

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

L'involucro dell'edificio nel corso degli anni ha subito un'evoluzione,



DSF (Double Skin Façade), (Print Centrosoyus, Le Corbusier, Mosca, 1928 Media Academy, 2000).



Lake Shore Drive, Mies van der Rohe, Chicago, 1951

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

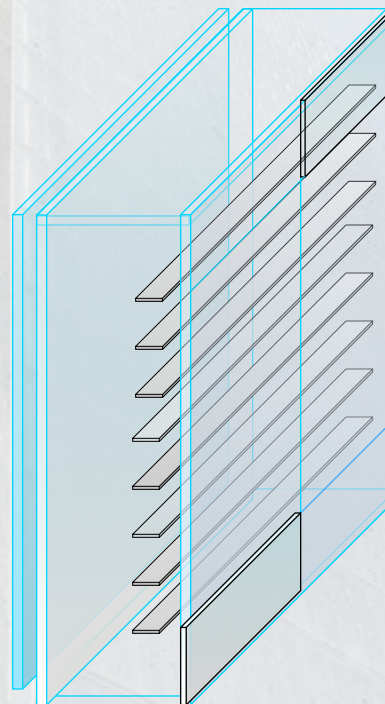
Le DSF sfruttano passivamente l'energia solare realizzando uno sdoppiamento della chiusura verticale e creando un'intercapedine d'aria. Gli elementi costituenti una DSF sono:

Pelle esterna realizzata con vetro di sicurezza;

Deflettori comandati manualmente o meccanicamente;

Pelle interna realizzata con vetrocamera basso emissivo;

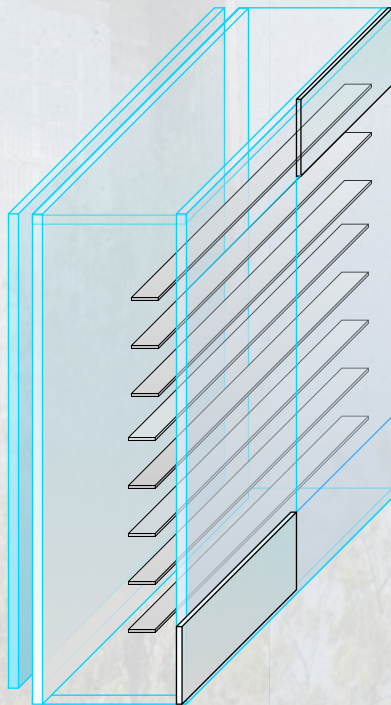
Veneziane fisse o su rullo, posizionate tra le due pelli.



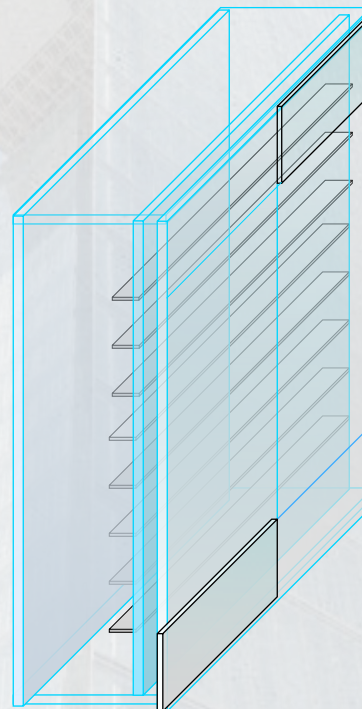
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Le facciate trasparenti a doppio guscio riducono l'incremento termico estivo e migliorano l'isolamento invernale.

Funzionamento della DSF interattivo



Funzionamento della DSF Attivo



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

Le tipologie di una DSF si differenziano in base alle caratteristiche fisiche dell'intercapedine e possono essere classificate in quattro sistemi:

Sistemi a tutta superficie:

La pelle esterna risulta completamente separata dall'edificio non essendoci partizioni né orizzontali né verticali tra le due pelli. L'intercapedine si sviluppa lungo tutta la superficie dell'involucro e la ventilazione della cavità è garantita dai deflettori posizionati alla base e alla sommità dell'edificio.

Business Center, Svezia



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

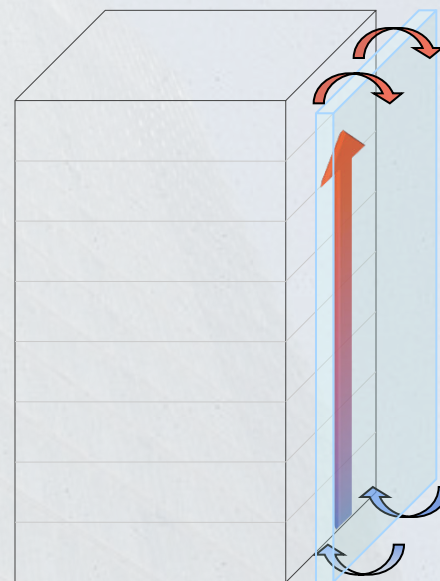
Sistemi a tutta superficie:

Vantaggi:

- Semplicità costruttiva;
- Nessun condizionamento estetico della facciata esterna;
- Alta efficienza termica;
- Attenuazione del livello sonoro esterno.

Svantaggi:

- Ventilazione naturale limitata attraverso le finestre;
- Trasmissione dei rumori da un piano all'altro;
- Gradiente verticale della temperatura nella cavità;
- Diffusione dei fumi in caso d'incendio.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Kista Science Tower, Svezia

Sistemi a canali orizzontali:

In questa tipologia di DSF si genera un'intercapedine longitudinale a canale corrispondente alla larghezza dell'edificio e all'altezza di un interpiano; ciascun modulo a canale possiede un deflettore per l'entrata e l'uscita dell'aria.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

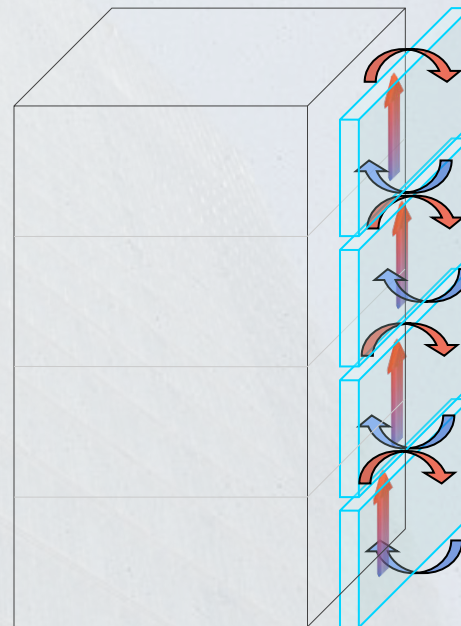
Sistemi a canali orizzontali:

Vantaggi:

- Migliore attenuazione sonora nelle cavità;
- Maggiore protezione contro l'incendio;
- Migliore efficienza del flusso d'aria;
- Posizionamento sfalsato delle aperture.

Svantaggi:

- Elevata differenza di pressione negli angoli dell'edificio;
- Differenza di pressione nel corridoio;
- Diffusione dei rumori tra un'unità abitativa e l'altra.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

ARAG 2000 Tower, Germania

Sistemi a celle con pozzo verticale:

In questa tipologia di DSF si genera un'alternanza di moduli ad altezza d'interpiano e un condotto verticale che si estende verticalmente per più piani. Ogni modulo è provvisto di deflettori per l'ingresso dell'aria e di aperture laterali per l'espulsione della stessa nel canale, il quale provvederà alla fuoriuscita dell'aria.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

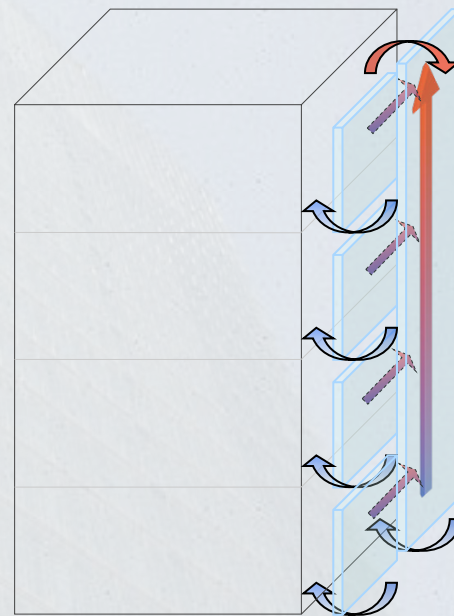
Sistemi a celle con pozzo verticale:

Vantaggi:

- Riduzione delle dispersioni termiche;
- Ventilazione naturale equilibrata;
- Rifornimento dell'aria in modo individuale per ogni cella;
- Incremento della differenza di pressione nel condotto;
- Attenuazione sonora.

Svantaggi:

- Surriscaldamento della pelle esterna;
- Difficoltà nella progettazione delle aperture di rifornimento;
- Diffusione dei fumi attraverso il condotto in caso d'incendio.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Print Media Academy, Germania
Sistemi a singole celle:

La facciata a doppia pelle con sistema a singole celle è costituita dall'aggregazione di celle vetrate con partizioni verticali in corrispondenza di ogni montante e setti orizzontali in corrispondenza dei solai. Ciascuna cella è dotata di propri deflettori per l'entrata e l'uscita dell'aria, con intercapedini indipendenti.

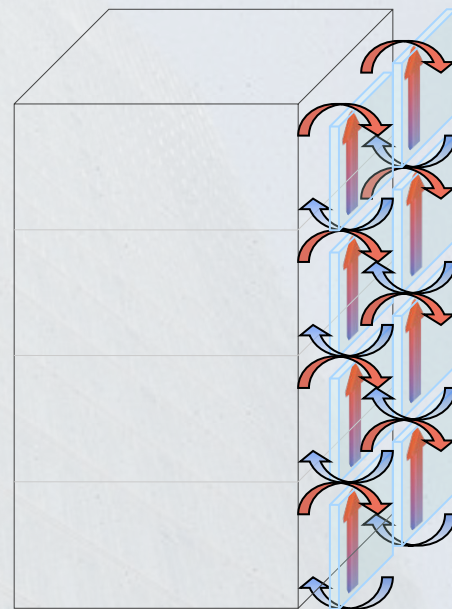


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Sistemi a singole celle:

Vantaggi:

- Ventilazione naturale attraverso le finestre interne;
- Adeguato isolamento acustico;
- Ridotti percorsi di ventilazione;
- Deflettori posizionati in modo sfalsato;
- Controllo individuale del singolo modulo;
- Compartimentazione ridotta:
 - Limitato aumento della temperatura nell'intercapedine;
 - Protezione acustica migliorata tra interpiani;
 - Controllo della propagazione del fuoco e dei fumi;
 - Buona ventilazione degli ambienti interni.

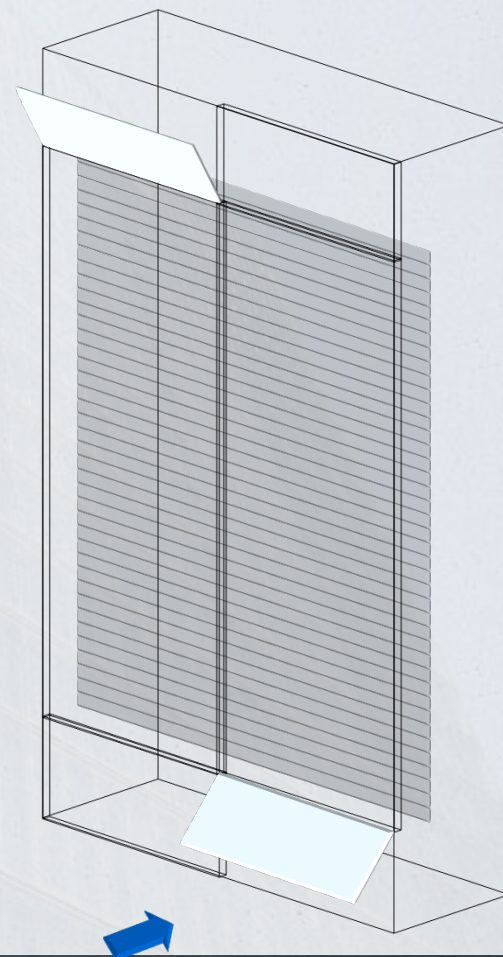


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Il funzionamento di una facciata a doppia pelle si differenzia a seconda della stagione considerata:

Stagione Estiva:

Durante l'estate le veneziane, all'interno di una DSF sono chiuse per impedire l'ingresso diretto della radiazione solare. I deflettori sono aperti e la differenza di temperatura tra l'aria dell'intercapedine e quella esterna genera il cosiddetto effetto *stack*. Il calore assorbito tra la lastra di vetro e le veneziane è rimosso attraverso la ventilazione notturna o meccanica.

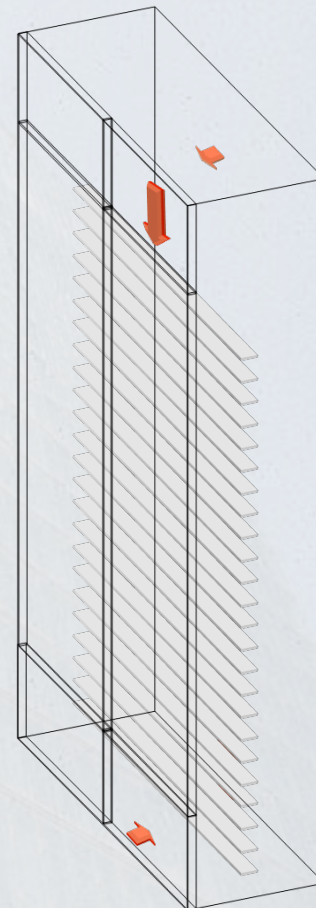


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

Stagione Invernale:

Durante l'inverno le veneziane, all'interno di una DSF sono aperte ed inclinate a 60° in modo tale da consentire l'ingresso della radiazione solare e di conseguenza l'accumulo di calore all'interno della cavità, mentre i deflettori chiusi. Si verificano gradienti termici positivi nell'intercapedine, scambio di calore con le superfici interne e benessere termico migliorato.



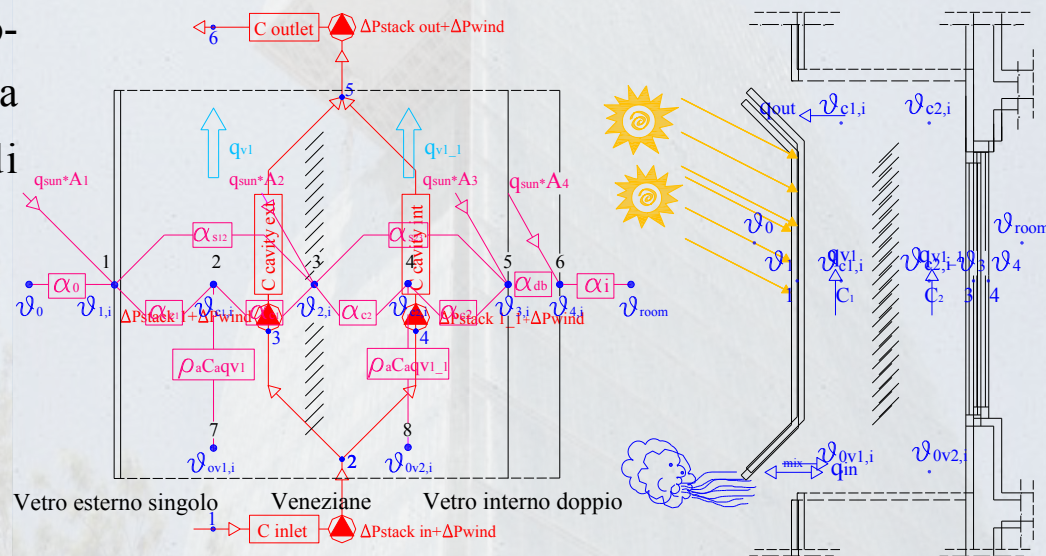
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Le interazioni tra la facciata a doppia pelle con le condizioni climatiche e il benessere termico interno sono state simulate utilizzando un modulo di Matlab, Simulink, attraverso la definizione di un algoritmo di calcolo che comprende:

1. Modellazione fisico-matematica costituita dall'interazione di due sottosistemi:

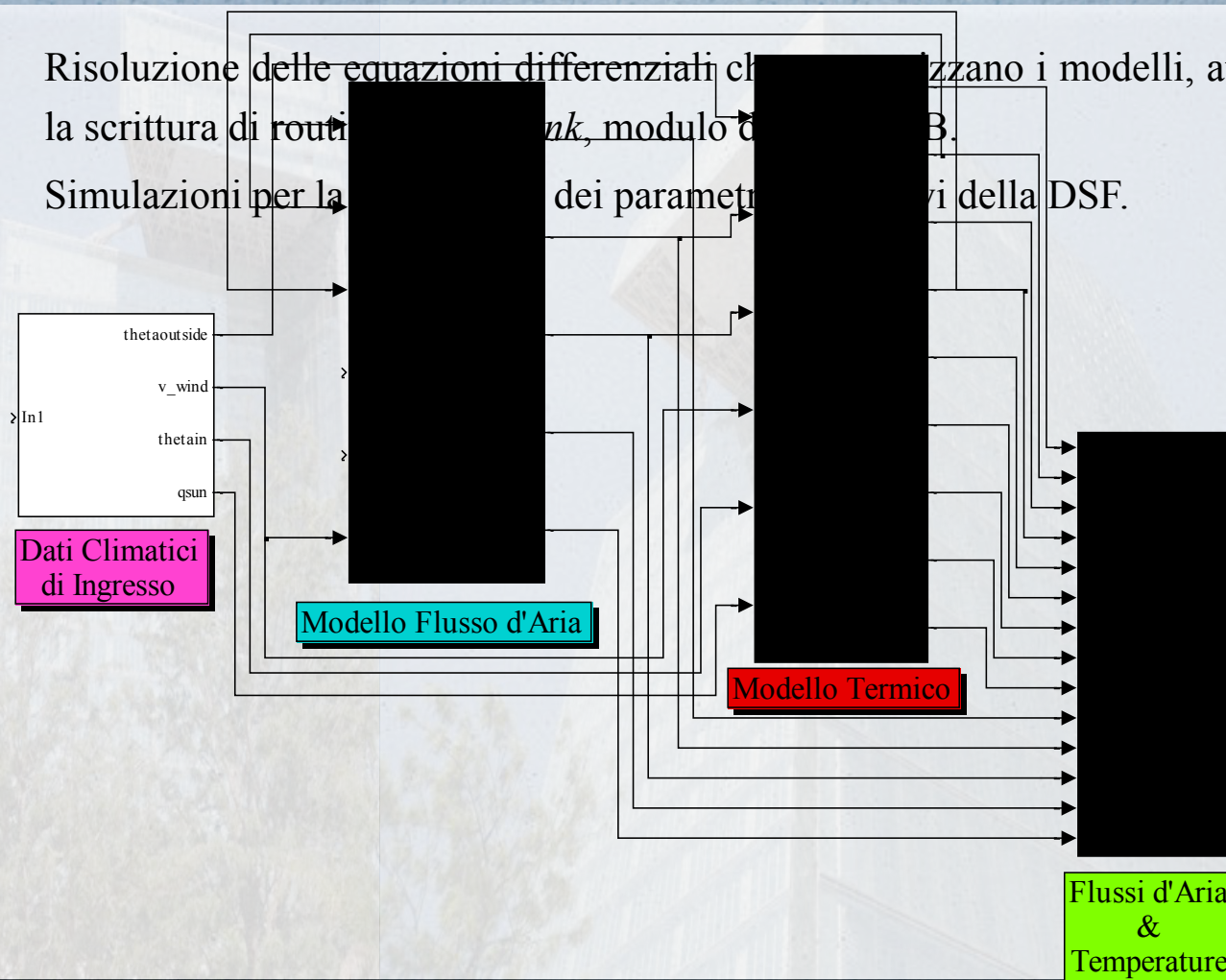
Modello flusso d'aria;

Modello termico.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

2. Risoluzione delle equazioni differenziali che modellano i modelli, attraverso la scrittura di routine in Fortran, modulo di calcolo B.
3. Simulazioni per la determinazione dei parametri di progetto della DSF.

