



POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di ingegneria Edile-Architettura

Corso di laurea magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

La ventilazione naturale in edifici industriali

Confronto tra la normativa UNI 15242 e l'applicazione Trnflow del software Trnsys secondo un campione di edifici industriali situati nella regione lombarda.

Relatore: Prof. Ing. Luca Pietro GATTONI

Tesi di laurea di

Alessandro BORELLO Matr. 736538

Anno Accademico 2009-2010

Indice degli argomenti

Abstract	pag. 3
Introduzione	4
Abbreviazioni e acronimi	5
1. Fenomeno fisico della ventilazione naturale	6
2 .La normativa vigente.	14
3. La norma UNI EN 15242	17
4. Analisi del campione	22
5. Parametri e intervallo di simulazione	30
6. Simulazioni	32
7. Conclusioni	63
Bibliografia	64
Allegati:	
A1. Caratteristiche degli edifici in analisi	65
A2. Modello analitico proposto dalla EN UNI 14242	73

Abstract

This degree thesis proposes a comparison between two calculation methods which bring to the determination of the flow rate in building including infiltration. These two calculation methods can be found in normative UNI EN 15242 and in the application Trnflow, part of Trnsys software. The most important peculiarity of this work is the natural ventilation study, that is the shift of air mass through the envelope building by physical or natural phenomenon.

The object of this degree thesis is to aid the department “B.E.S.T.” (Building Environment Science and Technology) of Politecnico di Milano in university researches. The aim of my degree thesis is also to find a method for commercial buildings calculation of energy requirement. It’s important for the department B.E.S.T. to understand in which circumstances could be made mistakes knowing the potentiality of Trnsys software.

By my degree thesis will be shown eight of these commercial buildings, starting from the wind analysis to the window area and the heating system. By this way I have calculated for each of them the UNI EN 15242 and the Trnflow variables. These ones have been important for the process which had lead to the comparison of the two models.

Introduzione

Il lavoro di tesi presentato in questo elaborato si inserisce nell'analisi dei flussi di aria all'interno degli edifici, punto di partenza per un corretto studio del fabbisogno energetico degli stessi. Gli obiettivi principali sono due: l'analisi critica della procedura di calcolo espressa dalla normativa UNI EN 15242 ed il confronto tra questa e la procedura utilizzata dall'applicazione TrnFlow all'interno del software Trnsys. La caratteristica fondamentale di questo lavoro è lo studio della ventilazione naturale, cioè quello spostamento di massa di aria attraverso l'involucro edilizio per mezzo di fenomeni naturali o meccanici.

L'analisi della normativa denominata "Ventilazione degli edifici. Metodi di calcolo per la determinazione delle portate negli edifici, comprese le infrazioni" è avvenuta in seguito all'approfondimento dello studio del fenomeno della ventilazione naturale attraverso diverse pubblicazioni. Inoltre per una completa visione del fenomeno sono state analizzate anche altre quattro normative collegate direttamente a quella sopra descritta: UNI EN 15241, UNI EN 13829, UNI EN 13779, UNI EN 13465. Infine per una corretta presentazione dei risultati sono state ricercate ulteriori pubblicazioni scientifiche che trattassero l'argomento attraverso la presentazione di risultati di sperimentazioni o test.

Lo scopo di questo lavoro è di fornire soluzioni di calcolo nella ricerca del dipartimento B.E.S.T. del Politecnico di Milano riguardo l'analisi del fabbisogno di alcuni edifici industriali presenti sul territorio lombardo. E' importante per il dipartimento capire quali sono le circostanze che potrebbero causare degli errori di valutazione analizzando il fenomeno con le potenzialità del software Trnsys.

Con la mia tesi presenterò 8 di questi edifici attraverso l'analisi del vento, dell'area finestrata, del tipo di sistema di riscaldamento e altri ancora; in questo modo ho potuto calcolare per ciascuno le variabili che entrano in gioco all'interno delle due procedure UNI EN 15242 e Trnflow. Queste variabili sono servite per le simulazioni che hanno portato al confronto dei due modelli.

Abbreviazioni ed acronimi

Simbolo	descrizione	u.m.	Pedice	riferimento
A	area	m ²	w	apertura
V	volume	m ³	αw	angolo di apertura
C	coefficiente generico	-	inv	involucro
Cp	coefficiente di pressione	-	comp	componente
q	portata	m ³ /h	leak	fessura
z0	rugosità terreno	-	vent	presa d'aria
θ	temperatura	°C	airing	grandi aperture
T	temperatura	K	v	ventilazione
P	pressione	Pa	f	finestrata
dP	differenza di pressione	Pa	met	stazione meteo
ρ	densità	kg/m ³	site	luogo dell'edificio
C _D	discharge coefficient	-	H	altezza oggetto
v	velocità vento	m/s	h	altezza dal suolo
n	esponente del moto d'aria	-	st	stack – eff. temperatura
n ₅₀	tasso di ricambio a 50Pa	1/h	wind	vento
μ	viscosità dell'aria		sw	stack + wind
L	lunghezza della fessura	m	air	aria
b	spessore della fessura	m	e	esterno
k	coefficiente di flusso		i	interno
α	coefficiente flusso laminare		4Pa	riferito a test con dP uguale a 4Pa
β	coefficiente flusso turbolento		50Pa	riferito a test con dP uguale a 50Pa
a	coefficiente di stack		ref	riferimento, condizioni standard
b	coefficiente di vento		t	turbolenze
ACH	air change per hour	ach ⁻¹	supply	impianto di aerazione
c	concentrazione gas tracciante		extr	impianto di estrazione
G	flusso gas tracciante		comb	aspirazione gas combusti

1. Il fenomeno fisico che governa la ventilazione naturale

1.1 Premessa

Il seguente paragrafo vuole presentare quali sono le conoscenze principali riguardo i fenomeni fisici disciplinati dalle cinque normative analizzate riguardo l'infiltrazione d'aria in edifici commerciali. Per fare ciò mi sono basato sul testo di Awbi (1), uno tra i più esaustivi in materia. Inizialmente si studiano le caratteristiche delle dispersioni d'aria attraverso gli edifici a seconda delle aperture e delle forzanti di pressione (vento, temperatura, meccanica). Successivamente vengono presentati alcuni modelli di calcolo suddivisi nelle due categorie: empirici e di rete. Infine sono riportati alcuni cenni sulle misurazioni da effettuare per ricavare alcuni dati del problema.

1.2 Caratteristiche delle dispersioni d'aria attraverso gli edifici

Flusso d'aria attraverso aperture.

In generale l'aria passante in un involucro edilizio dipende da: geometria delle aperture, caratteristiche del flusso e differenza di pressione tra l'ambiente interno e quello esterno. Calcolare il flusso d'aria attraverso aperture è davvero complesso, una stima può essere fatta partendo dal tipo di apertura. Sono previste equazioni per moti turbolenti, laminari o transitori. Nel caso di grandi aperture si considera un moto turbolento sotto l'azione della differenza di pressione, l'equazione di riferimento è la seguente:

$$q = C_d A \sqrt{2 \Delta p / \rho_0}$$

Vengono considerate grandi aperture quelle che superano le dimensioni di 10mm.

Per piccole aperture (fessure) il moto è essenzialmente laminare o viscoso. In questi casi il flusso è governato dalla formula di Couette:

$$q = \left[\frac{b h^3}{12 \mu L} \right] \Delta p$$

Per fessure più grandi il flusso non è propriamente laminare e nemmeno turbolento, viene considerato in uno stato transitorio. L'equazione è la seguente:

$$q = k L (\Delta p)^n$$

dove k dipende dalla geometria della fessura e n dal regime del flusso.

Il ragionamento fino a qui descritto può essere riassunto in un'equazione unica dimensionalmente omogenea: la forma quadratica.

$$\Delta p = \alpha Q + \beta Q^2$$

Differenza di pressione

La differenza di pressione attraverso un'apertura è la forzante che consente il movimento dell'aria. Questa è prodotta dall'azione del vento o dalla differenza di temperatura (pressione di stack) e dall'eventuale presenza di sistemi meccanici di ventilazione.

La pressione data dal vento è ricavabile dalla seguente equazione:

$$p_w = 0.5 c_p \rho_0 v^2$$

.Come vedremo più avanti nella trattazione i valori di C_p sono determinati dalla geometria dell'edificio, velocità del vento relativa all'edificio, esposizione della facciata e caratteristiche del terreno circostante.

La pressione dovuta alla stratigrafia dell'aria è una componente aggiuntiva che controlla il passaggio dell'aria attraverso l'involucro. La variazione di densità dovuta alla temperatura produce gradienti di pressioni interno, esterno ed attraverso l'edificio. Quando la temperatura interna è maggiore di quella esterna l'aria "fresca" esterna entra nell'edificio attraverso le aperture poste nella parte bassa di esso e l'aria calda esce dalle aperture poste nella parte alta. Il procedimento inverso avviene quando l'aria interna è più bassa di quella esterna.

La pressione è data dalla relazione: $p_s = p_0 - \rho g h$

Alla quota del piano neutro la pressione interna e quella esterna sono uguali. Per determinate condizioni il piano neutrale interseca una o più aperture causando in esse la contemporaneità di ingresso e uscita di aria.

Infiltrazione meccanica

La presenza di uno o più sistemi di ventilazione meccanici nell'edificio possono causarne una forzante di pressione interno – esterno e quindi interessare i fenomeni di ventilazione naturale. Il sistema può essere in pressione, in depressione o bilanciato. La depressione si raggiunge quando il ventilatore estrae aria dall'ambiente, come nel caso delle cappe delle cucine e delle aspirazioni dei bagni. La conseguenza è l'infiltrazione di aria dall'esterno verso l'interno. Viceversa l'edificio è in pressione quando il ventilatore immette aria in ambiente, come nel caso della ventilazione ospedaliera. In questo caso la conseguenza è l'exfiltrazione di aria verso l'esterno. Esiste anche un terzo caso, di ventilazione bilanciata. Esistono infatti sistemi che regolano il funzionamento dei ventilatori in ingresso ed in uscita mantenendo internamente la pressione desiderata.

Per un piccolo edificio la differenza di pressione può essere calcolata a partire dalle curve caratteristiche dei ventilatori.

La pressione totale agente sul passaggio di aria attraverso l'involucro è dunque la somma di questi tre effetti: vento, temperatura, impianto meccanico. Il suo valore è approssimato dalla seguente relazione:

$$Q_t = \left[Q_{wind}^{1/n} + Q_{st}^{1/n} + Q_{supply,nb}^{1/n} \right]^n$$

Nel caso ci fosse un sistema di bilanciamento meccanico varrà la seguente relazione:

$$Q_t = Q_{supply,b} + \left[Q_{wind}^{1/n} + Q_{st}^{1/n} \right]^n$$

1.3 Modelli di calcolo

Esistono diversi modelli di calcolo per ricavare il valore di pressione interna. Infatti il calcolo non è così immediato, risponde a combinazioni non lineari calcolabili per iterazioni. Quattro tra i modelli più popolari sono:

- Metodo di semplice linearità
- Metodo quadratico
- Metodo di semplice addizione di pressioni
- AIM-2 (Alberta Infiltration Model)

Per modellare una singola zona è necessario conoscere queste grandezze:

- la velocità del vento e la sua direzione
- la temperatura dell'aria esterna ed interna
- la posizione delle aperture e la caratteristica del flusso passante
- la distribuzione delle pressioni esterne per la direzione del vento considerata.

L'approccio progettuale prevede l'utilizzo di procedure empiriche oppure modelli di rete.

La differenza sostanziale tra i modelli empirici e quelli di rete consiste nel fatto che nel primo troviamo delle formule dirette per calcolare i risultati, invece nel secondo le procedure di calcolo sono più complesse ed è necessario procedere con calcoli iterativi.

Metodi empirici

In questa trattazione vengono presentati due metodi empirici: Ashrae e il British Standard B.S.M.)

Il metodo Ashrae viene presentato per il calcolo delle infiltrazioni, invece il B.S.M. è rivolto ad un calcolo di grandi aperture.

Il primo prevede la combinazione dell'effetto della temperatura e del vento con il modello quadratico visto sopra. La formula principale che governa il calcolo è la seguente:

$$Q = A \sqrt{(a \Delta T + b v_{met}^2)}$$

Nel British Standards Method si assumono due flussi passanti attraverso l'edificio:

- uno dovuto all'effetto combinato dal vento e dalla temperatura osservato per aperture opposte;
- un altro dovuto all'effetto combinato dal vento e dalla temperatura osservato per aperture poste sulla stessa parete.

Successivamente il problema viene approssimato quanto segue:

- l'area totale delle aperture attraversate in parallelo da flussi generati dalla stessa differenza di pressione si può ottenere come somma delle aree;
- L'area totale delle aperture attraversate in serie da flussi generati dalla stessa differenza di pressione si può ottenere come inverso delle aree;
- Per un primo calcolo è possibile considerare soltanto la maggiore tra le differenza di pressione generata per effetto del vento e quella per effetto della temperatura.

Queste tre considerazioni saranno molto importanti come vedremo dei successivi capitoli in occasione degli approcci progettuali.

Modelli di rete (network)

I modelli di rete come già accennato sono modelli più rigorosi dei precedenti e si propongono come risolutori di edifici con singole zone o multi zone. Si precisa che per edificio con zona singola si intende che assume condizioni omogenee in tutto il suo interno, cioè mantiene una pressione e una temperatura uniforme.

Il modello BRE (Building Research Establishment) mette in relazione le infiltrazioni di aria attraverso un involucro effettuando un test di pressurizzazione . Devono essere date le condizioni ambientali interne ed esterne e le caratteristiche dell'edificio.

Questo modello prende in considerazione i dati ottenuti sperimentalmente da test per ricavare i valori caratteristici delle dispersioni. Questo approccio è abbastanza comune e come vedremo più avanti è risultato uno delle problematiche maggiori al lavoro di tesi. Da segnalare come in questo caso vengano considerate uniformi le perdite per ciascuna facciata di edificio presa in esame

Il modello è stato però sviluppato da studiosi britannici applicandolo alle tipiche abitazioni inglesi e lo stesso Awbi (1) afferma che non si ha la certezza che il modello sia applicabile a casi generali. Per questo motivo non mi soffermo sulle formule, quanto all'esistenza del modello stesso. Per approfondimenti si rimanda al capitolo 3 del testo sopra citato.

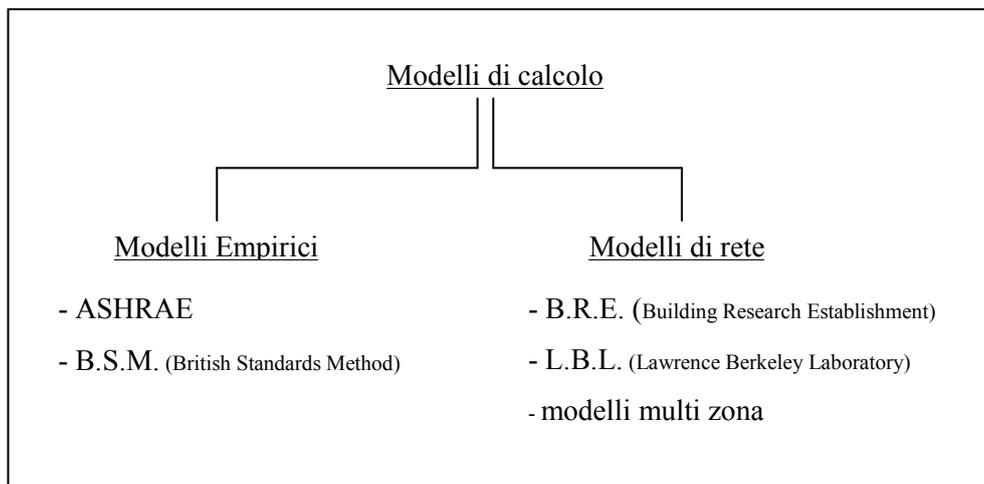
Il modello LBL (Lawrence Berkeley Laboratory model) è stato formulato per un edificio con una singola zona e la sua caratteristica è la semplicità. Ovviamente per questo motivo vengono trascurati molti dettagli dell'involucro edilizio. L'edificio viene approssimato ad una struttura rettangolare dove le infiltrazioni d'aria vengono descritte come grandi aperture. Da notare che le infiltrazioni dovute al vento e quelle dovute alla temperatura vengono calcolate separatamente e poi sommate con il metodo quadratico.

Talvolta questo metodo necessita la conoscenza della distribuzione delle fuoriuscite sulle superfici orizzontali e verticali (finestre, porte, prese d'aria) che normalmente non possono essere valutate con un test di pressurizzazione e questo comporta secondo un errore di valutazione di circa $\pm 25\%$.

I modelli multi zona sono sistemi basati su una griglia di nodi e connessioni tra le singole stanze o zone dell'edificio. Le connessioni che collegano i vari nodi rappresentano le caratteristiche della resistenza che incontra il flusso d'aria, ogni nodo rappresenta invece il valore della pressione per la zona rappresentata.

Siccome il flusso di volume non ha una dipendenza lineare rispetto alla differenza di pressione anche in questo caso è necessario procedere ad un calcolo iterativo.

Questi modelli sono vantaggiosi perché permettono di comprendere il fenomeno della ventilazione più dettagliatamente senza addentrarsi in modelli di fluidodinamica. E' infatti possibile calcolare il tasso di ricambio dovuto alla ventilazione meccanica prodotto da una canalizzazione o da una semplice cappa di aspirazione, siamo anche in grado di effettuare un'analisi dei contaminanti e il trasporto di questi, nonché alla diffusione del fumo in caso di incendio.



Schema ad albero dei modelli sopra citati

1.4 Misurazione delle infiltrazioni

Come si vedrà nei successivi capitoli il contributo delle infiltrazioni è strettamente legato alla misurazione sperimentale ed è facile capire come sia fondamentale utilizzare dati reali o provenienti da edifici molto simili.

Le misurazioni vengono sostanzialmente divise in due categorie: quelle sul componente dell'edificio e quelle sull'ambiente edilizio.

Le prime vengono effettuate in laboratorio con pressioni di test di circa 200 Pa ed il risultato ottenuto è il valore di permeabilità all'aria del singolo componente. Questo valore può essere espresso per unità di area oppure per lunghezza di fessura. Questi test sono apprezzabili per il basso costo che comportano ma non restituiscono il reale valore del prodotto in opera.

Per questo motivo talvolta è necessario ricorrere a test sull'ambiente edilizio realizzato. In genere vengono effettuate prove di pressurizzazione ed eventualmente analisi fluidodinamiche. Un test molto semplice è il Blower Door; viene infatti posizionata un macchinario in prossimità del telaio della porta della stanza con un ventilatore e sistemi di rilevamento. In questi casi si utilizza una differenza di pressione di 25 Pa o più. Talvolta è possibile utilizzare i sistemi di ventilazione meccanica già presenti in molti edifici con opportuni accorgimenti e modifiche al sistema stesso.

Per avere una maggiore accuratezza del risultato è possibile procedere con i test di pressurizzazione dinamica. A differenza dei precedenti la forzante non è più una pressione costante generata da un ventilatore ma una fluttuazione che simula l'effetto del vento. Vengono utilizzate pressioni maggiori di 10 Pa.

I risultati così ottenuti dovranno essere presentati nella forma generale: $Q = k (\Delta p)^n$. Dai dati di test si impone Δp e n e si ricava Q .

