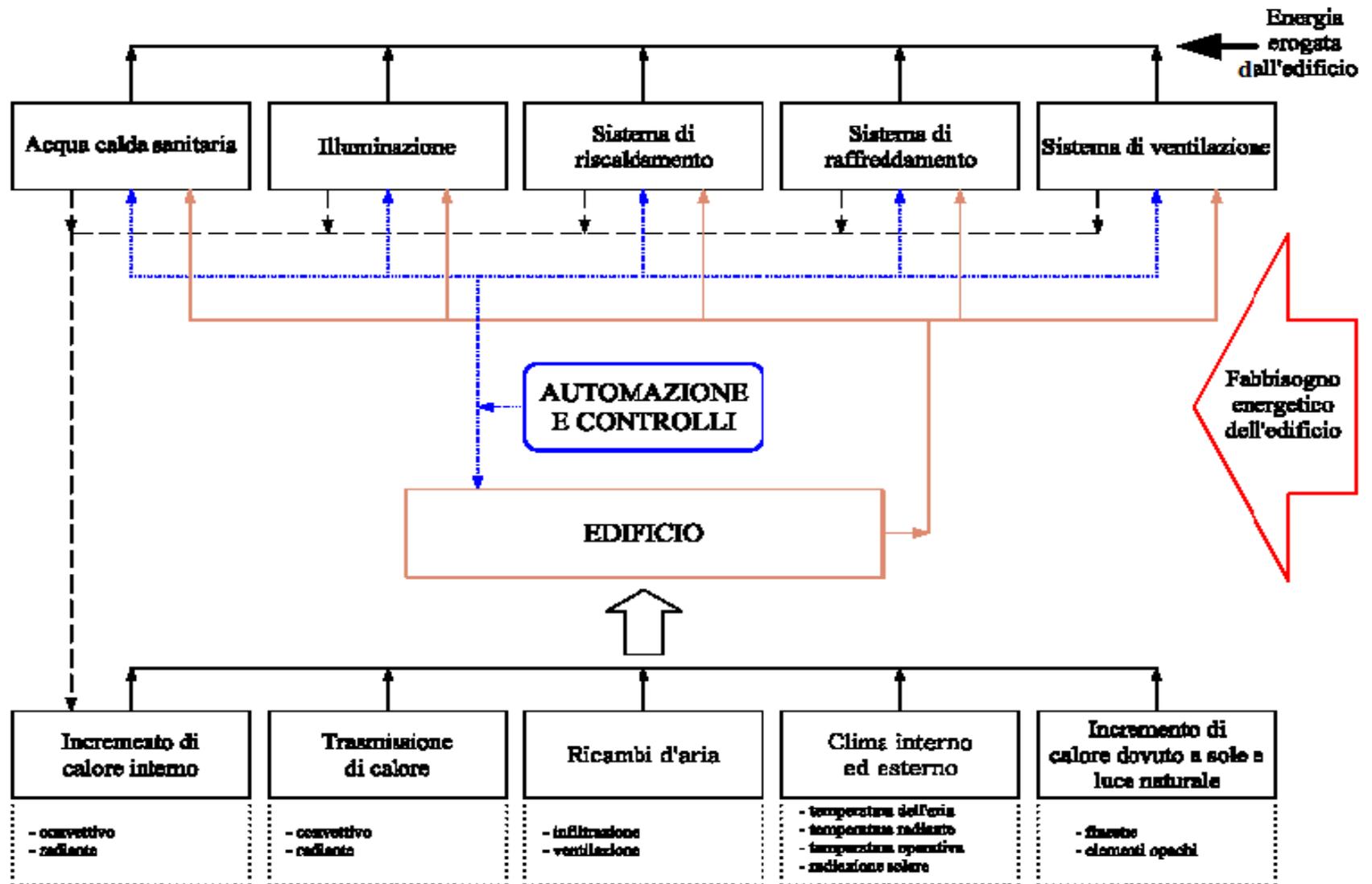
1. **permeabilità (porosità/non porosità materiali da costruzione);**
2. **conduttività termica( scambio calore/flussi termici);**

che consente un flusso con l'ambiente esterno, sia di massa sia di energia (tramite calore e/o lavoro e/o altra forma di energia) attraverso il suo confine (**Involucro edilizio/parete**)

Involucro  
edilizio/pareti



# Flussi termici in un sistema edificio



## VALORI E/O COMBINAZIONI DI VALORI DI

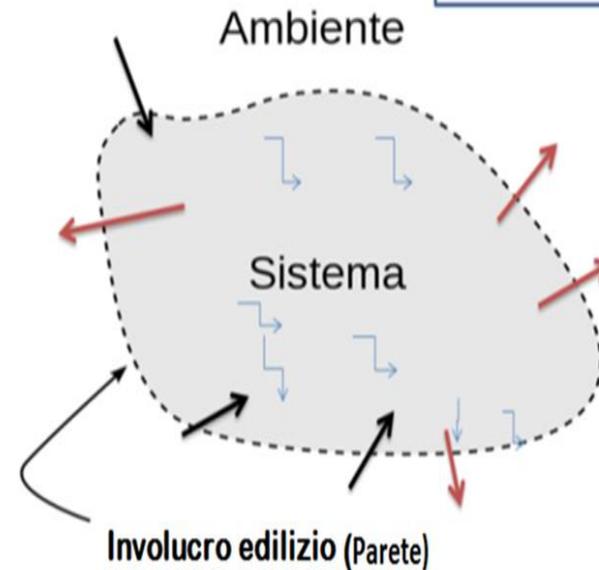
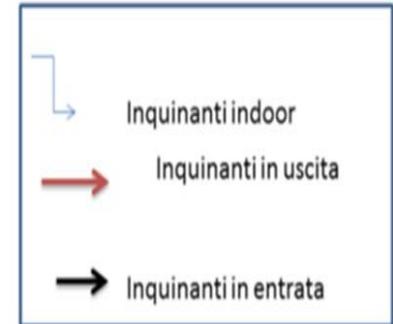
-  $T_a$ ,  $T_s$ , UR,  $V_{ARIA}$ , Ricambi d'aria

causano la **INDOOR CHEMISTRY**:



❖ contaminanti da individuate sorgenti indoor/outdoor possono reagire l'uno con l'altro o tra di loro dando luogo a prodotti (di reazione) altrimenti assenti in quanto non generati direttamente dalle sorgenti indoor/outdoor presenti nell'ambiente di indagine.

## Flussi Inquinanti



## **INDOOR CHEMISTRY (Reazioni)**

**Ossidazione** - all'aumentare dei livelli di ozono, ecc.

**Idrolisi** - condizioni di copresenza di umidità ed alcalinità delle superfici;

**Gas phase** - basse velocità/ricambi d'aria -aumentano il tempo di residenza degli inquinanti indoor favorendo reazioni in fase gas;

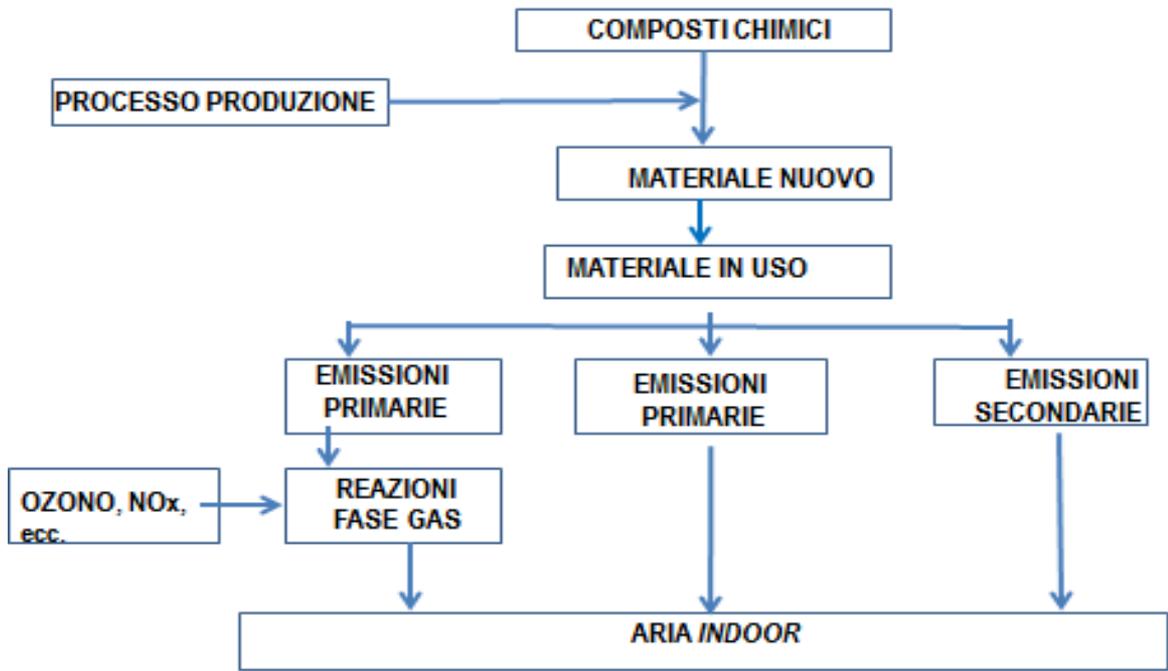
**Reazioni Eterogenee**- presenza di superfici polverose che aumentano la superficie reale di reazione, soprattutto se le particelle e polveri accumulate sono igroscopiche.