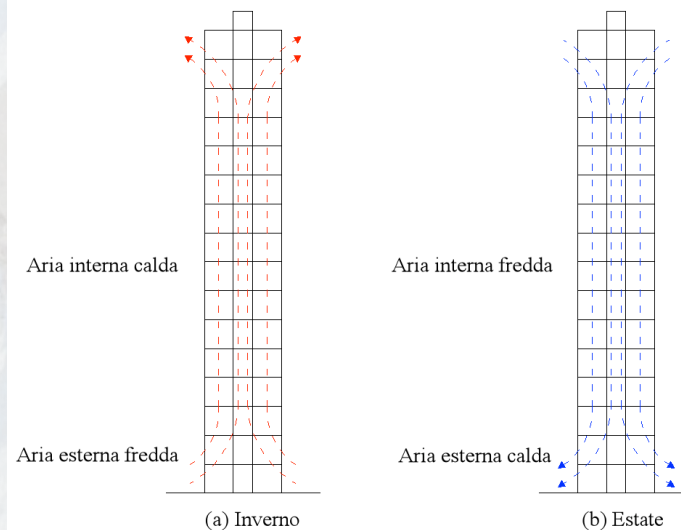


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Il flusso d'aria all'interno di una DSF è causato da due forze guida:

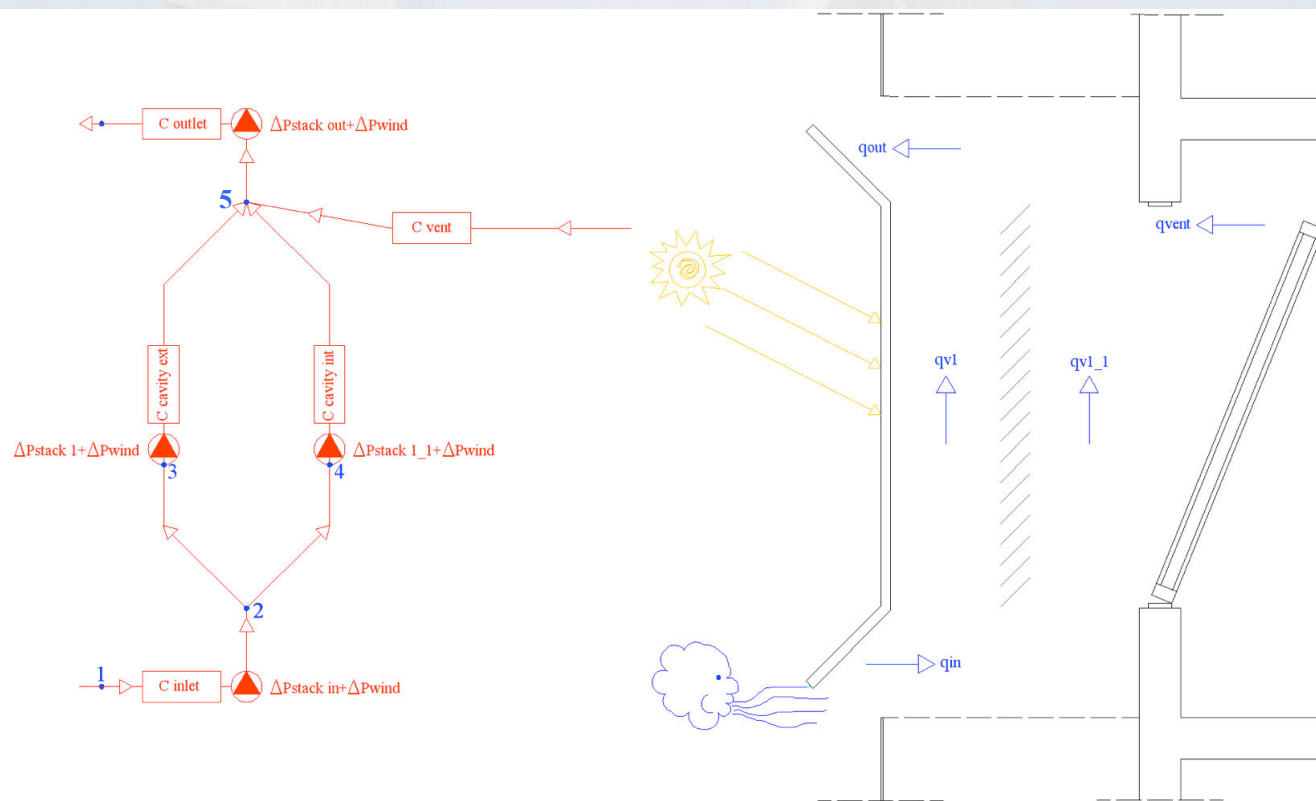
Effetto *Stack* generato da una differenza di temperatura tra l'aria esterna e quella nella cavità. Questo gradiente determina una differenza di pressione tale da innescare un flusso d'aria con direzione verticale dal basso verso l'alto nel caso in cui $T_{out} < T_{in}$ o dall'alto verso il basso se $T_{out} > T_{in}$.

Effetto *Wind* genera delle differenze di pressioni sulla facciata dell'edificio a causa delle turbolenze e di conseguenza un flusso d'aria all'interno della DSF.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Modello semplificato del flusso d'aria: resistenza del flusso d'aria tra due punti a differente pressione, sia con la finestra chiusa che aperta.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

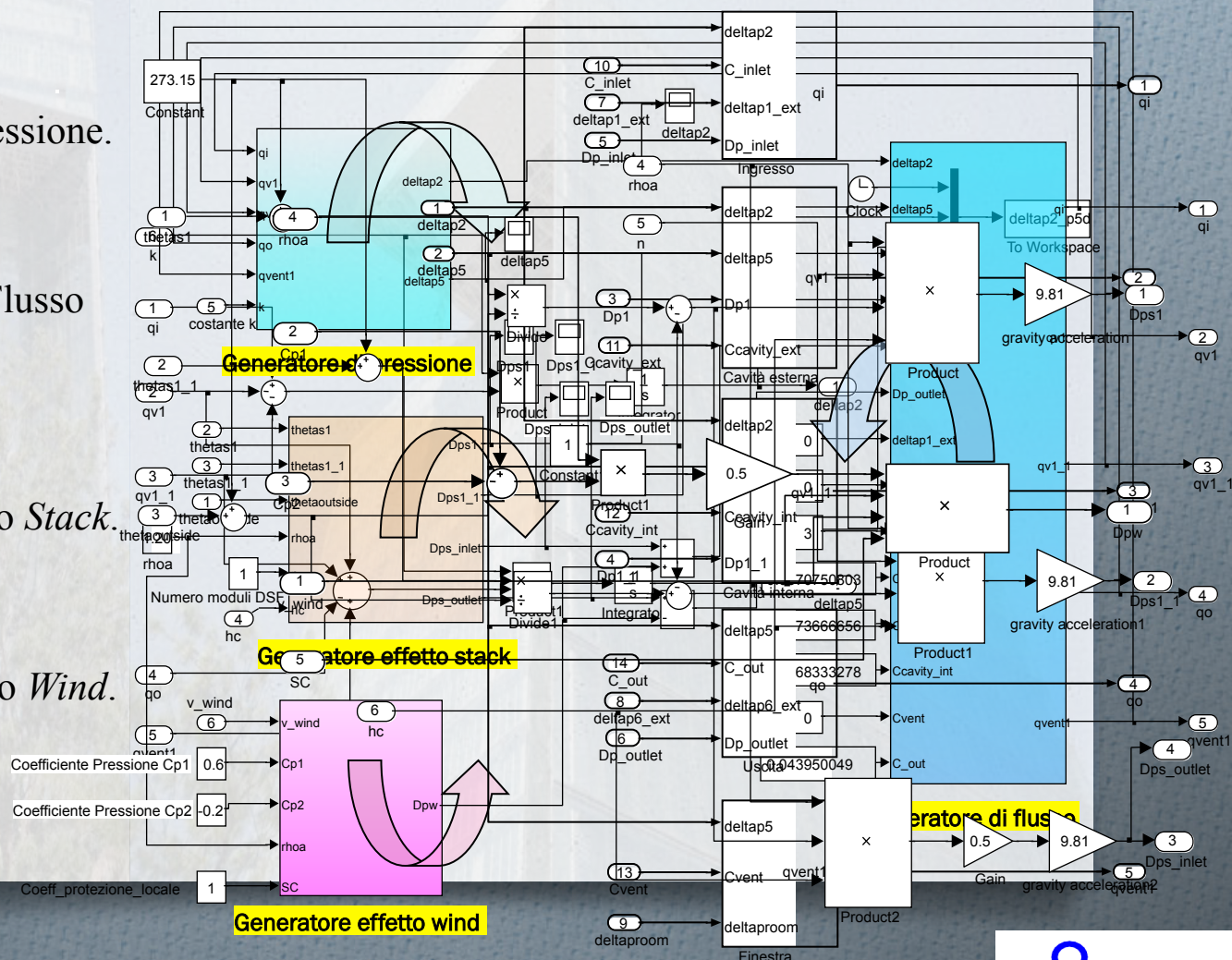
La modellazione matematica del flusso d'aria si compone dei seguenti sottosistemi:

Generatore di Pressione.

Generatore di Flusso
Aria.

Generatore Effetto *Stack*.

Generatore Effetto *Wind*.

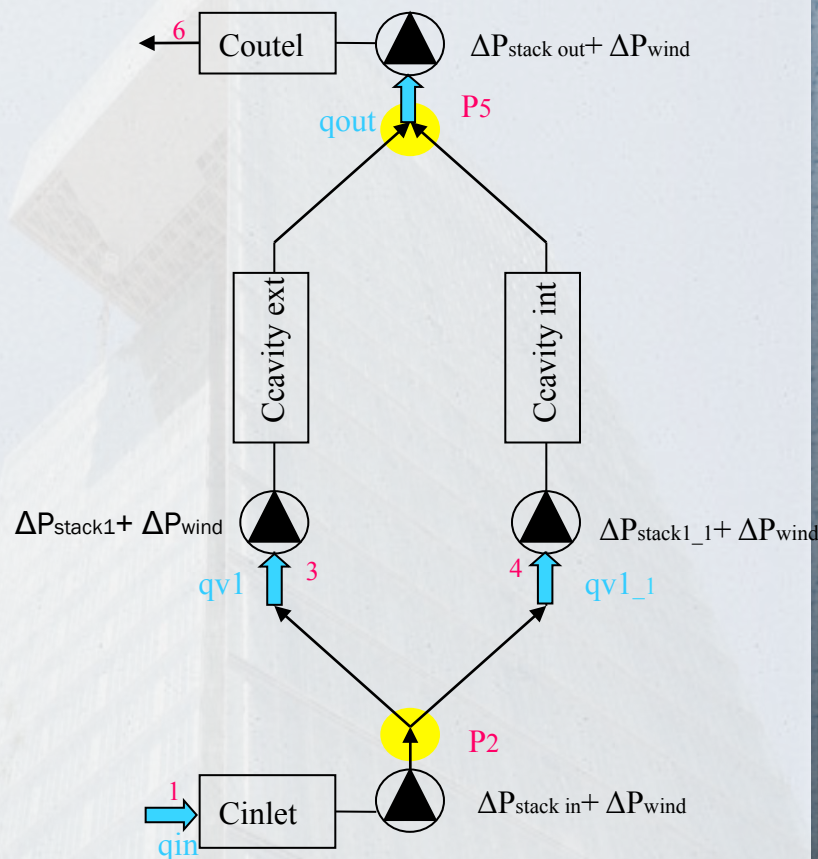


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di Pressione:

Gli input di tale generatore sono i flussi calcolati dal generatore flusso d'aria, gli output sono le pressioni all'ingresso e allo sbocco.

Per determinare tali pressioni P_2 e P_5 si considerano i volumi di controllo coincidenti con i volumi geometrici di ingresso e di uscita, spazi in cui si verificano gli scambi termici.



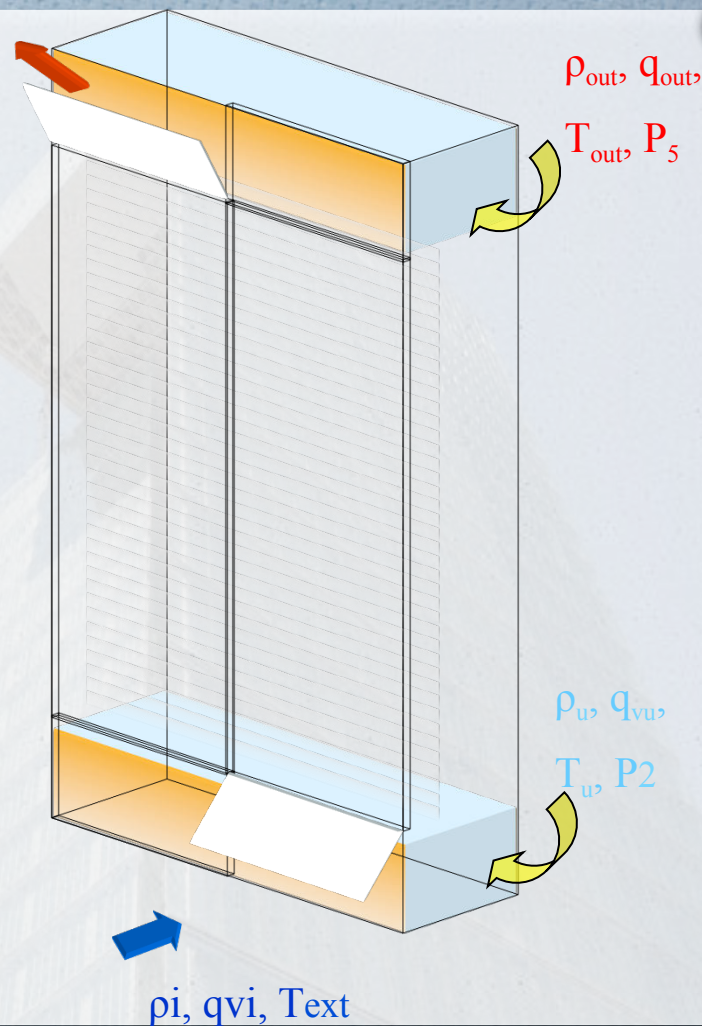
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di Pressione: Volume di Controllo.

Un fluido prima di entrare nel volume di controllo possiede una propria densità ρ_i , una portata q_{vi} e una temperatura T_{ext} .

Nel volume di controllo tale fluido cambia la sua densità a causa della differente temperatura e pressione le quali sono funzioni del tempo;

Il fluido manterrà questa densità nelle cavità fino ad incontrare il secondo volume di controllo.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di Pressione:

Calcolo delle pressioni P2 e P5 in condizioni non stazionarie.

La massa all'interno del volume di controllo è funzione del tempo trattandosi di un processo dinamico:

$$m = \rho_u * V \Rightarrow \frac{dm}{dt} = \frac{d\rho_u}{dt} \cdot V$$

Per il principio di conservazione della massa all'interno del volume di controllo;

$$m = m_i - m_u \Rightarrow \frac{dm}{dt} = \frac{dm_i}{dt} - \frac{dm_u}{dt}$$

Con opportune manipolazioni matematiche il differenziale della massa rispetto al tempo è esprimibile in funzione dei flussi:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm_i}{dt} - \frac{dm_u}{dt} = \rho_i \cdot q_{vi} - \rho_u \cdot q_{vu}$$

Eguagliando l'ultima espressione con la prima si ottiene:

$$\rho_i \cdot q_{vi} - \rho_u \cdot q_{vu} = V \cdot \frac{d\rho_u}{dt}$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di Pressione:

Calcolo delle pressioni P2 e P5 in condizioni non stazionarie.

Utilizzando la legge dei gas ideali espressa in funzione della densità si ottiene:

$$P \cdot V = n \cdot R' \cdot T \Rightarrow P = \frac{m}{V} \cdot R \cdot T = \rho \cdot R \cdot T$$

Applicando tale legge all'interno del volume di controllo e differenziando rispetto al tempo si ha:

$$\rho_u = \frac{P_u}{R} \cdot \frac{1}{T_u} \Rightarrow \frac{d\rho_u}{dt} = \frac{1}{R \cdot T_u} \left[\frac{dP_u}{dt} - \frac{P_u}{T_u} \cdot \frac{dT_u}{dt} \right]$$

$$\rho_i \cdot q_{vi} - \rho_u \cdot q_{vu} = V \cdot \frac{d\rho_u}{dt}$$



Attraverso manipolazioni matematiche si ottiene la variazione della pressione intorno ad un valore stabile:

$$\frac{dP_u}{dt} = \frac{P_u}{V} \cdot (q_{vi} - q_{vu}) = K \cdot (q_{vi} - q_{vu})$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di Pressione:

Calcolo delle pressioni P2 e P5 in condizioni non stazionarie.

Suddividendo la pressione $P_u = P_{us} + \Delta P_u \Rightarrow \frac{dP_u}{dt} = \frac{dP_{us}}{dt} + \frac{d\Delta P_u}{dt} = \frac{d\Delta P_u}{dt}$ totale in pressione statica e pressione dinamica e differenziando rispetto al tempo si ottiene:

$$\frac{d\Delta P_u}{dt} = \frac{P_u}{V} \cdot (q_{vi} - q_{vu}) = K \cdot (q_{vi} - q_{vu})$$



Si giunge così alla formula finale per il calcolo delle pressioni, esplicitandola per i punti 2 e 5 si perviene alla formula per il calcolo delle P₂ e P₅.

$$\frac{d\Delta P_2}{dt} = \frac{P_2}{V} \cdot (q_{vi} - q_{vu}) = K_1 \cdot (q_i - q_{v1} - q_{v1_1})$$

$$\frac{d\Delta P_5}{dt} = \frac{P_5}{V} \cdot (q_{vi} - q_{vu}) = K_2 \cdot (q_{v1} + q_{v1_1} - q_o)$$

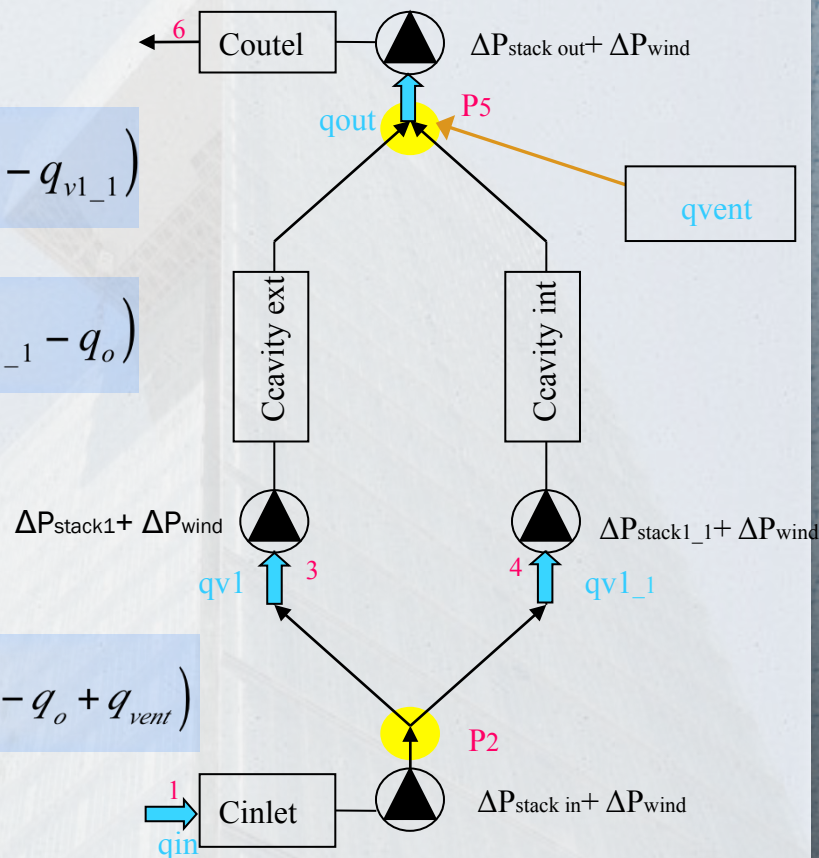
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di Pressione:

$$\frac{d\Delta P_2}{dt} = \frac{P_2}{V} \cdot (q_{vi} - q_{vu}) = K_1 \cdot (q_i - q_{v1} - q_{v1_1})$$

$$\frac{d\Delta P_5}{dt} = \frac{P_5}{V} \cdot (q_{vi} - q_{vu}) = K_2 \cdot (q_{v1} + q_{v1_1} - q_o)$$

$$\frac{d\Delta P_5}{dt} = \frac{P_5}{V} \cdot (q_{vi} - q_{vu}) = K_2 \cdot (q_{v1} + q_{v1_1} - q_o + q_{vent})$$



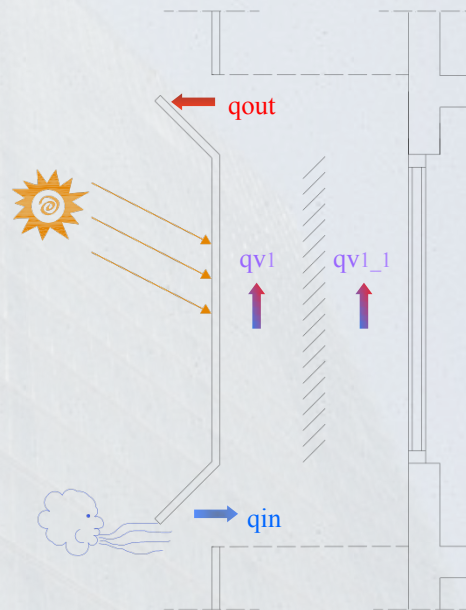
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di flusso d'aria:

Gli input di tale generatore sono la pressione assoluta, le differenze di pressione dovute all'effetto *stack* e all'effetto *wind* e i coefficienti di ammittanza C. Gli output sono i flussi all'ingresso, nelle due cavità e allo sbocco.