Un altro parametro che caratterizza gli ambienti è il ACH (air change per hour) o tasso di ricambio orario. Generalmente si calcola con la seguente $ACH = \frac{q_{50}}{20 \cdot V} [\text{ach}^{-1}]$ ma nel caso di edilizia non domestica è più interessante utilizzare la formula $ACH = \frac{q_{50}}{60 \cdot A_{inv}} [\text{ach}^{-1}]$.

Una misurazione diretta del rapporto di aria passante attraverso l'involucro è ottenibile con monitoraggi sequenziali della concentrazione del livello del gas tracciante. Normalmente viene immesso in ambiente un gas inerte o non reattivo che idealmente ha una densità uniforme in tutto lo spazio confinato. Un buon gas tracciante non deve essere tossico, chimicamente stabile, non assorbibile dai componenti edilizi e presente in basse concentrazioni in atmosfera. Alcuni esempi: N_2O , SF_6 , CO_2 , CH_4 , He.

Il bilancio di massa del gas tracciante è individuato dalla:

$$V \frac{dc}{dt} = G + q (c_e - c)$$

Per mezzo del gas tracciante possono essere utilizzati tre metodi:

- metodo della diminuzione di concentrazione o decadimento
- metodo di iniezione costante
- metodo a concentrazione costante

Nel primo caso viene immessa una quantità nota di gas all'interno del locale e dopo un tempo stabilito viene analizzata la concentrazione interna con spettrografia o gas cromatografia. In

questo caso vale la legge :

$$\int_{c_0}^c \frac{dc}{c} = -\frac{q}{V} \int_0^t dt$$

Nel secondo si procede con un'iniezione costante nel tempo di gas tracciante e analisi finale come nel primo caso.

$$q = \bar{G}/c$$

Infine nel terzo caso si mantiene costante la concentrazione del gas facendone variare la portata.

$$q = G/\bar{c}$$

2. La normativa vigente

2.1 Premessa

Questo breve capitolo presenta quali sono le cinque normative principali analizzate nel lavoro di tesi. La prima è sicuramente la più importante essendo stata analizzata in ogni sua parte come si potrà osservare nel proseguo del lavoro.

2.2 UNI EN 15242: Ventilazione degli edifici. Metodi di calcolo per la determinazione delle portate negli edifici, comprese le infiltrazioni.

Questa normativa permette di calcolare le portate di aria negli edifici utili nelle applicazioni di calcolo energetico, di raffrescamento o riscaldamento, per la valutazione del benessere e per la qualità dell'aria. Il metodo si applica alla ventilazione meccanica, ai condotti di ventilazione "passiva", al sistema ibrido e all'apertura manuale di finestre o porte. E' applicabile ai sistemi di evacuazioni fumi esausti delle cucine ma non ai processi industriali di vario genere. Inoltre la normativa non è applicabile ad edifici più alti di 100m o con differenze di temperatura all'interno dei singoli locali maggiore di 15K. Per il calcolo è possibile considerare una singola o più zone collegate fra loro. Il secondo caso è utilizzabile quando le differenti zone hanno differenti sistemi di ventilazione oppure quando nelle zone si considerano flussi di aria indipendenti.

Nella parte conclusiva è presente un capitolo sul calcolo energetico. In realtà vengono presentate soltanto le basi e alcune ipotesi. Per un calcolo approfondito si rimanda alla UNI EN 15241.

2.3 UNI EN 15241: Ventilazione degli edifici. Metodi di calcolo delle perdite di energia dovute alla ventilazione e alle infiltrazioni in edifici commerciali

La norma presenta una metodologia di calcolo per valutare l'impatto energetico dell'impianto di ventilazione e delle infiltrazioni. Partendo dalle portate ricavate nella precedente è possibile calcolare i consumi dell'edificio provenienti dai carichi termici di riscaldamento e rinfrescamento. A differenza di quanto si può immaginare dal titolo, la normativa non dà ampio spazio al calcolo delle perdite energetiche dovute alle infiltrazioni. Per quanto riguarda il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici è tutto demandato alla UNI EN 13790. L'unica cosa da segnalare è il modello di calcolo semplificato per lo scambio termico tra le canalizzazioni di aria interrata e con il terreno stesso, presentato nell'allegato A della normativa.

2.4 UNI EN 13779: Ventilazione degli edifici non residenziali. Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione

Come si evince dal titolo la normativa presenta i requisiti prestazionali riguardanti gli impianti di ventilazione negli edifici non residenziali. E' espressamente specificato che la normativa non si applica ai casi di ventilazione naturale e di processi industriali. Viene invece applicata alla ventilazione meccanica dell'aria immessa, espulsa e per quanto riguarda la parte meccanica della ventilazione ibrida.

La normativa si concentra sulla qualità dell'aria con particolare attenzione alla corretta rimozione dell'aria esausta e al possibile riutilizzo dell'aria estratta per abbattere i consumi. Vengono richiesti i profili di utilizzo dell'edificio in base al numero di persone ed al loro vestiario, al tipo di attività, alla presenza di apporti interni e produzione di inquinanti volatili. In un secondo luogo viene presentata una classificazione dell'aria, dell'impianto e del suo sistema di controllo. La normativa termina con le disposizioni riguardo la qualità dell'aria e umidità interna dei locali.

2.5 UNI EN 13829: Prestazione termica degli edifici. Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici. Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore.

La norma specifica un metodo per l'analisi della permeabilità di un edificio. Utilizzando impianti di ventilazione meccanica si effettua una pressurizzazione o depressurizzazione di una singola zona. Il procedimento può essere effettuati a più zone in collegamento tra loro da porte aperte. La norma non è finalizzata a determinare la permeabilità di singoli componenti, inoltre non fornisce direttamente i risultati riguardanti le infiltrazioni ma dati che dovranno essere poi utilizzati in calcoli.

Si effettuano le pressurizzazioni mediante ventilatore per: misurare la permeabilità dell'aria di un edificio, confrontare le permeabilità di più edifici, identificare le cause di infiltrazione, determinare la riduzione delle infiltrazioni. Il metodo permette di calcolare i flussi entranti o uscenti dall'edificio, non i flussi entranti ed uscenti in contemporanea. Le condizioni climatiche ideali di test sono piccole differenze di temperatura e basse velocità di vento.

Vengono presentate inizialmente la componentistica e l'operatività della misurazione (apparecchiatura di movimentazione aria, sigillature, metodo di prova A e B), infine la modalità per presentare i risultati in riferimento ai valori convenzionali utilizzati nel panorama scientifico.

Il capitolo 6.2 della normativa presenta il calcolo per la determinazione della portata, il 6.3 approfondisce il problema entrando nel dettaglio di: portata di rinnovo dell'aria, permeabilità, portata specifica, portata d'infiltrazione. Negli allegati si possono trovare: descrizione dell'attrezzatura da utilizzare, equazione del vapore saturo, il metodo statistico per la valutazione degli errori, la scala Beaufort per la valutazione dell'intensità del vento.

2.6 UNI EN 13465: Ventilazione degli edifici. Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici residenziali.

Bisogna precisare che questa normativa è stata ufficialmente ritirata e sostituita dalla UNI EN 15242. E' stata comunque analizzata in quanto la più recente inizialmente è stata di difficile comprensione e tutt'ora ci sono delle questioni molto dubbie.

La presente normativa determina le portate di aria per le abitazioni, gli edifici unifamiliari e per i singoli appartamenti di dimensioni inferiori a 1000 m³. Si applica a tre differenti applicazioni: calcolo energia persa nella ventilazione, progetto del carico massimo di riscaldamento, valutazione IAQ. Per quanto riguarda le aperture non è previsto il flusso incrociato ma solo in ingresso o in uscita.

L'equazione che governa le portate di aria è la seguente:

$$q_v = C(\Delta p)^n$$

come abbiamo già visto la prima comprende sostanzialmente le caratteristiche geometriche e la seconda quelle del tipo di moto dell'aria.

La normativa prevede il calcolo delle portate di aria per:

- infiltrazione dovuta alla ventilazione naturale;
- impianto di trasferimento dell'aria;
- impianto di ventilazione meccanica;
- estrazione di aria combusta.

Infine viene proposto un calcolo iterativo del tutto simile ad un modello di rete o network.

La logica qui presentata è la stessa della UNI EN 15242, ovviamente cambiano le procedure di calcolo.

3. La normativa UNI EN 15242

3.1 Premessa

Come premesso nel capitolo precedente questa normativa ci permette di ricavare le portate di aria entranti o uscenti in un edificio dovute alla ventilazione naturale. Come sappiamo la forzante in gioco è la differenza di pressione interno – esterno, prodotta dall’effetto del vento, della temperatura o di ventilazione meccanica.

Le portate così ottenute possono essere utilizzate in analisi sia energetiche, sia riguardanti la qualità dell’aria interna. Per quanto riguarda il discorso energetico le portate così ottenute devono essere utilizzate nelle considerazioni proposte dalla UNI EN 15241 ma soprattutto nelle procedure di calcolo della UNI EN ISO 13790.

La normativa presentata fornisce due possibilità di calcolo: un modello iterativo o istantaneo ed un modello semplificato o diretto.

Il primo, presentato nei paragrafi dal 6.2 al 6.6 della normativa, procede con il calcolo delle portate per ventilazione meccanica (supply), passiva o ibrida (passive), combusta (comb) proveniente da cucine ed infine la conseguente ventilazione naturale. Nell’insieme viene presentata una procedura per il calcolo della portata di una “large opening”, assimilabile ad una porta o finestra. E’ specificato che la ventilazione meccanica non si può riferire a processi industriali ma solo ad aria per il riscaldamento o climatizzazione.

Il modello semplificato, presentato nel paragrafo 6.7 della normativa, è invece utilizzabile quando non c’è correlazione tra la ventilazione meccanica e quella naturale. Con questa procedura non è però simulabile un processo di ventilazione passiva o ibrida.

Per quanto riguarda l’analisi del campione di edifici industriali abbiamo optato per una analisi con metodo iterativo anche se in questa prima fase la ventilazione meccanica ed ibrida non sono state modellate come specificato da normativa. In particolare per quanto riguarda la ventilazione meccanica è doveroso soffermarsi volta per volta sul tipo di condotta, essendo esclusa da questa normativa quella destinata ai processi industriali. Per completezza viene anche analizzato di seguito anche il modello semplificato.

3.2 Modello iterativo

Come premesso questo modello si sofferma ampiamente sulle caratteristiche della ventilazione meccanica (supply) utilizzata per il riscaldamento o per la climatizzazione dei locali e sul sistema di ventilazione passiva o ibrida. Dopo aver stimato anche le caratteristiche di un eventuale condotta di aspirazione di gas combustibili il modello passa al calcolo iterativo per la valutazione della pressione dell'aria interna.

Il lavoro di tesi è basato proprio su quest'ultimo aspetto del complesso fenomeno della ventilazione naturale. Per fare ciò ho trascurato i tre contributi: meccanico, ibrido e di aspirazione.

E' anche doveroso precisare che negli edifici di studio non è così frequente il riscaldamento con sistema "a tutta aria"; vengono infatti preferiti stucchi radianti o aerotermini. Da qui l'idea di non soffermarci inizialmente su questo tipo di ventilazione. Inoltre la climatizzazione dei volumi destinati alle lavorazioni è del tutto assente.

Dunque viene proposto in allegato l'analisi del calcolo delle portate passanti attraverso fessure o perdite (leakages), prese d'aria (vents) e finestra (large opening) in condizioni di vento proveniente da una direzione fissa con flusso d'aria esclusivamente entrante.

Calcolo di "Large opening":

con questa procedura si intende simulare il flusso passante attraverso aperture nell'involucro edilizio paragonabili a porte o finestre. Nel caso di edifici industriali saranno simulate anche le saracinesche. I dati in ingresso sono le caratteristiche geometriche dell'apertura (area e altezza), differenza di temperatura interno – esterno, velocità del vento e l'angolo di apertura per finestre a basculante. Il risultato fornito è una portata di aria entrante nell'edificio. Infine il calcolo presentato per un singolo istante deve essere applicato al caso reale di funzionamento delle aperture inserendo la variabile tempo. Un buon intervallo di analisi è quello di 1 ora.

Possiamo subito notare come non venga presa in considerazione l'altezza da terra dell'apertura e le caratteristiche del moto dell'aria all'interno del profilo dell'apertura. Un ulteriore limite è dato dall'inclinazione del vento rispetto all'apertura: viene infatti previsto soltanto un flusso monodirezionale con impatto frontale.

Possiamo subito riconoscere un errore nel fatto che la portata passante in una finestra aperta sia maggiore di una portata passante in una finestra con apertura a 90° ed ugualmente completamente aperta.

Infatti come si può osservare dal calcolo riportato in allegato: $A_{\alpha_w} = C_k(\alpha_w) \cdot A_w$

$C_k(90^\circ) = 0.90$ anziché 1.00

Calcolo di infiltrazioni ed exfiltrazioni

Il calcolo di infiltrazioni e exfiltrazioni si rivolge come scritto sopra a due categorie di aperture: le fessure o leakage e le prese d'aria o vent. Più generalmente vengono chiamati componenti, ciascuno è caratterizzato da un proprio coefficiente $C_{p_{comp}}$ e da un'altezza h relativa alla quota del pavimento della zona considerata.

Le fessure di una parete dipendono dal materiale stesso, dalle connessioni tra diversi elementi (per esempio solaio - tamponamento) e dalle connessioni vetro – infisso nei serramenti con particolare attenzione agli apribili. Come vedremo queste ultime componenti avranno una maggiore importanza nelle simulazioni.

Tutte le fessure e le prese d'aria sono caratterizzate da un proprio C_{comp} , valutato in l/s per 1 Pa di pressione di riferimento. La somma di tutti i C_{comp} del fabbricato fornisce il valore C_{leak} dell'edificio. Il metodo più semplice per ricavare il valore di C_{leak} è quello di effettuare dei test così come proposti dal paragrafo 1.4. In alternativa esistono tabelle in normativa e in letteratura che assegnano dei valori in base alle caratteristiche costruttive ma gli stessi autori non ne consigliano l'utilizzo per altri modelli differenti dal loro proposto.

Il procedimento prosegue con la valutazione della differenza di pressione all'interno e all'esterno del componente, causata anche in questo caso da una forzante termica e una di vento. Il metodo iterativo individua per tentativi il valore di pressione tale che si mantenga costante la quantità di massa all'interno della zona analizzata. Tutto questo per il principio di conservazione della massa di aria secca. A questo punto si sono definite le portate, convenzionalmente entranti positive e uscenti negative. Personalmente ho proposto una fine al calcolo "iterativo" nel momento in cui l'errore stabilito dalla seguente relazione scendesse sotto a valori dell'1%

$$ERR = \frac{\sum q_v}{\left(\frac{q_v^+ + q_v^-}{2}\right)} < 1\%$$

3.3 Modello semplificato

Come precisato questo metodo è utilizzabile quando la ventilazione meccanica funziona distintamente da quella naturale, cioè gli effetti dell'una non sono significativi sull'altra dato che per la fisica del problema è impossibile separarle. Gli step di questo metodo sono tre. Il primo riguarda il calcolo diretto della portata per ventilazione naturale, prodotta cioè da vento e temperatura. Il secondo calcola la risultante dei flussi aggiungendo i contributi di ventilazione meccanica, di estrazione o di aria combusta cercando di combinare questi con le due forzanti sopra descritte. Infine come terzo step si applica il metodo ad ogni istante orario.

Differentemente dal modello iterativo in questo caso la portata di aria per infiltrazione non varia in funzione della portata interna ma per considerazioni sperimentali.

3.4 Analisi del vento e dei coefficienti di pressione C_p

L'analisi della forzante del vento in questa normativa è regolata secondo due aspetti: il calcolo della velocità del vento nel sito dell'edificio a partire dai dati meteorologici ed il calcolo della pressione del vento sulla singola facciata e sul tetto.

Per il calcolo della velocità del vento in allegato è riproposta la formula con alcune eccezioni:

- è valida solo per venti rilevati ad altezze superiori di 60 m ed inferiori a 100 m dal suolo
- può essere applicata a venti di intensità superiore a 2 m/s
- può essere applicata ad edifici con altezza pari o superiore a $20 \cdot z_o$, con quest'ultimo corrispondente al parametro di rugosità del terreno in sito.

In allegato è anche presente una tabella che assegna i valori dei C_p per individuare la pressione agente su ogni singola parete esterna. Da notare come si assegni un valore soltanto alla facciata sopravento (Windward), sottovento (Leeward) ed al tetto. Per le prime due è possibile approssimare ad un delta di $\pm 60^\circ$. In queste considerazioni non sono contemplate le facciate parallele alla direzione del vento.

3.5 Osservazioni

Da osservare come la normativa non sia ben chiara, in particolare se la procedura di calcolo di porte e finestre si possa combinare o meno con quella iterativa delle portate di fessure, prese d'aria dato che nell'equazione di bilancio non compare nessun termine. Solo da un'analisi in letteratura si può comprendere che i due fenomeni devono essere osservati distintamente. Inoltre non è chiara nemmeno la differenza tra l'area di una presa d'aria e di una finestra. L'unico riferimento a questo interrogativo l'ho trovato nella UNI EN 13141- 1 e 2 dove si comprende che le prese d'aria hanno dimensioni limitate.

Un altro aspetto da chiarire riguarda la direzione del vento incidente; infatti è possibile attribuire dei coefficienti solo per facciate e aperture a favore di vento (windward), controvento (leeward) o in copertura. Non è riscontrabile come poter simulare facciate parallele alla direzione del vento o vento incidente con angolazione diversa da quella perpendicolare.

Un'altra critica a questo modello potrebbe essere fatta riguardo alle caratteristiche dei leakages, infatti è necessario conoscere dei valori sperimentali da applicare nel modello. Questo comporta

una maggiore affidabilità nei risultati ma una minore attendibilità alla fase progettuale nel caso di nuove costruzioni.

4. Analisi del campione

4.1 Caratteristiche generali del campione analizzato

Il lavoro di tesi è stato focalizzato su un campione di 8 edifici industriali situati nel territorio lombardo; l'obiettivo era proprio quello di avere un riscontro reale del problema e allo stesso tempo contribuire al lavoro di ricerca del dipartimento B.E.S.T. del Politecnico di Milano.

Gli edifici sono stati realizzati in periodi socio-economico differenti negli ultimi decenni e le caratteristiche costruttive lo dimostrano. Il territorio circostante in alcuni casi è pianeggiante ed in altri si possono osservare le prime colline dell'arco alpino. In tutti i casi gli edifici sono inseriti in un contesto edilizio misto industriale e residenziale che caratterizza i piccoli comuni della provincia di Varese e della Brianza. Dal punto di vista del vento possiamo ritenere che la località sia in fascia A, zona 1 secondo la normativa vigente¹.

Gli edifici sono stati nominati con un numero univoco per il lavoro di tesi e per il lavoro di ricerca del dipartimento sopra citato. Non sono state riportate le informazioni riguardo il nome dell'azienda produttrice all'interno degli edifici per motivi legislativi.

Il lavoro di tesi che sto presentando riguarda esclusivamente le aree produttive degli edifici: sono stati infatti esclusi gli uffici, i bagni, i locali caldaia, etc, da ogni considerazione eccetto per i passaggi dell'aria e dei suoi sbarramenti.