**Emissioni secondarie dei costituenti chimici dei materiali utilizzati nell'indoor-**  
temperature elevate aumentano la velocità alla quale avvengono la maggior parte dei processi chimici, e le emissione di alcuni composti chimici coinvolti i questi processi.

# EMISSIONI PRIMARIE E SECONDARIE DEI MATERIALI IN USO NELL'INDOOR ( arredi; materiali da costruzione ecc.)

Cause : T, UR - Le reazioni possono avvenire:

- 1. nel materiale;
- 2. sulla superficie del materiale;
- 3. in fase gas



## Il microclima indoor è generato:

- ▶ **clima outdoor** con le sue variazioni (temperatura, umidità, irraggiamento solare, vento, ecc.) di breve, medio e lungo termine;
- ▶ **caratteristiche dell'ambiente esterno** in grado di influenzare le interazioni dirette tra parametri microclimatici e climatici (barriere al vento, effetti canyon, ombreggiamenti, specchi d'acque superficiali, ecc.);
- ▶ **caratteristiche tecnologiche e costruttive dell' ambiente** in esame (materiali impiegati, impianti di controllo del microclima, architettura, ecc.);
- ▶ **uso degli ambienti;**
- ▶ **attività svolta/uso dagli occupanti;**
- ▶ **scambi termici e di acqua che avvengono con l'esterno;**
- ▶ **scambi termici e di acqua tra l'ambiente interno e gli elementi ivi presenti.** In particolare gli scambi avvengono notoriamente attraverso:
  - **la convezione; la conduzione; l'irraggiamento.**

# Omogeneità e stazionarietà dei parametri microclimatici nell'indoor

Uno stesso ambiente indoor può presentare condizioni di omogeneità/disomogeneità e/o di stazionarietà/non stazionarietà del microclima:

- Omogeneo -stazionario;
- Omogeneo- non stazionario;
- Non omogeneo-stazionario;
- Non omogeneo-non stazionario

I concetti di omogeneità e di stazionarietà sono relativi al valor medio ed alla fluttuazione, rispetto alla media, dei valori del parametro considerato ( $T$ ,  $UR$  o  $V_{aria}$ ) rispettivamente nello spazio e nel tempo.

❖ Il valore del rapporto tra media e fluttuazioni entro il quale l'ambiente può ritenersi omogeneo e/o stazionario dipende dall'influenza che le variazioni del parametro considerato hanno sul comportamento del contaminante ricercato e delle relative sorgenti.

## Esempi:

- a parità di fluttuazione potremmo considerare un ambiente omogeneo per un determinato COV e disomogeneo per un dato agente microbiologico e viceversa. Analoghe considerazioni valgono per la stazionarietà. nel caso di impianto di ventilazione artificiale, c'è una significativa differenza (disomogeneità) di velocità dell'aria nello spazio in particolare tra il punto di immissione aria e punti posti a distanza.

**FATTORI da considerare nella programmazione delle misure dei parametri microclimatici contestuali alle misure (campionamenti) di contaminanti indoor in funzione dell'uso dell'ambiente confinato ed attività ivi presenti:**

- la variabilità dei parametri microclimatici nello spazio (**omogeneità**) e nel tempo (**stazionarietà**) durante il periodo di campionamento;
- L'esercizio (funzionamento/non funzionamento) degli impianti di regolazione e controllo del microclima e dei ricambi d'aria;
- condizioni meteo climatiche outdoor;
- eventi accidentali che generano:
  - ❖ infiltrazioni di acqua,
  - ❖ variazioni di temperature
  - ❖ correnti d'aria inconsuete.

Verificare se, per gli ambienti considerati, i parametri microclimatici sono da considerarsi **stazionari ed omogenei** nonché rappresentativi delle condizioni che si vogliono analizzare.

# FATTORI CHE INFLUENZANO L'UMIDITA' e quindi gli INQUINANTI

## Sorgenti umidità:

### ❖ *sorgenti di immissione di umidità di origine*

- **naturale:** pioggia, umidità del suolo, falde e vene acquifere, ghiaccio e neve fondenti, superfici di specchi d'acqua;
- **artificiale:** guasti in condutture di adduzione acqua e di smaltimento reflui, processi industriali limitrofi, sistemi di riscaldamento e raffrescamento, trattamento dell'aria.

### ❖ *sorgenti indoor di umidità :*

- **attività:** cottura (sia per combustione sia per evaporazione), lavaggio e asciugatura indumenti e stoviglie, bagni e docce, pulizia degli ambienti, innaffiamento;
- **presenza:** respirazione/traspirazione di persone, animali e piante ecc.

### ❖ *umidità da materiali da costruzione:*

- **ponti termici:** quando l'umidità relativa degli ambienti interni si combinano con una temperatura superficiale dell'involucro dell'edificio che ha valore più basso del punto di rugiada.

➤ **Umidità persistenti e frequenti ma episodiche perché legate ad eventi stagionali e straordinari:**

- ❑ **meteorica:** è dovuta all'acqua piovana che bagnando la parete esterna penetra nella muratura anche per tutto il suo spessore;
- ❑ **da condensazione:** dovuta a **ponti termici**, tubazioni sottotraccia ecc.;
- ❑ **da infiltrazione:** da presenza di falde acquifere o da imprevisti (rotture di tubazioni, fognature, ecc.).

➤ **Umidità che si manifesta costantemente durante tutto il corso dell'anno**

- ❑ **da risalita (capillare):** proviene dal terreno (tipicamente falde freatiche) e risale nelle murature per capillarità.

# Umidità (condensazione superficiale e/o interstiziale pareti) :

## PONTI TERMICI

### - condensazione superficiale parete (muratura):

*quando, per cause di diversa natura, la temperatura sulla superficie della parete scende al di sotto della temperatura di rugiada in concomitanza di elevati valori di umidità relativa dell'aria interna.*

### - condensazione interstiziale della parete (muratura):

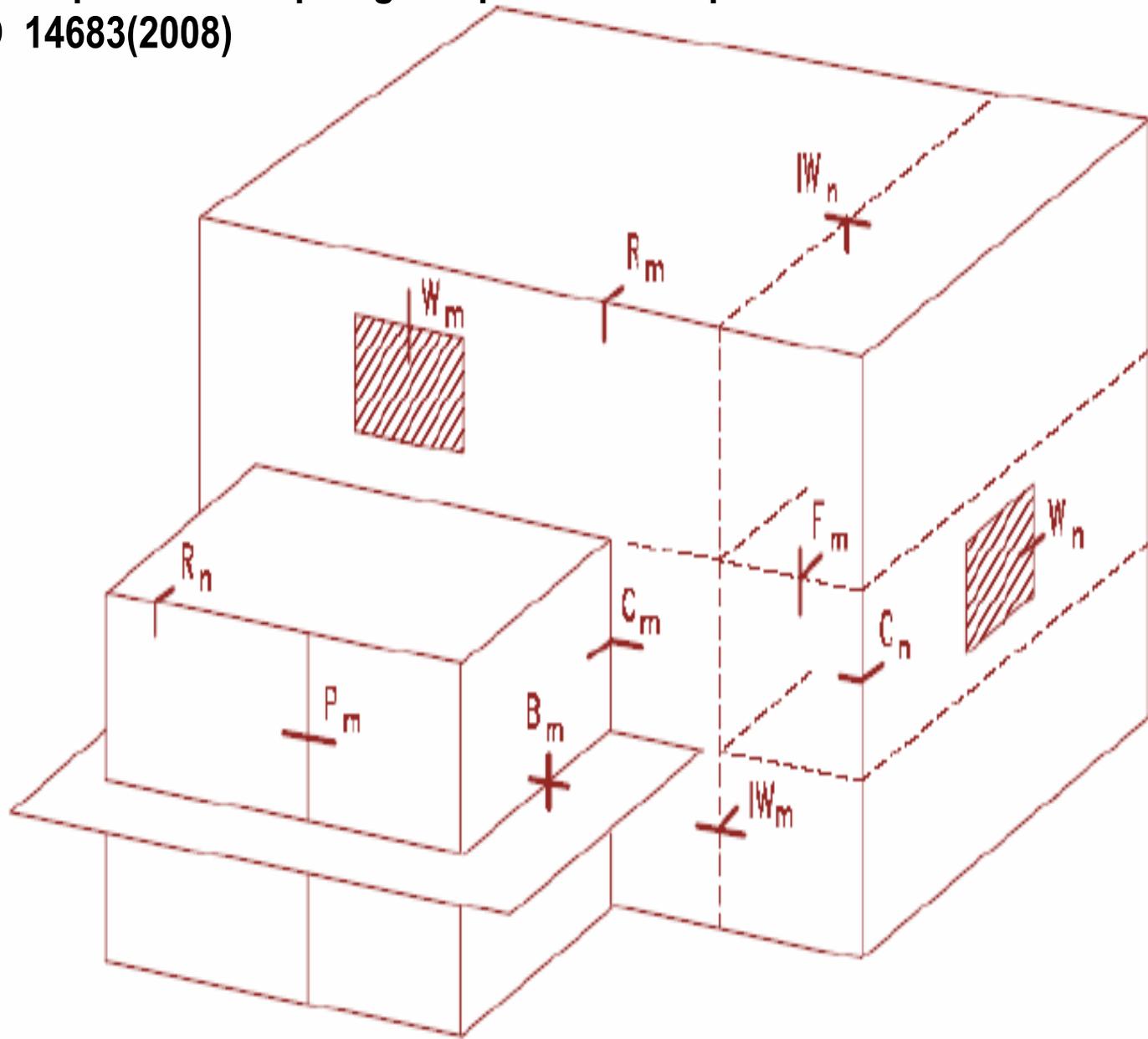
*quando, all'interno della parete, si verificano condizioni di temperature e pressioni tali da raggiungere le condizioni di rugiada (cond vapore).*