Avvalendosi del Teorema di Bernoulli e considerando le perdite di carico la formula utilizzata per il calcolo delle portate è la seguente:

$$q_{i-j} = C_{i-j} \cdot \sqrt{\Delta P_{i-j}}$$



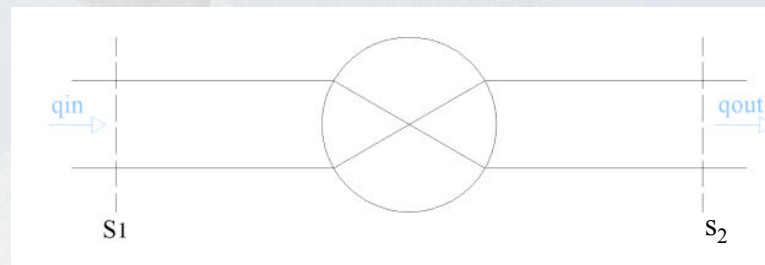
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di flusso d'aria:

Il teorema di Bernoulli senza trascurare le resistenze al moto:

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 + \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \rho \cdot \frac{v_2^2}{2} + R_{12}$$

$$p_1 = p_2 + R_{12} \Rightarrow R_{12} = p_1 - p_2$$



Le perdite di carico sono localizzate R_a , e distribuite R_c .

Nel caso specifico di una DSF le perdite di carico sono localizzate quelle all'ingresso e all'uscita dal deflettore a causa di una deviazione del fluido, mentre diventano distribuite nella cavità

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di flusso d'aria:

Le perdite di carico distribuite: $R_c = \lambda \cdot \frac{l}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad [Pa]$

- λ - Fattore di attrito [-];
- ρ - Densità del fluido [Kg/m³];
- l - Lunghezza del condotto [m];
- v - Velocità media del fluido [m/s];
- D - Diametro equivalente [m];

$\xi = \lambda \cdot \frac{l}{D}$ - Coefficiente di resistenza da valutare sperimentalmente

Le perdite di carico localizzate: $R_a = \lambda \cdot \frac{l_e}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad [Pa]$

- l_e - Lunghezza equivalente [m];
- $\xi = \lambda \cdot \frac{l_e}{D}$ - Coefficiente di resistenza da valutare sperimentalmente

$$R = R_c + R_a = \lambda \cdot \frac{(l_e + l)}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

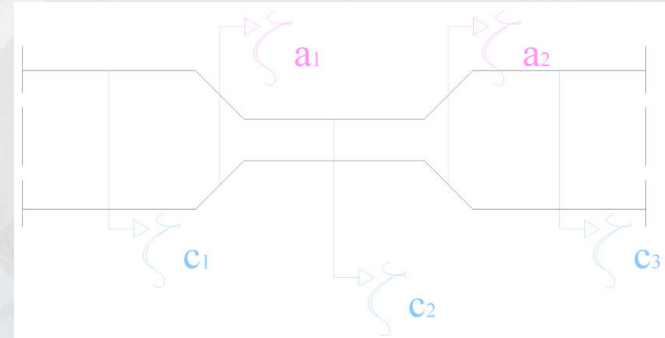
Generatore di flusso d'aria:

$$R_{12} = p_1 - p_2 = \Delta P = R_{c1} + R_{c2} + R_{c3} + R_{a1} + R_{a2}$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \rho \cdot \frac{q^2}{2 \cdot A^2}$$

$$q^2 = \frac{\Delta P \cdot 2 \cdot A^2}{\rho \cdot \sum_{i=1}^n \xi_i} \Rightarrow q = \sqrt{\frac{2 \cdot A^2}{\rho \cdot \sum_{i=1}^n \xi_i}} \cdot \sqrt{\Delta P} = C \cdot \sqrt{\Delta P}$$

$$C_{i-j} = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{i-j}^2}{\xi_{i-j} \cdot \rho_{air}}} \quad \xi_{i-j} \Rightarrow \text{Desunti Sperimentalmente (TU Delft)}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore di flusso d'aria:

$$q_{i-j} = C_{i-j} \cdot \sqrt{\Delta P_{i-j}}$$

$$C_{i-j} = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{i-j}^2}{\xi_{i-j} \cdot \rho_{air}}}$$

$$\Delta P_{i-j} = P_i - P_j + \Delta P_{(s+w)i-j}$$

$$\Delta P_{(s+w)i-j} = \Delta P_{stack\ i-j} + \Delta P_{wind\ i-j}$$

- q_{i-j} - Flusso d'aria attraverso la parte specificata del modello [m^3/s];
- C_{i-j} - Coefficiente di ammittanza di una specifica parte del modello [-];
- ΔP_{i-j} - Differenza di pressione per la parte specificata del modello [Pa];
- ξ_{i-j} - Coefficiente di resistenza della parte specificata del modello [-];
- A_{i-j} - Area della sezione ortogonale al flusso della parte specificata del modello [m^2];
- ρ_{air} - Densità dell'aria [Kg/m^3];

ΔP_{stack} = Differenza di pressione dovuta all'effetto Stack;

ΔP_{wind} = Differenza di pressione dovuta all'effetto Wind;

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Il flusso d'aria in corrispondenza del deflettore di ingresso è pari a:

$$q_{inlet} = C_{inlet} \cdot \sqrt{|P_{1_ext} + \Delta P_{in} - P_2|} \cdot \frac{P_{1_ext} + \Delta P_{in} - P}{|P_{1_ext} + \Delta P_{in} - P|}$$

Il flusso d'aria nella cavità esterna è pari a:

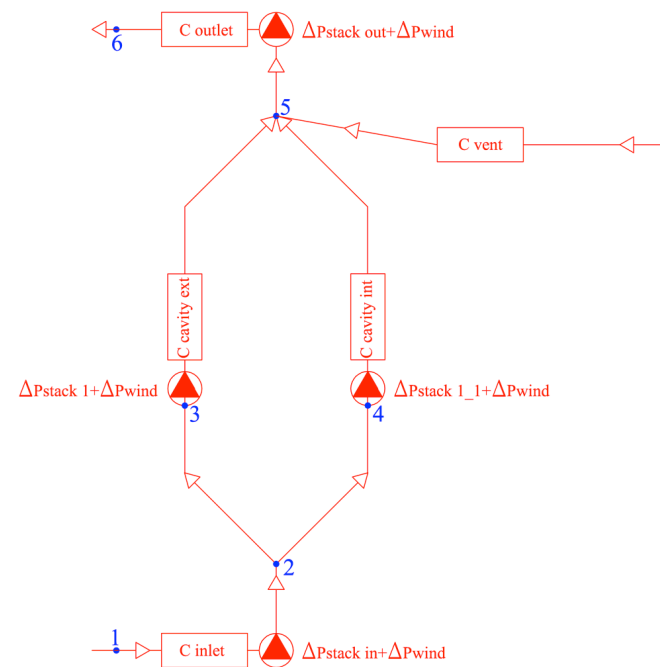
$$q_{v1} = C_{cavity_ext} \cdot \sqrt{|P_2 + \Delta P_1 - P_5|} \cdot \frac{P_2 + \Delta P_1 - P_5}{|P_2 + \Delta P_1 - P_5|}$$

Il flusso d'aria nella cavità interna è pari a:

$$q_{v1_1} = C_{cavity_int} \cdot \sqrt{|P_2 + \Delta P_{1_1} - P_5|} \cdot \frac{P_2 + \Delta P_{1_1} - P_5}{|P_2 + \Delta P_{1_1} - P_5|}$$

Il flusso d'aria in corrispondenza del deflettore di sbocco è pari a:

$$q_{outlet} = C_{outlet} \cdot \sqrt{|P_5 + \Delta P_{out} - P_6|} \cdot \frac{P_5 + \Delta P_{out} - P_6}{|P_5 + \Delta P_{out} - P_6|}$$



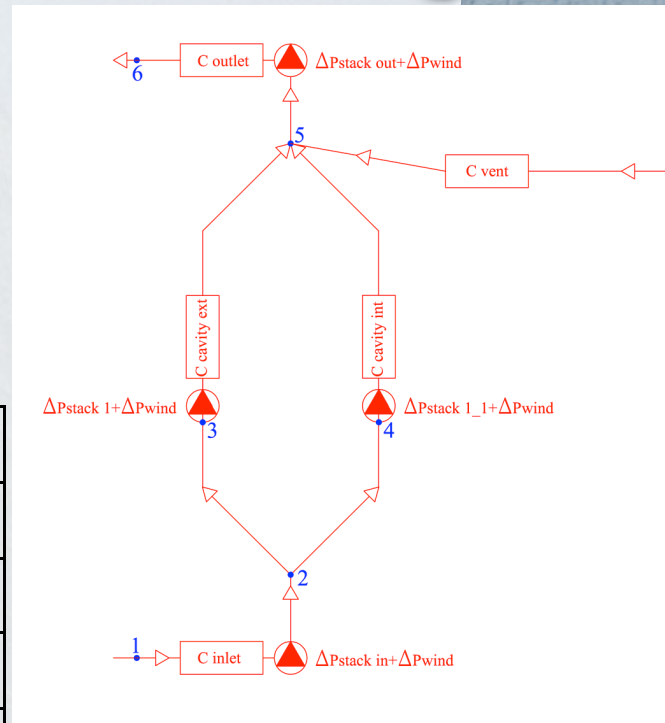
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Il flusso d'aria attraverso la finestra è pari a:

$$q_{vent} = C_{vent} \cdot \sqrt{|P_{room} - P_5|} \cdot \frac{P_{room} - P_5}{|P_{room} - P_5|}$$

Valori sperimentali dei coefficienti di resistenza

Parte della facciata	Simbolo	Valore
Ingresso alla cavità	ξ_{1_2}	103.605
Parte esterna della cavità	ξ_{2_5}	691.018
Parte interna della cavità	ξ_{2_5}	691.018
Uscita dalla cavità	ξ_{5_6}	174.725



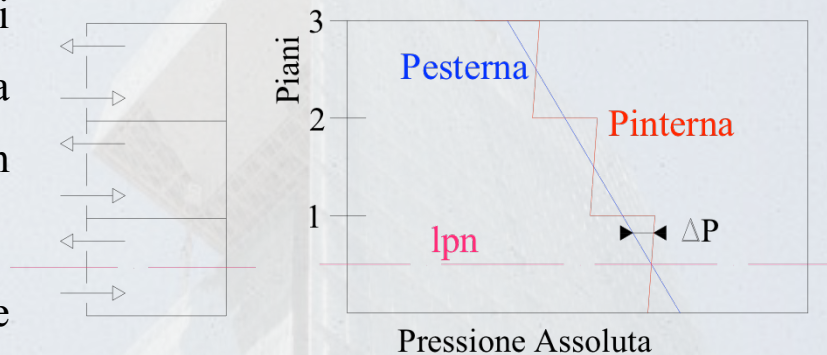
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore effetto *Stack*: calcolo della differenza di pressione ΔP_{stack}

Con riferimento allo schema di una DSF a singola cella, il livello di pressione neutra si posiziona a metà altezza dei singoli moduli, in presenza del solo effetto stack.

Integrando le equazioni indefinite di equilibrio di Cauchy ($\sigma_{ij,j} + \gamma_i = 0$), si perviene alla valutazione della pressione statica esterna ed interna.

La differenza tra le due pressioni dovuta all'effetto *stack* è pari (Liddament 1996):



$$P_{out}[z] = \gamma_{out} \cdot z + P_{lpn} = \rho_{out} \cdot g \cdot z + P_{lpn}$$

$$P_{in}[z] = \gamma_{in} \cdot z + P_{lpn} = \rho_{in} \cdot g \cdot z + P_{lpn}$$

$$\Delta P_s = P_{out} - P_{in} = \rho_{out} \cdot g \cdot (h_{lpn} - h) \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}} \right)$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

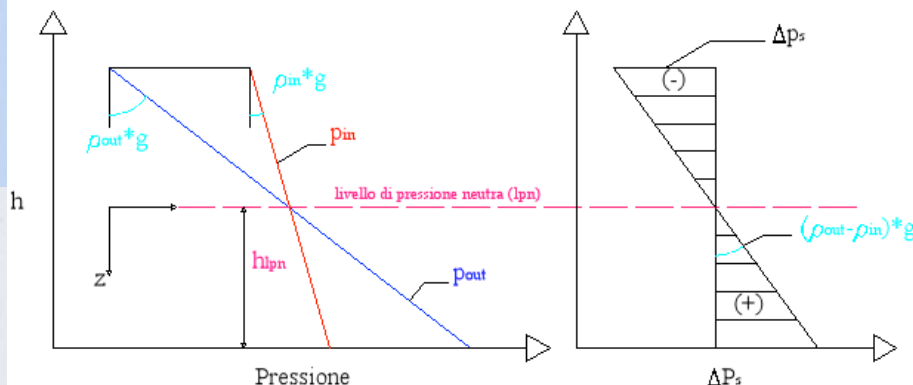
Generatore effetto *Stack*: calcolo della differenza di pressione ΔP_{stack}

$$\Delta P_s = P_{out} - P_{in} =$$

$$\rho_{out} \cdot g \cdot (h_{lpn} - h) \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}} \right)$$

$$z = h_{lpn} - h$$

$$\rho_{out} = \frac{T_{in} \cdot \rho_{in}}{T_{out}}$$



- ΔP_s - Differenza di pressione per effetto *stack* [N/m² o Pa];
- ρ_{out} - Densità dell'aria esterna [Kg/m³];
- ρ_{in} - Densità dell'aria interna [Kg/m³];
- g - Accelerazione di gravità [9.81 m/s²];
- h - Altezza di osservazione [m];
- h_{lpn} - Altezza del livello di pressione neutra [m];
- T_{out} - Temperatura assoluta esterna [°K];
- T_{in} - Temperatura assoluta interna [°K];

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

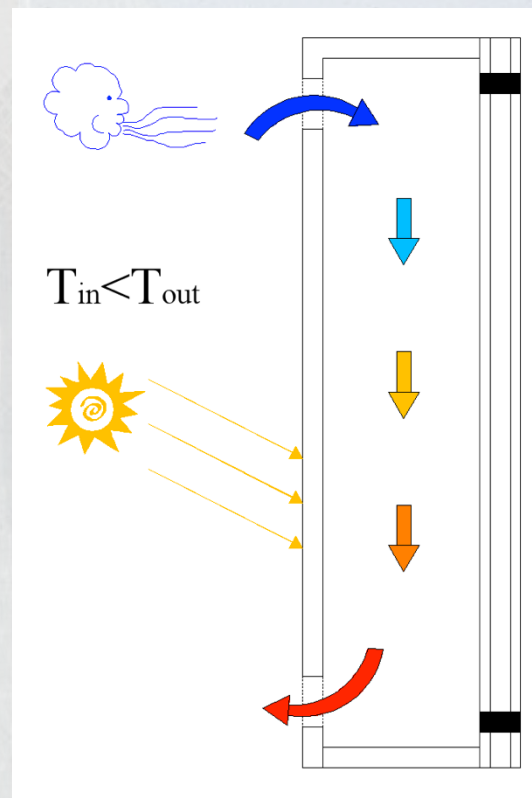
Generatore effetto *Stack*: calcolo della differenza di pressione ΔP_{stack}

$$\Delta P_{stack} > 0 \Rightarrow P_{out} > P_{in}$$

Quando l'aria interna si trova ad una temperatura più alta di quella esterna, al disopra del livello di pressione neutra la DSF è in sovrappressione mentre al di sotto è in depressione, determinando un flusso d'aria dal basso verso l'alto.

$$\Delta P_{stack} < 0 \Rightarrow P_{out} < P_{in}$$

Quando la temperatura interna è più bassa di quella esterna, al disopra del livello di pressione neutra la DSF è in depressione mentre al di sotto è in sovrappressione, determinando un flusso d'aria dall'alto verso il basso.

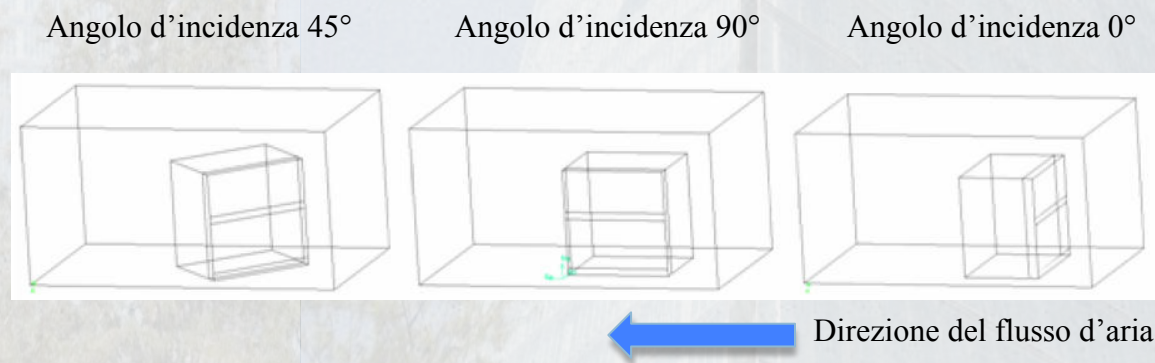


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Effetto Wind

Effetto *Wind* genera delle differenze di pressioni sulla facciata dell'edificio per effetto delle turbolenze e di conseguenza un flusso d'aria all'interno della DSF.

Le pressioni agenti sulla facciata di un edificio possono essere positive o negative a seconda dell'angolo di incidenza del vento e della forma dell'edificio

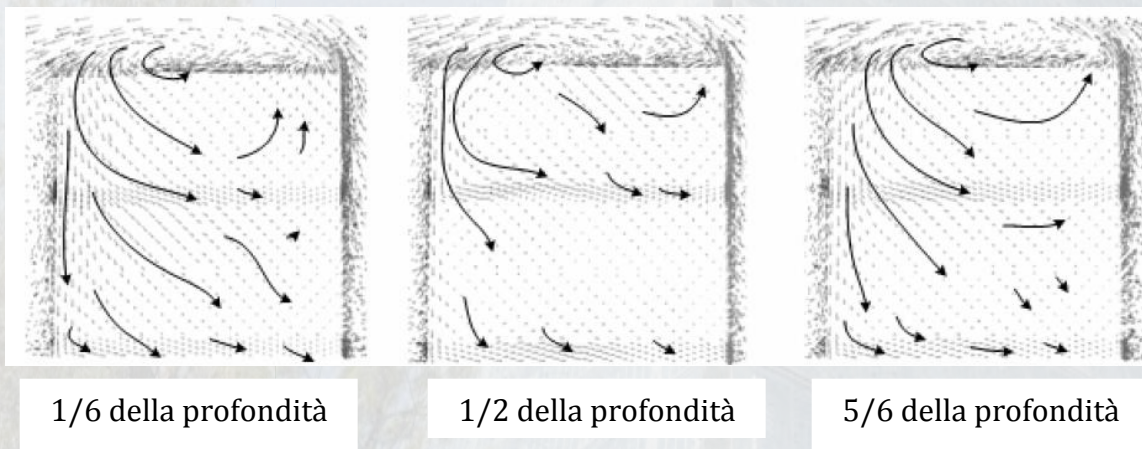


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Angolo di incidenza del vento 0° : la pressione maggiore si verifica al centro della facciata e il deflettore di sbocco induce una pressione negativa che stimola il flusso di sollevamento dal deflettore d'ingresso.