La pianta del campione analizzato varia da un minimo di circa 1600 m² ad un massimo di circa 11800 mq, il volume è compreso tra 10000 e 95000 m³ circa. La forma della pianta per 6 campioni è regolare, cioè riconducibile ad un modello quadrato o rettangolare, per i restanti due casi è più articolata essendo composta da più edifici realizzati vicino tra loro e collegati internamente. Lo schema seguente propone le dimensioni minime e massime per ciascun modello del campione analizzato.

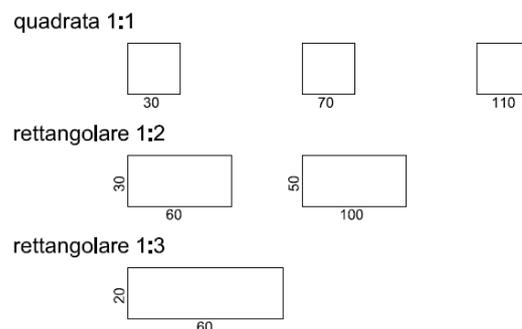


Figura 1: proporzioni e dimensioni delle piante dei fabbricati del campione

¹ UNI 10349, Dati climatici (12)

Quasi tutti gli edifici hanno un'altezza di circa 8 m, una misura ormai standard delle realizzazioni industriali recenti. I fabbricati più datati sono più bassi anche di un paio di metri. E' importante osservare come alcuni edifici si sviluppino su due livelli dimezzando sostanzialmente l'altezza interna dei volumi. Questa caratteristica interesserà fortemente la considerazione sulla ventilazione.

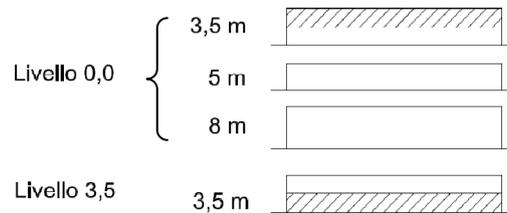


Figura 2: altezza interna media e livello del solaio

Nella figura sottostante sono invece raffigurate le coperture riscontrate nel campione, nei capitoli seguenti verranno analizzate più approfonditamente presentando le caratteristiche dimensionali e di funzionamento delle aperture che le caratterizzano. Infatti un tema di particolare interesse è proprio la fuoriuscita dell'aria dalla copertura per mezzo di ventilazione naturale.

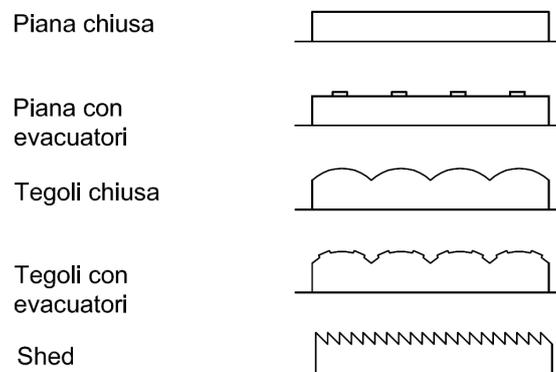


Figura 3: tipologie di copertura

Sono state anche osservate le ostruzioni e il livello di esposizione al vento che ogni singolo edificio del campione presenta. Secondo le norme tecniche per le costruzioni² gli edifici sono da considerarsi in classe IV. Le considerazioni principali sono due e riguardano l'ostruzione di

² Norme tecniche per le costruzioni, emesse ai sensi delle leggi 05.11.1971, n. 1086, e 02.02.1974, n. 64, così come riunite nel Testo Unico per l'Edilizia di cui al D.P.R. 06.06.2001, n.380, e dell'art. 5 del decreto legge 28.05.2004, n. 136, convertito in legge, con modificazioni, dall'art. 1 della legge 27.07.2004, n. 186 e ss. mm. ii..

porzioni delle facciate degli edifici e altre realizzazioni civili nelle immediate vicinanze del fabbricato oggetto di analisi.

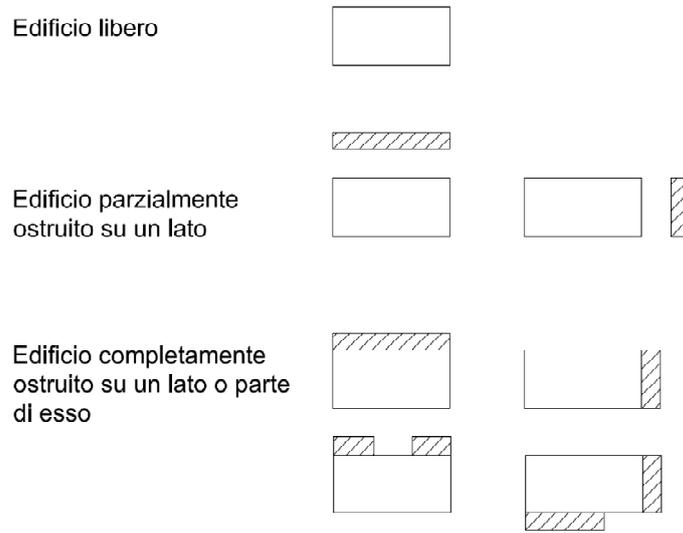


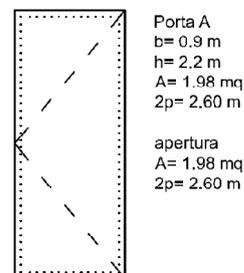
Figura 4: tipologia di ostruzione riscontrata nel campione analizzato

4.2 Elementi apribili

Sono state osservate inizialmente le piante e i prospetti degli edifici, successivamente per una più accurata analisi anche il rilievo fotografico. Il risultato è stata una campionatura delle aperture presenti sui tamponamenti di facciata e in copertura. Nei disegni sotto proposti si può notare con la linea tratteggiata la posizione delle cerniere e con la linea a punti la presenza di battute apribili. Queste considerazioni verranno approfondite nel calcolo riassunto nel paragrafo successivo.

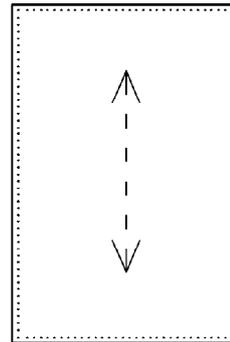
Porta con apertura ad anta:

E' riscontrabile sia a quota zero, sia ad altezze più elevate in collegamento con le rampe per l'evacuazione in caso d'incendio



Saracinesca o portellone:

Di dimensioni differenti con lati non inferiori a 3 metri. Vengono utilizzate per l'accesso direttamente al cassone dei camion. Hanno una bassa tenuta all'aria per le caratteristiche di funzionamento ad apertura rapida.

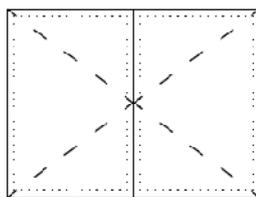


Saracinesca
 $b = 5 \text{ m}$
 $h = 4 \text{ m}$
 $A = 20 \text{ m}$
 $2p = 18 \text{ m}$

apertura
 $A = 20 \text{ m}$
 $2p = 18 \text{ m}$

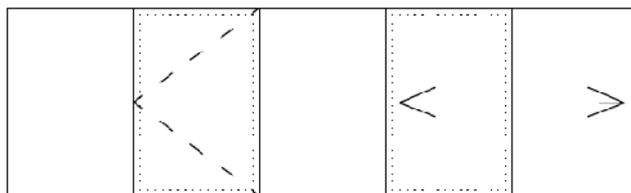
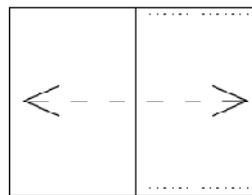
Finestre semplici o a nastro:

Generalmente dividono gli uffici dall'esterno ma sono state individuate anche negli spazi produttivi. Hanno altezza abbastanza limitate e si estendono talvolta in orizzontale per tutta la lunghezza del fabbricato. Talvolta si riscontrano anche serie di finestre poste a formare un nastro verticale.



Finestre A
 apertura ad anta singola,
 doppia o scorrevoli

dimensioni variab II



Finestre a nastro A

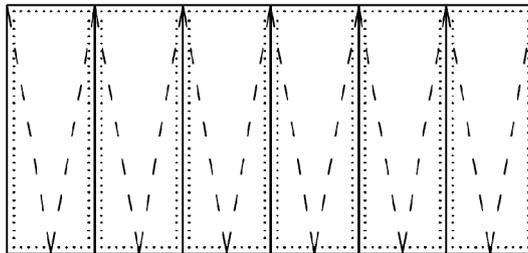
apertura ad anta o
 scorrevole

percentuale di apertura
 30% o 50%

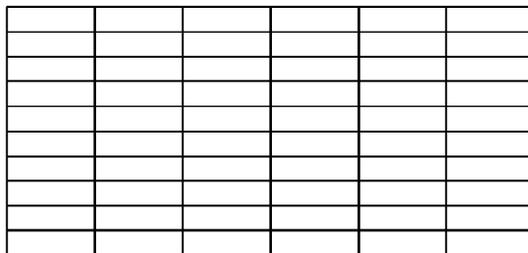
altezza e larghezza
 variabile

Sistemi complessi:

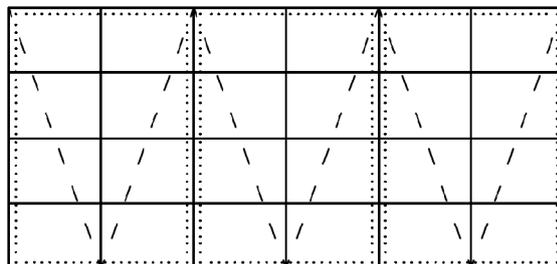
Si possono trovare sistemi di curtain walls o nastri di finestre di elevate dimensioni. L'apertura e il perimetro apribile variano da caso a caso. In questa categoria si comprendono anche alcune tipologie di shed come mostrato dalla figura qui sotto con apertura a basculante.



Finestre a nastro C
 apertura basculante
 percentuale di apertura
 100%
 altezza e larghezza
 variabile



Finestre a nastro
 apertura a "veneziana" in
 vetro
 percentuale di apertura
 100%
 altezza e larghezza
 variabile



Curtain walls
 apertura basculante
 percentuale di apertura
 100%
 altezza e larghezza
 variabile

4.3 Metodologia di analisi

Per ciascun tipo di apertura sono stati individuate le quattro grandezze significative: area totale, perimetro dei serramenti, percentuale di area apribile e metri di battuta dei serramenti. L'obiettivo è stato ricercare un valore caratteristico che legasse tutti questi parametri per creare le condizioni per una simulazione più generale. Inoltre si è pensato di simulare diverse modalità di apertura per saracinesche, porte, uscite di sicurezza, finestre e shed. Siccome ai fini della ventilazione naturale è interessante conoscere anche la disposizione delle aperture in altezza sulla facciata è stato pensato un modello di analisi qui proposto.

Il modello prevede un calcolo delle quattro grandezze sopra descritte separato in quattro porzioni di facciata:

A: 0-2 metri B: 2-4 metri C: 4-6 metri D: 6-8 metri e separatamente per la copertura.

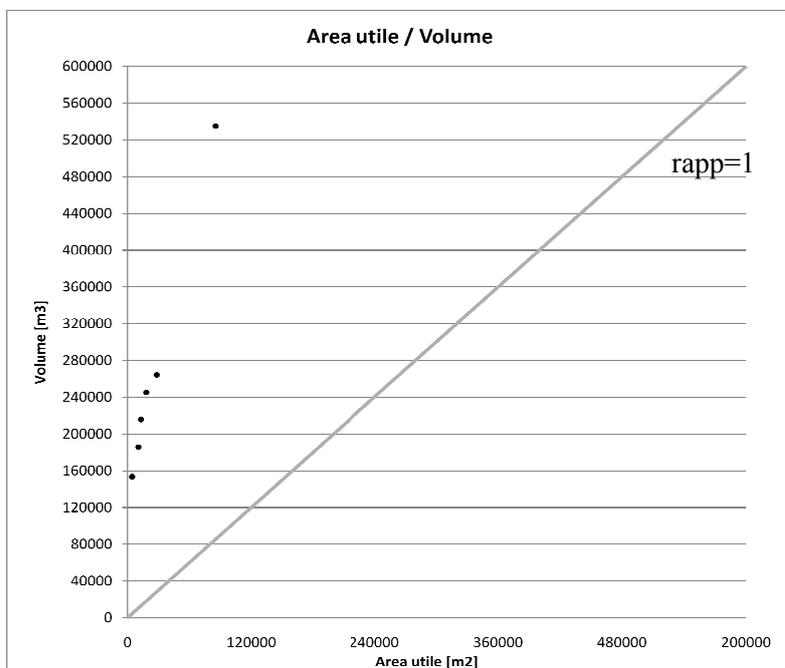
Dopo aver calcolato le aree e i perimetri sono stati comparati tra loro per ricercare le costanti.

Edificio	A pianta	Altezza media	A apr/ A pianta	A involucro / Volume	A involucro / A pianta
U.M.	m2	m	-	m2/m3	-
02	5123	7.0	5.52%	9.04	1.29
03	94736	6.0	0.24%	6.12	1.02
04	31736	6.0	0.71%	6.19	1.03
06	15444	8.0	2.31%	8.70	1.09
10	9918	8.0	5.57%	9.02	1.13
25	20495	8.0	2.92%	8.69	1.09

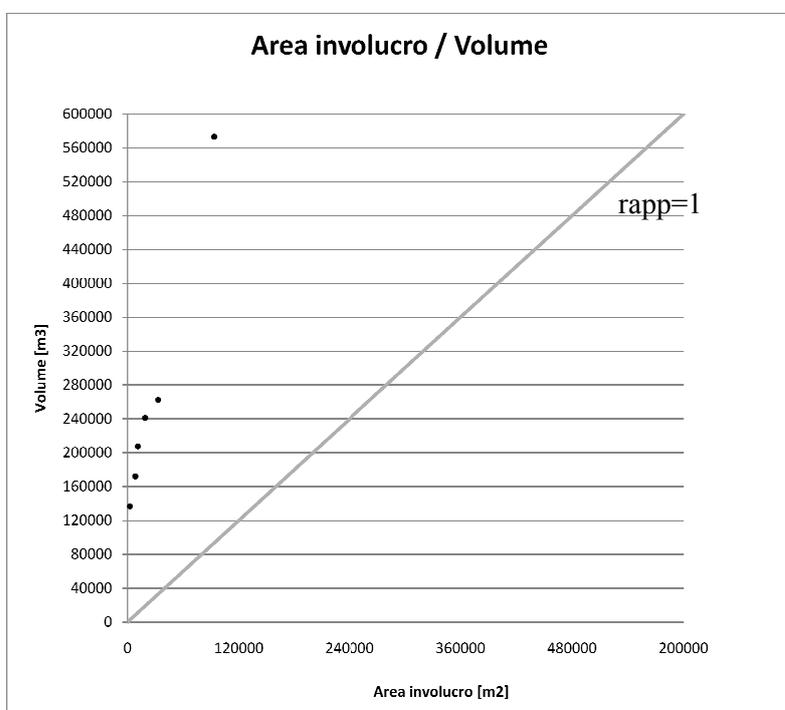
Edificio	Analisi delle singole facciate			Analisi delle fasce da 2 m		
	A apr/ A tot	Perim apr/ A apribile	Perim apr/ Perim tot	A apr/ A tot	Perim apr/ A apribile	Perim apr/ Perim tot
U.M.	-	m/m2	-	-	m/m2	-
02	62%	2.18	68%	58%	2.42	77%
03	75%	2.95	79%	73%	4.23	77%
04	85%	2.26	88%	81%	2.23	84%
06	65%	1.97	73%	75%	1.74	79%
10	81%	2.77	80%	86%	2.37	84%
25	95%	1.74	90%	96%	1.55	88%

Dai dati sopra proposti è possibile ricavare il rapporto tra:

- superficie utile e il volume;
- superficie disperdente e il volume.



In questo caso i rapporti variano tra circa 6 e 8 m³/m².



In questo caso i valori variano tra circa 6 e 9 m³/m².

4.4 Sistemi di riscaldamento

In edifici industriali di grandi dimensioni il controllo della temperatura talvolta non è presente, in alcuni casi invece avviene con diversi apparecchi all'interno dello stesso locale. Il motivo per il quale non avviene un controllo del riscaldamento così approfondito come nel residenziale è dato dai grandi volumi di aria da riscaldare e dall'elevata permeabilità degli involucri. Lo stesso ragionamento porta a non climatizzare alcuno spazio dedicato alle lavorazioni se non per particolari processi produttivi. Differenti sono le considerazioni per gli uffici all'interno dei capannoni dove si cerca di garantire un adeguato confort sia invernale che estivo dei lavoratori.

Le tecnologie impiegate negli edifici osservati sono prevalentemente aerotermi, ma possiamo anche trovare diverse strisce radianti a soffitto e canalizzazioni per sistemi "a tutta aria". La scelta di strisce radianti in molti casi deriva dal fatto che per determinati processi produttivi non è auspicabile una veloce movimentazione dell'aria, una caratteristica degli altri due sistemi.

Le grandi aperture delle saracinesche sono spesso provviste di "lame" d'aria posizionate localmente.

In alcuni stabilimenti il riscaldamento non è necessario vista la presenza di macchinari che producono calore in eccesso rispetto alle condizioni di comfort.