**PONTE TERMICO (UNI EN ISO 10211-2008): parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo a causa di**

- 1. COMPENETRAZIONE DI MATERIALI CON CONDUTTIVITÀ TERMICA DIVERSA NELL'INVOLUCRO EDILIZIO;**
- 2. DISCONTINUITÀ GEOMETRICA NELLA FORMA E SPESSORE DELLA STRUTTURA**

**Fig. Schema di edificio con posizioni e tipologie di ponti termici più comuni individuati dalla norma UNI EN ISO 14683(2008)**

- R = Parete/Tetto**
- IW = Partizione/Parete**
- B = Balcone/Parete**
- C = Parete/Parete angolo**
- P = Parete/Parete**
- F = Parete/Solaio**
- W = Apertura/Parete**
- n,m = numero ponte termico**

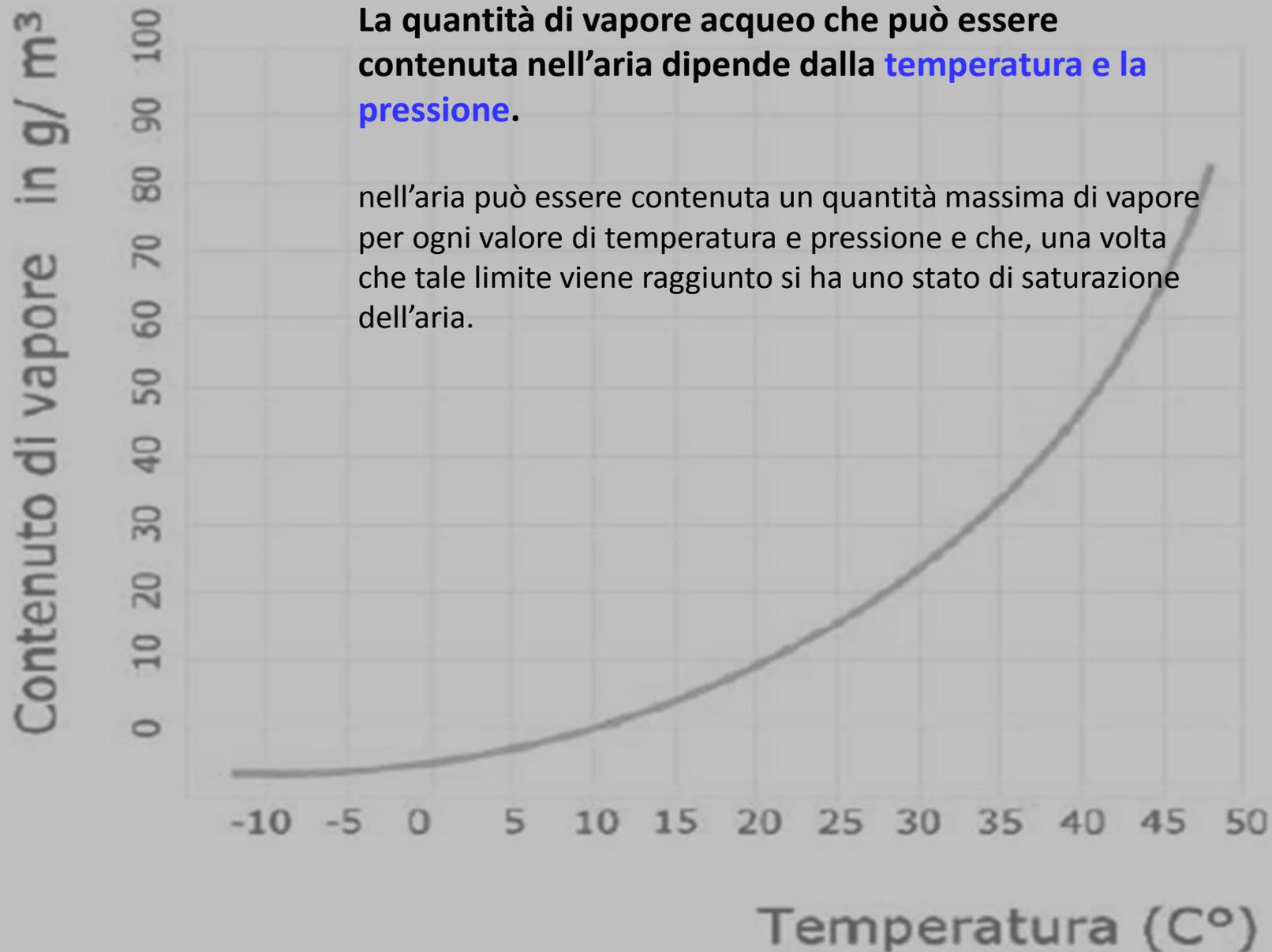


P= cost

## COME SI FORMA LA CONDENSA

La quantità di vapore acqueo che può essere contenuta nell'aria dipende dalla **temperatura e la pressione**.

nell'aria può essere contenuta un quantità massima di vapore per ogni valore di temperatura e pressione e che, una volta che tale limite viene raggiunto si ha uno stato di saturazione dell'aria.



## CONTROLLO DELLA CONDENSAZIONE SUPERFICIALE ED INTERSTIZIALE DELLE PARETI

Il metodo per evitare la formazione della condensa si basa sul profilo **delle temperature e delle pressioni parziali del vapore acqueo in una parete.**

Il calcolo è definito dalla norma Europea UNI EN 13788 (2013)

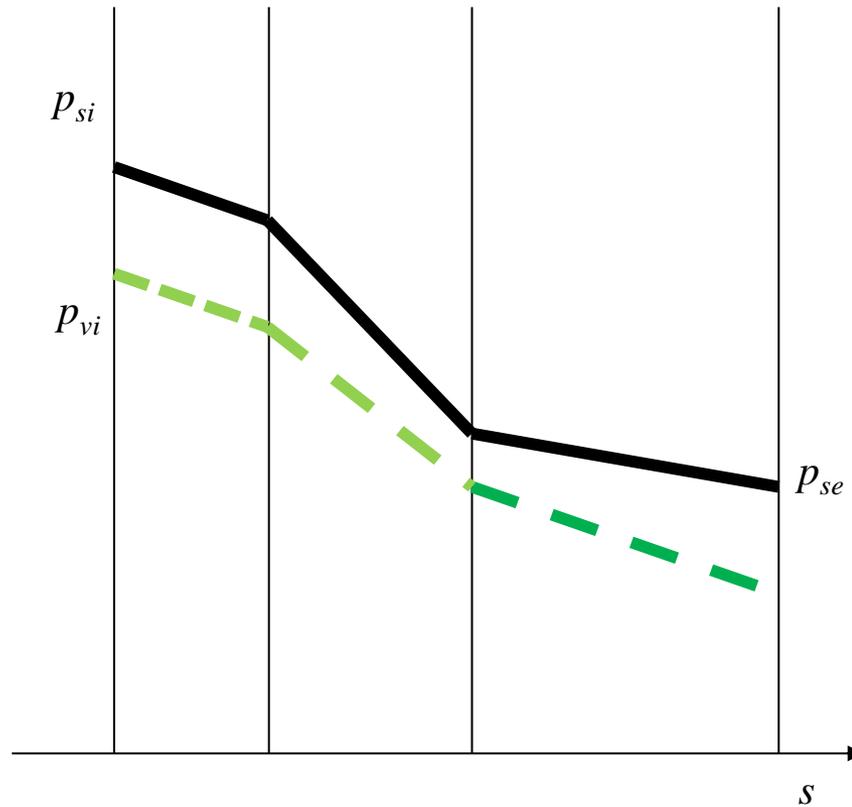
I dati necessari riguardano:

- **temperatura e condizioni igrometriche di progetto interne ed esterne all'edificio**
- **spessore di ogni strato componente la parete**
- **conducibilità termica di ogni strato**
- **resistenza alla diffusione del vapore acqueo di ogni strato.**

Utilizzando queste informazioni si calcola la pressione del vapore attraverso la parete.