Angolo di incidenza del vento 45° : flusso d'aria dal deflettore d'ingresso verso quello di sbocco generando turbolenze nella cavità interna

Angolo di incidenza del vento 90° : flusso d'aria dal deflettore di sbocco, dove è presente la massima pressione, verso quello d'ingresso; si crea un vortice nella cavità.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore effetto *Wind*: calcolo della differenza di pressione ΔP_{wind}

La distribuzione delle pressioni statiche generate dal vento sulla superficie di una DSF a singola cella è stata determinata utilizzando la formula di Swami e l'ASHARE 2001:

$$\Delta P_{wind} = C_{p(in-out)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{out} \cdot v_{w,h}^2$$

- ΔP_{Wind} - Differenza di pressione per effetto *Wind* [N/m² o Pa];
- ρ_{out} - Densità dell'aria esterna [Kg/m³];
- $V_{w,h}$ - Velocità del vento sull'edificio all'altezza d'interesse [m/s];
- $C_{p(in-out)}$ - Coefficiente di pressione superficiale del vento;

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Generatore effetto *Wind*: calcolo della differenza di pressione ΔP_{wind}

$$\Delta P_{wind} = C_{p(in-out)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{out} \cdot v_{w,h}^2$$

$$C_{p(in-out)} = C_p - C_{in} \qquad v_{w,h} = v_{w,met} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{H}{H_{met}} \right)^\gamma$$

C_p : Coefficiente di pressione,
Lato esposto al vento vale 0.6;
Lato non esposto al vento vale 0.3.

C_{in} : Coefficiente di pressione indotto dal
vento vale 0.2.

- $v_{w,h}$ - Velocità del vento superficie dell'edificio all'altezza d'interesse [m/s];
- $v_{w,met}$ - Velocità del vento rilevata dalla stazione meteorologica [m/s];
- H_{met} - Altezza dell'anemometro dal piano di campagna [m];
- H - Altezza di interesse per la determinazione della velocità del vento [m];
- α, γ - Parametri relativi alla classe di terreno considerato [-];

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

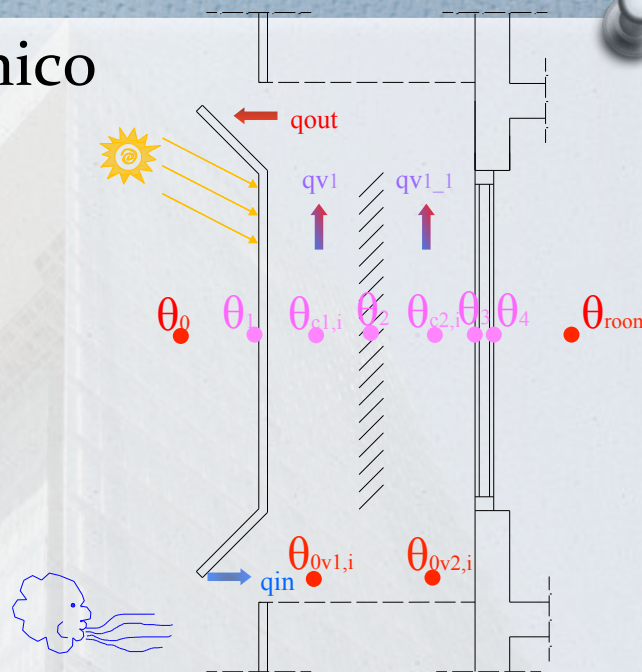
Modello Termico

Gli input del modello termico sono:

Temperatura esterna;

Temperatura di benessere interna;

Temperature di ingresso nella cavità interna ed esterna (Van Paassen, 1998, TU Delft);



$$\vartheta_{0v1} = \frac{q_{v,stack}}{q_{v,stack} + q_{v,turb}} \cdot \vartheta_{c1}(i-1) + \frac{q_{v,turb}}{q_{v,stack} + q_{v,turb}} \cdot \vartheta_0$$

$$\vartheta_{0v2} = \frac{q_{v,stack}}{q_{v,stack} + q_{v,turb}} \cdot \vartheta_{c2}(i-1) + \frac{q_{v,turb}}{q_{v,stack} + q_{v,turb}} \cdot \vartheta_0$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Modello Termico

Coefficienti di scambio di calore convettivo (α_0), convettivo interno (α_i), convettivo tra gli elementi della DSF (α_{ci}), coefficiente di calore radiativo (α_{sij}) e per conduzione convezione e irraggiamento (α_{db});

Flussi d'aria desunti dal modello flusso aria;

Radiazione solare e valori della velocità

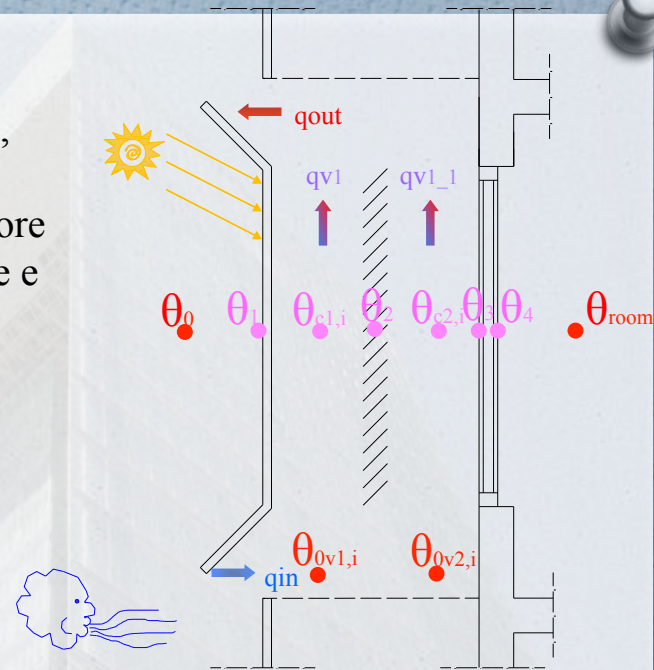
$$\alpha_0 = 6.2 + 4.2 \cdot v_{wind} \quad \text{del vento;}$$

$$\alpha_i = 3.6 + 4.4 \cdot \frac{\varepsilon_{vetro}}{0.837}$$

$$\alpha_{ci} = (-7.52 \cdot d_{ci} + 8.68) \cdot v_{si} - 0.448 \cdot d_{ci} + 0.542$$

$$\alpha_{sij} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (\theta_i^3 + \theta_i^2 \cdot \theta_j + \theta_i \cdot \theta_j^2 + \theta_j^3)$$

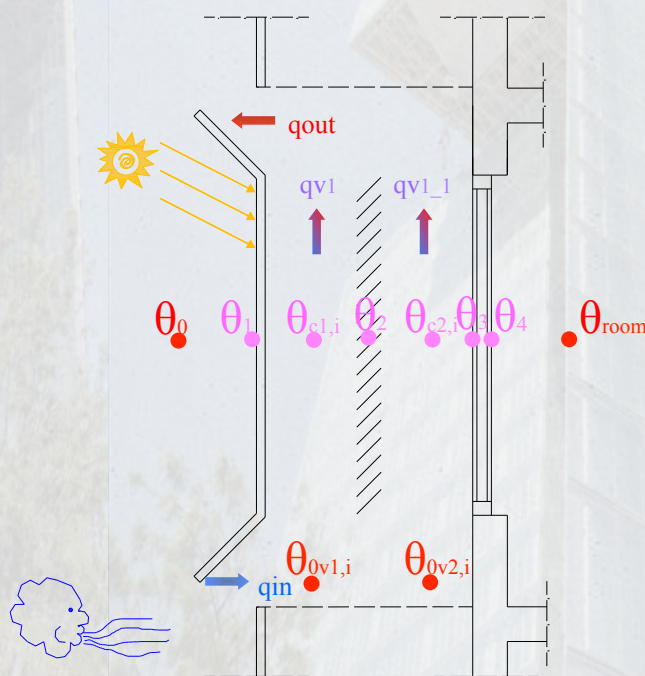
$$\alpha_{db} = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s}{\lambda}}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Modello Termico

Gli output sono le temperature sul vetro esterno, nelle due cavità, sulle veneziane e sul vetro camera interno.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Rete termica:

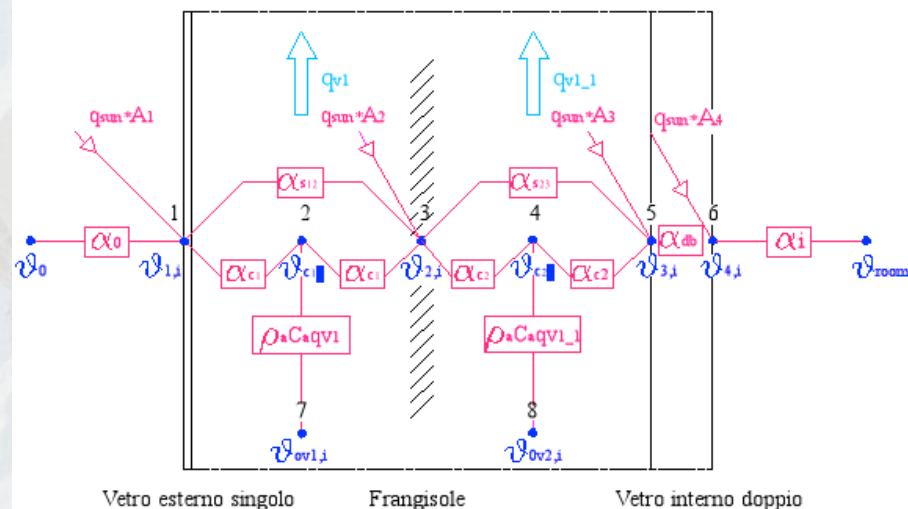
La rete di scambio termico evidenzia gli equilibri termici per ciascun nodo della DSF. Il modello è unidimensionale con direzione dello scambio termico ortogonale ad ogni strato dello i-esimo piano della facciata.

Le formule utilizzate nel bilancio energetico sono:

Scambio di calore per convezione:

Scambio di calore per irraggiamento:

Scambio di calore convettivo per trasporto:



$$q_{convection} = \alpha_c \cdot A \cdot \Delta\theta$$

$$q_{radiant} = \alpha_s \cdot A \cdot \Delta\theta$$

$$q_{convection} = \rho_a \cdot C_a \cdot q_v \cdot \Delta\theta$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

Rete termica in condizioni non stazionarie:

Gli equilibri termici, in un sistema dinamico come la facciata a doppia pelle, devono essere descritti in condizioni non stazionarie ricorrendo alla risoluzione di equazioni differenziali in ogni nodo del circuito.

Si giunge a tali equazioni differenziali utilizzando il I Principio della Termodinamica e considerando che sono nulli i seguenti contributi:

Il calore generato in una DSF;

Il lavoro poiché in tale sistema non ci sono forze che compiono lavoro;

Si ottiene la seguente formula, la cui variazione nel tempo è pari:

$$dQ - dL = dU$$

$$dQ = dQ_g + dQ_e$$

$$dQ_g = 0$$

$$dL = 0$$

$$dQ_e = dU \Rightarrow \frac{dQ_e}{dt} = \frac{dU}{dt}$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

Rete termica in condizioni non stazionarie:

La variazione di calore che attraversa la DSF è correlata al flusso termico specifico per unità di area:

$$dQ_e = dt \cdot \int_A \vec{q}^* \cdot \vec{n} \cdot dA$$

La variazione di energia interna è correlata al calore specifico e alla densità per mezzo della variazione di temperatura rispetto al tempo:

$$dU = dt \cdot \int_V c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \cdot dV$$

Eguagliando le precedenti, integrando e ricordando che la temperatura varia solo in funzione del tempo si ottiene quanto segue:

$$\int_A \vec{q}^* \cdot \vec{n} \cdot dA = \int_V c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dV$$

Tale formula è stata utilizzata per il calcolo delle equazioni termiche in condizioni non stazionarie.

$$\vec{q}^* \cdot A = q = c \cdot \rho \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot V$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

$$q^* \cdot A = q = c \cdot \rho \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot V$$

$$q^* = \frac{q}{A}$$

 c ρ

$$\frac{d\theta}{dt}$$

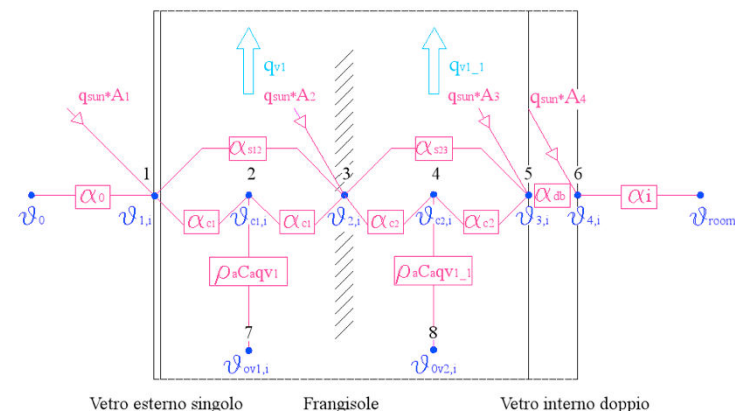
- Flusso termico specifico per unità di area;
- Calore specifico;
- Densità;
- Variazione di temperatura in funzione del tempo;

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{q^* \cdot A}{c \cdot \rho \cdot V}$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Scambi termici Nodo 1:

- Conduzione vetro esterno ed ambiente trascurata per lo spessore limitato del vetro;
- Convezione tra vetro esterno ed ambiente (1-ext);
- Convezione tra vetro esterno e fluido nell'intercapedine (1-2);
- Irraggiamento tra vetro esterno e veneziane (1-3);
- Calore assorbito dal vetro esterno per irraggiamento.



$$\int_A \left(\frac{\alpha_0 \cdot A \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_1) + \alpha_{c1} \cdot A \cdot (\vartheta_{c1} - \vartheta_1) + \alpha_{s12} \cdot A \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + A_1 \cdot q_{sun} \cdot A}{A} \right) \cdot dA =$$

$$\int_V c_g \cdot \rho_g \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} \cdot dV$$

$$\frac{d\vartheta_1}{dt} = \left[\frac{\alpha_0 \cdot (\theta_0 - \vartheta_1) + \alpha_{c1} \cdot (\theta_{c1} - \theta_1) + \alpha_{s12} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + A_1 \cdot q_{sun}}{C_g \cdot \rho_g \cdot A_g \cdot d_g} \right] \cdot A$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

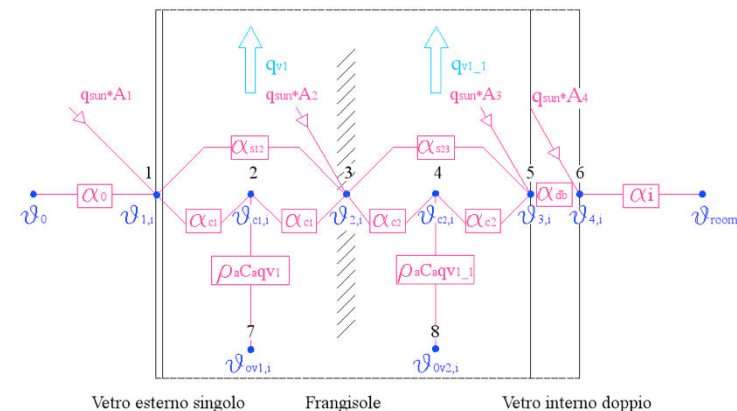
$$\frac{d\vartheta_1}{dt} = \left[\frac{\alpha_0 \cdot (\theta_0 - \vartheta_1) + \alpha_{c1} \cdot (\theta_{c1} - \vartheta_1) + \alpha_{s12} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + A_1 \cdot q_{sun}}{C_g \cdot \rho_g \cdot A_g \cdot d_g} \right] \cdot A$$

- α_0 - Coefficiente di scambio di calore convettivo tra l'ambiente e il vetro esterno [W/m²*K];
- α_{c1} - Coefficiente di scambio di calore convettivo tra il vetro esterno e la cavità [W/m²*K];
- α_{s12} - Coefficiente di scambio di calore radiativo tra il vetro esterno e il frangisole [W/m²*K];
- A_1 - Percentuale di radiazione solare assorbita dal vetro esterno [-];
- q_{sun} - Radiazione solare [W/m²];
- A - Superficie ortogonale al flusso energetico [m²];
- ϑ_0 - Temperatura esterna [°C];
- ϑ_1 - Temperatura sul vetro esterno [°C];
- ϑ_{c1} - Temperatura nel mezzo della cavità esterna [°C];
- ϑ_2 - Temperatura sul frangisole [°C];
- C_g - Calore specifico del vetro [J/Kg*K];
- ρ_g - Densità del vetro [Kg/m³];
- A_g - Area del vetro [m²];
- d_g - Spessore del vetro [m];

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Scambi termici Nodo 2:

- Convezione tra la cavità esterna e il vetro esterno (2-1);
- Convezione tra la cavità esterna e le veneziane (2-3);
- Convezione per trasporto all'interno della cavità esterna (7-2);



$$\int_A \left[\frac{\alpha_{c1} \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_{c1}) + \alpha_{c1} \cdot A \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_{c1}) + \rho_a \cdot C_a \cdot q_{v1} \cdot (\vartheta_{0v1} - \vartheta_{c1})}{A} \right] \cdot dA =$$

$$\int_V C_a \cdot \rho_a \cdot \frac{d\vartheta_{c1}}{dt} \cdot dV$$

$$\frac{d\vartheta_{c1}}{dt} = \frac{\alpha_{c1} \cdot (\theta_1 - \vartheta_{c1}) \cdot A + \alpha_{c1} \cdot (\theta_2 - \vartheta_{c1}) \cdot A + \rho_a \cdot C_a \cdot q_{v1} \cdot (\vartheta_{0v1} - \vartheta_{c1})}{C_a \cdot \rho_a \cdot A_{c1} \cdot d_{c1}}$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

$$\frac{d\vartheta_{c1}}{dt} = \frac{\alpha_{c1} \cdot (\theta_1 - \vartheta_{c1}) \cdot A + \alpha_{c1} \cdot (\theta_2 - \vartheta_{c1}) \cdot A + \rho_a \cdot C_a \cdot q_{v1} \cdot (\vartheta_{0v1} - \vartheta_{c1})}{C_a \cdot \rho_a \cdot A_{c1} \cdot d_{c1}}$$

- α_{c1} - Coefficiente di scambio di calore convettivo tra il punto 2 e il vetro esterno e tra il punto 2 e il frangisole [W/m²*K];
- A - Superficie ortogonale al flusso energetico [m²];
- ϑ_1 - Temperatura sul vetro esterno [°C];
- ϑ_{c1} - Temperatura nel mezzo della cavità esterna [°C];
- ϑ_2 - Temperatura sul frangisole [°C];
- ϑ_{ov1} - Temperatura di ingresso nella cavità esterna [°C];
- q_{v1} - Flusso d'aria nella cavità esterna [m³/s];
- C_a - Calore specifico a volume costante dell'aria [J/Kg*K];
- ρ_a - Densità dell'aria [Kg/m³];
- A_{c1} - Area della cavità esterna [m²];
- d_{c1} - Spessore della cavità esterna [m];

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

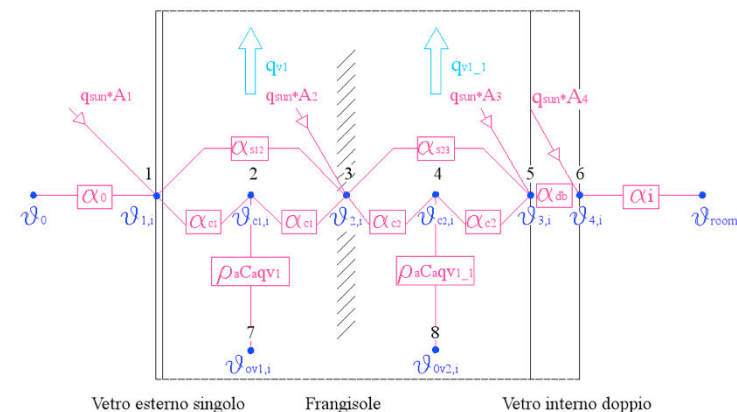
Scambi termici Nodo 3:

- Convezione tra le veneziane e la cavità esterna (3-2);
- Convezione tra le veneziane e la cavità interna (3-4);
- Irraggiamento tra le veneziane e il vetro esterno (3-1);
- Irraggiamento tra veneziane e il vetro interno (3-5);
- Radiazione solare assorbita dalle veneziane.

$$\int_A \left[\frac{\alpha_{c1} \cdot A \cdot (\vartheta_{c1} - \vartheta_2) + \alpha_{c2} \cdot A \cdot (\vartheta_{c2} - \vartheta_2) + \alpha_{s12} \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) + \alpha_{s23} \cdot A \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_2)}{A} + \frac{A_2 \cdot q_{sun} \cdot A}{A} \right] \cdot dA =$$

$$\int_V C_b \cdot \rho_b \cdot \frac{d\vartheta_2}{dt} \cdot dV$$

$$\frac{d\vartheta_2}{dt} = \left[\frac{\alpha_{c1} \cdot (\vartheta_{c2} - \vartheta_{c1}) + \alpha_{c2} \cdot (\vartheta_{c2} - \vartheta_2) + \alpha_{s12} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) + \alpha_{s23} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_2) + A_2 \cdot q_{sun}}{C_b \cdot \rho_b \cdot A_b \cdot d_b} \right] \cdot A$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

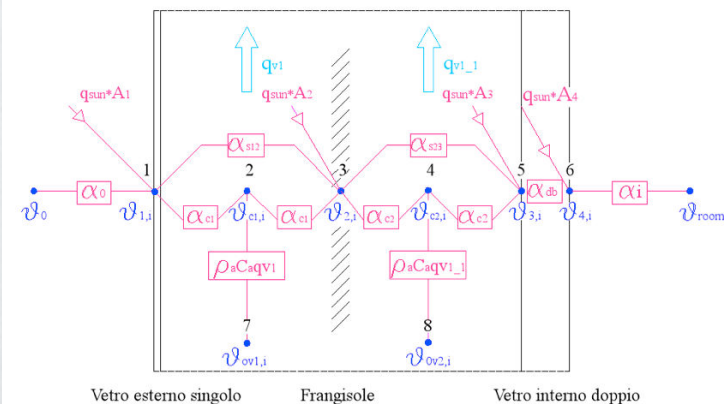
$$\frac{d\vartheta_2}{dt} = \left[\frac{\alpha_{c1} \cdot (\theta_{c1} - \vartheta_2) + \alpha_{c2} \cdot (\theta_{c2} - \vartheta_2) + \alpha_{s12} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) + \alpha_{s23} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_2) + A_2 \cdot q_{sun}}{C_b \cdot \rho_b \cdot A_b \cdot d_b} \right] \cdot A$$

- α_{c1} - Coefficiente di scambio di calore convettivo tra il frangisole e il punto 2 [W/m²*K];
- α_{c2} - Coefficiente di scambio di calore convettivo tra il frangisole e il punto 4 [W/m²*K];
- α_{s12} - Coefficiente di scambio di calore radiativo tra il frangisole e il vetro esterno [W/m²*K];
- α_{s23} - Coefficiente di scambio di calore radiativo tra il frangisole e il vetro interno [W/m²*K];
- A_2 - Percentuale di radiazione solare assorbita dal frangisole [-];
- q_{sun} - Radiazione solare [W/m²];
- A - Superficie ortogonale al flusso energetico [m²];
- ϑ_1 - Temperatura sul vetro esterno [°C];
- ϑ_{c1} - Temperatura nel mezzo della cavità esterna [°C];
- ϑ_2 - Temperatura sul frangisole [°C];
- ϑ_{c2} - Temperatura nel mezzo della cavità interna [°C];
- ϑ_3 - Temperatura sulla prima lastra del vetro interno [°C];
- C_b - Calore specifico del frangisole [J/Kg*K];
- ρ_b - Densità del frangisole [Kg/m³];
- A_b - Area del frangisole [m²];
- d_b - Spessore del frangisole [m];

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Scambi termici Nodo 4:

- Convenzione tra cavità interna e veneziane (4-3);
- Convenzione tra cavità interna e vetro interno (4-5);
- Convezione per trasporto nella cavità interna (8-4).



$$\int_A \left[\frac{\alpha_{c2} \cdot A \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_{c2}) + \alpha_{c2} \cdot A \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_{c2}) + \rho_a \cdot C_a \cdot q_{v1_1} \cdot (\vartheta_{ov2} - \vartheta_{c2})}{A} \right] \cdot dA =$$

$$\int_V C_a \cdot \rho_a \cdot \frac{d\vartheta_{c2}}{dt} \cdot dV$$

$$\frac{d\vartheta_{c2}}{dt} = \left[\frac{\alpha_{c2} \cdot (\theta_2 - \vartheta_{c2}) \cdot A + \alpha_{c2} \cdot (\theta_3 - \vartheta_{c2}) \cdot A + \rho_a \cdot C_a \cdot q_{v1_1} \cdot (\theta_{ov2} - \vartheta_{c2})}{C_a \cdot \rho_a \cdot A_{c2} \cdot d_{c2}} \right]$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

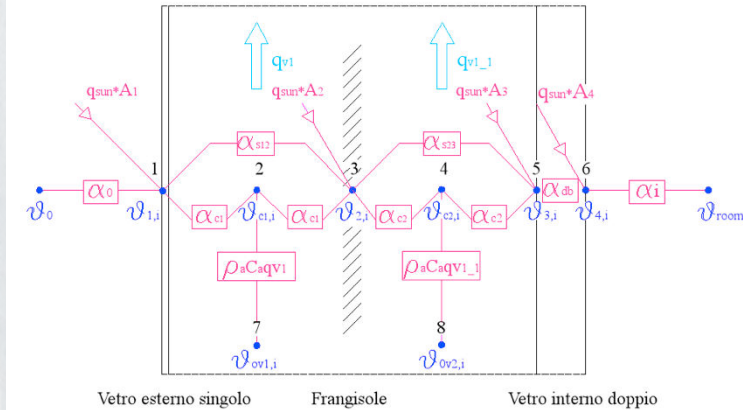
$$\frac{d\vartheta_{c2}}{dt} = \left[\frac{\alpha_{c2} \cdot (\theta_2 - \vartheta_{c2}) \cdot A + \alpha_{c2} \cdot (\theta_3 - \vartheta_{c2}) \cdot A + \rho_a \cdot C_a \cdot q_{v1_1} \cdot (\theta_{ov2} - \vartheta_{c2})}{C_a \cdot \rho_a \cdot A_{c2} \cdot d_{c2}} \right]$$

- α_{c2} - Coefficiente di scambio di calore convettivo tra il frangisole e il punto 4 [W/m²*K];
- q_{v1_1} - Flusso d'aria nella cavità esterna [m³/s];
- A - Superficie ortogonale al flusso energetico [m²];
- θ_2 - Temperatura sul frangisole [°C];
- ϑ_{c2} - Temperatura nel mezzo della cavità interna [°C];
- ϑ_3 - Temperatura sulla prima lastra del vetro camera interno [°C];
- θ_{ov2} - Temperatura di ingresso nella cavità interna [°C];
- C_a - Calore specifico a volume costante dell'aria [J/Kg*K];
- ρ_a - Densità dell'aria [Kg/m³];
- A_{c2} - Area della cavità interna [m²];
- d_{c2} - Spessore della cavità interna [m];

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Scambi termici Nodo 5:

- Convenzione tra il vetro interno e la cavità interna (5-4);
- Irraggiamento tra vetro interno e veneziane (5-4);
- Radiazione solare assorbita dalla prima lastra di vetro pelle interna;
- Conduzione, convezione e irraggiamento dell'argon nel vetro camera (5-6).



$$\int_A \left[\frac{\alpha_{c2} \cdot A \cdot (\vartheta_{c2} - \vartheta_3) + \alpha_{s23} \cdot A \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) + \alpha_{db} \cdot A \cdot (\vartheta_4 - \vartheta_3) + A_3 \cdot q_{sun} \cdot A}{A} \right] \cdot dA =$$

$$\int_V C_g \cdot \rho_g \cdot \frac{d\vartheta_3}{dt} \cdot dV$$

$$\frac{d\vartheta_3}{dt} = \left[\frac{\alpha_{c2} \cdot (\theta_{c2} - \vartheta_3) + \alpha_{s23} \cdot (\theta_2 - \theta_3) + \alpha_{db} \cdot (\vartheta_4 - \vartheta_3) + A_3 \cdot q_{sun}}{C_g \cdot \rho_g \cdot A_{g1} \cdot d_{g1}} \right] \cdot A$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

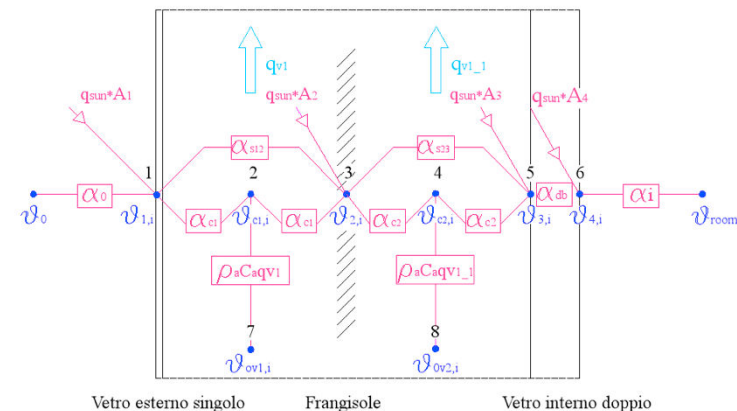
$$\frac{d\vartheta_3}{dt} = \left[\frac{\alpha_{c2} \cdot (\theta_{c2} - \vartheta_3) + \alpha_{s23} \cdot (\theta_2 - \theta_3) + \alpha_{db} \cdot (\vartheta_4 - \vartheta_3) + A_3 \cdot q_{sun}}{C_g \cdot \rho_g \cdot A_{g1} \cdot d_{g1}} \right] \cdot A$$

- α_{c2} - Coefficiente di scambio di calore convettivo tra il frangisole e il punto 4 [W/m²*K];
- α_{s23} - Coefficiente di scambio di calore radiativo tra il frangisole e il vetro interno [W/m²*K];
- α_{db} - Coefficiente di scambio di calore che tiene conto della conduzione, convezione e irraggiamento [W/m²*K];
- A_3 - Percentuale di radiazione solare assorbita dalla prima lastra del vetro camera interno[-];
- q_{sun} - Radiazione solare [W/m²];
- A - Superficie ortogonale al flusso energetico [m²];
- ϑ_2 - Temperatura sul frangisole [°C];
- ϑ_{c2} - Temperatura nel mezzo della cavità interna [°C];
- ϑ_3 - Temperatura sulla prima lastra del vetro camera interno [°C];
- ϑ_4 - Temperatura sulla seconda lastra del vetro camera interno [°C];
- C_g - Calore specifico della prima lastra del vetro camera interno [J/Kg*K];
- ρ_g - Densità del vetro [Kg/m³];
- A_{g1} - Area della prima lastra del vetro camera interno[m²];
- d_{g1} - Spessore della prima lastra del vetro camera interno [m];

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Scambi termici Nodo 6:

- Convenzione tra la seconda lastra del vetro interno e l'ambiente interno (6-room);
- Radiazione solare assorbita dalla seconda lastra, pelle interna;
- Conduzione, convezione e irraggiamento dell'argon nel vetro camera (6-room).



$$\int_A \left[\frac{\alpha_i \cdot A \cdot (\vartheta_{room} - \vartheta_4) + \alpha_{db} \cdot A \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_4) + A_4 \cdot q_{sun} \cdot A}{A} \right] \cdot dA =$$

$$\int_V C_g \cdot \rho_g \cdot \frac{d\vartheta_4}{dt} \cdot dV$$

$$\frac{d\vartheta_4}{dt} = \left[\frac{\alpha_i \cdot (\theta_{room} - \vartheta_4) + \alpha_{db} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_4) + A_4 \cdot q_{sun}}{C_g \cdot \rho_g \cdot A_{g2} \cdot d_{g2}} \right] \cdot A$$

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

$$\frac{d\vartheta_4}{dt} = \left[\frac{\alpha_i \cdot (\theta_{room} - \vartheta_4) + \alpha_{db} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_4) + A_4 \cdot q_{sun}}{C_g \cdot \rho_g \cdot A_{g2} \cdot d_{g2}} \right] \cdot A$$

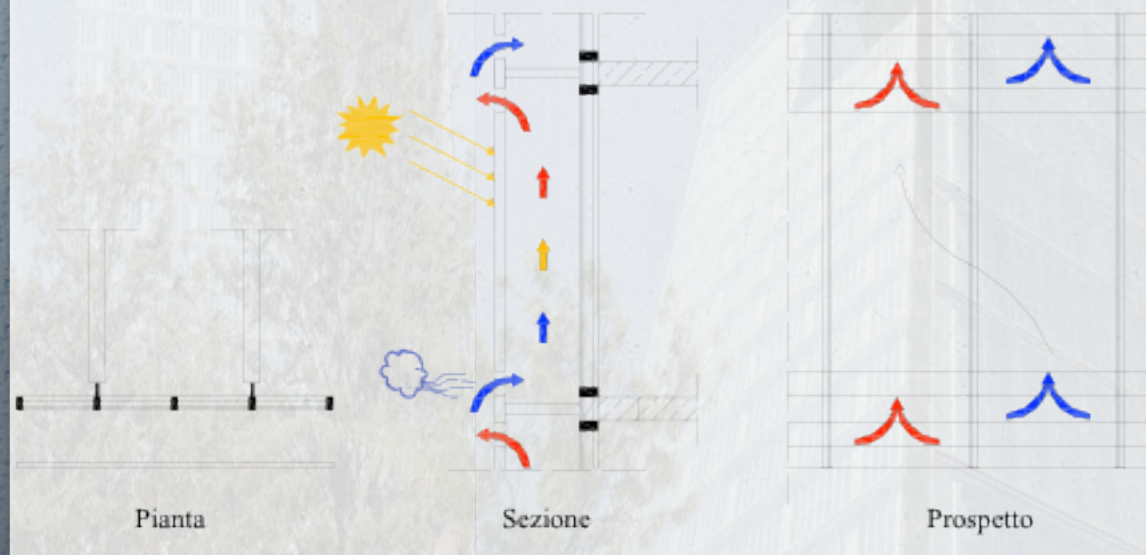
- α_{db} - Coefficiente di scambio di calore che tiene conto della conduzione, convezione e irraggiamento [W/m²*K];
- α_i - Coefficiente di scambio di calore convettivo interno [W/m²*K];
- A_4 - Percentuale di radiazione solare assorbita dalla seconda lastra del vetro camera interno[-];
- q_{sun} - Radiazione solare [W/m²];
- A - Superficie ortogonale al flusso energetico [m²];
- ϑ_3 - Temperatura sulla prima lastra del vetro camera interno [°C];
- ϑ_4 - Temperatura sulla seconda lastra del vetro camera interno [°C];
- ϑ_{room} - Temperatura interna della stanza [°C];
- C_g - Calore specifico del vetro [J/Kg*K];
- ρ_g - Densità del vetro [Kg/m³];
- A_{g2} - Area della seconda lastra del vetro camera interno[m²];
- d_{g2} - Spessore della seconda lastra del vetro camera interno [m];

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

L'applicazione pratica dell'algoritmo di calcolo è stata effettuata per la tipologia di DSF a singola cella sulla quale sono state condotte le simulazioni.

Ogni modulo della DSF è costituito da una pelle esterna 3[m]x3[m] suddivisa in due parti e sostenuta da montanti interni.

Il sistema di ancoraggio delle lastre esterne della DSF è un sistema puntuale costituito da crociere in acciaio inossidabile AISI 316.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Pelle esterna: Vetro di sicurezza Pilkington Optilam™;

Spessore vetro sicurezza: Norma UNI 7143-72, utilizzando la formula di Timoshenko:

$$s = a \cdot \sqrt{\frac{6}{n} \cdot \frac{p}{\sigma_{am}}}$$

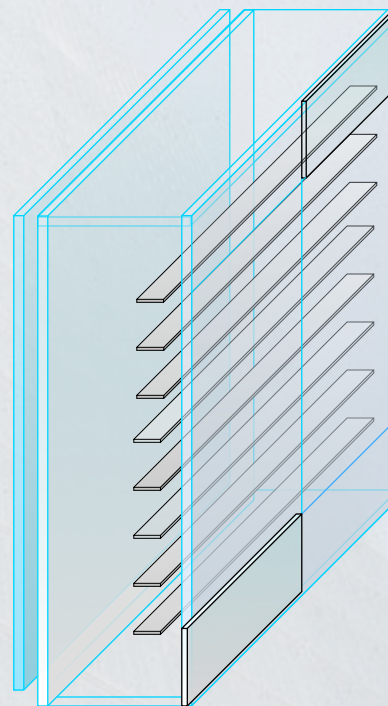
- a : Distanza tra gli appoggi nel caso in cui la lastra poggia su due lati [m];
- n : Coefficiente pari a 8 nel caso in cui la lastra poggia su due lati [-];
- p : Pressione del vento agente sulla lastra [N/m²];
- s : Spessore del vetro esterno [cm];
- σ_{am} Tensione ammissibile [N/cm²];

Ogni lastra di vetro utilizzata per i moduli di DSF:

Altezza - 3.00 m;

Larghezza - 1.50 m;

Spessore - 12.8 mm.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

Pelle interna: Vetro camera Pilkington:

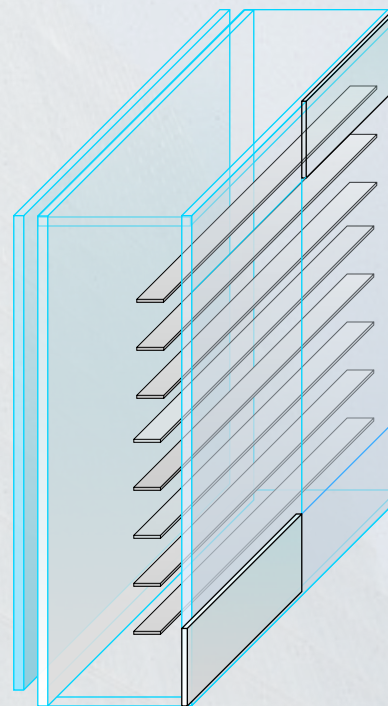
Pilkington K Glass™ con spessore di 6 mm;

Intercapedine costituita da argon con spessore di 12 mm;

Pilkington K Glass™ con spessore di 6 mm;

Il sistema di ombreggiatura: veneziana motorizzata MA016 e MA025 fornita dalla società Pellini:

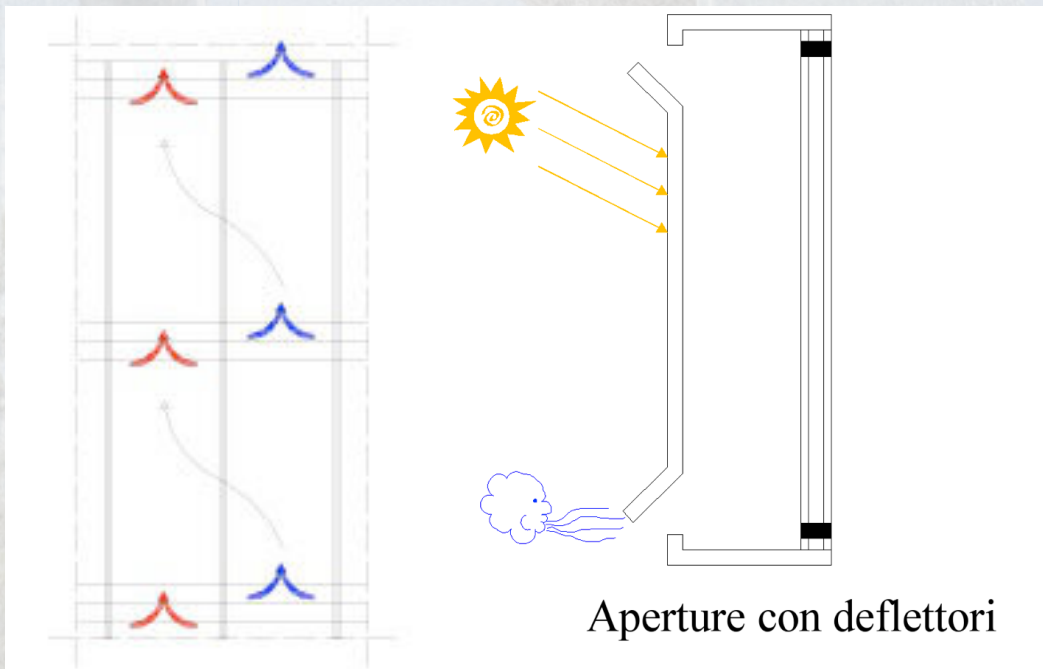
Lamelle in alluminio di larghezza 16 mm (MA016) o 25 mm (MA025) e profili in alluminio estruso verniciati in tinta con i colori delle lamelle.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Aperture nella pelle esterna: Deflettori mobili consentono il controllo del flusso d'aria e la distribuzione delle temperature.