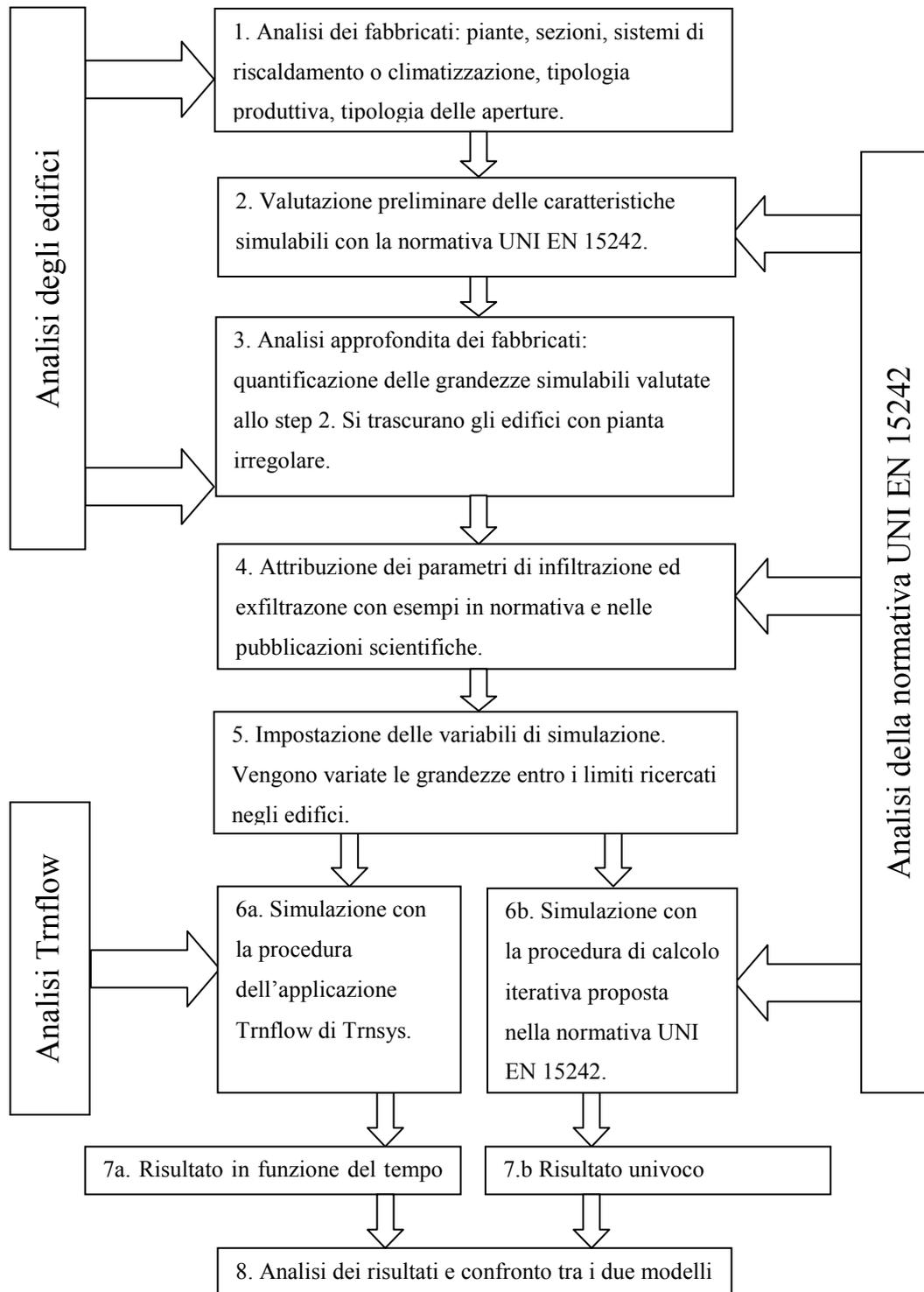
4.5 Sistemi di estrazione meccanica dell'aria

Alcuni degli stabilimenti oggetto di analisi effettuano delle lavorazioni che richiedono un tasso di ricambio elevato di aria per poter tenere sotto controllo le concentrazioni di alcuni gas. Questo viene garantito da adeguati sistemi di estrazione dell'aria, che portano l'aria interna verso l'esterno in copertura. Viene a crearsi così una depressione interna al locale e un successivo ingresso di aria dall'esterno attraverso aperture e fessure.

Il tasso di ricambio imposto dalla ventilazione meccanica è un valore molto importante per un calcolo corretto della ventilazione naturale ma allo stesso tempo è difficile da ricavare non conoscendo i macchinari presenti all'interno dell'area produttiva.

5. Parametri e intervallo di simulazione

Questo breve capitolo vuole introdurre alcuni concetti utili per comprendere le simulazioni proposte. Con lo schema sotto riportato si mostra la sequenza logica delle operazioni principali del lavoro di tesi:



(*) Le simulazioni in questo elaborato di tesi non presentano variabili in funzione del tempo. Si osserva pertanto in Trnsys la soluzione costante dopo i primi intervalli di assestamento dei valori iniziali delle condizioni al contorno.

I parametri fondamentali che ad inizio lavoro volevo trattare erano le due forzanti: la differenza di temperatura e l'intensità del vento. Per questo è stata fissata una temperatura interna pari a 20°C ed esternamente si sono imposti valori talvolta di $\pm 5^\circ\text{C}$, talvolta di $\pm 10^\circ\text{C}$. La velocità del vento ha assunto in alcune circostanze valori bassi prossimi allo zero e in altre valori di 10 m/s, decisamente elevati per il contesto geografico analizzato.

Nel corso delle simulazioni sono intervenuti altri fattori esterni che ne hanno caratterizzato il lavoro, in questo caso l'ordine logico delle simulazioni potrebbe risultare un po' confuso ma talvolta ha portato a risultati interessanti.

I risultati sono stati presentati in base alla portata passante nell'apertura. La convenzione per il flusso è positivo se entrante nell'edificio e negativo se uscente. La scala massima per le grandi aperture varia in un intervallo di $\pm 10000 \text{ m}^3/\text{h}$, per prese d'aria $\pm 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ e per fessure $\pm 100 \text{ m}^3/\text{h}$.

Si è pensato inizialmente di legare i risultati ottenuti al tasso di ricambio per il locale ma in seguito è risultato inopportuno essendo il volume non influente nei calcoli. È stata riportata una velocità fittizia dell'aria calcolata come rapporto tra la portata e l'area. Nelle simulazioni con area variabile la velocità fittizia non è stata rappresentata.

Un'ultima considerazione sull'area delle prese d'aria: infatti la normativa 15242 non prevede dei limiti per classificare un'apertura del tipo "vent" o "large opening". Il buonsenso ed il collegamento alla normative 13141-1 e 13141-2 portano a presupporre che le prese d'aria siano di dimensioni contenute ($< 60 \text{ cm}$ per lato) e che le "large opening" racchiudano l'insieme delle finestre e delle porte.

Gli edifici industriali sono caratterizzati da un'elevata permeabilità dei serramenti, da altezze interne dei locali molto elevate e da forti direzionalità delle aperture. Questi parametri sono stati schematizzati e riportati nell'allegato A con una scheda per ogni edificio analizzato.

Come si può facilmente osservare l'incremento della velocità dell'aria non incide sostanzialmente sul modello normativo. Infatti come si può osservare nell'equazione nell'allegato B la velocità dell'aria pur essendo elevata al quadrato viene moltiplicata per il coefficiente C_w che ne ridimensiona notevolmente l'effetto rispetto al contributo di stack. L'effetto del vento si inizia a percepire oltre i 6 m/s ma con valori decisamente inferiori a quelli proposti dalla curva di Trnflow. Per questo motivo il paragone si limita ad affermare che per basse velocità (1 m/s) i due modelli potrebbero fornire gli stessi risultati.

6.2 Simulazione n°2

Descrizione: Confronto tra grandi aperture simulate con i due modelli. Variazione dell'area di apertura, apertura di forma quadrata che simula le condizioni di un portellone di edificio industriale.

Condizioni al contorno:

Forma apertura: quadrata (h=b)

Temperatura interna: 20°C

 esterna: 25°C

Cp sopravento: + 0.8

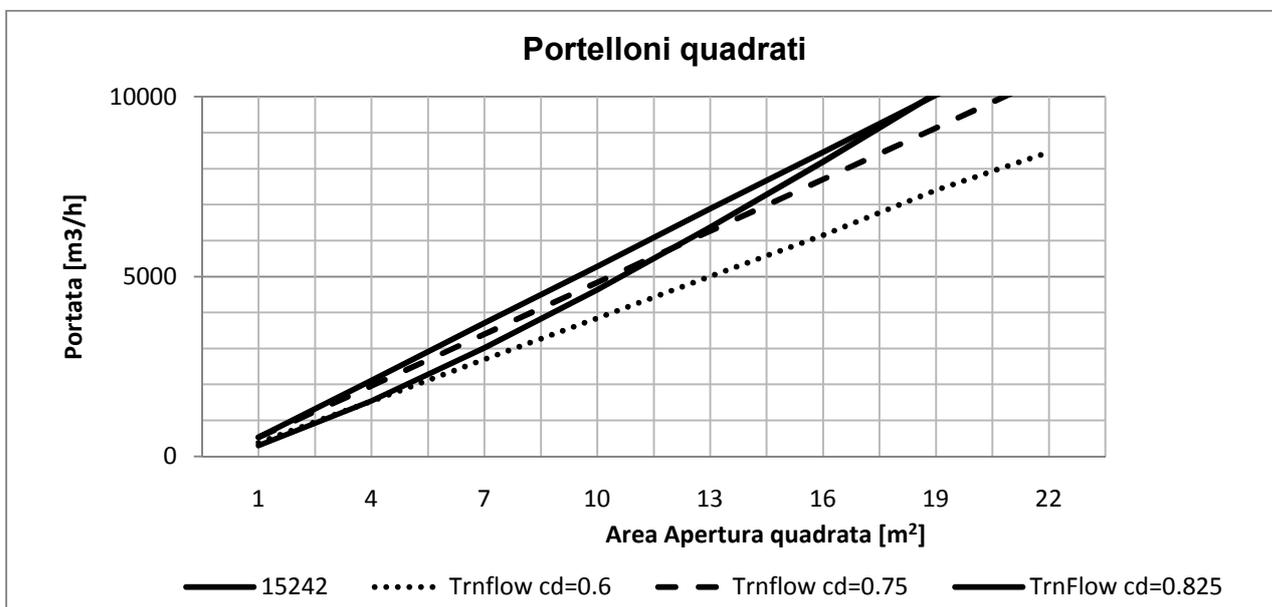
 sottovento: - 0.2

Velocità del vento: 1 m/s

Variabili:

Area apertura:	1 – 4 – 7 – 10 – 13 – 16 – 19 – 22 [m ²]
Cd apertura Trnflow:	0.6 – 0.75 – 0.825

Risultati:

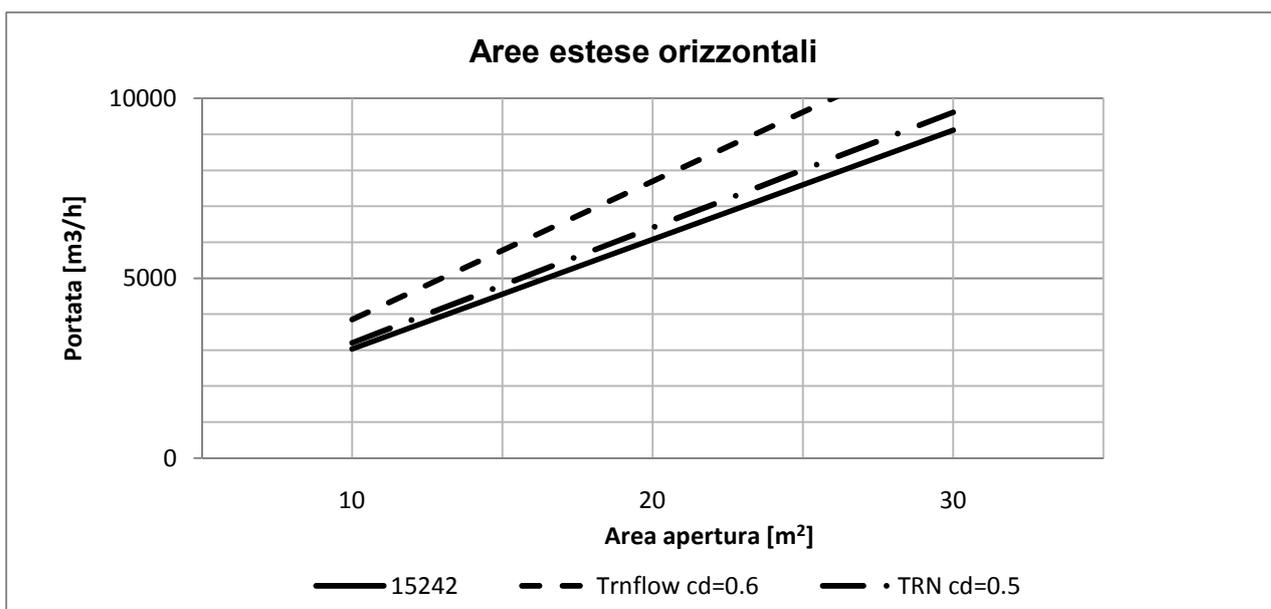
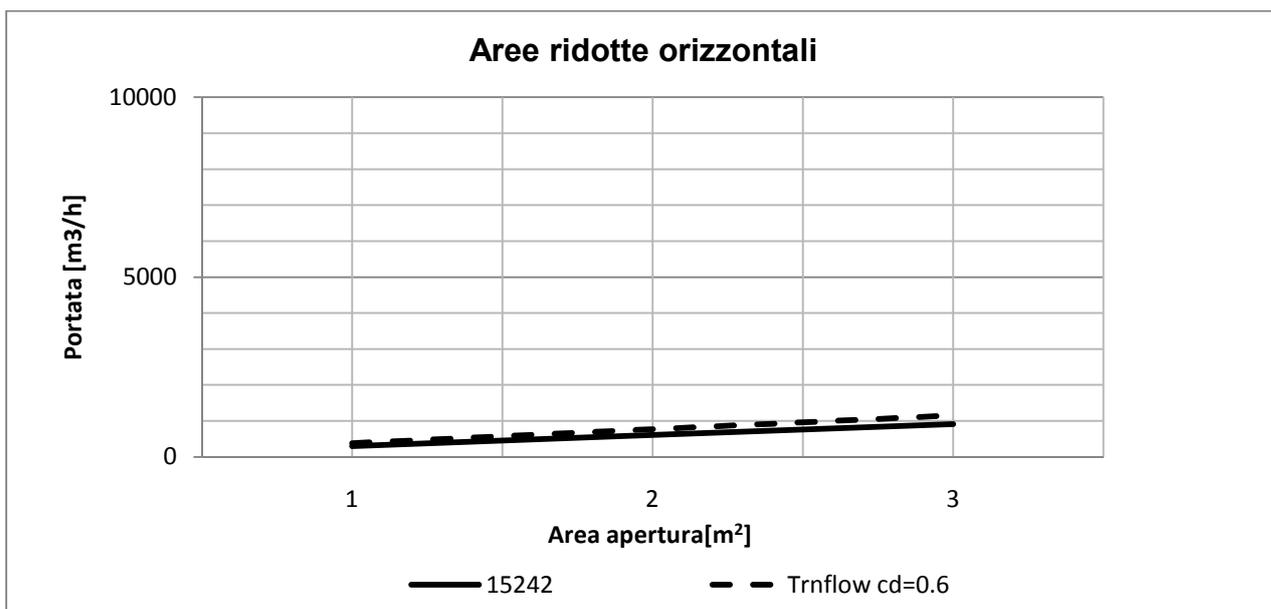


Commenti:

In questa simulazione l'obiettivo era quello di confrontare sia la variazione di flusso in funzione dell'aumento dell'area dell'apertura e sia quello di ricercare un valore di Cd tale da ottenere risultati simili tra le due procedure. Come si può notare le curve in Trnflow sono lineari mentre

quella normativa è esponenziale. Il coefficiente C_d esprime il rapporto tra il flusso reale e quello teorico calcolato secondo la legge di Bernoulli. Nella procedura normativa non è possibile assegnare questo coefficiente. Possiamo notare che il coefficiente di 0,6 consigliato dal manuale di Trnflow si discosta maggiormente dalla curva normativa rispetto ai coefficienti 0,75 (che interseca a 12 m²) e da 0,825 (che interseca a 19 m²).

Risultati:



Commenti:

In questa simulazione sono rappresentate due tipologie di aperture, entrambe con altezza pari a 1 metro. La prima comprende serramenti quali finestre semplici di larghezza 1, 2 o 3 metri. In questo caso le portate risultano simili perché hanno dei valori molto bassi. È stata scelta una scala di rappresentazione così elevata per uniformare i risultati al secondo caso dove è più evidente il discostamento tra i due modelli. Da rilevare come sia uguale in entrambi i casi la differenza tra le pendenze delle curve.

Nel secondo caso inoltre è stato modellata un apertura in Trnflow con Cd pari a 0,5. La curva sembra molto simile a quella normativa ma bisogna ricordarsi le osservazioni fatte nella simulazione precedente.

6.4 Simulazione n°4

Descrizione: Confronto tra grandi aperture simulate con i due modelli. Variazione dell'area di apertura; apertura rettangolare di altezza variabile e larghezza 1 m che simula una finestra semplice o a "nastro" verticale.

Condizioni al contorno:

Base apertura: 1m

Temperature

interna: 20°C

esterna: 25°C

Cp sopravento: +0,8

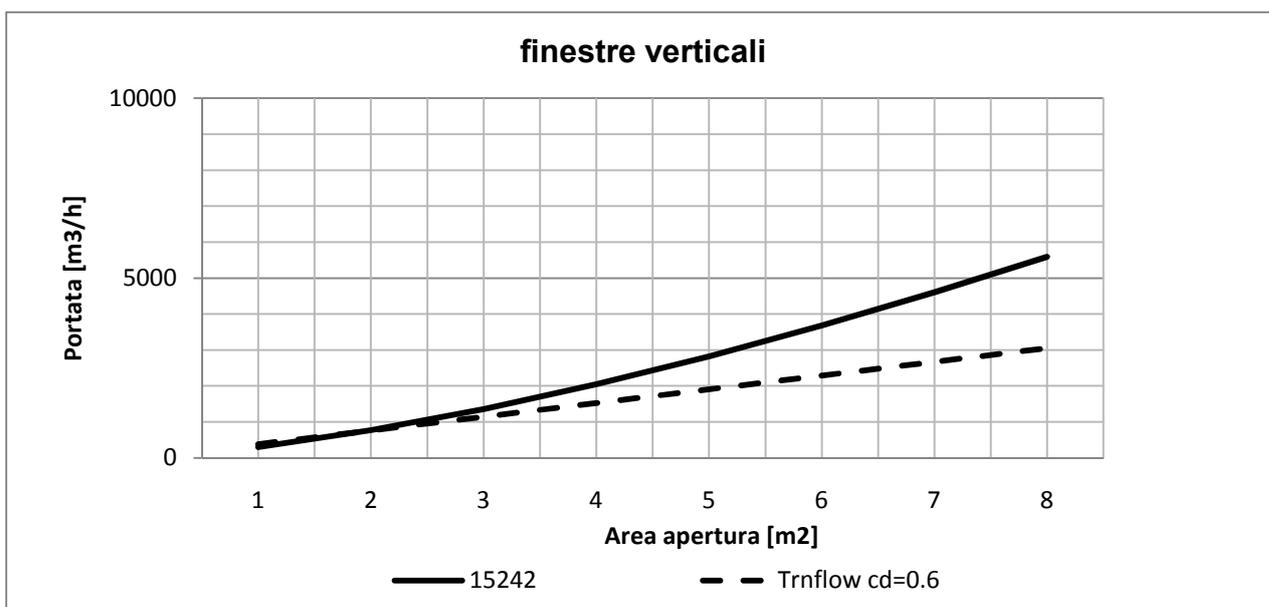
sottovento: -0,2

Velocità del vento: 1 m/s

Variabili:

Area apertura: 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 [m²]

Risultati:



Commenti:

La simulazione ha l'intento di rappresentare le vetrate poste verticalmente negli edifici industriali con apertura a tutta altezza. La larghezza è stata fissata per convenzione a 1m. L'altezza non supera gli 8 m date le caratteristiche del campione analizzato.

Si evidenzia l'andamento esponenziale per la portata normativa e lineare per Trnflow.

Tra le due curve non esistono sostanziali differenze per aperture inferiori a 3 m².

6.6 Simulazione n°6

Descrizione: Confronto tra grandi aperture simulate con i due modelli . Variazione della temperatura esterna entro limiti accettabili. Apertura che simula un portellone di edificio industriale.