➤ **Se la curva di pressione parziale raggiunge quella di saturazione significa che si formerà condensa nella parete, e in particolare nella parte della costruzione dove le due linee si toccano**

# Parete non interessata dalla condensazione interstiziale



Spessore parete

$P_{si}$  = pressione vapore saturo lato indoor;

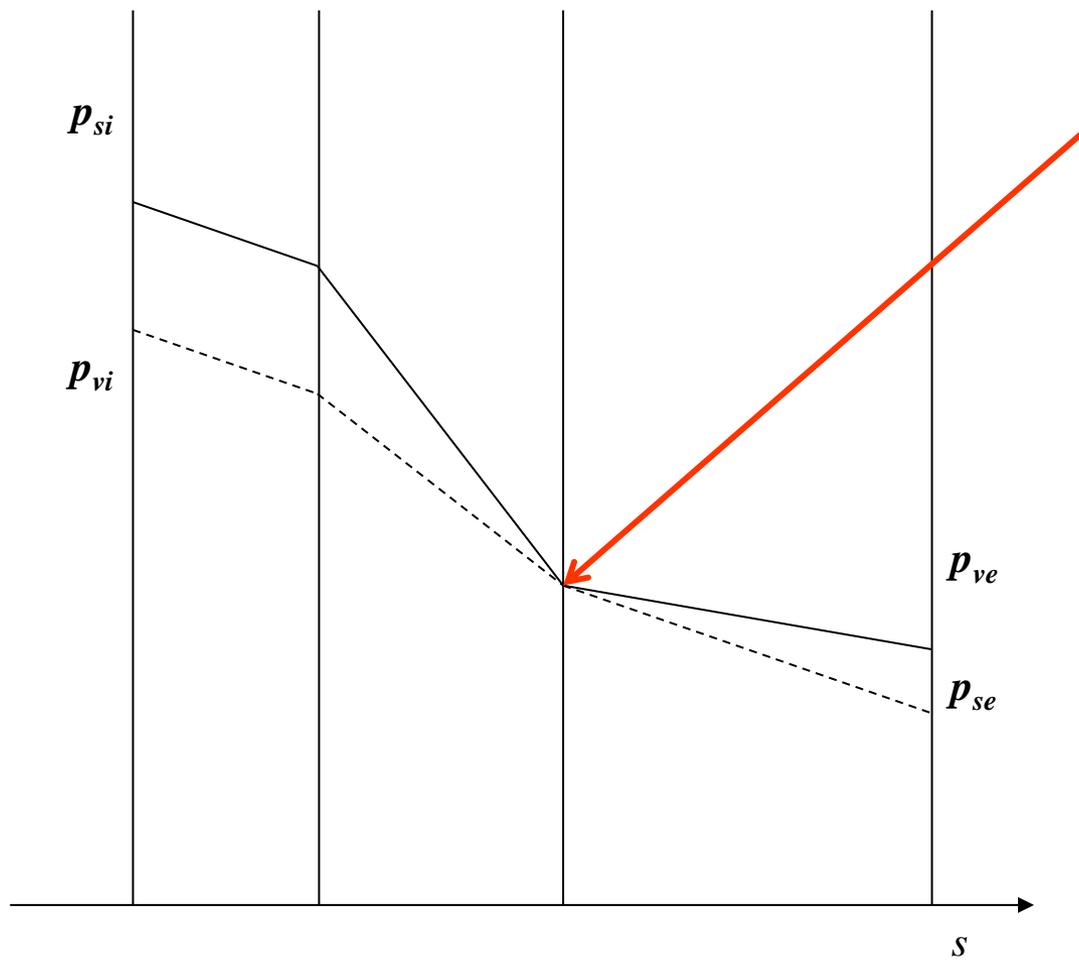
$P_{vi}$  = pressione vapore lato indoor

$P_{se}$  = pressione vapore saturo lato outdoor

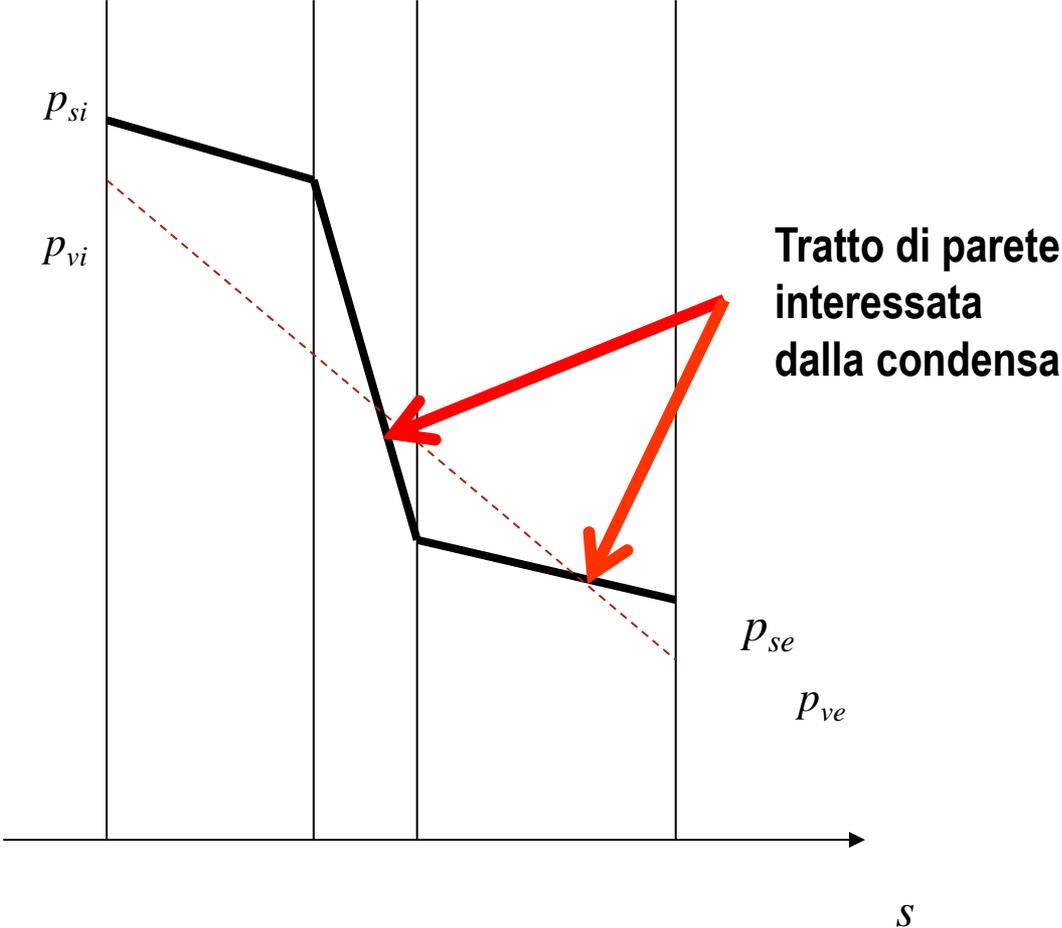
$P_{ve}$  = pressione vapore lato outdoor

$P_{ve}$

# Parete interessata dalla condensazione interstiziale



# Parete interessata dalla condensazione interstiziale



## **EFFETTI NEGATIVI dei PONTI TERMICI ED UMIDITÀ DELLE MURATURE E/O DELL'AMBIENTE EDILIZIO):**

- ❖ **Degrado di tipo chimico (ossidazione, idrolisi, idratazione, corrosione);**
- ❖ **Degrado di tipo fisico (meccanico, dilatazione termica, gelo, cristallizzazione dei sali);**
- ❖ **Degrado di tipo biologico (muffe, microorganismi, ecc. dovuta a contemporanea presenza di alta UR e bassa temperatura);**
- ❖ **Decadimento del benessere termo-igrometrico/comfort abitativo: dovuto al gradiente di temperatura tra superficie e aria (quando  $\Delta T > 3$  °C rispetto alla temperatura dell'aria si avverte una sensazione di disagio in prossimità di tale superficie);**
- ❖ **Migrazione (Termoforesi) di particelle dal mezzo gassoso o liquido, alla superficie quando questa sia più fredda dell'aria. Le particelle di dimensioni comprese tra 0,1 e 1  $\mu\text{m}$  possono perciò depositarsi sulla superficie a causa del gradiente di temperatura esistente.**

**Le problematiche dell'involucro edilizio si manifestano sia dal punto di vista**

- **visivo (macchie, muffe sulla parete ecc.);**
- **che da quello delle sensazioni termiche relative alla temperatura, sensazione di caldo o freddo.**

## UMIDITA' DOVUTA A PRESENZA PERSONE ED ATTIVITA' (esempi)

- ❑ una persona può immettere con la sola sudorazione anche 500gr/h di acqua in condizioni di attività (es. palestra);
- ❑ una pentola per una cucina di tipo domestico (di capacità circa 8 litri) può perdere circa il 30% del liquido contenuto per ogni ora di ebollizione.
- ❖ L'umidità relativa (UR) di una stanza (di dimensioni  $\sim 200 \text{ m}^3$ , con  $T_a \sim 20 \text{ °C}$  e UR 50%), con la presenza di 10 persone che svolgono una attività leggera per 2 ore, può passare al valore UR 100%
- ❖ analogamente una pentola in ebollizione per circa 45 minuti

**Ciò ovviamente in assenza di ricambi d'aria.**

| Attività                 | Vapore acqueo prodotto (g/h) |
|--------------------------|------------------------------|
| Sonno – attività leggera | 30-60                        |
| Asciugatura del bucato   | 50-200                       |
| Cucina                   | 600-1500                     |
| Doccia                   | 2600                         |

## TEMPERATURA IN AMBIENTE INDOOR

Temperature dei diversi elementi (es. superfici solide, aria immessa, ecc.) presenti nell'indoor possono essere differenti da quella dell'aria anche di *diverse decine di gradi*.