La ventilazione variabile comporta l'applicazione di deflettori mobili regolati da impulsi elettrici e comandati da sensori che rilevano la temperatura interna, la temperatura esterna e il fattore crepuscolare ottenendo un aumento delle prestazioni complessive dell'involucro.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

L'obiettivo principale delle simulazioni è quello di definire le dimensioni geometriche della DSF a singola cella e in particolar modo l'ampiezza dell'intercapedine.

I fattori fisici che determinano l'efficienza di una DSF sono distinti per stagione:

Periodo invernale: bisogna valutare l'efficienza di preriscaldamento η : capacità della DSF di preriscaldare l'aria all'interno della cavità.

$$\eta = \frac{T_{room} - T_{cavity}}{T_{room} - T_{out}}$$

- | | |
|--------------|---|
| η | - Efficienza della temperatura di preriscaldamento [-]; |
| T_{room} | - Temperatura dell'aria all'interno della stanza [°C]; |
| T_{cavity} | - Temperatura dell'aria all'interno della cavità [°C]; |
| T_{out} | - Temperatura dell'aria esterna [°C]; |

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

Periodo estivo: Si valuta il fattore solare g ossia la quantità di calore trasferita all'interno attraverso gli strati della DSF, includendo non solo l'energia trasferita direttamente ma anche la radiazione solare assorbita e trasferita per conduzione, convezione e irraggiamento.

$$g = \frac{DT \cdot q_{sun} + \alpha_i \cdot (\theta_{surface} - \theta_{inside})}{q_{sun}}$$

- | | |
|--------------------|---|
| g | - Quantità di calore trasferito all'interno [-]; |
| DT | - Percentuale di radiazione solare trasferita all'interno [-]; |
| q_{sun} | - Irradianza solare verticale [W/m ²]; |
| $\theta_{surface}$ | - Temperatura sulla superficie del vetro interno [°K]; |
| θ_{inside} | - Temperatura dell'aria interna [°K]; |
| α_i | - Coefficiente di scambio di calore convettivo interno [W/m ² *K]; |

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Comparando le differenti simulazioni per stagione, si sceglierà la DSF che presenta il più basso valore del fattore solare g e il più alto valore dell'efficienza η .

Le dimensioni fissate della DSF a singola cella durante le simulazioni sono:

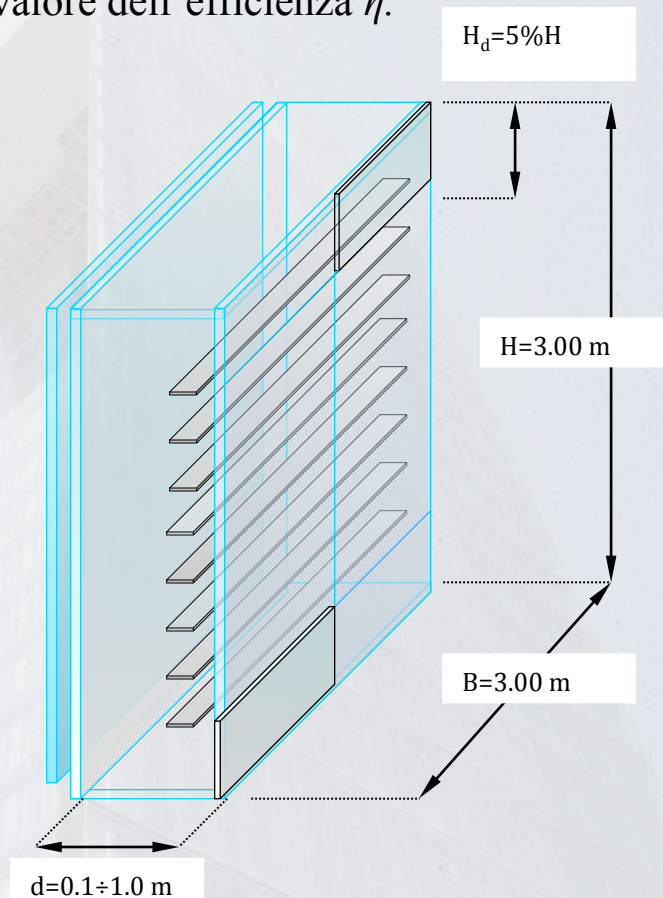
Altezza pari a 3.00 m;

Larghezza pari a 3.00 m;

Profondità variabile:

- cavità non accessibile da 0.1 a 0.5 m;
- cavità accessibile da 0.6 a 1.0 m;

Altezza dei deflettori pari al 5% dell'altezza del modulo di DSF;



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Periodo Estivo

I risultati delle simulazioni nel periodo estivo si ottengono utilizzando:

- **Modello flusso d'aria e modello termico all'interno del Simulink;**
 - **Dati climatici di input:**
1. Distribuzione giornaliera della temperatura estiva massima [°C] (Norma UNI 10349)
$$\vartheta_t = \theta_{\max} - F(t) \cdot \Delta\theta_{\max}$$

$\theta_{\max}$ Temperatura massima giornaliera dell'aria esterna, desunta dalla norma UNI, valutabile in base al capoluogo di provincia (altitudine);

$F(t)$ Fattore di distribuzione della temperatura, desunto dalla norma UNI in base all'orario di simulazione;

$\Delta\theta_{\max}$ Escursione giornaliera dell'aria esterna desunta dalla norma UNI, valutabile in base al capoluogo di provincia (altitudine).

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Periodo Estivo

2. Irradianza solare massima estiva incidente sulla superficie verticale [W/m^2], desumibile dalla Norma UNI 10349 in base alle coordinate geografiche del capoluogo di provincia;
3. Valori medi mensili della velocità del vento [m/s], forniti dall'ufficio centrale di ecologia agraria (UCEA).

- **Dati geometrici di input:**

1. Dimensioni della DSF;
2. Venezie chiuse e posizionate nel mezzo dell'intercapedine;
3. Deflettori aperti.

- **Output:**

1. Profondità ideale dell'intercapedine:
 - Non accessibile da 10 a 50 [cm];
 - Accessibile da 60 a 100 [cm].

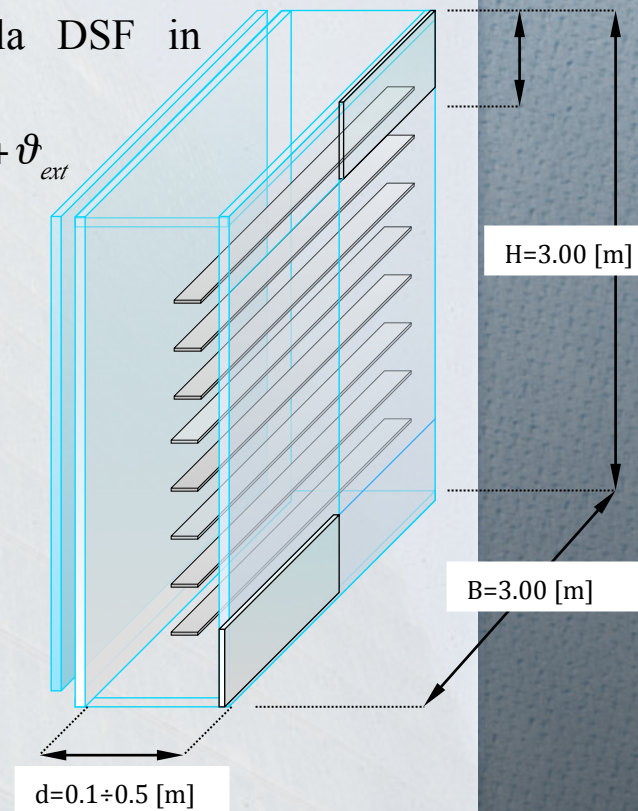
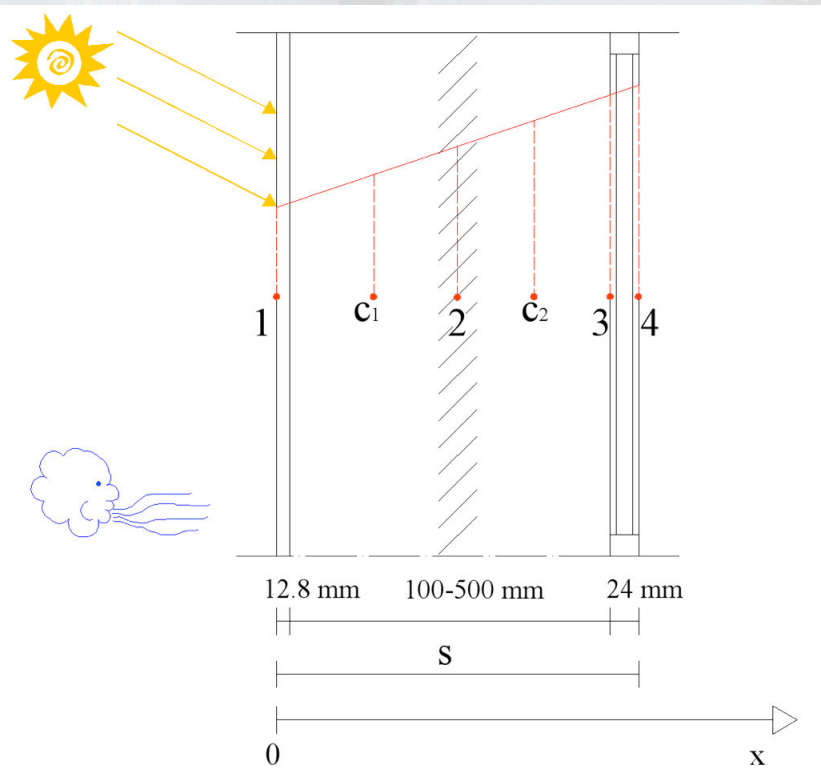
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Estate per cavità non accessibili

Simulazioni nel periodo estivo per valutare la profondità ideale dell'intercapedine non accessibile. *Presenza del solo effetto stack, effetto wind trascurato.*

Andamento lineare della temperatura all'interno della DSF in condizioni non stazionarie della rete termica.

$$\vartheta[x] = \frac{\vartheta_{room} - \vartheta_{ext}}{S} \cdot x + \vartheta_{ext}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

I risultati di queste simulazioni consentono di affermare che il valore più basso del fattore solare g si verifica in corrispondenza di una DSF profonda $d = 20$ [cm] e $d = 30$ [cm], in corrispondenza della massima irradianza ($q_{\text{sun}} = 457$ [W/m²] alle ore 12:00).

	Profondità della cavità non accessibile [m]	Temperatura massima dell'aria nella cavità [°C]		Flusso d'aria nella cavità [m ³ /s]		Velocità dell'aria nella cavità [m/s]		g
		Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	
1 ^a Simulazione	0.10	55.03	52.01	0.0139	0.132	0.0926	0.0880	0.3238
2 ^a Simulazione	0.20	49.31	47.30	0.0168	0.0153	0.0561	0.0511	0.3236
3 ^a Simulazione	0.30	46.89	45.54	0.0176	0.0154	0.0391	0.0341	0.3245
4 ^a Simulazione	0.40	45.44	44.53	0.0178	0.0151	0.0296	0.0251	0.3253
5 ^a Simulazione	0.50	44.42	43.80	0.0177	0.0148	0.0236	0.0197	0.3260

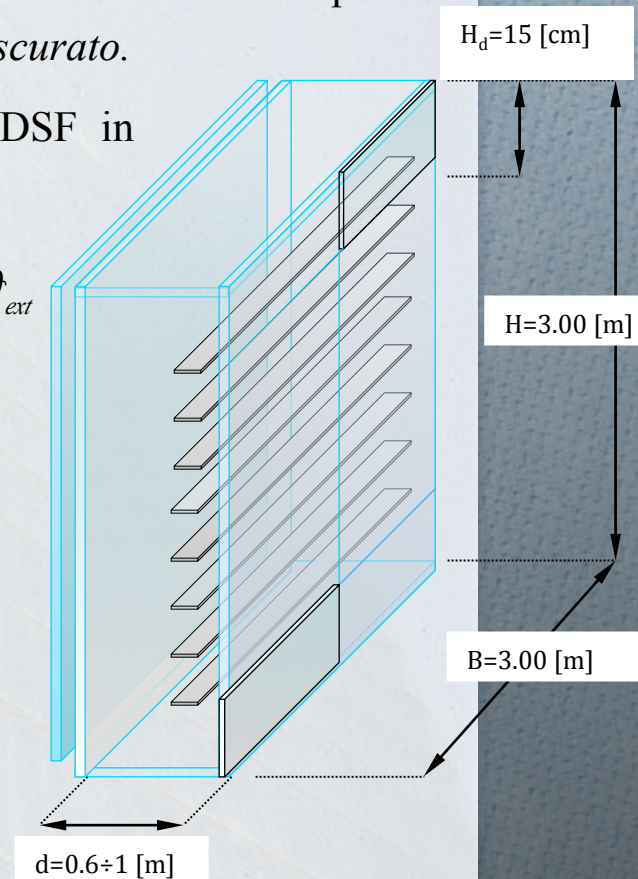
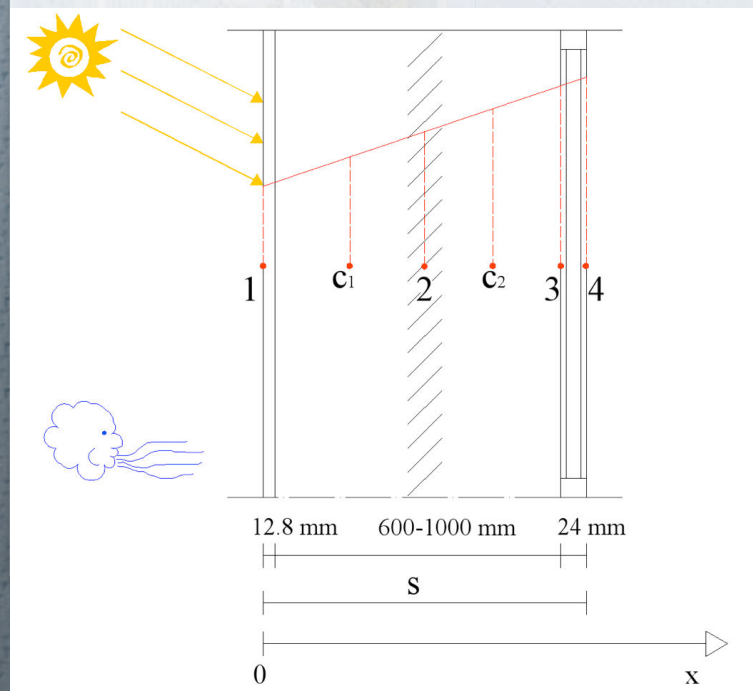
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Estate per cavità accessibili

Simulazioni nel periodo estivo per valutare la profondità ideale dell'intercapedine accessibile. *Presenza del solo effetto stack, effetto wind trascurato.*

Andamento lineare della temperatura all'interno della DSF in condizioni non stazionarie della rete termica.

$$\vartheta[x] = \frac{\vartheta_{room} - \vartheta_{ext}}{s} \cdot x + \vartheta_{ext}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

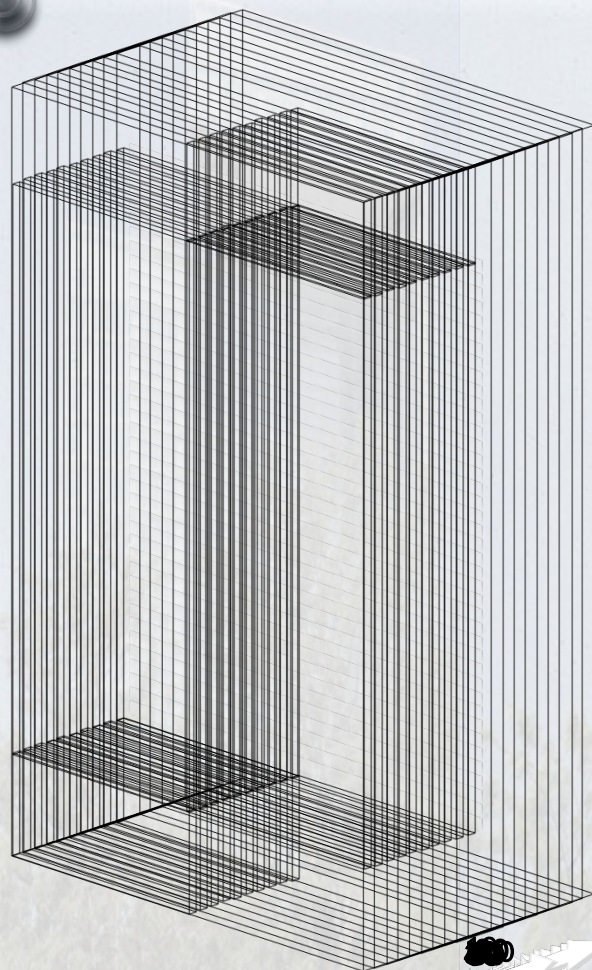
I risultati di queste simulazioni consentono di affermare che il valore più basso del fattore solare g si verifica in corrispondenza di una DSF profonda $d = 60$ [cm], in corrispondenza della massima irradianza ($q_{\text{sun}} = 457$ [W/m²] alle ore 12:00).

	Profondità della cavità accessibile [m]	Temperatura massima dell'aria nella cavità [°C]		Flusso d'aria nella cavità [m ³ /s]		Velocità dell'aria nella cavità [m/s]		g
		Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	
6 ^a Simulazione	0.60	43.62	43.18	0.0175	0.0145	0.0195	0.0161	0.3268
7 ^a Simulazione	0.70	42.94	42.63	0.0173	0.0136	0.0164	0.0136	0.3274
8 ^a Simulazione	0.80	42.34	42.10	0.0170	0.0140	0.0141	0.0117	0.3280
9 ^a Simulazione	0.90	41.77	41.59	0.0167	0.0138	0.0124	0.0102	0.3285
10 ^a Simulazione	1.0	41.22	41.08	0.0164	0.0135	0.0109	0.0902	0.3291

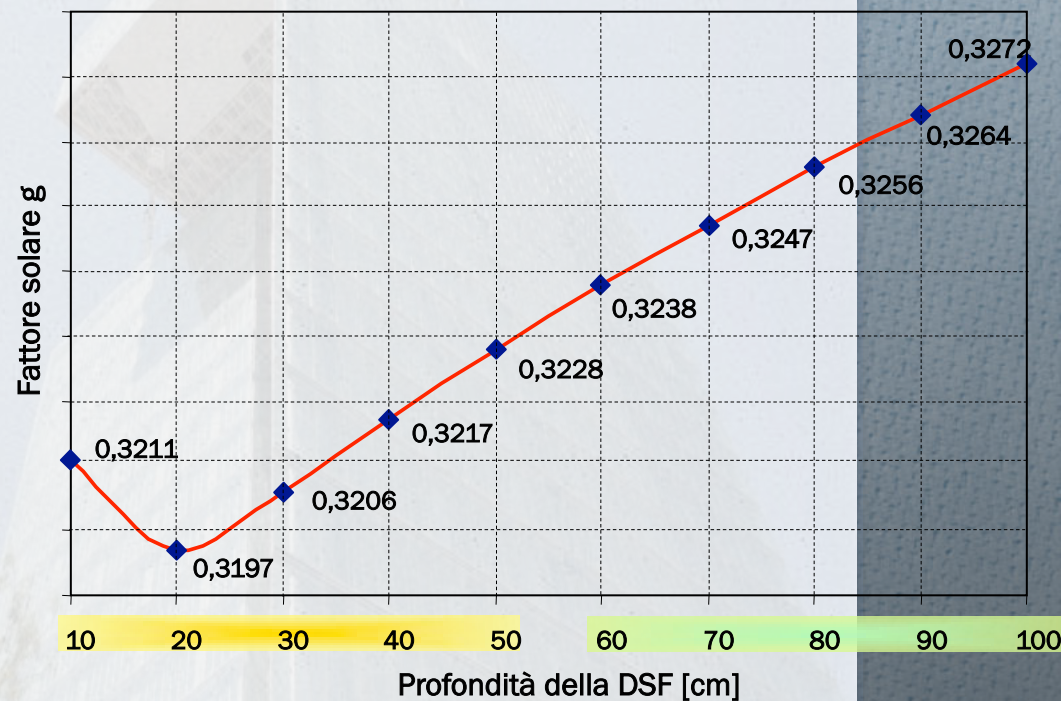
EDIZIONI ACCADEMICHE ITALIANE



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni



Fattore solare g al variare della profondità della DSF



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

I risultati delle simulazioni nel periodo invernale si ottengono:

- **Modello flusso d'aria e modello termico all'interno del Simulink;**
- **Dati climatici di input:**

1. Distribuzione giornaliera della temperatura invernale [°C];

La norma UNI 10349 ha definito il mese più freddo: Gennaio.