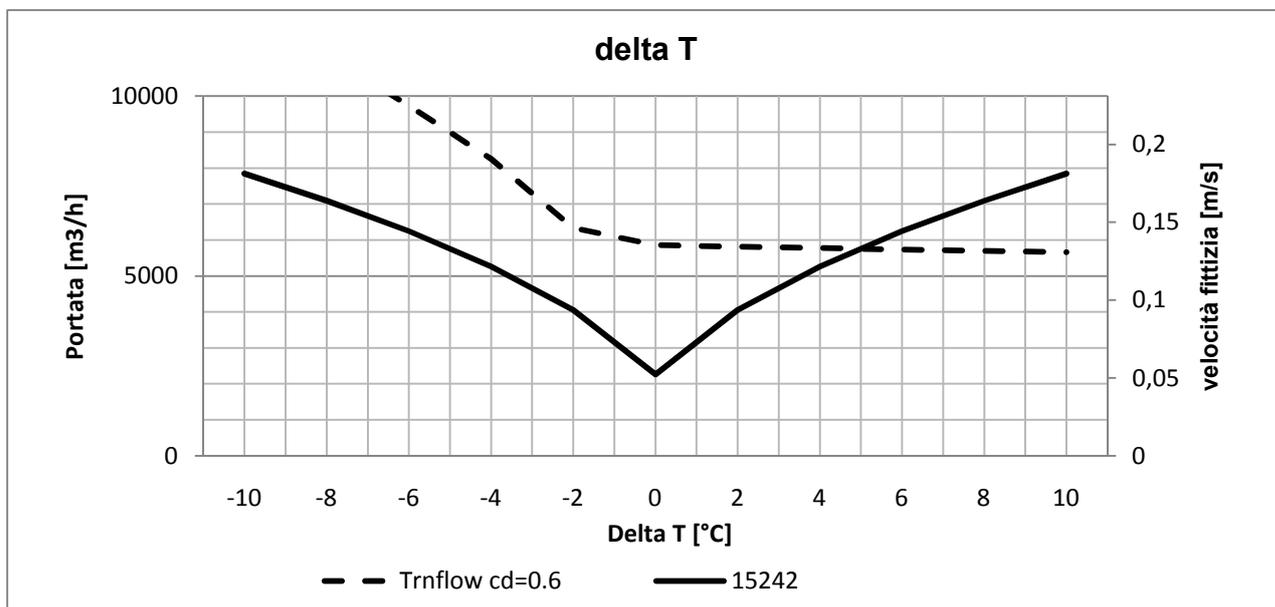
Condizioni al contorno:

Area apertura:	12m ²
Altezza apertura:	3,64m
Temperature interna:	20°C
Cp sopravento:	+0,8
sottovento:	-0,2
Velocità del vento:	1 m/s
Cd trnflow:	0,75

Variabili:

Temperatura esterna: da 10°C a 30°C con incremento di 2°C

Risultati:



Commenti:

In questa simulazione dobbiamo distinguere due analisi: per differenze di temperatura negative e positive. Nel primo caso la temperatura esterna è minore di quella interna, il comportamento è esponenziale in entrambe le procedure. La differenza tra le due è quasi sicuramente da ricercarsi nel valore di Cd.

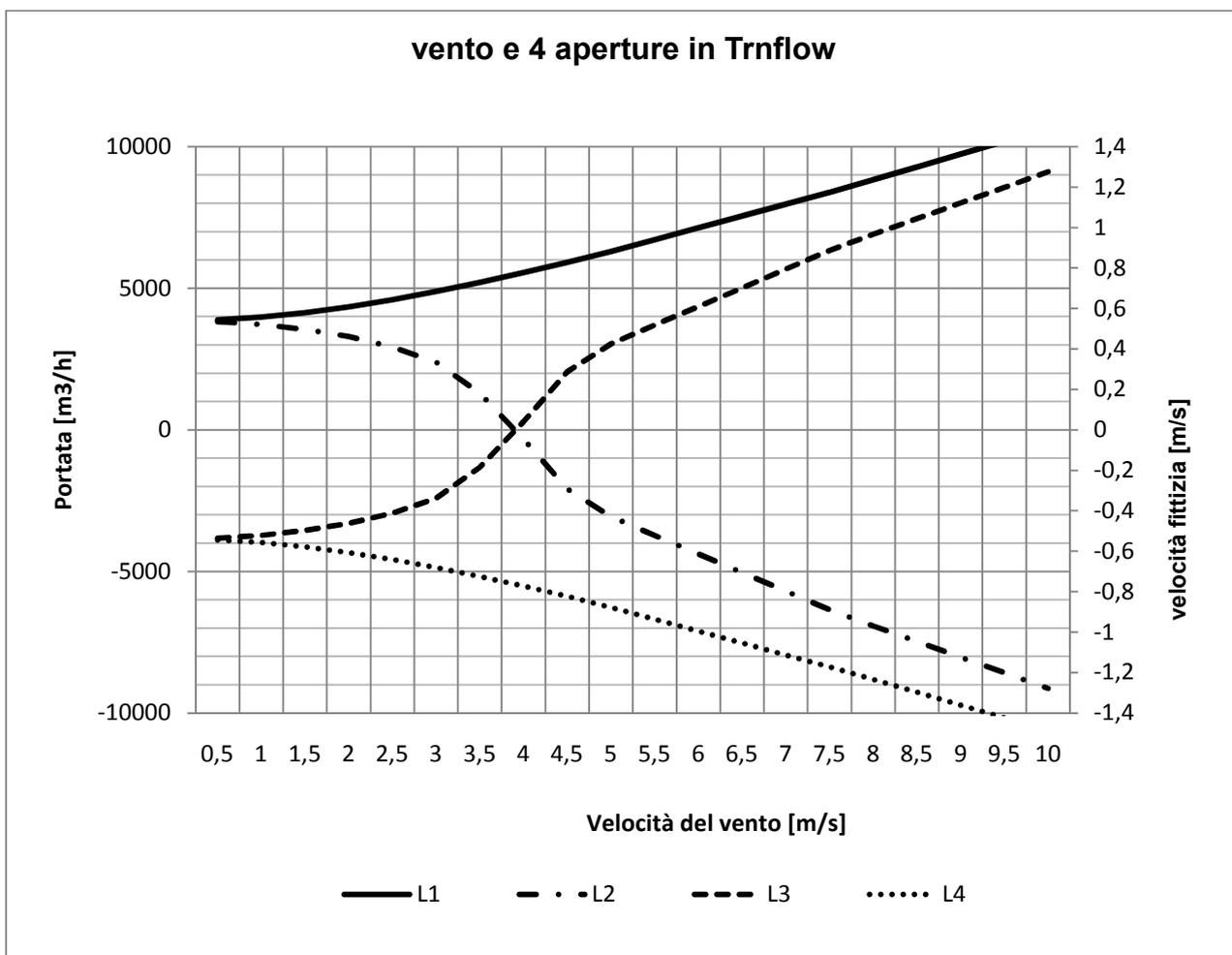
Ovviamente il flusso entra dall'apertura posta in basso ed esce da quella posta in alto.

Nel secondo caso il modello normativo prosegue con lo stesso principio della prima analisi. Infatti è possibile notare una certa simmetria con asse nello zero. Lo stesso non si può dire per il modello di Trnflow che tende ad allinearsi asintoticamente.

Commenti:

La stessa simulazione n°1 viene riproposta con velocità basse di vento e aperture più grandi. L'interesse è quello di ricercare eventuali flussi di ingresso e uscita contemporanei attraverso la medesima apertura. Per fare ciò è stata accentuata l'area e diminuite le velocità del vento. Da segnalare che il modello normativo prevede soltanto il flusso monodirezionale. Sono state simulate soltanto 2 aperture poste alla stessa quota e non 4 per non accentuare l'effetto camino interno alla stanza così come proposto dalla simulazione n°6.

Nei risultati di Trnflow possiamo osservare che per velocità inferiori a 0,5 m/s esiste un flusso uscente contemporaneo a quello entrante. Per velocità dell'aria prossime allo zero i due flussi si equivalgono. Per velocità superiori a 0,5 m/s l'effetto del vento per questo profilo di apertura predomina favorendo il solo ingresso di aria. Tutte queste considerazioni sono da osservarsi in relazione al flusso della normativa decisamente più elevato. Per velocità superiori a 1 m/s la portata di Trnflow risulta essere maggiore come già visto nella simulazione n°1.

Risultati:**Commenti:**

Dopo la simulazione precedente è doverosa una considerazione sui flussi entranti e uscenti in Trnflow. Per questo motivo sono state simulate 4 aperture poste a due a due su pareti opposte (sottovento e sopravvento) e ad altezze differenti di 1 e 7 metri da terra.

Anche in questo caso per valori di velocità del vento prossimi allo zero abbiamo solo il contributo dell'effetto di stack: nell'edificio entra la medesima quantità di aria da L1 e da L2 poste ad 1 m sulle pareti opposte ed esce la stessa quantità dalle aperture L3 e L4 poste a 7m. Intorno ai 4 m/s circa avviene l'inversione del fenomeno e nelle aperture L2 e L3 le due forzanti si equivalgono. Per velocità elevate dell'aria il contributo termico diminuisce ulteriormente senza scomparire del tutto, anzi determina il divario tra le curve che 1-3 e 2-4.

Commenti:

Come si intuisce nelle variabili di simulazione i due modelli utilizzano dati differenti pur simulando ambedue il comportamento con apertura a basculante. In Trnflow è necessario inserire la percentuale di apertura, nella normativa l'angolo rispetto alla condizione 90°: completamente aperta.

Possiamo osservare che i due modelli seguono leggi differenti: il primo lineare, mentre il secondo esponenziale. Questo aspetto è da osservare nella formula polinomiale per il calcolo di C_k in funzione dell'angolo α . Si rimanda pertanto al capitolo relativo di presentazione della procedura.

Commenti:

L'interesse ad effettuare questa simulazione è partito da un ragionamento precedente sui volume dei locali da sottoporre ad osservazioni. E' stato verificato che Trnflow non prende in considerazione le caratteristiche geometriche che riguardano la larghezza e la profondità di un edificio. L'unico dato che viene osservato è l'altezza interna dei locali. Quindi se volessimo simulare un edificio stretto e lungo piuttosto che di forma quadrata, a parità di volumi e altezze interne non avremmo alcuna differenza nelle soluzioni. E' il caso degli edifici industriali come si può notare dal capitolo riguardante l'analisi del campione.

La simulazione qui descritta inizialmente considera un unico volume di 1600 m³ con dimensioni 10x20 m in pianta e 8 m in altezza. In un secondo momento viene creata una divisione fittizia in 2 zone e poi ancora in 4 e 8 della dimensione più lunga.

Il risultato è che se per le aperture L1 e L4 il flusso sembra rimanere costante, per le aperture L2 e L3 più aumenta il numero delle zone e più diminuisce l'effetto del vento a favore dell'effetto di stack. Vengono così amplificati i fenomeni di circolazione dell'aria in verticale in prossimità delle pareti piuttosto che in orizzontale attraversando l'intero edificio.

Questa simulazione non può fornire un parametro coerente con la realtà ma può essere di aiuto nel conoscere alcuni limiti del software.

6.11 Simulazione n°11

Descrizione: Confronto tra prese d'aria simulate con i due modelli. Variazione della temperatura esterna per analizzare il contributo dell'effetto di "stack".

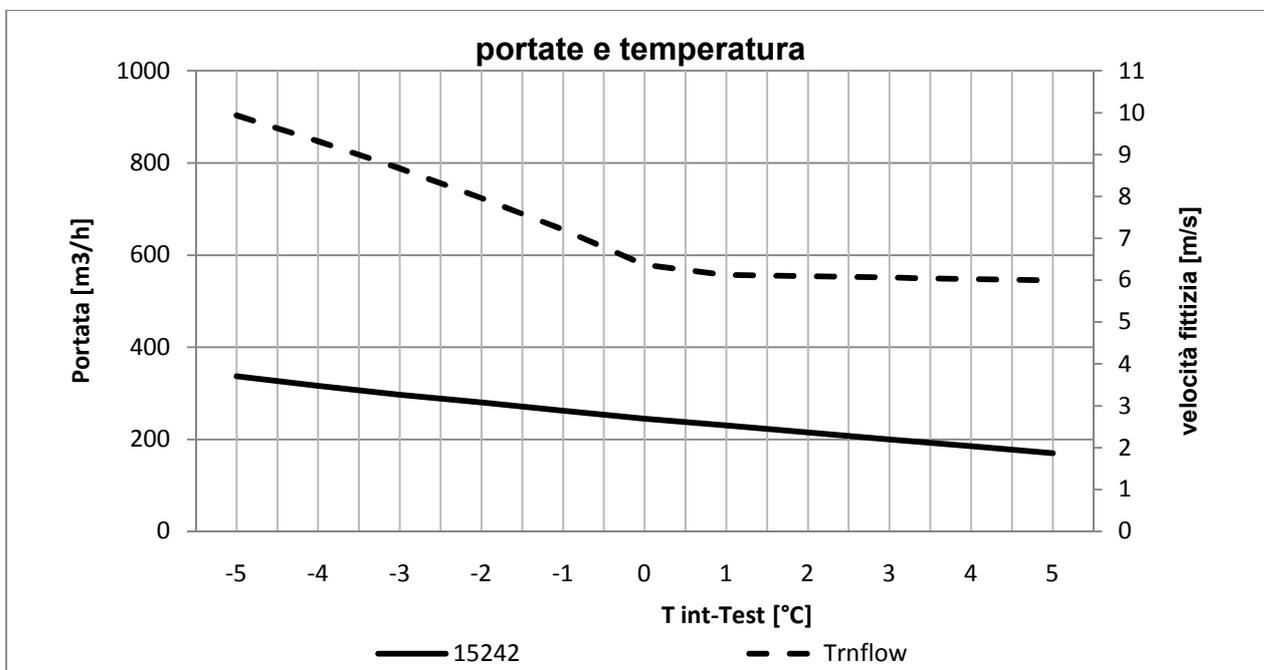
Condizioni al contorno:

Area prese d'aria: 0,25m²
 Altezza prese d'aria: 0,5 m
 Altezza da suolo prese d'aria: L1:1m e L2:7 m
 Esposizione al vento: L1:sopravento L2:sottovento
 Temperature interna: 20°C
 Cp sopravento: +0,8
 sottovento: -0,2
 Cd trnflow: 0,75
 Velocità del vento: 5 m/s

Variabili:

Temperatura esterna: da 15°C a 25°C con incremento di 1°C

Risultati:



Commenti:

In questa prima simulazione delle prese d'aria il comportamento del modello di Trnflow è del tutto analogo a quello proposto dalla simulazione n°6, per quanto riguarda la normativa invece non avviene quel comportamento speculare intorno allo zero descritto prima.

Da rilevare in questa simulazione gli unici risultati con velocità fittizia maggiore alla velocità reale dell'aria.

6.12 Simulazione n°12

Descrizione: Confronto tra prese d'aria simulate con i due modelli. Variazione Cd, rapporto tra il flusso reale e quello teorico calcolato con il teorema di Bernoulli.

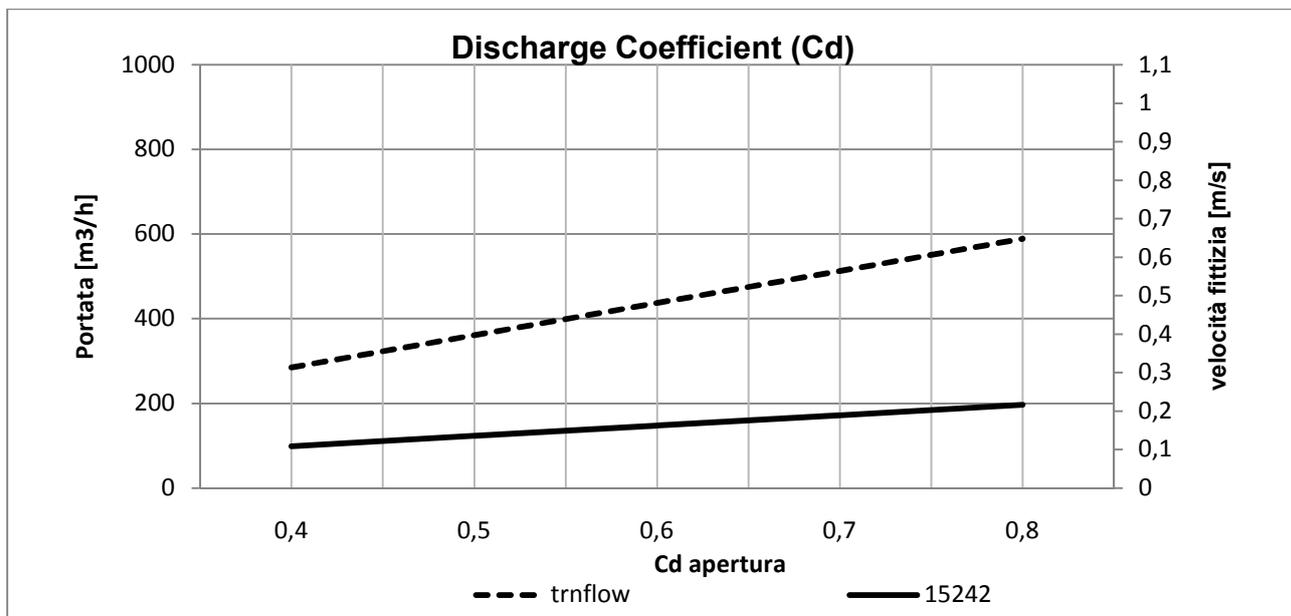
Condizioni al contorno:

Area prese d'aria: 0,25m²
 Altezza prese d'aria: 0,5 m
 Altezza da suolo prese d'aria: L1:1m e L2:7 m
 Esposizione al vento: L1:sopravento L2:sottovento
 Temperature interna: 20°C
 Cp sopravento: +0,8
 sottovento: -0,2
 Velocità del vento: 5 m/s
 Temperatura esterna: da 24°C

Variabili:

Cd: da 0,4 a 0,8 con incremento di 0,1

Risultati:



Commenti:

A differenza del modello normativo delle “large opening” quello delle prese d’aria consente l’introduzione del parametro Cd.

In entrambi i modelli l’andamento è lineare, nel primo con una pendenza maggiore.

6.13 Simulazione n°13

Descrizione: Confronto tra prese d'aria simulate con i due modelli. Variazione della velocità del vento per analizzare questo contributo.