**Le temperature delle superfici presenti in ambienti indoor sono in generale influenzate dai seguenti fattori:**

- irraggiamento solare diretto;
  - **trasmissione di calore generato o trasportato all'interno di apparati, di dispositivi o di macchine comprese le apparecchiature a superfici calde per il riscaldamento;**
  - **presenza di ponti termici.**
- ❖ L'irraggiamento solare ha l'effetto di trasmettere calore all'ambiente interno attraverso le pareti sia opache che trasparenti.
- ❖ Nel caso di superfici trasparenti l'influenza dell'irraggiamento comporta il riscaldamento sia dell'aria che delle superfici interne irradiate. Generalmente l'energia termica che riscalda direttamente l'aria è circa il 10% del totale.

- ❖ La temperatura della superficie sarà tanto più elevata quanto minore sarà il calore specifico e l'energia raggiante riflessa. L'elemento irradiato scambierà energia con l'ambiente insieme alle altre superfici.

I valori di temperature che le superfici, soggette all'irraggiamento solare diretto, possono raggiungere derivano dalla equazione :

$$T_s - T_a = P \times R_{th}$$

$T_s$  = temperatura della superficie esposta all'irraggiamento solare;

$T_a$  = temperatura aria;

$P$  = potenza assorbita (potenza trasmessa dal sole x coefficiente di assorbimento della superficie);

$R_{th}$  = resistenza termica del materiale della superficie.

con tale formula, ed i valori " **tipici** " di potenza irradiata dal sole alle nostre latitudini, si possono raggiungere facilmente temperature di superfici  $T_s$  di **60 °C e, meno usualmente, perfino 80°C ed oltre.**

**Illuminazione e apparecchiature sono sorgenti indoor di calore e contribuiscono alla variazione di  $T_s$ ,  $T_a$  ecc..**

- la norma UNI EN13790 del 2008 stima **tra 20 e 200 W** per persona i valori degli apporti calorici da apparati presenti in ufficio.

## **Variazione Temperatura dovuta ad attività**

**Il dispendio energetico (attività svolta) e relativo numero degli occupanti può far variare la temperatura dell'aria ( $T_a$ ) anche di **10 °C**.**

## Apporto energetico all'ambiente confinato derivante da attività metaboliche di una persona

| Attività                    | Metabolismo energetico medio [ W ] | Esempi  |
|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Riposo                      | 115                                | Riposo, seduto a proprio agio ecc..                                     |
| Basso carico metabolico     | 180                                | Bar, ristoranti, ecc..  |
| Medio carico metabolico     | 295                                | Laboratori didattici, sale giochi, ecc.                                 |
| Alto carico metabolico      | 415                                | Discoteche ecc.   |
| Altissimo carico metabolico | 520                                | Palestre per atleti professionisti con attrezzature tipo spinning, ecc. |

Dalla tabella si deduce ad es.

l'attività a medio carico metabolico che sviluppa **295 W** è sufficiente a mantenere alla temperatura ( $T_a$ ) di **circa 20 °C** un locale di **circa 9 m<sup>3</sup>** di caratteristiche costruttive tipiche delle nostre latitudini.

# Aerazione/moto dell'aria in ambienti *indoor*

può avvenire in modo:

- ❑ **naturale** - per **differenze di pressione** tra la pressione statica e la pressione del vento, e/o **differenze di temperatura**;
- ❑ **artificiale** - realizzata tramite ventilatori od altri dispositivi meccanici di sola immissione/estrazione o con sistemi di ricircolo aria previo trattamento

La ventilazione/ricambio dell'aria, dovrebbe consentire la rimozione e/o diluizione degli inquinanti e dell'umidità generati nell' indoor e qualitativamente/ quantitativamente tale da non immettere contaminanti indoor.

❖ **aria esterna immessa con sistemi meccanici** agisce in modo “controllato”

●●●● **aria esterna per infiltrazione**, da perdite attraverso porte finestre fessure nei muri ed altro, ha comportamenti casuali:

- è determinata da una differenza di pressione tra interno ed esterno;
- la quantità di aria infiltrata dipende dalla dimensione delle aperture, dalla tortuosità dei cammini, dalle crepe o dalle discontinuità delle chiusure perimetrali.

# Aerazione naturale

Il movimento dell'aria in un determinato ambiente è generato:

- **gradiente di pressione**
- **o gradiente temperatura**

dipende

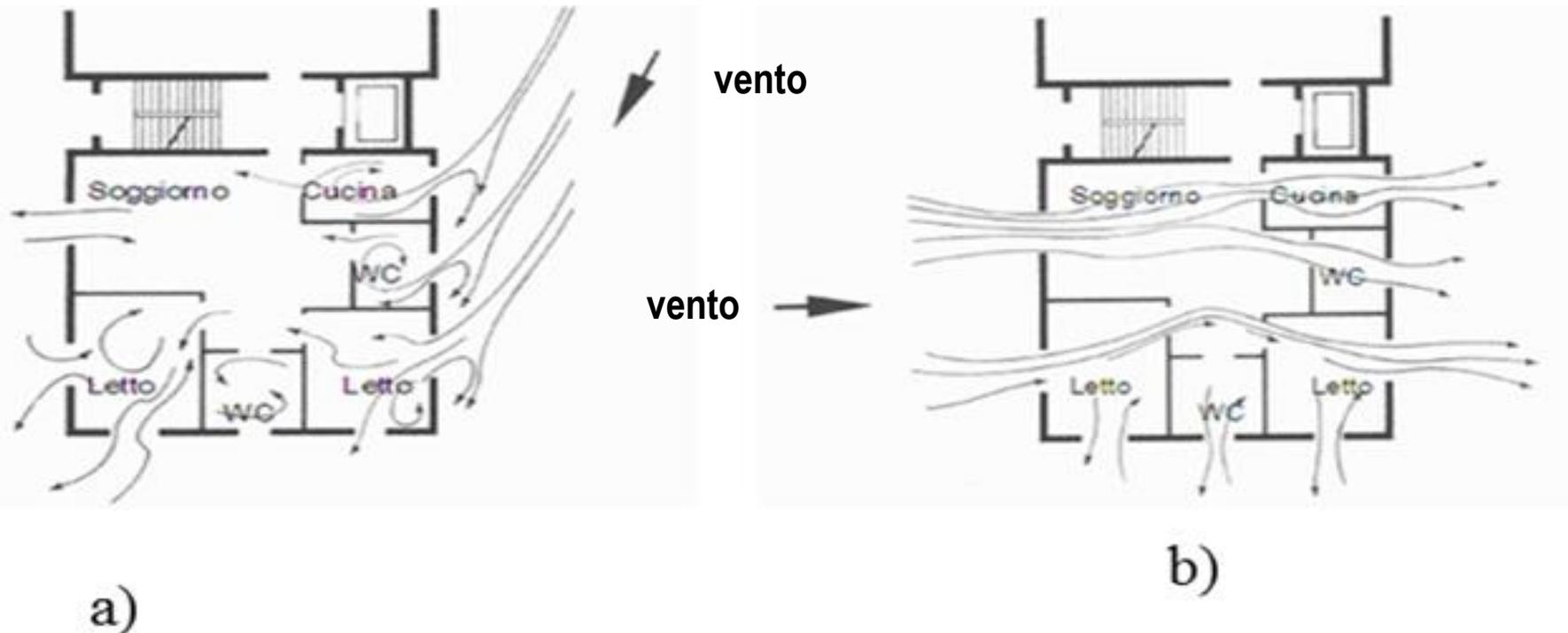
- **dalla distribuzione degli spazi, tipologia e posizione delle aperture verso l'esterno;**

**Aperture esterne poste a quote diverse** influenzano il movimento d'aria verticale generato dal gradiente temperatura.

**L'entità/efficacia dell'aerazione dipende dalla direzione del vento.**

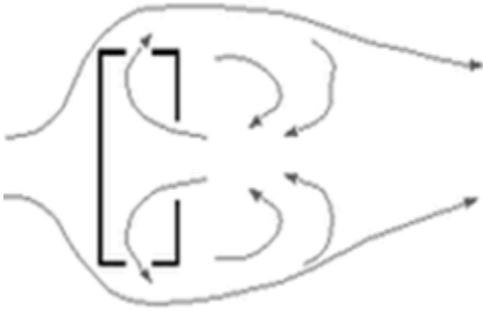
## Nella distribuzione orizzontale si deve considerare il gradiente di pressione $\Delta p$

- L'aria tende a circolare **dal lato sopravvento verso il lato sottovento ( $\Delta p$ )**; ovvero dal lato pressione maggiore verso il lato a minor pressione.
- **L'efficacia** dell'aerazione dipende, principalmente, dall'angolo d'incidenza del vento rispetto alla parete su cui è posizionata l'apertura di ingresso dell'aria.