La distribuzione giornaliera della temperatura invernale riferita al mese di gennaio 2006 è stata desunta dall'istituto di metodologie per l'analisi ambientale (IMAA) presente il CNR di Potenza.

Tempo [hh:mm]	Temperatura media Gennaio 2006 [°C]
	Giorni 07_08_13_14_15_20_23_24_25_26
0.00	-2,45
1.00	-2,8
2.00	-3
3.00	-3,06
4.00	-3,36
5.00	-3,9
6.00	-3,89
7.00	-3,92
8.00	-2,21
9.00	-0,85
10.00	-1,6
11.00	1,76
12.00	2,46
13.00	2,71
14.00	2,48
15.00	1,75
16.00	0,48
17.00	-0,23
18.00	-0,53
19.00	-0,84
20.00	-1,37
21.00	-1,72
22.00	-1,61
23.00	-1,59

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

2. Irradianza solare massima invernale incidente sulla superficie verticale [W/m²];

I valori dell'irradianza solare invernale incidente su una superficie orizzontale sono stati forniti dalla Agenzia Lucana di Sviluppo e di Innovazione in Agricoltura (ALSIA) di Matera inerenti al mese di Gennaio.

Per ottenere i valori dell'irradianza solare invernale incidente su una superficie verticale si fa riferimento alla norma UNI 8477/1:

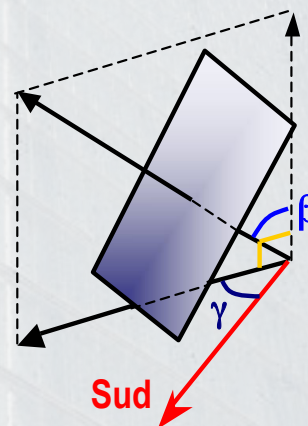
$$H = R \cdot H_h$$

H_h
 R

- Irradianza orizzontale;

- Coefficiente che tiene conto del soleggiamento diretto, diffuso e riflesso;

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H_h}\right) \cdot R_b \cdot \frac{H_d}{H_h} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

2. Valori medi mensili della velocità del vento [m/s], forniti dall'ufficio centrale di ecologia agraria (UCEA).

- **Dati geometrici di input:**

1. Dimensioni della DSF;
2. Venezie inclinate di 60° e posizionate nel mezzo dell'intercapedine;
3. Deflettori chiusi.

- **Output:**

1. Profondità ideale dell'intercapedine:
 - Non accessibile da 10 a 50 [cm];
 - Accessibile da 60 a 100 [cm].

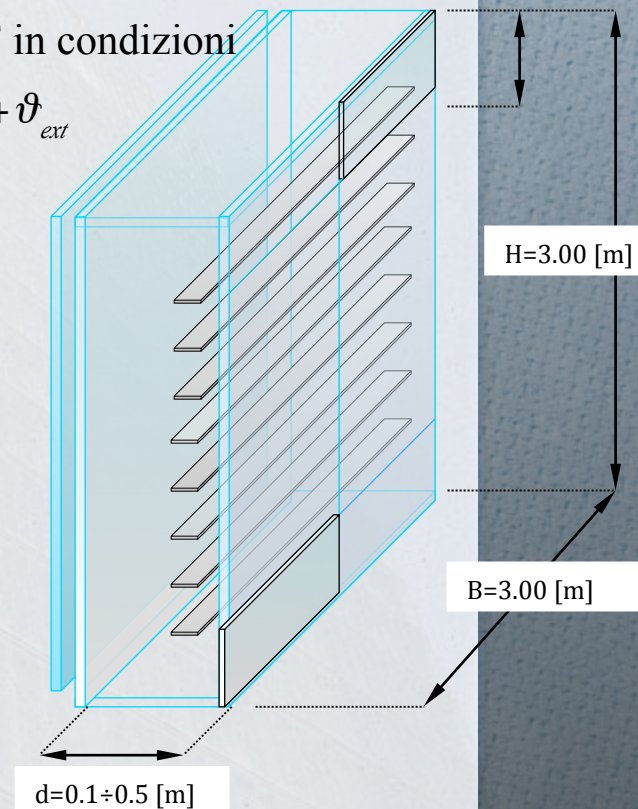
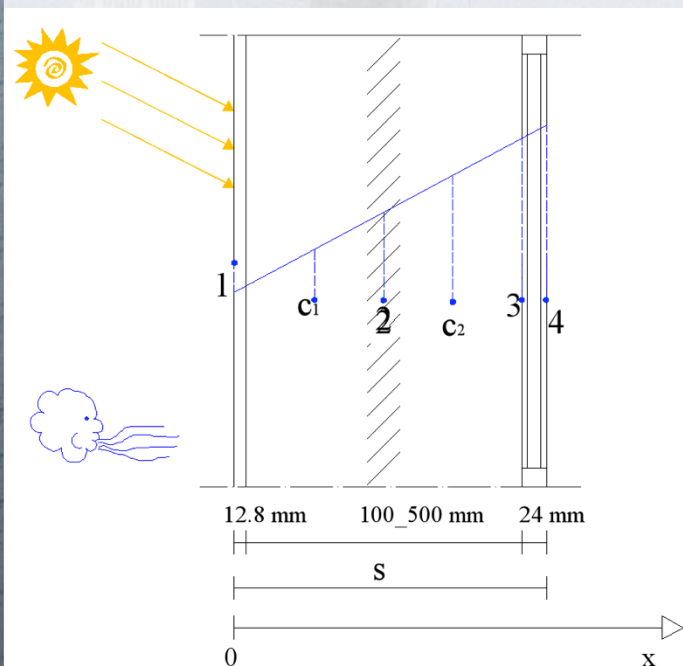
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Inverno per cavità non accessibili

Simulazioni nel periodo invernale per valutare la profondità ideale dell'intercapedine non accessibile. *Presenza del solo effetto stack, effetto wind trascurato.*

Andamento lineare della temperatura all'interno della DSF in condizioni non stazionarie della rete termica.

$$\vartheta[x] = \frac{\vartheta_{room} - \vartheta_{ext}}{s} \cdot x + \vartheta_{ext}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

I risultati di queste simulazioni consentono di affermare che il valore più alto dell'efficienza η si verifica in corrispondenza di una DSF profonda $d = 10_20$ [cm];

	Profondità della cavità non accessibile [m]	Temperatura massima dell'aria nella cavità [°C]		Flusso d'aria nella cavità [m³/s]		Velocità dell'aria nella cavità [m/s]		η
		Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	
1 ^a Simulazione	0.10	25.95	25.71	0.0018	-0.0018	0.1188	-0.1188	1.377
2 ^a Simulazione	0.20	25.73	25.66	0.0020	-0.0020	0.0065	-0.0065	1.364
3 ^a Simulazione	0.30	25.67	25.64	0.0019	-0.0019	0.0043	-0.0043	1.361
4 ^a Simulazione	0.40	25.64	25.63	0.0018	-0.0018	0.0031	-0.0031	1.359
5 ^a Simulazione	0.50	25.63	25.63	0.0018	-0.0018	0.0024	-0.0024	1.359

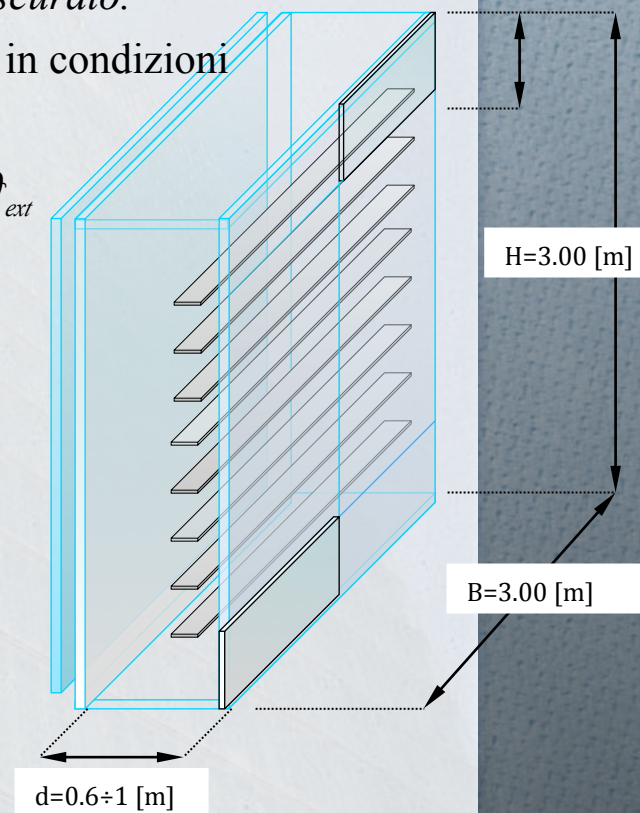
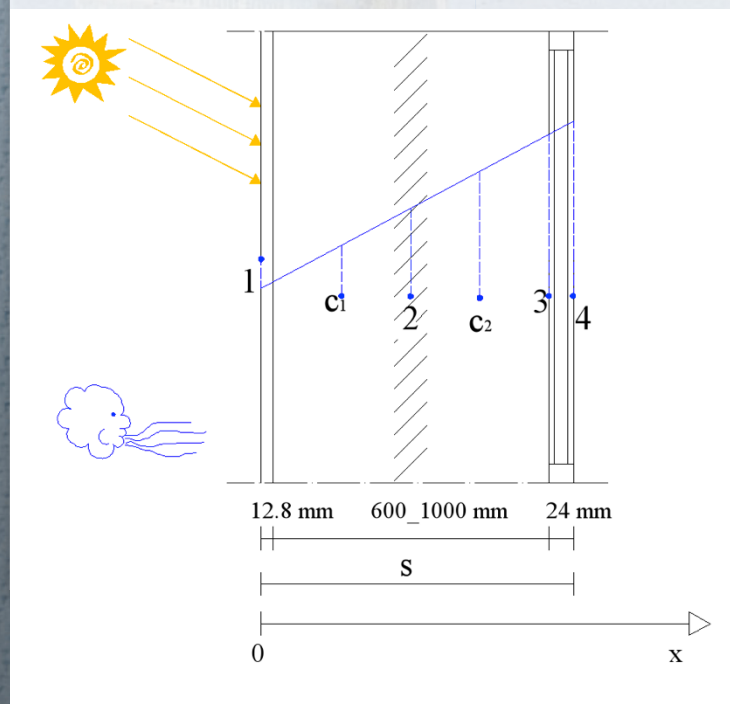
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Inverno per cavità accessibili

Simulazioni nel periodo invernale per valutare la profondità ideale dell'intercapedine accessibile. *Presenza del solo effetto stack, effetto wind trascurato.*

Andamento lineare della temperatura all'interno della DSF in condizioni non stazionarie della rete termica.

$$\vartheta[x] = \frac{\vartheta_{room} - \vartheta_{ext}}{s} \cdot x + \vartheta_{ext}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

I risultati di queste simulazioni consentono di affermare che il valore più alto dell'efficienza η si verifica in corrispondenza di una DSF profonda $d = 60$ [cm];

	Profondità della cavità accessibile [m]	Temperatura massima dell'aria nella cavità [°C]		Flusso d'aria nella cavità [m³/s]		Velocità dell'aria nella cavità [m/s]		η
		Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	
6 ^a Simulazione	0.60	25.63	25.62	0.0017	-0.0017	0.0019	-0.0019	1.358
7 ^a Simulazione	0.70	25.62	25.62	0.0016	-0.0016	0.0015	-0.0015	1.358
8 ^a Simulazione	0.80	25.62	25.62	0.0015	-0.0015	0.0013	-0.0013	1.358
9 ^a Simulazione	0.90	25.62	25.61	0.0014	-0.0014	0.0011	-0.011	1.357
10 ^a Simulazione	10.0	25.60	25.60	0.0091	-0.0091	0.0014	-0.0014	1.357

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

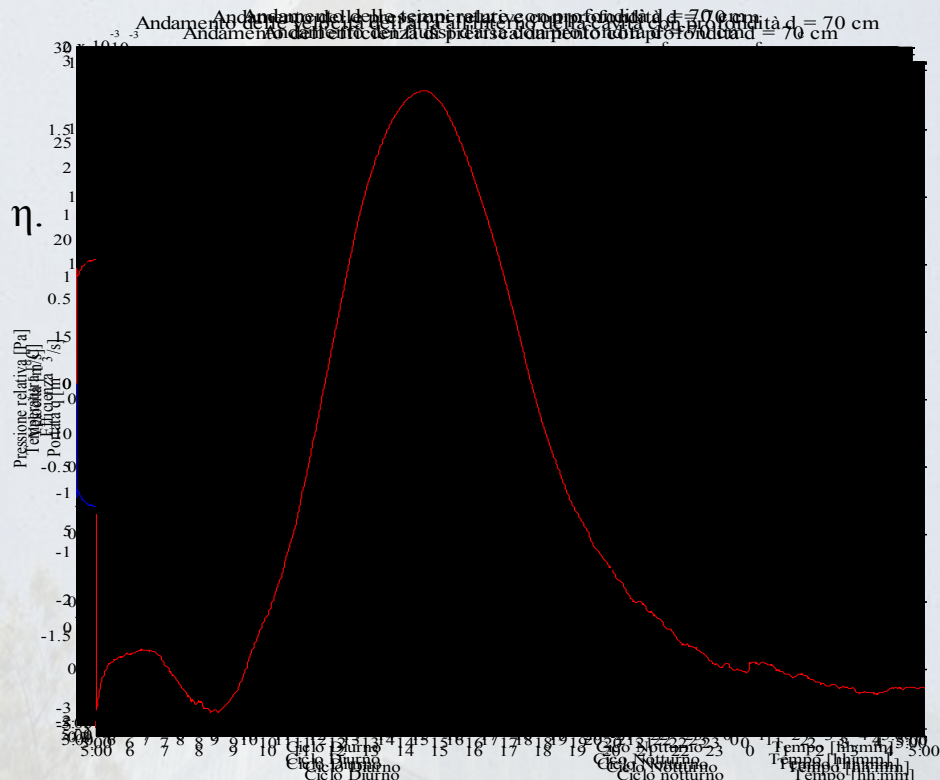
Andamento delle temperature.

Andamento dei flussi d'aria;

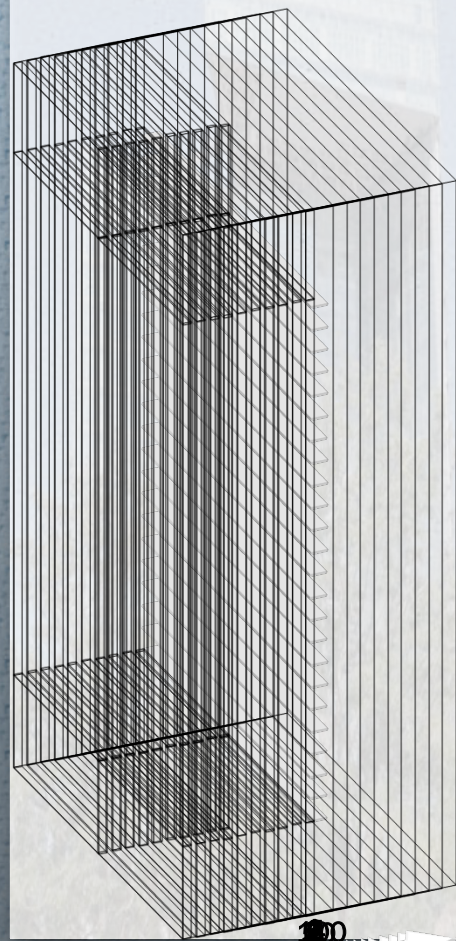
Andamento delle velocità;

Andamento delle pressioni;

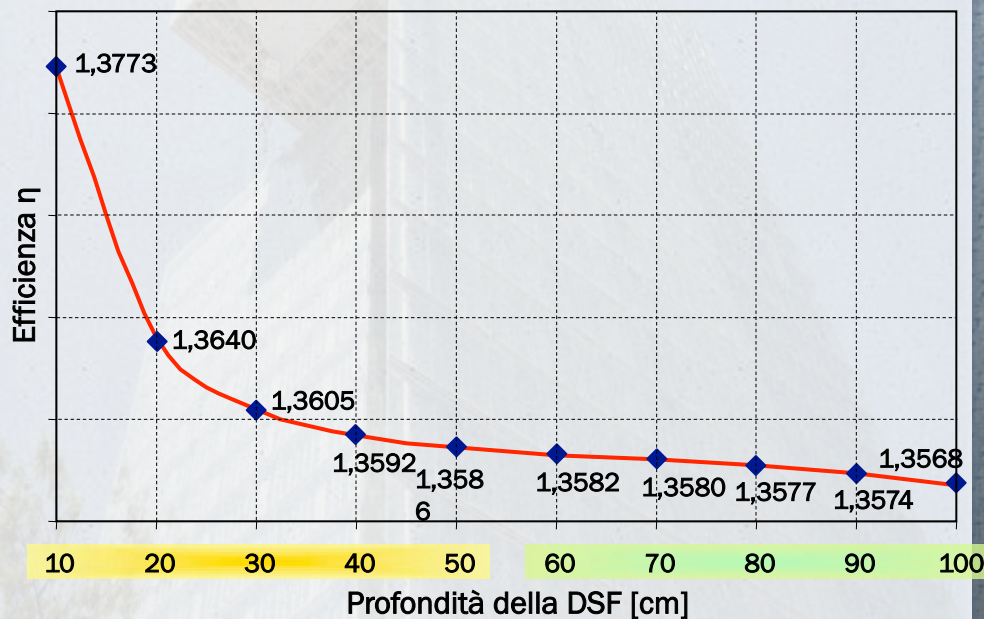
Efficienza di preriscaldamento η .



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni



Efficienza η al variare della profondità della DSF



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

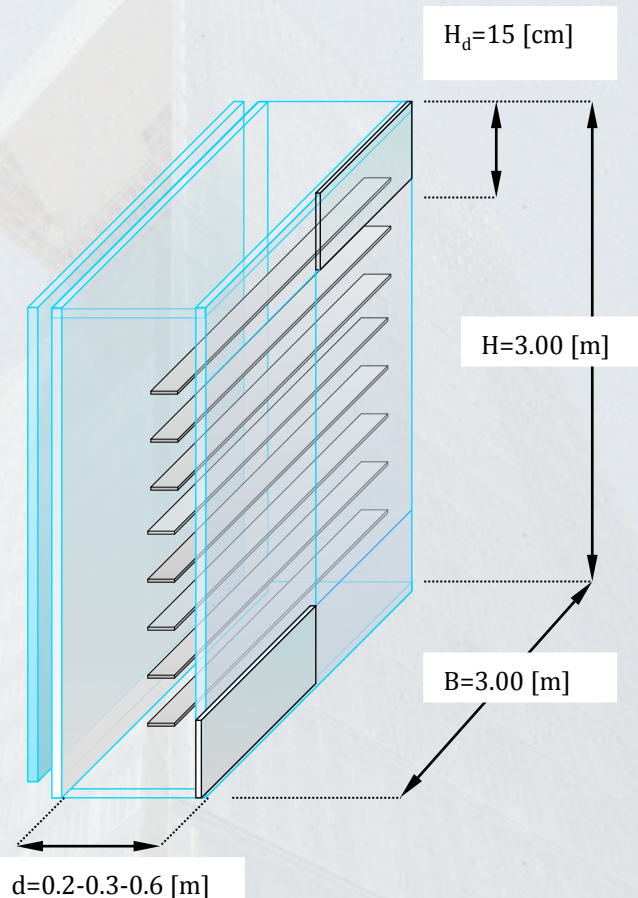
Modellazione Fisica e Simulazioni

Comparando i risultati delle simulazioni sia nel periodo estivo che in quello invernale l'ampiezza ideale delle intercapedine è:

- *Cavità non accessibili 20_30 [cm];*
- *Cavità accessibili 60 [cm].*

Input geometrici:

- *DSF: 3[m]x3[m];*
- *$H_{\text{deflettore}}$: 15 [cm];*
- *Veneziane posizionate nel mezzo.*



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Estate con $H_{\text{deflettore}} = 30 \text{ [cm]}$

Le successive simulazioni sono state eseguite solo in estate per valutare l'altezza dei deflettori, fissando le dimensioni della DSF, la sua profondità ideale e la posizione delle veneziane. Variando l'altezza dei deflettori da 15 a 30 [cm].