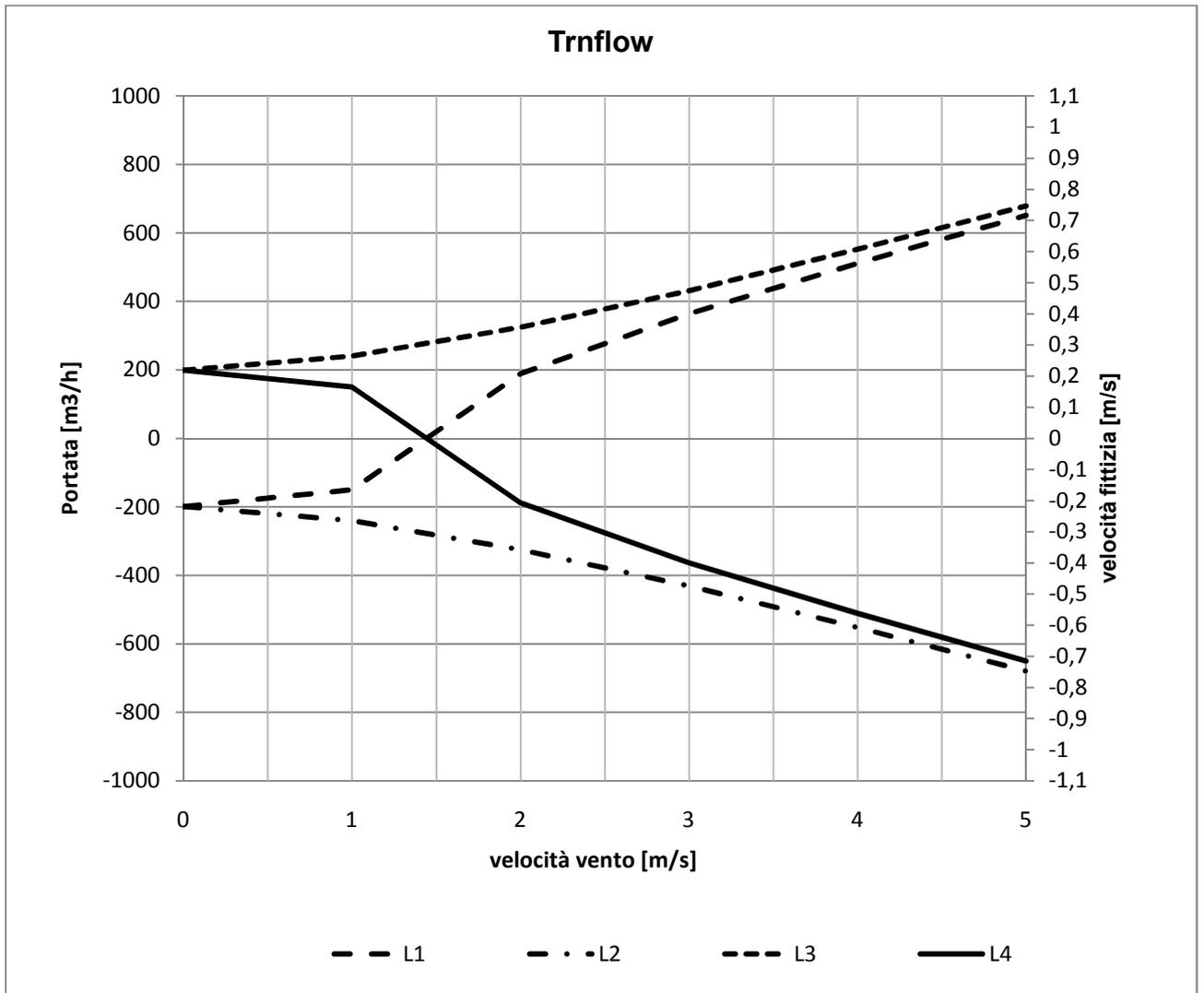
Condizioni al contorno:

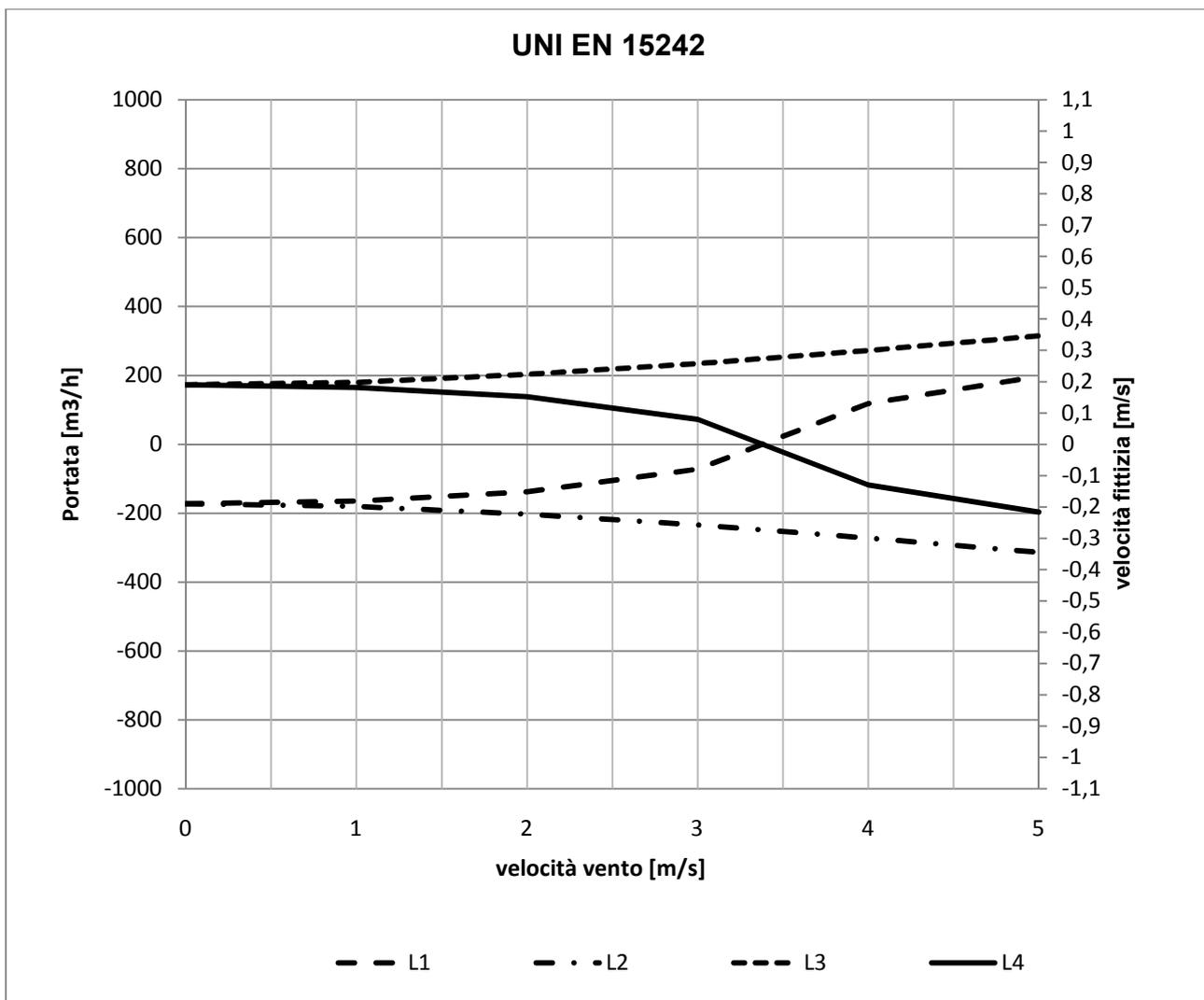
Area prese d'aria:	0,25m ²
Altezza prese d'aria:	0,5 m
Altezza da suolo prese d'aria:	L1:1m e L2:7 m
Esposizione al vento:	L1:sopravento L2:sottovento
Temperature interna:	20°C
Cp sopravento:	+0,8
sottovento:	-0,2
Cd trnflow:	0,75
Temperatura esterna:	22°C

Variabili:

Velocità del vento: da 0 a 5 m/s, incremento di 1 m/s.

Risultati:





Commenti:

Bisogna precisare che questa doppia simulazione prevede una temperatura esterna maggiore di quella interna, condizione opposta alla simulazione n°8, dunque i paragoni sono fuorvianti. Bisogna anche ammettere che il modello iterativo ha la possibilità di simulare n aperture come Trnflow.

Osservando questi due grafici è possibile analizzare il medesimo comportamento con la forzante termica che induce un flusso discendente per velocità basse e che tende ad annullarsi per velocità elevate. L'inversione dei fenomeni avviene a diverse temperature: in TrnFlow a circa m/s e nella normativa a 3,3m/s per le condizioni al contorno sopra descritte.

Inoltre le portate della normativa assumono sempre valori inferiori.

6.14 Simulazione n°14

Descrizione: Confronto tra le portate passanti attraverso le fessure di un serramento chiuso. Variazione della velocità del vento. Simulazione con 2 serramenti posti alla stessa altezza da terra.

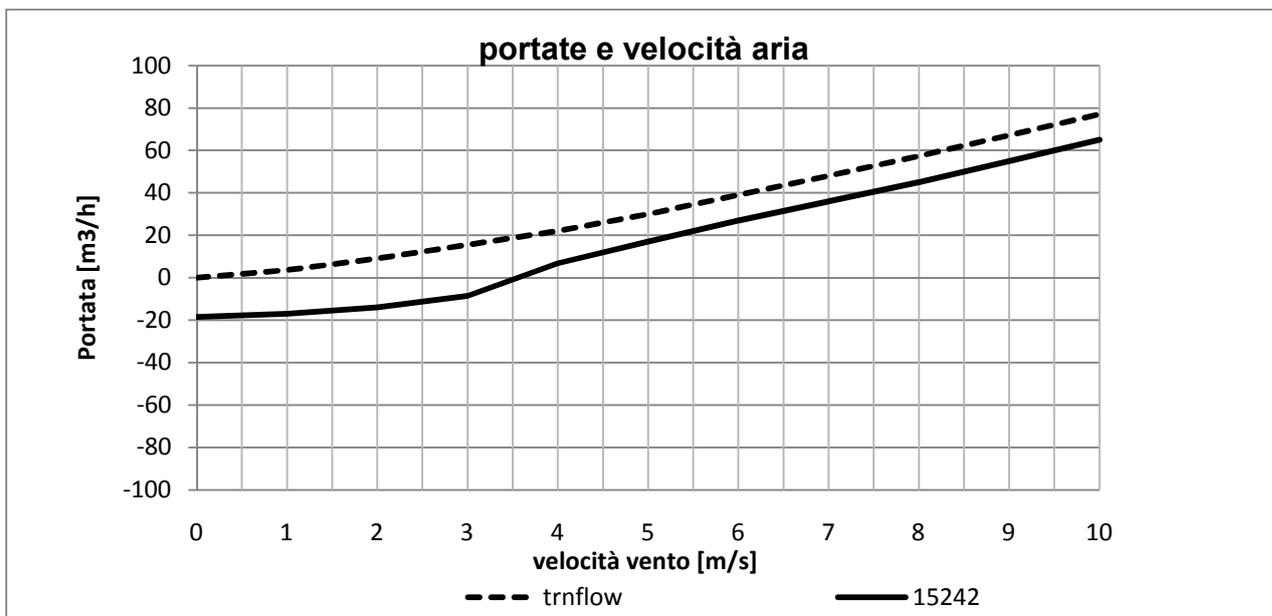
Condizioni al contorno:

C_{leak} :	7.85 l/s che corrisponde a $C_s=0,009$ kg/s
Altezza prese d'aria:	0,5 m
Altezza da suolo prese d'aria:	L1:1m e L2:7 m
Esposizione al vento:	L1:sopravento L2:sottovento
Temperature interna:	20°C
C_p sopravento:	+0,8
sottovento:	-0,2
esponente n del moto:	0.667
Temperatura esterna:	25°C

Variabili:

Velocità del vento: da 0 a 5 m/s, incremento di 1 m/s.

Risultati:



Commenti:

Il serramento simulato è riconducibile ad una finestra di area 2x1 m con perimetro apribile di 7m.

Per il dato di Cleak è stato fatto riferimento a valori presenti in normativa e in letteratura. [inserire riferimento]. Nel grafico sono riportati soltanto i valori in ingresso da L1 essendo uguali e opposti a quelli in uscita da L2.

I valori sono più simili perché il dato in partenza è proprio una portata e diversamente sarebbe diverso; ciò l'andamento esponenziale della normativa non avviene così regolarmente per velocità del vento comprese tra 2 e 4 m/s.

6.15 Simulazione n°15

Descrizione: : Confronto tra le portate passanti attraverso le fessure di un serramento chiuso. Variazione della differenza di temperatura. Simulazione con 4 serramenti posti a due a due a 1 e 7 metri di altezza e su pareti esterne sottovento e sopravento.

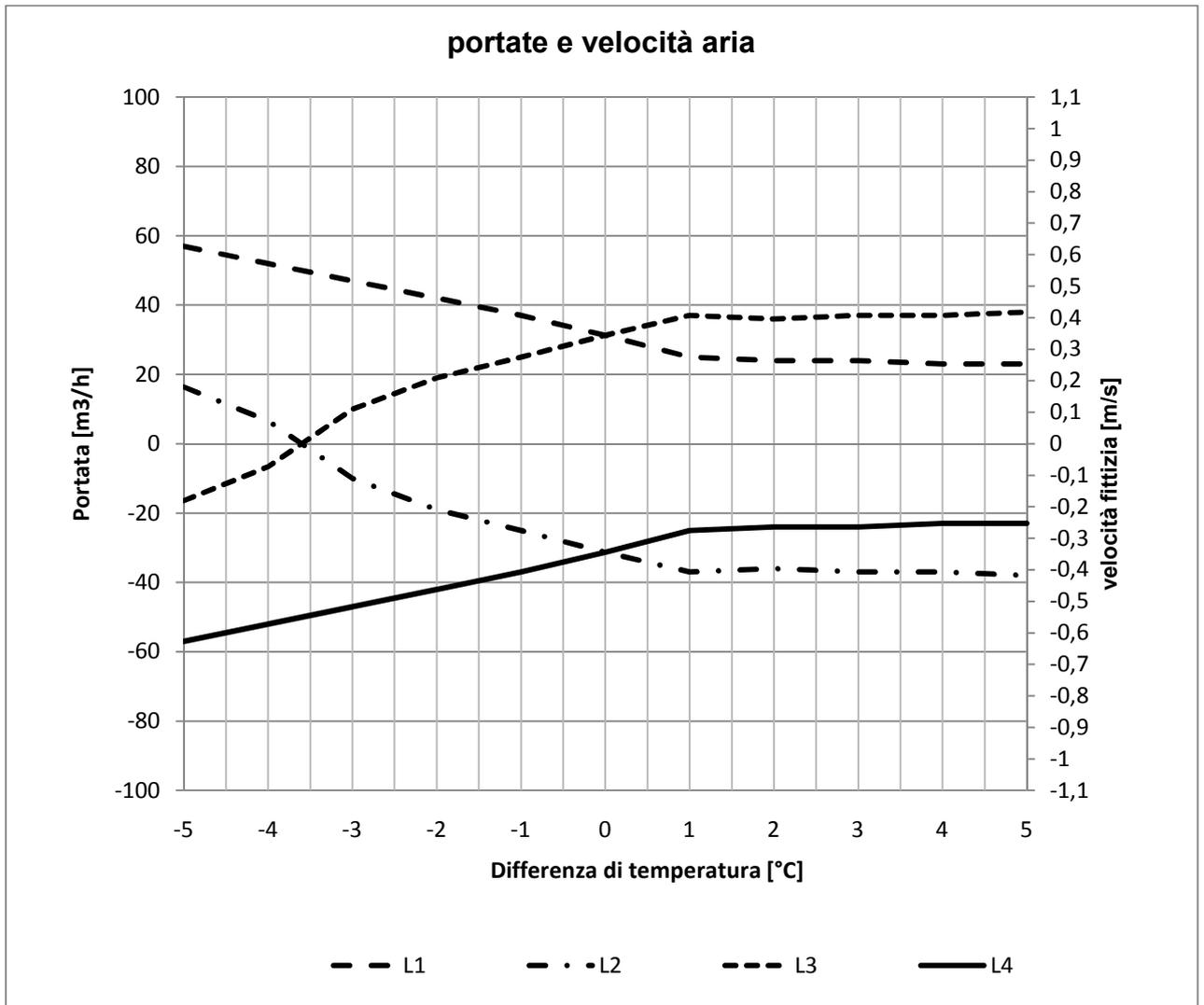
Condizioni al contorno:

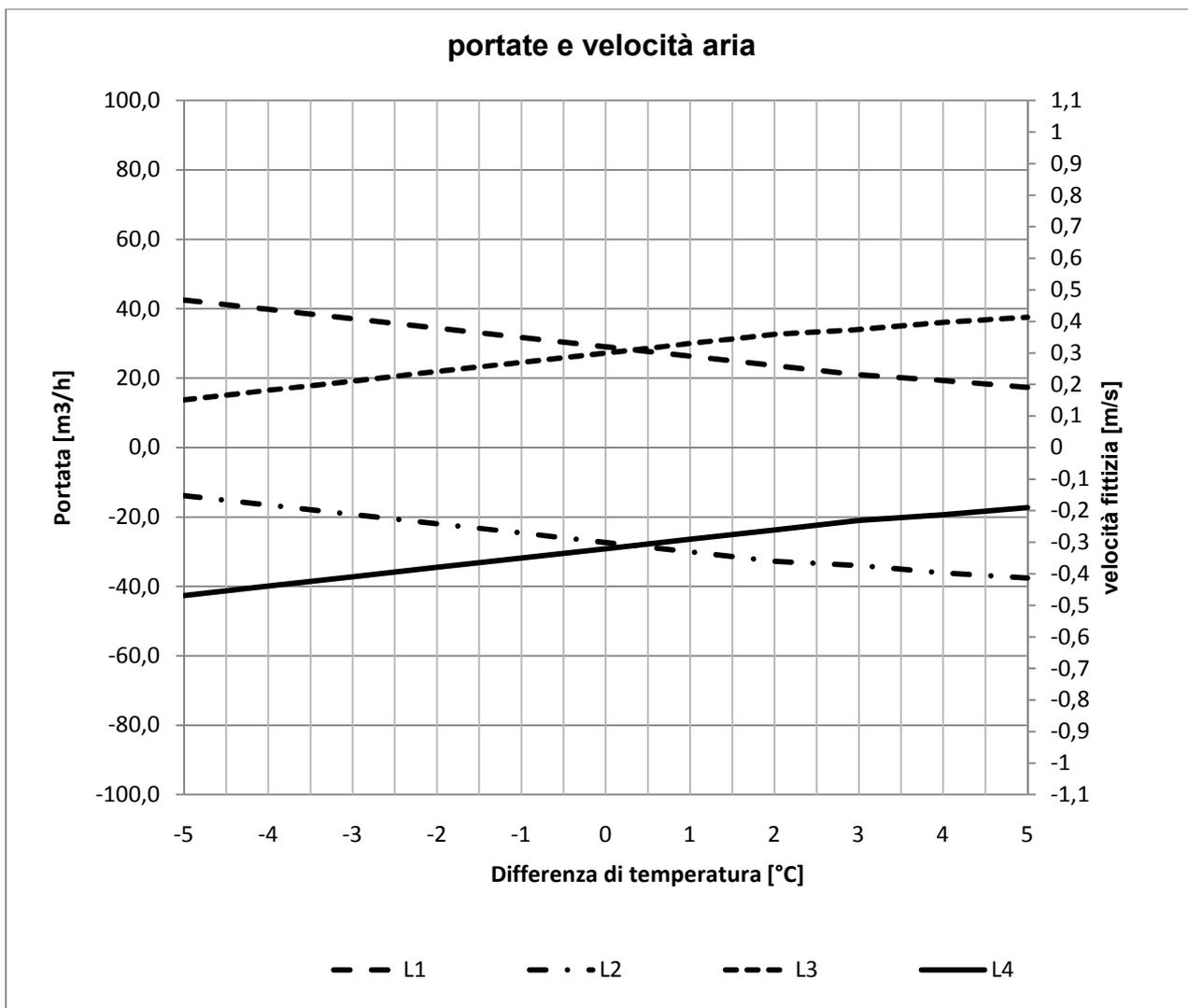
C_{leak}	7.85 l/s che corrisponde a $C_s=0,009$ kg/s	
Altezza da suolo prese d'aria:	L1,L2:1m e L3,L4:7 m	
Esposizione al vento:	L1,L3:sopravento	L2,L4:sottovento
Temperature interna:	20°C	
C_p sopravento:	+0,8	
sottovento:	-0,2	
esponente n del moto:	0.667	
Velocità dell'aria:	5 m/s	

Variabili:

Temperatura esterna: da 15°C a 25°C con incremento di 1°C

Risultati:



**Commenti:**

Nel secondo grafico è facile osservare un andamento lineare delle portate così come espresso nella simulazione n°11 per le prese d'aria. Infatti il calcolo utilizzato è il medesimo. In prossimità dell'annullarsi della forzante termica il contributo del vento eguaglia le portate in tutte e quattro le aperture. Ovviamente in quelle sopravento sono rappresentate positive perché entranti nell'edificio e viceversa in quelle sottovento negative perché uscenti.