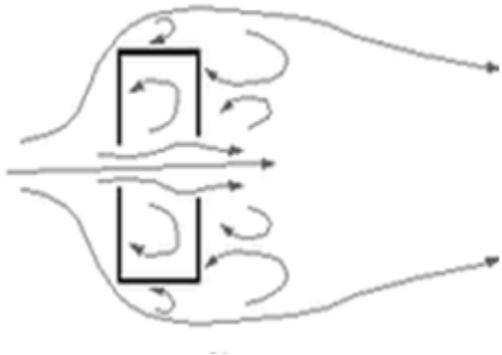


Flussi d'aria per ventilazione naturale in un appartamento: a) distribuzione orizzontale dell'aria con direzione del vento inclinata rispetto alle pareti perimetrali ed aperture sopravvento; b) distribuzione orizzontale dell'aria con direzione del vento perpendicolare alle pareti perimetrali-

# Aperture posizionate orizzontalmente alla stessa quota



Aperture poste unicamente sui lati sottovento determinano una condizione di **minore efficacia dell'aerazione**



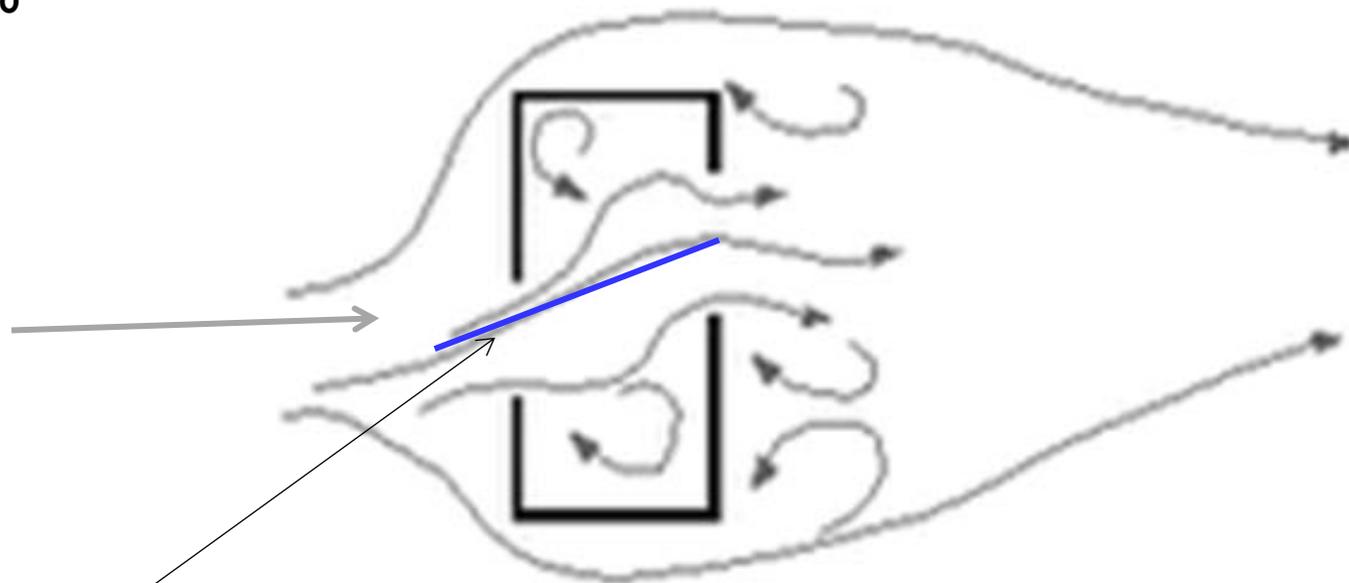
Apertura posta su lato sopravvento (**maggiore efficacia dell'aerazione**)

## Caso di vento con direzione perpendicolare alle pareti edificio ed obliqua rispetto alla congiungente le aperture

si avrà una ulteriore efficacia dell'aerazione dovuta al rimescolamento dell'aria (con conseguente maggior influenza dell'outdoor sull'indoor) se la congiungente le aperture, posizionate su pareti contrapposte, è obliqua a rispetto alla direzione del vento

Apertura  
sopravento

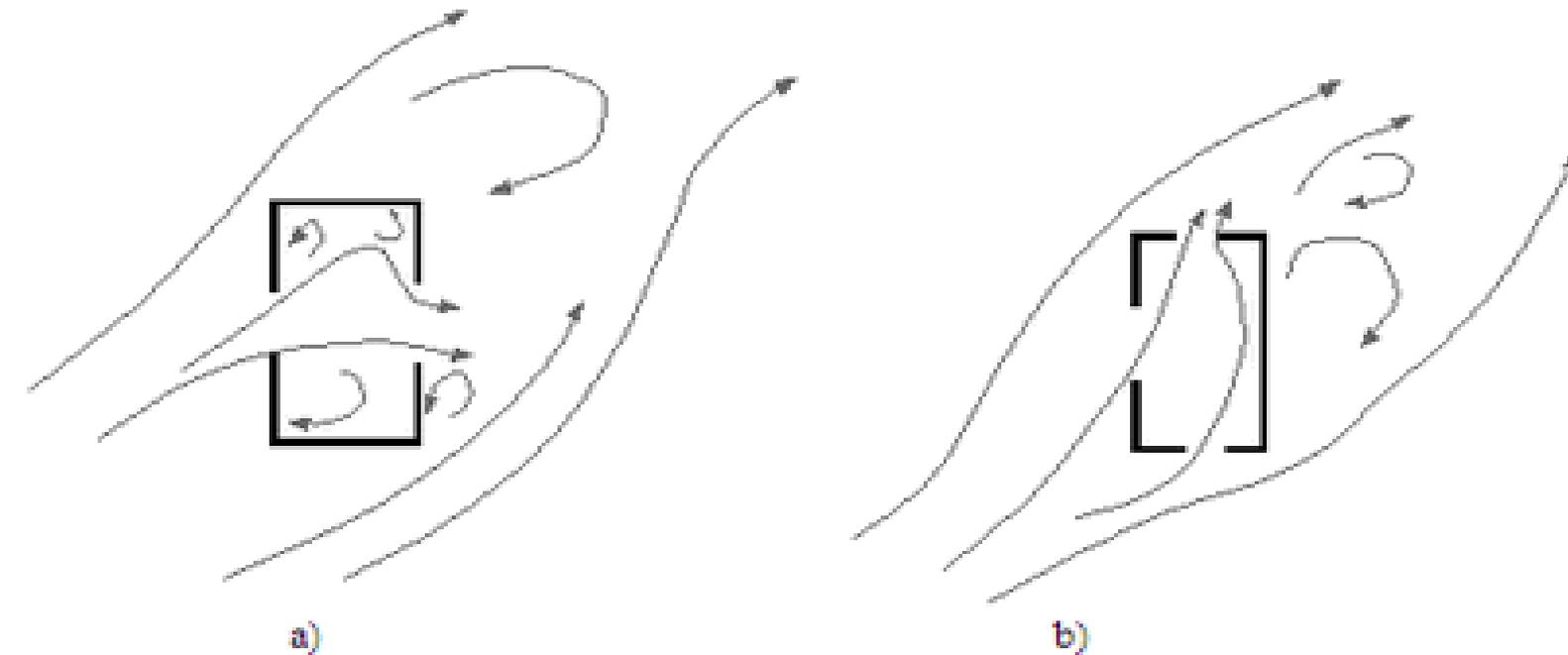
Vento



congiungente le aperture

# Caso direzione obliqua del vento rispetto alle facciate dell'edificio (angolo di incidenza $< 45$ )

genera una ventilazione più efficace di quella prodotta dal vento perpendicolare, sia con aperture contrapposte (a), sia con aperture poste su tre pareti contigue (b).



**Maggiore efficacia**

## **Nella distribuzione verticale si deve considerare il gradiente termico ( $\Delta T$ ).**

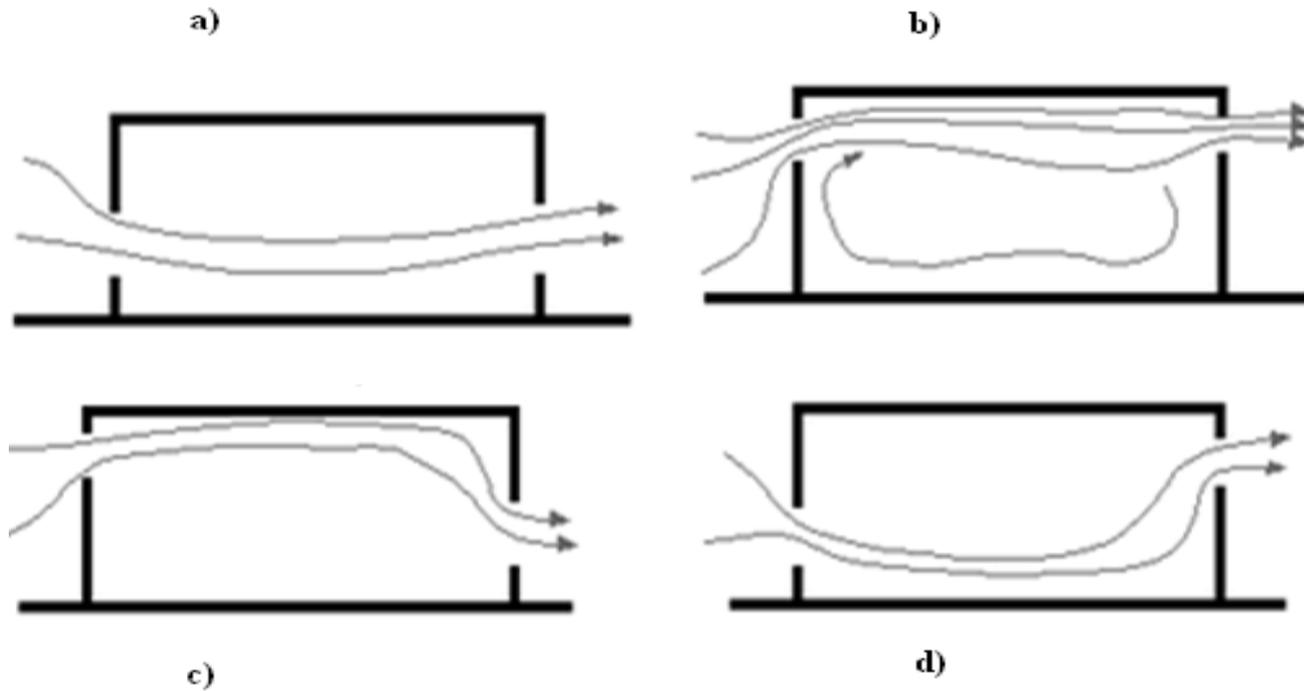
- ambienti con maggior produzione di calore posti in basso tendono ad esaltare l'effetto camino che determina un movimento dal basso verso l'alto in funzione del gradiente di temperatura tra le quote verticali.
- aperture posizionate in basso e sopravento ed aperture posizionate in alto e sottovento determinano lo stesso effetto camino o lo accentuano se già si è in presenza di un gradiente termico.

### **Aperture posizionate verticalmente**

Il posizionamento verticale delle aperture influisce

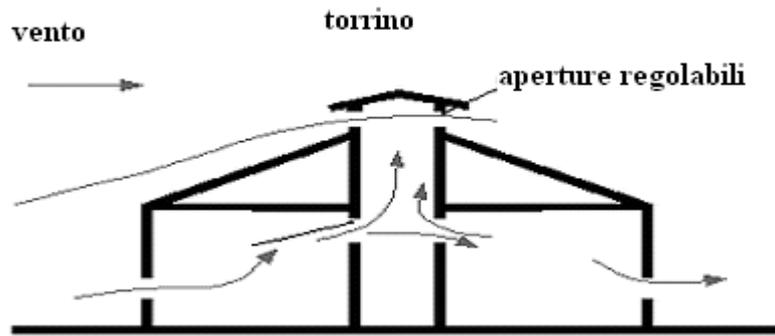
- sulla direzione di flusso dell'aerazione passante, quando esso è generato prevalentemente dal vento;
- ed influisce sulla portata, quando il flusso è innescato da effetto camino.

Nel caso di aerazione passante da vento, la differenza di quota tra le aperture di ingresso e di uscita dell'aria influenza il movimento d'aria e conseguentemente le modalità di rimescolamento.

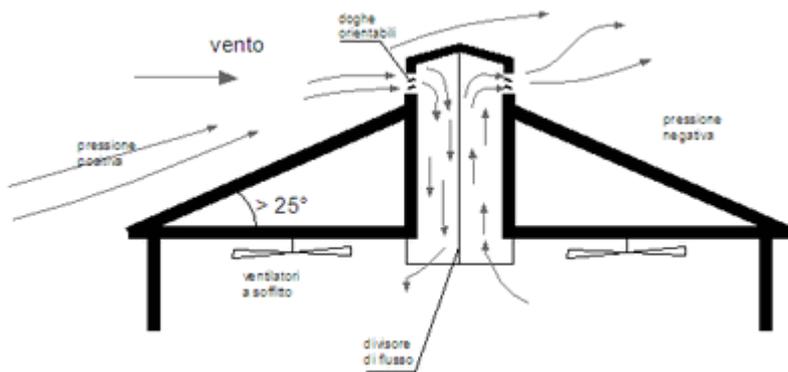


**Flusso d'aria interno ad un ambiente, in funzione della posizione verticale delle aperture, nel caso di aerazione passante (viste in sezione)**

**Azione combinata dei due effetti, direzione vento e camino, si ottiene con le aperture d'uscita a torrino, collocate in corrispondenza del colmo del tetto.**



Schema di aperture a torrino sul tetto e relativi flussi d'aria.



Torrino a doppio flusso per lo sfruttamento combinato vento + effetto camino

## **Le aperture per il passaggio dell'aria possono essere:**

- finestre apribili;
- dispositivi specifici per la ventilazione, quali griglie e bocchette ecc.;
- porte, portoni, ecc.;
- passaggi comunicanti con l'esterno o con altri ambienti interni adiacenti, aperti occasionalmente o in modo stabile o in modo alternato con frequenza più o meno rilevante.

## **Fattori che influenzano i flussi di aerazione naturale :**

- posizione delle aperture;
- area d'apertura;
- tipo e modalità di apertura.

## CORRELAZIONE UMIDITÀ E TEMPERATURA DELL'ARIA INDOOR/OUTDOOR

J. L. Nguyen, J. Schwartz, D. W. Dockery nel lavoro: *“The relationship between indoor and outdoor temperature, apparent temperature, relative humidity, and absolute humidity. Indoor Air. Volume 24, Issue 1, pages 103–112, February 2014)”*,

riportano per le temperature i seguenti risultati:

la relazione tra temperature indoor ed outdoor risulta globalmente non lineare:

- ad alte temperature c'è una forte correlazione tra temperature indoor e outdoor (coefficiente di correlazione Pearson,  $r=0,91$ ,  $\beta=0,41$ );
- a più basse (fredde) temperature la correlazione è debole ( $r=0,40$ ,  $\beta=0,04$ ).

Analoghi risultati anche per la temperatura percepita

## CORRELAZIONI UMIDITA' INDOOR/OUTDOOR

- **Le correlazioni umidità relativa indoor/outdoor ed umidità assoluta indoor/outdoor sono lineari:**
  - **La correlazione per l'umidità relativa è stata modesta ( $r=0,55$ ,  $\beta=0,39$ ).**
  - **L'umidità assoluta ha una correlazione più forte tuttavia a temperature esterne più calde.**
- **L'umidità relativa outdoor è un indicatore debole dell'umidità relativa indoor.**
- **L'umidità assoluta indoor ha una forte correlazione con quella outdoor nel corso dell'intero anno.**

Tuttavia, tali risultati sono relativi alla temperatura media aria indoor, alla temperatura percepita, all'umidità relativa ed all'umidità assoluta misurate in 16 abitazioni in Greater Boston per il periodo di un anno e comparate con le misurazioni eseguite all'aeroporto Boston Logan.

❖ Da altro studio [] emerge che ci sia una associazione tra salute e condizioni meteorologiche dell'ambiente esterno.