Un'analisi differente per Trnflow, infatti notiamo un comportamento abbastanza asintotico per differenze di temperatura esterno-interno maggiori di 1°C come nel caso proposto dalle simulazioni n°6 e n°11. Anche in questo caso per l'annullarsi della forzante termica avviene l'inversione delle portate tra ascendenti e discendenti. Inoltre è stato anche individuato il punto di annullamento reciproco della forzante vento e stack nelle fessure L2 e L3 per differenze di temperatura pari a circa -3,6°C.

7. Conclusioni

Alla luce del lavoro svolto in questi mesi riguardante l'analisi del campione di edifici industriali e la successiva serie di simulazioni con i modelli proposti dalla normativa UNI EN 15242 e dall'applicazione Trnflow del software Trnsys è possibile formulare diverse conclusioni.

Così come espresso dai risultati posso dire con certezza che in alcuni casi il software si comporta analogamente al modello normativo ma il campo di analisi deve essere molto limitato. Infatti in molti casi i risultati si discostano notevolmente pur avendo lo stesso andamento, come nel caso delle simulazioni con variazione della velocità del vento.

In altri casi ancora il fenomeno fisico è descritto con procedure totalmente diverse come nel caso della variazione di temperatura, oppure per le aperture a basculante e per basse velocità del vento (dove predomina la forzante temperatura).

Si consiglia pertanto uno sviluppo futuro analizzando la ventilazione meccanica e passiva o ibrida perché si ritiene fondamentale questo aspetto nell'analisi degli edifici industriali, pur tenendo in considerazione che la norma UNI EN 15242 non si applica alla ventilazione dei processi industriali e quindi potrebbe presentare un forte limite. Si auspica inoltre che la stessa analisi possa essere replicata per l'intero "funzionamento" dell'edificio nel corso dell'anno solare per poi avere una ricaduta nel calcolo del fabbisogno energetico: obiettivo primario della normativa in questione.

Infine sarebbe interessante sviluppare delle analisi anche per capannoni non regolari in pianta o parti di edificio dove le condizioni dell'aria non avvengono in maniera così semplificata come proposta da entrambi i modelli visti nel lavoro di tesi. Si potrebbe pertanto fare riferimento a pubblicazioni scientifiche o a software di analisi fluidodinamica.

Bibliografia

- (1) AWBI H. , *Ventilation of Building* , second edition , 2003 , pp 97-136
- (2) ASTM COMMITTEE E-6 , *Measured air leakage of building* , 1984
- (3) CHEVEREAU A. , Risparmio energetico & ventilazione naturale , PhD thesis , Politecnico di Milano, 2005
- (4) Trnflow rev. 1.3 User manual, 2006
- (5) UNI EN 15242
- (6) UNI EN 15241
- (7) UNI EN 13779
- (8) UNI EN 13829
- (9) UNI EN 13465
- (10) UNI EN 13141-1
- (11) UNI EN13141-2
- (12) UNI EN 13790 – Dati Climatici
- (13) R. Zmeureanu, P.E., T. Stathopoulos, P.E., Fellow, ASCE, M. E. D. Schopmeijer, F. Siret, and J. Payer , *Measurements of air leakage through revolving doors of institutional building*, Journal of architectural engineering, 12/2001

ALLEGATO A. Schede degli edifici

Premessa alla presentazione dei dati

Nelle prossime pagine vengono presentati i dati osservati per ogni edificio così come espresso dallo step 3 del capitolo 5. Dalla rappresentazione grafica, qui sotto riportata nella sua forma generica, si possono ricavare le percentuali delle aperture suddivise per esposizione (a sinistra) e per fascia di analisi da 2 metri (a destra). Si può inoltre osservare la direzione geografica e ricavare dunque quella del vento prevalente. All'interno della pianta simbolica del fabbricato, delimitata dalle facciate numerate progressivamente da 1 a 4, sono riportate le partizioni interne che incidono sostanzialmente sulle caratteristiche del vento passante.

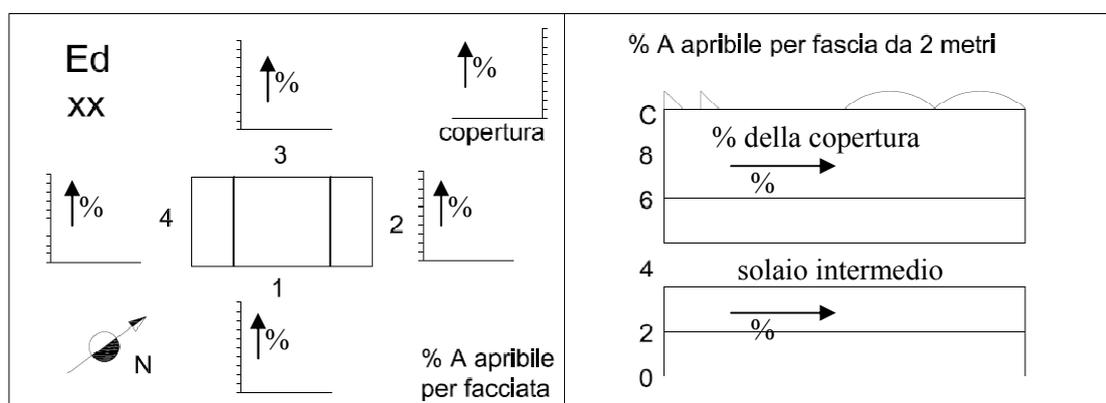
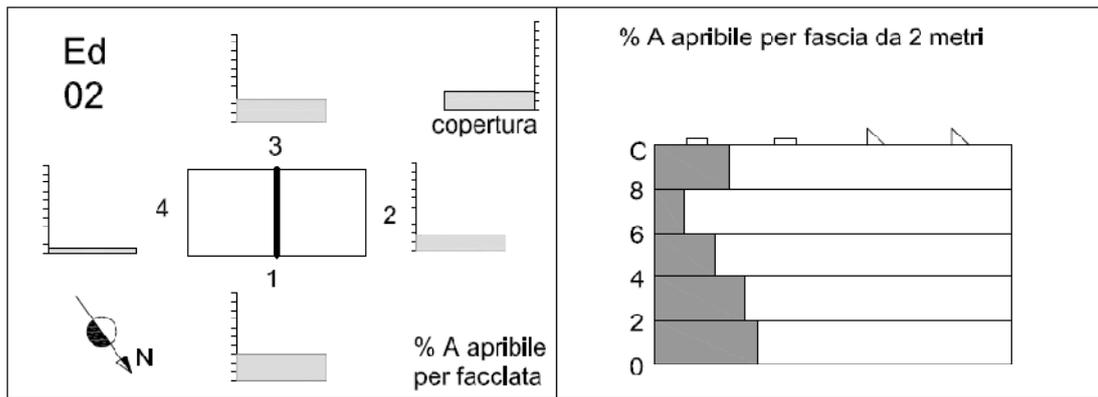


Figura 5: simbologia utilizzata nella rappresentazione degli edifici

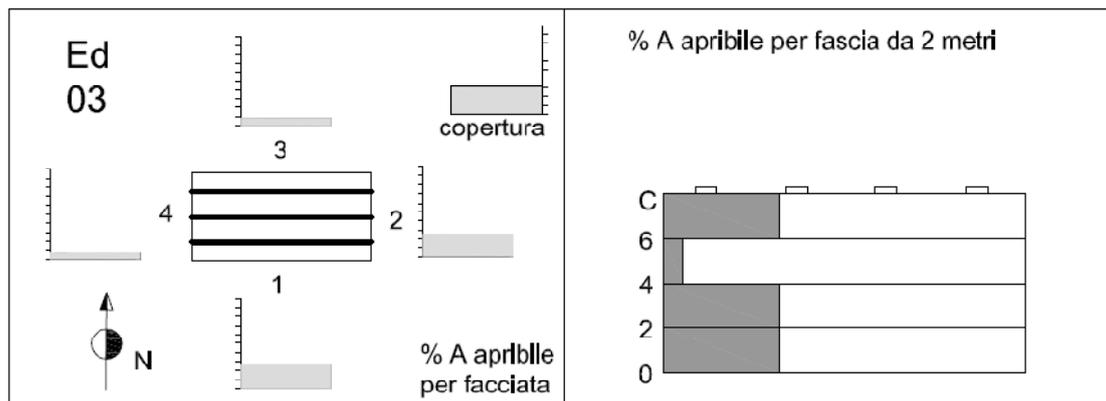
Osservando il riquadro a destra in alcuni casi è possibile osservare una netta separazione tra alcune fasce da 2 metri. Con questa simbologia si rappresentano i solai intermedi. In sommità al fabbricato sono rappresentate le aperture simbolicamente così come espresso dal paragrafo 4.1.

Nella tabella che si trova sotto alla simbologia sono riportati i valori delle percentuali espresse graficamente. Si sono calcolati anche i rapporti tra l'area apribile e l'area pavimentata dell'edificio.

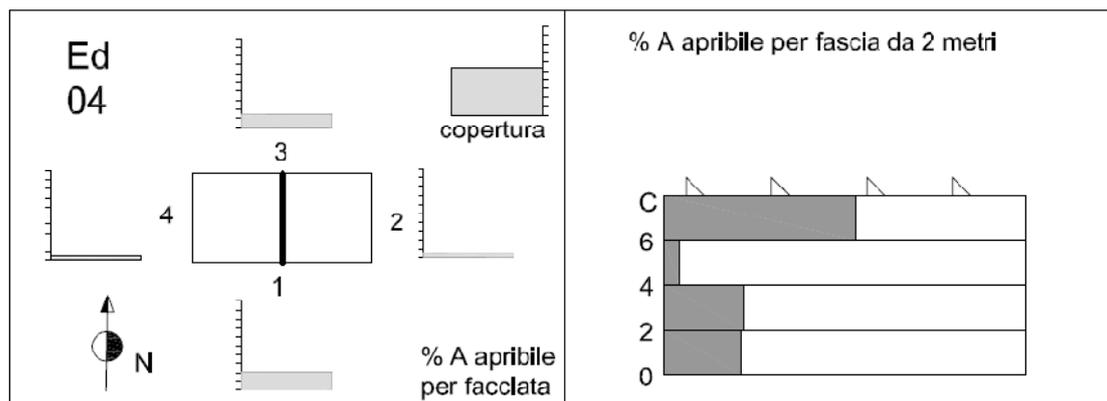
Vengono anche riportate le informazioni riguardante i perimetri apribili, l'area e i perimetri che si potrebbero aprire con interventi di modeste entità agendo sui serramenti già presenti.



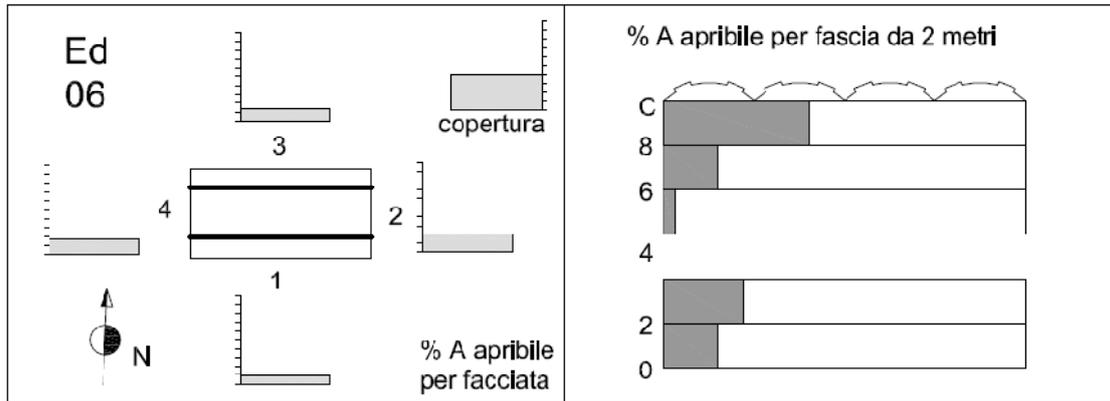
Edificio 02		A pianta		5123 m2		
Facciata	A w	A w / A w tot	A w / A pianta	A w / A f tot	Perim apr / A w	Perim apr / Perim tot
1	87.2	31%	1.70%	71%	2.79	100%
2	51.0	18%	1.00%	63%	3.14	79%
3	68.3	24%	1.33%	63%	1.23	54%
4	17.3	6%	0.34%	84%	1.74	82%
copertura	58.8	21%	1.15%	32%	2.00	26%
Tot.	282.5	100%	5.52%			
Media				62%	2.18	68%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-
Sezione	A w	A w / A w tot	A w / A pianta	A w / A f tot	Perim apr / A w	Perim apr / Perim tot
0-2 m	82.96	29%	1.62%	85%	1.26	100%
2-4 m	69.536	25%	1.36%	74%	2.43	80%
4-6 m	49.15	17%	0.96%	50%	3.34	86%
6-8 m	22.09	8%	0.43%	50%	3.08	96%
copertura	58.8	21%	1.15%	32%	2.00	26%
Tot.	282.5	100%	5.52%			
Media				58%	2.42	77%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-



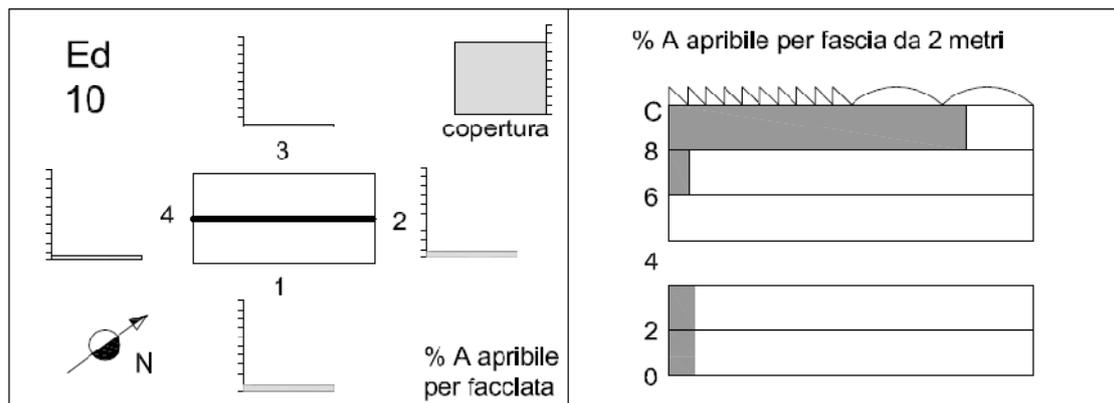
Edificio 03						
		A pianta		94736	m2	
Facciata	A w	A w / A w tot	A w / A pianta	A w / A f tot	Perim apr / A w	Perim apr / Perim tot
1	62.0	27%	0.07%	33%	3.00	40%
2	57.9	25%	0.06%	63%	7.32	89%
3	20.0	9%	0.02%	100%	1.02	100%
4	17.9	8%	0.02%	78%	1.42	67%
copertura	72.0	31%	0.08%	100%	2.00	100%
Tot.	229.8	100%	0.24%			
Media				75%	2.95	79%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-
Sezione	A apribile	A w / A w tot	A w / A pianta	A w / A f tot	Perim apr / A w	Perim apr / Perim tot
0-2 m	74.1	32%	0.08%	67%	3.30	80%
2-4 m	72.66	32%	0.08%	37%	4.60	57%
4-6 m	11	5%	0.01%	88%	7.00	73%
6-8 m	0	0%	0.00%	-	-	-
copertura	72.0	31%	0.08%	100%	2.00	100%
Tot.	229.8	100%	0.24%			
Media				73%	4.23	77%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-



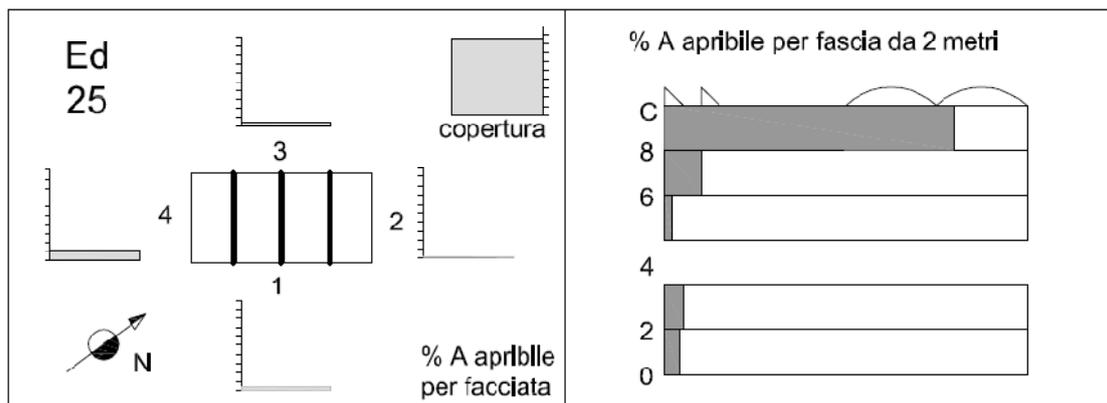
Edificio 04		A pianta		31736	m2		
Facciata	A w	A w/ A w tot	A w/ A pianta	A w/ A f tot	Perim apr/ A w	Perim apr/ Perim tot	
1	48.0	21%	0.15%	100%	0.50	100%	
2	13.9	6%	0.04%	100%	3.63	100%	
3	32.0	14%	0.10%	100%	0.50	100%	
4	11.0	5%	0.03%	100%	3.66	100%	
copertura	120.0	53%	0.38%	25%	3.00	38%	
Tot.	224.9	100%	0.71%				
Media				85%	2.26	88%	
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-	
Sezione	A w	A w/ A w tot	A w/ A pianta	A w/ A f tot	Perim apr/ A w	Perim apr/ Perim tot	
0-2 m	47.2	21%	0.15%	100%	0.84	100%	
2-4 m	49.22	22%	0.16%	100%	1.18	100%	
4-6 m	8.5	4%	0.03%	100%	3.88	100%	
6-8 m	0	-	0.00%	-	-	-	
copertura	120.0	53%	0.38%	25%	3.00	38%	
Tot.	224.9	100%	0.71%				
Media				81%	2.23	84%	
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-	



Edificio 06		A pianta		15444 m2		
Facciata	A w	A w/ A w tot	A w/ A pianta	A w/ A f tot	Perim apr/ A w	Perim apr/ Perim tot
1	33.5	9%	0.22%	71%	1.84	77%
2	70.6	20%	0.46%	38%	2.49	48%
3	50.0	14%	0.32%	83%	1.92	100%
4	59.2	17%	0.38%	34%	2.60	39%
copertura	144.0	40%	0.93%	100%	1.00	100%
Tot.	357.3	100%	2.31%			
Media				65%	1.97	73%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-
Sezione	A w	A w/ A w tot	A apr/ A pianta	A apr/ A f tot	Perim apr/ A w	Perim apr/ Perim tot
0-2 m	52.2	15%	0.34%	100%	1.50	100%
2-4 m	76.523	21%	0.50%	34%	2.09	38%
4-6 m	10	3%	0.06%	100%	0.90	100%
6-8 m	74.6	21%	0.48%	41%	3.22	55%
copertura	144.0	40%	0.93%	100%	1.00	100%
Tot.	357.3	100%	2.31%			
Media				75%	1.74	79%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-