# Influenza della velocità/movimenti dell'aria sui contaminanti indoor

- ❖ La ventilazione ha effetti diretti in termini di rimozione/diluizione dei contaminanti in aria, ma anche effetti sull'umidità e sulla temperatura che a loro volta influiscono sulla concentrazione inquinanti.
- ❖ Velocità dell'aria, localizzata o generale, causa il sollevamento/distacco di materiale solido composto sia da agenti chimici che biologici, da eventuali superfici su cui aderiscono. **Correnti d'aria eccessive possono pertanto influenzare il rilascio di inquinanti da superfici.**

- **La distribuzione dell'aria nei diversi spazi ed ambienti, la tipologia di flusso (laminare, turbolento ecc.) le variazioni delle velocità nel tempo anche in corrispondenza delle superfici presenti, hanno influenze molto significative sulla distribuzione degli inquinanti sia di origine chimica sia di natura biologica.**

## **FLUSSI LAMINARI sembrano essere più efficaci**

**Effetti del movimento dell'aria sulle superfici dei materiali sorgenti di COV** (Ying Zhang, Fariborz Haghighat. 1997. The impact of surface air movement on material emissions. Building and Environment Volume 32, Issue 6: 551–556)

Si è riscontrato che la velocità di emissione dei COV è funzione delle condizioni di flusso superficiale dell'aria:

- ❖ **all'aumento della velocità dell'aria i contaminanti provenienti dai materiali si esauriscono più rapidamente;**
- ❖ **flussi turbolenti hanno un effetto minore sulla velocità di emissione.**

**DEPOSIZIONE DEL PARTICOLATO IN FUNZIONE DI :**

- **condizioni di flusso nelle vicinanze della superficie di deposizione (velocità di attrito),**
- **superficie di rugosità;**
- **concentrazione del particolato stesso;**

➤ **Per particolato di dimensione  $< 0,1 \mu\text{m}$  ( ), maggiori velocità di attrito alla superficie e maggiore superficie di rugosità **possono comportare una maggiore velocità di deposizione del particolato;****

➤ **Per particolato di dimensione maggiore (intervallo  $1-5 \mu\text{m}$ ), l'influenza della velocità di attrito e della rugosità potrebbe essere trascurata**

## **RISULTATI DI ALCUNI STUDI SULLA DEPOSIZIONE DEL PARTICOLATO NELL' INDOOR EMERGE CHE:**

1. la deposizione dipende fortemente dalla dimensione particolato raggiungendo un minimo per particelle  $0,1-0,3\mu\text{m}$  (Lai, 2002);
2. l'andamento della velocità di deposizione come funzione del diametro particolato risulta essere lo stesso in tutti gli studi effettuati, tuttavia c'è una significativa differenza anche di un ordine e più di grandezza tra i valori di velocità riportati nei singoli studi;
3. Mentre entrambi approcci sperimentali e teorici mostrano andamenti simili di deposizione, le stime del modello sono spesso significativamente differenti da quelli derivanti da risultati sperimentali specialmente per particelle al di sotto di  $0,5\mu\text{m}$  (Morawska and Salthammer,2003).

Vedere anche [**Congrong He , Lidia Morawska , Dale Gilbert. Particle deposition rates in residential houses. Atmospheric Environment 39 (2005) 3891–3899**].

# DEPOSIZIONE INQUINANTI INDOOR SULLE SUPERFICI

dipende da

- **Regime turbolento o laminare dell'aria,  $V_a$**
- **Temperatura aria,**
- **Temperatura superficie ,**
- **Umidità relativa interna,**
- **Presenza di condensa sulla superficie**

**Gli inquinanti sotto forma di gas o aerosols, a seconda delle dimensioni, raggiungono una superficie e si depositano su di essa attraverso vari meccanismi:**

**per effetto della diffusione molecolare browniana (fenomeni di turbolenza),**

**termoforesi**, [Il fenomeno consiste nella migrazione di particelle, da un mezzo gassoso o liquido, indotta da un gradiente di temperatura. Quando la superficie è più fredda dell'aria, le particelle di dimensioni comprese tra 0,1 e 1  $\mu\text{m}$  possono depositarsi sulla superficie a causa del gradiente di temperatura esistente ( caso Ponti termici: la non uniformità della temperatura superficiale grazie alla termoforesi causa l'accumularsi della polvere nelle zone più fredde

**flusso idrodinamico di Stefan-** fortemente legato a fattori quali le caratteristiche della superficie:

❖ rugosità, dimensioni, ecc.

[quando su una superficie si deposita della condensa, in prossimità della superficie stessa si crea un flusso idrodinamico il quale aumenta la deposizione dei vari inquinanti. **Al contrario, nel caso in cui si verifichi l'evaporazione dell'acqua dalla superficie si forma un flusso idrodinamico che tenderà ad allontanare gli aerosols dalla superficie**

**per gravità**

❖ **Diffusione molecolare browniana e fenomeni di turbolenza** : Le particelle di dimensioni  $<0,1 \mu\text{m}$  presenti nell'aria sono caratterizzate da un movimento casuale ed irregolare di **tipo browniano** causa di questo movimento le particelle si urtano tra loro o colpiscono le superfici dalle quali possono essere catturate.

**Il trasporto e la deposizione delle particelle sono influenzati dalla turbolenza dell'aria, delle condizioni di umidità e dalla rugosità della superficie**

## Deposizione per gravità

Questo fenomeno interessa soprattutto le **superfici orizzontali e** si verifica in condizioni di **aria calma**, quando **la velocità di sedimentazione e raggio della particella sono proporzionali** tra loro .

La sedimentazione gravitazionale ha un effetto significativo sulla deposizione di particelle grossolane (dimensioni  $>2 \mu\text{m}$ ) mentre il moto browniano domina la deposizione di particelle molto fini ( $<0,1 \mu\text{m}$ ).

All'aumentare della dimensione delle particelle infatti aumenta di conseguenza la distribuzione delle stesse sulla superficie in seguito a velocità di deposizione maggiori.

# Influenza dell'umidità sugli inquinanti

# Influenza dell'umidità sugli inquinanti

- ❖ formazione e proliferazione di muffe ed altri agenti biologici:
  - in aria;
  - sulle superfici ed all'interno dei materiali presenti (rappresentati da arredi ,suppellettili e dagli elementi costituenti gli edifici, gli impianti ecc.
- ❖ Con efficienze e meccanismi diversi da caso a caso, l'acqua aerodispersa o condensata sostituisce, in alcuni substrati adsorbenti o assorbenti, le sostanze già presenti nei materiali favorendone la miscelazione con l'aria indoor. In altri casi reagisce con le sostanze adsorbite, assorbite o costituenti i materiali sia dando luogo a substrati che favoriscono la crescita di agenti biologici sia costituendo o promuovendo la formazione di ulteriori composti chimici che possono disperdersi sotto forma di gas, vapori o polveri.
- ❖ Il fenomeno dell'idrolisi risulta più o meno favorito in funzione dell'umidità presente o della condensa sulle superfici orizzontali e verticali.

- ❖ le reazioni chimiche tra le varie sostanze presenti, lo stato di aggregazione (granulometria) di particelle solide, la formazione e la dimensione degli aerosol secondari ( e perciò la relativa deposizione) .
- ❖ Nel caso dei materiali, le sostanze chimiche precedentemente assorbite o adsorbite possono essere sostituite .

Numerose pubblicazioni segnalano che la presenza di agenti biologici genera a sua volta una cospicua quantità di composti chimici che si aggiunge a quelli già presenti nell'indoor; le emissioni sono la conseguenza della competizione, all'adsorbimento nei materiali presenti, tra l'umidità e gli agenti chimici. Inoltre diverse specie fungine producono metaboliti volatili ( composti chimici industriali).

**Basse** (Litvak et al., 2000) ed **alte** (Miguel et al., 2004; Fromme et al., 2007) umidità relative sembrano entrambe far aumentare la deposizione del particolato fine (**studio epidemiologico sulla irritazione occhi**).

**La formaldeide proveniente da materiali a base di legno, ad una data temperatura è proporzionale all'umidità relativa (VanNetten et al., 1989). la concentrazione di formaldeide cresce con l'umidità relativa.** Tuttavia si è anche concluso che il tasso di ricambio d'aria influenza la concentrazione indoor in modo molto maggiore (Salthammer et al., 1995);

## CONCLUSIONI

determinati valori e/o combinazioni di valori di  $T_a$ ,  $T_s$ ,  $T_{rm}$ , UR,  $V_a$ , Ricambi d'aria :

- causano la **indoor chemistry**: contaminanti da individuate sorgenti indoor/outdoor possono reagire l'uno con l'altro o tra di loro dando luogo a prodotti (di reazione) altrimenti assenti in quanto non generati direttamente dalle sorgenti indoor/outdoor presenti nell'ambiente di indagine.
- influenzano le concentrazioni degli inquinanti, le velocità di emissioni provenienti dalle individuate sorgenti indoor in quanto possono favorire determinate reazioni (es. in fase gas, idrolisi, ecc;
- possono dar luogo a nuove sorgenti indoor (es. parete con umidità: muffa ; superfici di materiali (costruzione, arredi ad elevate  $T_s$  possono originare nuove sorgenti di inquinanti) non previste al momento dell'inizio indagine;
- possono favorire la migrazione degli inquinanti, dalle superfici su cui aderiscono, verso l'aria e viceversa (vedasi aerosol, particolato)

## per i campionamenti è fondamentale tener conto:

1. omogeneità/stazionarietà dei parametri microclimatici;
2. che Il microclima indoor è generato da una serie di fattori quali:
  - clima outdoor con le sue variazioni (temperatura, umidità, irraggiamento solare, vento, ecc.) di breve, medio e lungo termine;
  - le caratteristiche dell'ambiente esterno in grado di influenzare le interazioni dirette tra parametri microclimatici e climatici (barriere al vento, effetti canyon, ombreggiamenti, specchi d'acque superficiali, ecc.);
  - caratteristiche tecnologiche e costruttive dell' ambiente in esame (architettura, materiali e prodotti impiegati, impianti di controllo del microclima, ecc.);
  - uso degli ambienti: attività e presenza

che incidono sui valori e variabilità dei parametri microclimatici

## Il microclima indoor è determinato inoltre:

- **dagli scambi termici e di acqua che avvengono con l'esterno;**
- **scambi termici e di acqua tra l'ambiente interno e gli elementi ivi presenti.**