Edificio 10		A pianta		9918	m2	
Facciata	A w	A w/ A w tot	A w/ A pianta	A w/ A f tot	Perim apr/ A w	Perim apr/ Perim tot
1	31.5	6%	0.32%	82%	2.93	81%
2	42.0	8%	0.42%	100%	1.00	100%
3	9.0	2%	0.09%	50%	6.00	67%
4	20.3	4%	0.20%	90%	1.60	81%
copertura	450.0	81%	4.54%	83%	2.33	69%
Tot.	552.8	100%	5.57%			
Media				81%	2.77	80%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-
Sezione	A w	A w/ A w tot	A w/ A pianta	A w/ A f tot	Perim apr/ A w	Perim apr/ Perim tot
0-2 m	39	7%	0.39%	100%	1.15	100%
2-4 m	37	7%	0.37%	100%	1.49	100%
4-6 m	0	0%	0.00%			
6-8 m	26.75	5%	0.27%	60%	4.52	68%
copertura	450.0	81%	4.54%	83%	2.33	69%
Tot.	552.8	100%	5.57%			
Media				86%	2.37	84%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-



Edificio 25						
		A pianta		20495	m2	
Facciata	A w	A w/ A w tot	A w/ A pianta	A w/ A f tot	Perim apr/ A w	Perim apr/ Perim tot
1	25.0	4%	0.12%	100%	0.80	100%
2	4.0	1%	0.02%	100%	3.00	100%
3	25.0	5%	0.12%	76%	0.80	63%
4	68.0	12%	0.33%	100%	3.32	90%
copertura	476.0	86%	2.32%	100%	0.76	100%
Tot.	598.0	108%	2.92%			
Media				95%	1.74	90%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-
Sezione	A w	A w/ A apr tot	A w/ A pianta	A w/ A f tot	Perim apr/ A w	Perim apr/ Perim tot
0-2 m	24	4%	0.12%	100%	1.25	100%
2-4 m	28	5%	0.14%	78%	0.86	39%
4-6 m	10	2%	0.05%	100%	1.40	100%
6-8 m	60	10%	0.29%	100%	3.50	100%
copertura	476.0	80%	2.32%	100%	0.76	100%
Tot.	598.0	100%	2.92%			
Media				96%	1.55	88%
U.M.	m2	-	-	-	m/m2	-

**ALLEGATO B. Il modello di calcolo proposto dalla
UNI EN 15242**

B.1 Procedura di calcolo di porte e finestre

Bisogna premettere che questo calcolo, proposto nel paragrafo 6.5 della presente normativa, si applica solamente ad un problema con flusso di aria monodirezionale, cioè con un singolo impatto sull'edificio.

La portata entrante è espressa dalla seguente formula:

$$q_{v \text{ airing}} = 3.6 \cdot 500 \cdot A_{\alpha w} \cdot V^{0.5} \quad [m^3/h]$$

dove A_{ow} corrisponde all'area della finestra aperta e V alla velocità del vento calcolata nel seguente modo:

$$V = C_t + C_w \cdot V_{met}^2 + C_{st} \cdot H_w \cdot |\vartheta_i - \vartheta_e|$$

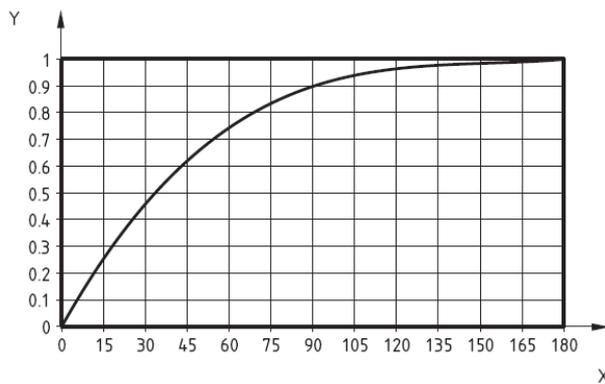
con $C_t=0.01$, $C_w=0.001$, V_{met} rilevata all'altezza di 10 metri, $C_{st}=0.0035$.

Per finestre con apertura a basculante il calcolo si complica nel modo seguente:

$$A_{ow} = C_{\alpha w}(\alpha) \cdot A_w$$

dove A_w è la finestra totalmente aperta e C_k si calcola con l'approssimazione polinomiale qui sotto riportata in funzione dell'angolo di apertura α .

$$C_{\alpha w}(\alpha) = 2.60 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 - 1.19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 1.86 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha$$



α [°] (X)	$C_k(\alpha)$ [-] (Y)
0	0.00
5	0.09
10	0.17
15	0.25
20	0.33
25	0.39
30	0.46
45	0.62
60	0.74
90	0.90
180	1.00

Il calcolo presentato per un singolo istante deve essere applicato al caso reale di funzionamento delle aperture inserendo la variabile tempo. Un buon intervallo di analisi è quello di 1 ora.

B.2 Procedura di calcolo di infiltrazioni ed exfiltrazioni

Per ciascun componente viene calcolata la differenza di pressione interno-esterno dello stesso:

$$dP_{comp} = P_{e,comp} - P_{i,comp}$$

$$P_{e,comp} = \rho_{air,ref} \left(0.5 \cdot C_{p,comp} \cdot V_{site}^2 - h_{comp} \cdot g \cdot \right) \frac{T_{e,ref}}{T_e}$$

$$P_{i,comp} = P_i - \rho_{air,ref} \cdot h_{comp} \cdot g \frac{T_{e,ref}}{T_i}$$

$\rho_{air,ref} = 1.22 \text{ kg/m}^3$
 $T_{ref}=283 \text{ K.}$

P_i è la pressione relativa interna ed incognita, di seguito viene spiegato il suo calcolo.

Come possiamo notare entrambe le equazioni sono date da una differenza tra due pressioni, una dovuta all'effetto del vento e l'altra alla temperatura. Da osservare come queste pressioni siano tutte relative, cioè riferite alla pressione dell'aria esterna a quota zero.

Si calcola così la portata in funzione proprio della differenza di pressione.

Per fessure $q_{v,leak} = C_{leak} \cdot sign(dP) \cdot |dP|^{0,667}$ $sign(dP) = \pm 1$
a seconda del segno di dP

Per prese d'aria $q_{v,vent} = C_{vent} \cdot sign(dP) \cdot |dP|^{0,5}$

Come è noto per il principio di conservazione della massa di aria secca, la somma di tutti i flussi deve risultare zero:

$$q_{v \text{ supply}} + q_{v \text{ cowl}} + q_{v \text{ comb}} + \sum q_{v-leak} + \sum q_{v-vent} = 0$$

allora è facile immaginare che è necessario fare dei tentativi con irp differenti affinché si rispetti questa legge. Nel nostro caso i tentativi cesseranno quando il valore trovato rapportato al valor medio tra la portata in ingresso e in uscita sarà minore dell'1%.

$$ERR = \frac{\sum q_v}{\left(\frac{q_v^+ + q_v^-}{2}\right)} < 1\%$$

Si ottiene così una serie di flussi, tutti in funzione del medesimo valore di pressione interna.

Modello semplificato

1. Calcolo del flusso d'aria attraverso l'involucro dovuto alla forzante termica (stack) e all'impatto del vento senza considerare l'azione della ventilazione meccanica o dei flussi di combustione.

$$q_{v,st} = 0.0146 \cdot q_{4Pa} (h_{stack} \cdot |T_e - T_i|)^{0.667}$$

$$q_{v,wind} = 0.0769 \cdot Q_{4Pa} (0.75 \cdot v_{site}^2)^{0.667}$$

$h_{stack} = 0.7 H_{locale}$

2. Calcolo della risultante dei flussi (ad una prima approssimazione la portata "infiltrata" è uguale alla somma di q_{sw} e alla differenza tra l'aria esausta e "meccanica" calcolate senza forzante termica o del vento) . Questo metodo non prende in considerazione il fatto che se c'è una differenza tra esausta e meccanica si creerebbe una depressione o una sovrappressione con conseguente riduzione di $q_{w,sw}$.

$$q_{v,sw} = \max(q_{v,st}; q_{v,wind}) + \frac{0.14 (q_{v,st} \cdot q_{v,wind})}{q_{4Pa}}$$

ad una prima approssimazione $q_{v,inf} \cong q_{v,sw}$

$$q_{v,inf} = \max(0; -q_{v,diff}) + q_{v,sw} \quad \text{con} \quad q_{v,diff} = q_{v,supply} + q_{v,extr} + q_{v,comb}$$

flussi positivi: entranti nella zona

Come spiegato prima questo procedimento non tiene in considerazione dell'interazione del sistema di ventilazione. Per stimare questo fenomeno (qv-infred) è possibile utilizzare la seguente equazione:

$$q_{v,infred} = \max \left(q_{v,sw}; \left[\frac{q_{v,st} \cdot \left| \frac{q_{v,diff}}{2} \right| + q_{v,wind} \cdot \left| \frac{2 \cdot q_{v,diff}}{3} \right|}{q_{v,st} + q_{v,wind}} \right] \right)$$

$$q_{v,inf} = \max(0; q_{v,sw} - q_{v,infred})$$

3. Determinazione del valore medio del flusso. Integrando nel tempo (sommatoria) i flussi così ottenuti si ottiene il valore medio. Per un calcolo orario si considera un solo stato, per un calcolo mensile bisogna considerare i periodi di occupazione e azione del vento. Inoltre è necessario utilizzare solo una forzante di temperatura interna- esterna mensile.

$$q_{v,tot} = \sum_i q_{v,tot,i} \cdot f_i$$

B.3 Caratteristiche delle fessure (leakages)

Le caratteristiche delle infiltrazioni attraverso fessure o leakages si ricavano sperimentalmente con test come proposto nel paragrafo 3.4. I risultati ottenuti con i test vengono espressi comunemente secondo questi tre parametri:

- la portata in m³/h per m² di involucro esterno
- i ricambi orari in volumi/h
- la portata in m³/h per m² di area utile

Le tabelle seguenti mostrano dei valori medi classificati in base al livello di leakages (low, average, high) ed in base alla tipologia edilizia (single family, multi family, industrial). Allo stesso tempo viene precisato che questi valori sono indicativi e possono discostarsi sensibilmente dalla realtà a seconda del panorama costruttivo nazionale.

		m ³ /h per m ² of outer envelope (exp n = 0,667)		
		Q4Pa	Q10Pa	Q50Pa
single family	leakages level			
	low	0,5	1	2,5
	average	1	2	5
multi family ; non residential except industrial	leakages level			
	low	0,5	1	2,5
	average	1	2	5
industrial	leakages level			
	low	1	2	5
	average	2	3,5	10
	high	4	7	20

		n (vol.h) (exp n=0,667)			outer area/vol 1/m
		n4Pa	n10Pa	n50Pa	
single family	leakages level				
	low	0,4	0,8	1,9	0,75
	average	0,8	1,5	3,8	0,75
multi family ; non residential except industrial	leakages level				
	low	0,2	0,4	1,0	0,4
	average	0,4	0,8	2,0	0,4
industrial	leakages level				
	low	0,3	0,6	1,5	0,3
	average	0,6	1,1	3,0	0,3
	high	1,2	2,1	6,0	0,3

	leakages level	m ³ /h per m ² of floor area (exp n = 0,667)			outer area / floor area 1/m
		Q4Pa	Q10Pa	Q50Pa	
single family	low	0,9	1,8	4,5	1,8
	average	1,8	3,6	9,0	1,8
	high	3,6	6,3	18,0	1,8
multi family ; non residential except industrial	low	0,6	1,1	2,8	1,1
	average	1,1	2,2	5,5	1,1
	high	2,2	3,9	11,0	1,1
industrial	low	1,5	3,0	7,5	1,5
	average	3,0	5,3	15,0	1,5
	high	6,0	10,5	30,0	1,5

Figura 6: valori indicativi di test sperimentali [UNI EN 15242]

Da osservare per gli edifici industriali un rapporto di 0.3 per l'area di involucro sul Volume dell'edificio e un rapporto di 1.5 dell'Area dell'involucro sull'Area utile di pavimento.

Una volta ricavati i parametri di test è possibile calcolare il coefficiente C_{leak} che rappresenta il flusso alla pressione di 1 Pa:

$$C_{leak} = \frac{q_v(dp)}{50^n} [l/s] \quad \text{per } \Delta p \text{ superiore a } 50\text{Pa} \quad n = 0.65 \text{ di default}$$

$$C_{leak} = 0.278 \cdot \frac{n_{50} \cdot V}{50^n} [l/s] \quad \text{per } \Delta p \text{ inferiore a } 50\text{Pa}$$

In edifici industriali è consigliato l'utilizzo di metodi di test superiori a 50 Pa e dunque viene utilizzata la prima formula. In allegato D comunque sono riportate le tabelle di conversione tra i diversi sistemi di misura.

B.4 Caratteristiche delle prese d'aria (vents)

Per il calcolo del coefficiente per le ventilazioni C_{vent} è proposta la seguente formula:

$$C_{vent} = 1000 \cdot A_{vent} \cdot \left(\frac{2}{\rho}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{1}{\Delta p_{ref}}\right)^n \cdot C_D$$

B.5 Analisi della ripartizione delle infiltrazioni

Le infiltrazioni e le infiltrazioni dovute a alle fessure sono governate dal coefficiente C_{comp} come espresso sopra nella procedura. Questo coefficiente deriva da un'analisi sperimentale iniziale per l'intero edificio, successivamente viene ripartito analiticamente per ogni singola facciata (copertura compresa) come segue:

$$C_{leak,zone} = \sum C_{leak,facciate} + C_{leak,copertura}$$

entrambi i componenti dell'equazione si ricavano per media pesata sulle aree:

$$\sum C_{leak, facciate} = C_{leak, zone} \cdot \frac{A_{facciate}}{A_{facciate} + A_{copertura}}$$

$$C_{leak, copertura} = C_{leak, zone} \cdot \frac{A_{copertura}}{A_{facciate} + A_{copertura}}$$

poi viene divisa la facciata orizzontalmente in 2 settori di altezza $H_z/2$. Ad ogni settore viene assegnato un C_{leak} pari al 25 % del totale ripartito sulle facciate sia per la zona esposta al vento, sia per la zona protetta dal vento. La tabella sottostante riassume il concetto:

	Windward facade	Leeward facade	roof
Component height = 0,25 Hz	0,25 $C_{leak facade}$	0,25 $C_{leak facade}$	
Component height = 0,75 Hz	0,25 $C_{leak facade}$	0,25 $C_{leak facade}$	
Component height = Hz			$C_{leak roof}$

Figura 7: suddivisione dei leakages [UNI EN 15242]

Allo stesso tempo vengono definiti i C_{inlet} riguardanti le grandi aperture, l'unico problema è che non vengono utilizzati da nessuna parte nella normativa: per le "large opening" non si fa riferimento a C_{inlet} e per i vents esiste la procedura proposta nel paragrafo precedente.

	Windward facade	Leeward facade
Component height = 0,25 Hz	0,25 $C_{inlet facade}$	0,25 $C_{inlet facade}$
Component height = 0,75 Hz	0,25 $C_{inlet facade}$	0,25 $C_{inlet facade}$

Figura 8: valori di C_{inlet} [UNI EN 15242]

B.6 Analisi del vento e coefficienti di pressione C_p

L'intero paragrafo comprende le tre fasi che controllano la forzante del vento: velocità del vento a 10 m, divisione dell'edificio in tre parti, assegnazione dei C_p ad ognuna.

L'analisi del vento incidente sull'edificio proposto dalla normativa è una formula che converte i dati rilevati alla stazione meteorologica in base alle caratteristiche del terreno circostante ed alla presenza di eventuali schermature prodotte da edifici limitrofi.

La formula proposta è la seguente:

$$\frac{v_{site}}{v_{met}} = \frac{\ln\left(\frac{h_{met}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{site}}{z_0}\right)}$$

La normativa fornisce anche la presenza di un coefficiente α dovuto alla rugosità del terreno ed allo stesso tempo non definisce il significato di z_0 . Ho dunque ipotizzato un errore di scrittura e l'attribuzione a z_0 del significato appena descritto. Bisognerebbe capire se viene inteso un unico parametro da rapportare a h_1 e h_2 oppure è necessario individuare due parametri, uno per il terreno in sito e uno per la stazione meteo.

Tra le osservazioni a questa legge fisica la normativa propone delle restrizioni:

- è valida solo per venti rilevati ad altezze superiori di 60 m ed inferiori a 100 m dal suolo
- può essere applicata a venti di intensità superiore a 2 m/s
- può essere applicata ad edifici con altezza pari o superiore a $20 \cdot z_0$, con quest'ultimo corrispondente al parametro di rugosità del terreno in sito.

La divisione delle facciate proposta dalla normativa è riferita ad edifici con altezze elevate, infatti il primo settore è inferiore ai 15m, il secondo compreso tra 15m e 50m e il terzo oltre i 50 m.

Nel nostro caso, trattandosi di edifici relativamente bassi che raggiungono l'altezza massima di 8 metri, tutte le facciate verranno classificate nel primo settore con il termine di LOW.

Successivamente avviene anche una classificazione in base agli edifici circostanti, nelle nostre simulazioni verranno trascurate dato che le informazioni plani volumetriche non sono esaustive e dal rilievo fotografico è possibile osservare dei contesti fortemente urbanizzati e protetti dal vento. Si prenderà in considerazione dunque una schermatura elevata.

Facade part	Shielding	Dimensionless wind pressures C_p				
		Windward C_{p1}	Leeward C_{p2}	roof (depending on slope) C_{p3}		
				< 10°	10°-30°	> 30°
low	Open	+ 0,50	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20
	Normal	+ 0,25	- 0,50	- 0,60	- 0,50	- 0,20
	Shielded	+ 0,05	- 0,30	- 0,50	- 0,40	- 0,20
medium	Open	+ 0,65	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20
	Normal	+ 0,45	- 0,50	- 0,60	- 0,50	- 0,20
	Shielded	+ 0,25	- 0,30	- 0,50	- 0,40	- 0,20
High	Open	+ 0,80	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20

Figura 9: coefficienti di pressione del vento[UNI EN 15242]

E' facile osservare come siano definiti soltanto i coefficienti per la facciata sopravento (Windward), per quella sottovento (Leeward) e per la copertura. La direzione del vento non è presa in considerazione. L'unica approssimazione che si conosce tiene in conto di questa variazione è l'applicabilità del coefficiente C_p appena definito con un range di $\pm 60^\circ$ rispetto alla direzione del vento.

Se ci fossero state delle altezze più elevate, tali da permettere una divisione della facciata in due o tre parti, allora sarebbe stato possibile utilizzare diversi valori di C_p sulla medesima facciata a seconda dell'esposizione del settore.

Nei casi in cui si voglia simulare un edificio con flusso d'aria passante (cross ventilation) la classe di esposizione della facciata deve essere sempre OPEN e il valore del C_p della copertura pari a quello della facciata sottovento. Nel caso di edifici senza ventilazione passante è possibile tenere in considerazione la fluttuazione del vento con la variazione dei C_p da un massimo di +0.05 ad un minimo di -0.05.