Input geometrici:

- *DSF: 3[m]x3[m];*
- *Profondità dell'intercapedine $d=0.20 \text{ [m]}$, $d=0.3 \text{ [m]}$, $d=0.6 \text{ [m]}$.*
- *$H_{\text{deflettore}}$: 30 [cm], (10% H);*
- *Veneziane posizionate nel mezzo;*
- *Andamento lineare della temperatura.*

$$\vartheta[x] = \frac{\vartheta_{\text{room}} - \vartheta_{\text{ext}}}{s} \cdot x + \vartheta_{\text{ext}}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

I risultati delle simulazioni estive con $H_{\text{deflettore}} = 30$ [cm]:

Nelle tre intercapedini esaminate si verifica:

1. Abbassamento del fattore solare g ;
2. Riduzione delle temperature nelle due cavità;
3. Un lieve aumento della velocità e portata dell'aria.

	Profondità della cavità [m]	Temperatura massima dell'aria nella cavità [°C]		Flusso d'aria nella cavità [m³/s]		Velocità dell'aria nella cavità [m/s]		g
		Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	
1 ^a Simulazione	0.20	45.16	43.37	0.0221	0.0211	0.0736	0.0702	0.3197
2 ^a Simulazione	0.30	42.40	41.03	0.0248	0.0232	0.0517	0.0551	0.3206
3 ^a Simulazione	0.60	39.01	38.33	0.0265	0.0236	0.0294	0.0262	0.3238

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Estate con $H_{\text{deflettore}} = 45 \text{ [cm]}$

Input geometrici:

- $DSF: 3[m] \times 3[m]$;
- Profondità dell'intercapedine $d=0.20 \text{ [m]}$,
 $d=0.3 \text{ [m]}$, $d=0.6 \text{ [m]}$.
- $H_{\text{deflettore}}: 45 \text{ [cm]}$, (15% H);
- Venezie posizionate nel mezzo.
- Andamento lineare della temperatura

$$\vartheta[x] = \frac{\vartheta_{\text{room}} - \vartheta_{\text{ext}}}{s} \cdot x + \vartheta_{\text{ext}}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

I risultati delle simulazioni estive con $H_{\text{deflettore}} = 45$ [cm]:

Nelle intercapedini
non accessibili:

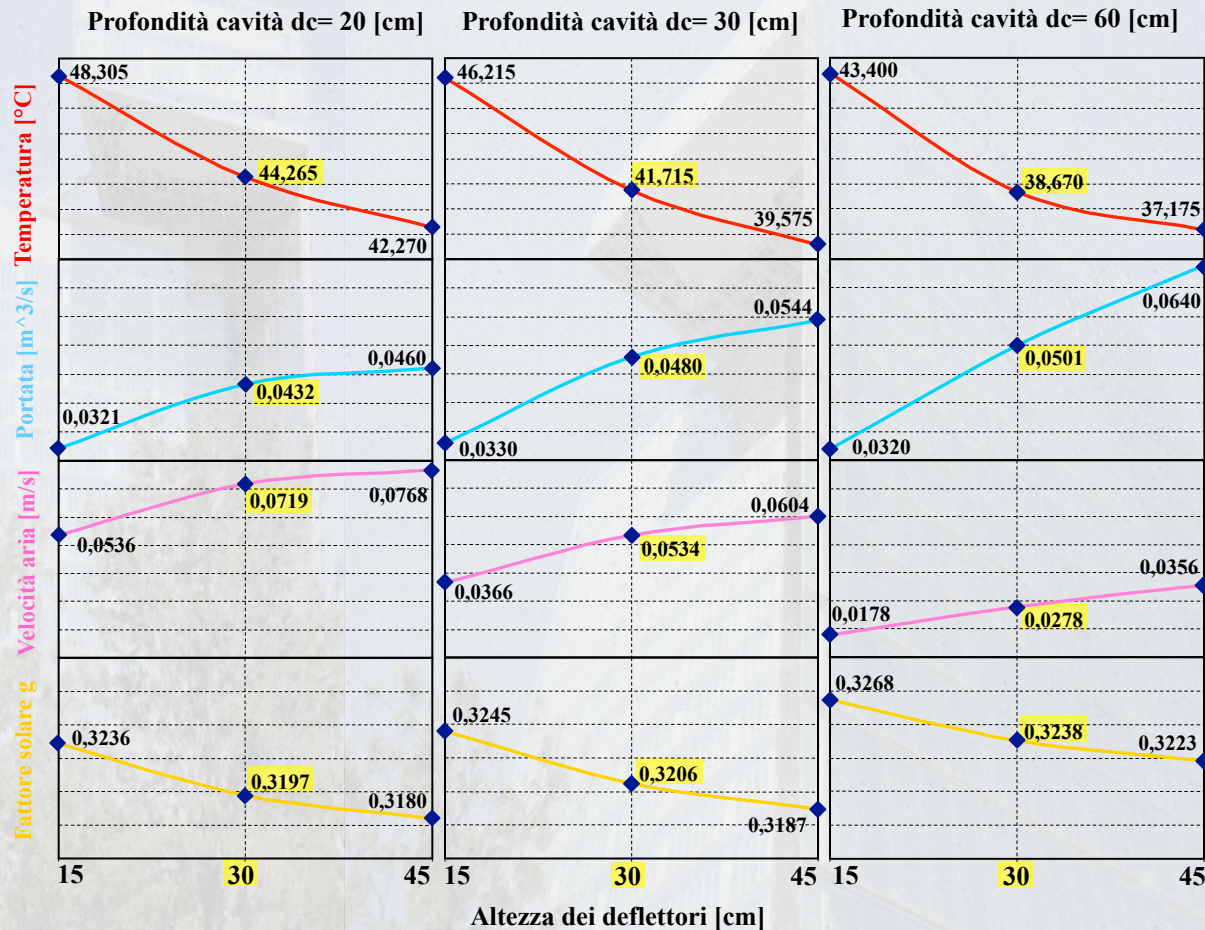
1. Un valore del
fattore solare g
simile;

Nella intercapedine
accessibili:

1. Un lieve
aumento del
fattore solare g .

	Profondità della cavità non accessibile [m]	Temperatura massima dell'aria nella cavità [°C]		Flusso d'aria nella cavità [m³/s]		Velocità dell'aria nella cavità [m/s]		g
		Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	
1 ^a Simulazione	0.20	43.06	41.48	0.0234	0.0226	0.0781	0.0754	0.318
2 ^a Simulazione	0.30	40.18	38.97	0.0278	0.0266	0.0617	0.0590	0.3187
3 ^a Simulazione	0.60	37.7	36.65	0.0647	0.0634	0.036	0.0353	0.3238

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni: Estate con la combinazione dell'effetto Stack e Wind

Input geometrici:

- $DSF: 3[m] \times 3[m]$;
- *Profondità dell'intercapedine*
- $d=0.20 [m], d=0.3 [m], d=0.6 [m]$.
- $H_{deflettore}: 30 [cm]$;
- *Veneziane chiuse posizionate nel mezzo;*
- *Andamento lineare della temperatura.*

$$\vartheta[x] = \frac{\vartheta_{room} - \vartheta_{ext}}{S} \cdot x + \vartheta_{ext}$$

$d=0.2-0.3-0.6 [m]$

$B=3.00 [m]$

$H=3.00 [m]$

30

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni: Estate con la combinazione dell'effetto Stack e Wind

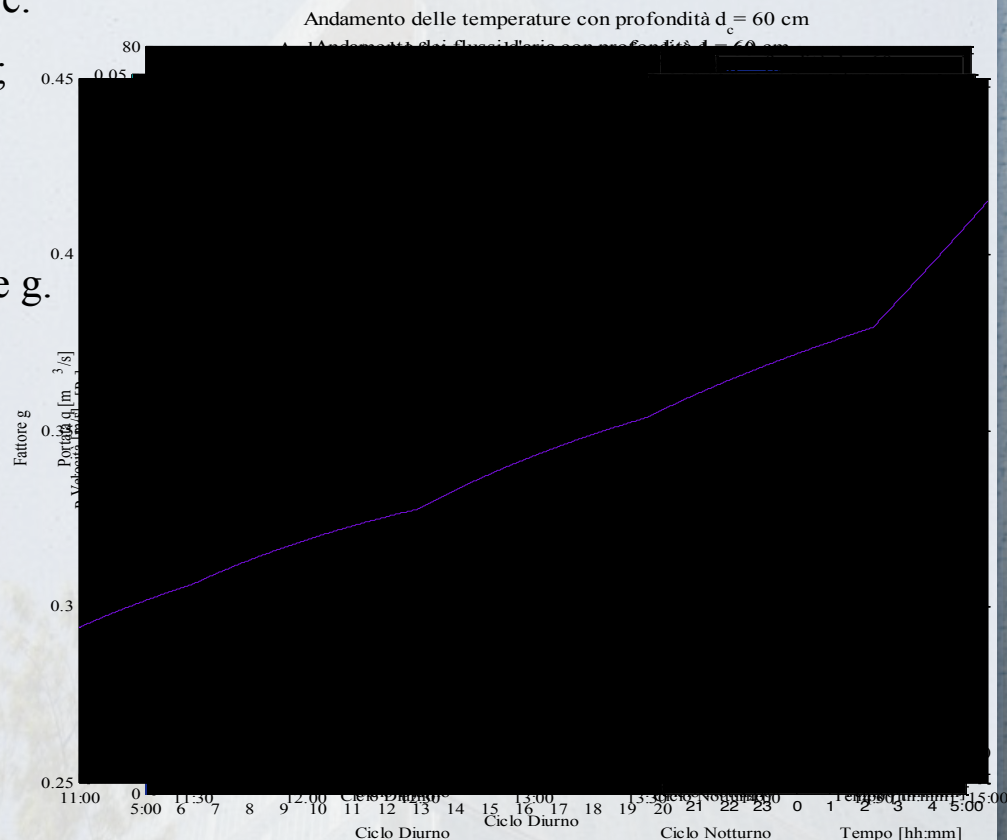
Andamento delle temperature.

Andamento dei flussi d'aria;

Andamento delle velocità;

Andamento delle pressioni;

Andamento del fattore solare g.



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni: Estate con la combinazione dell'effetto Stack e Wind

Nelle tre intercapedini esaminate si verifica:

1. Un lieve abbassamento del fattore solare g ;
2. Riduzione delle temperature nelle due cavità;
3. Valori della velocità e della portata dell'aria simili al caso del solo effetto stack.

	Profondità della cavità [m]	Temperatura massima dell'aria nella cavità [°C]		Flusso d'aria nella cavità [m³/s]		Velocità dell'aria nella cavità [m/s]		g
		Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	Cavità Int.	Cavità Est.	
1 ^a Simulazione	0.20	43.28	38.94	0.0203	0.0174	0.0676	0.0581	0.3154
2 ^a Simulazione	0.30	40.74	37.45	0.0232	0.0189	0.0517	0.0421	0.3161
3 ^a Simulazione	0.60	37.46	35.88	0.0262	0.0183	0.0291	0.0203	0.3187

Fissando l'altezza del deflettore pari a 30 cm, non si osservano variazioni significative con la presenza del vento sia per cavità accessibili e non.

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni: verifica portata d'aria

Le ultime simulazioni sono state condotte per verificare se le profondità scelte dell'intercapedine e l'altezza dei deflettori soddisfano i requisiti di portata minima pari a $0.011 \text{ [m}^3/\text{s]}$ per persona, previsti dalla Norma UNI 10339 e dall'ASHARE 62.

Con riferimento al caso studio del Print Media Accademy, dell'ufficio tipo utilizzato nelle simulazioni, bisogna verificare che i flussi d'aria, nelle due cavità, siano superiori al valore minimo di $0.044 \text{ [m}^3/\text{s]}$.

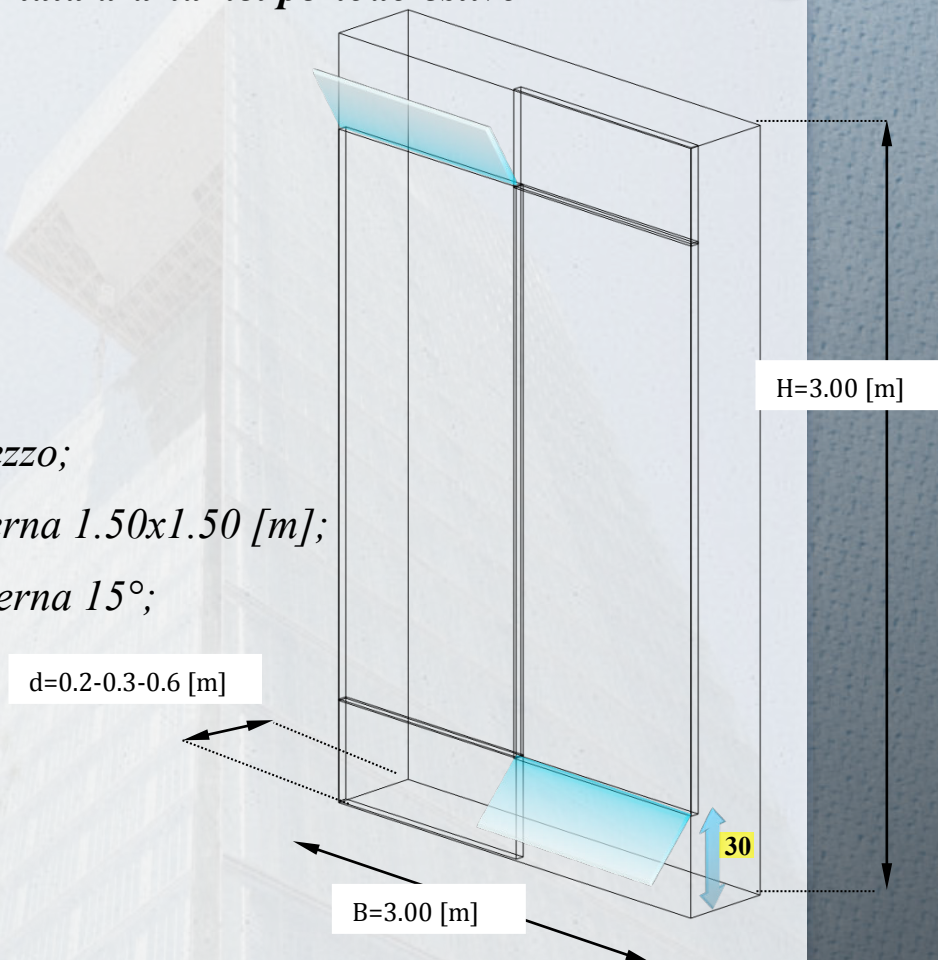


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni: verifica portata d'aria nel periodo estivo

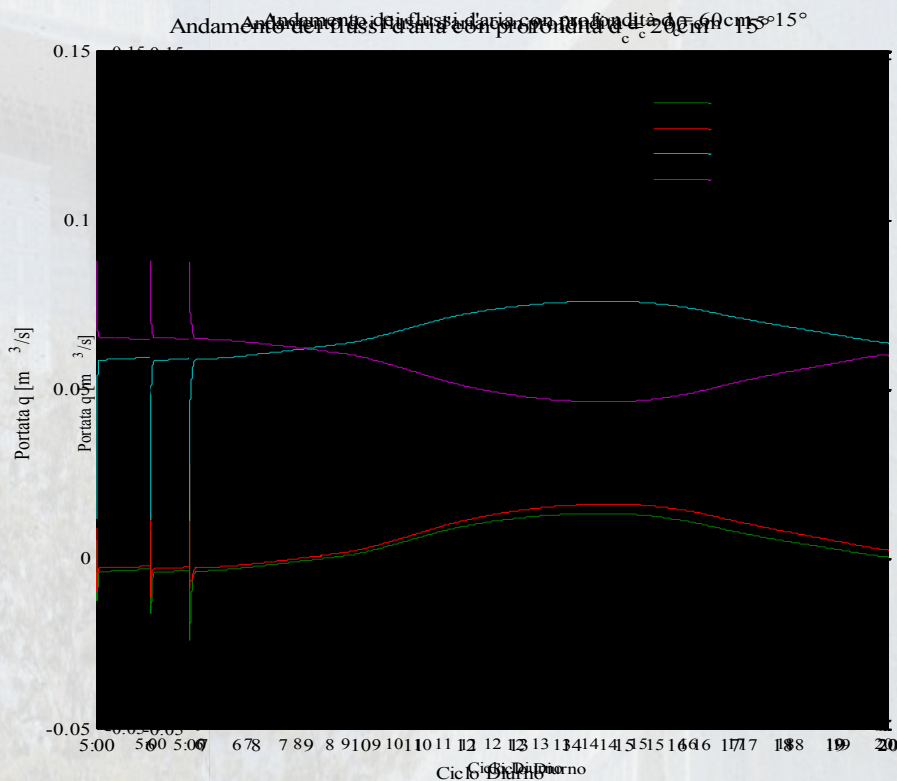
Input geometrici:

- $DSF: 3[m] \times 3[m]$;
- *Profondità dell'intercapedine*
- $d=0.20 [m]$, $d=0.3 [m]$, $d=0.6 [m]$.
- $H_{\text{deflettore}}: 30 [cm]$;
- *Veneziane chiuse posizionate nel mezzo;*
- *Dimensioni fissate della finestra interna $1.50 \times 1.50 [m]$;*
- *Angolo di apertura della finestra interna 15° ;*
- *Deflettori aperti.*



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Risultati Simulazioni: verifica portata d'aria nel periodo estivo

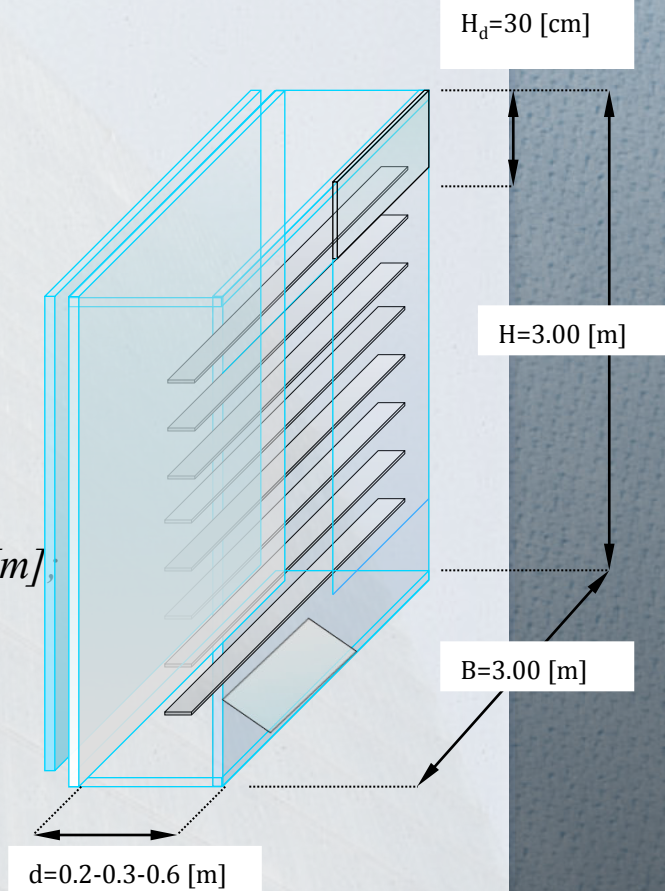


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni: verifica portata d'aria nel periodo invernale

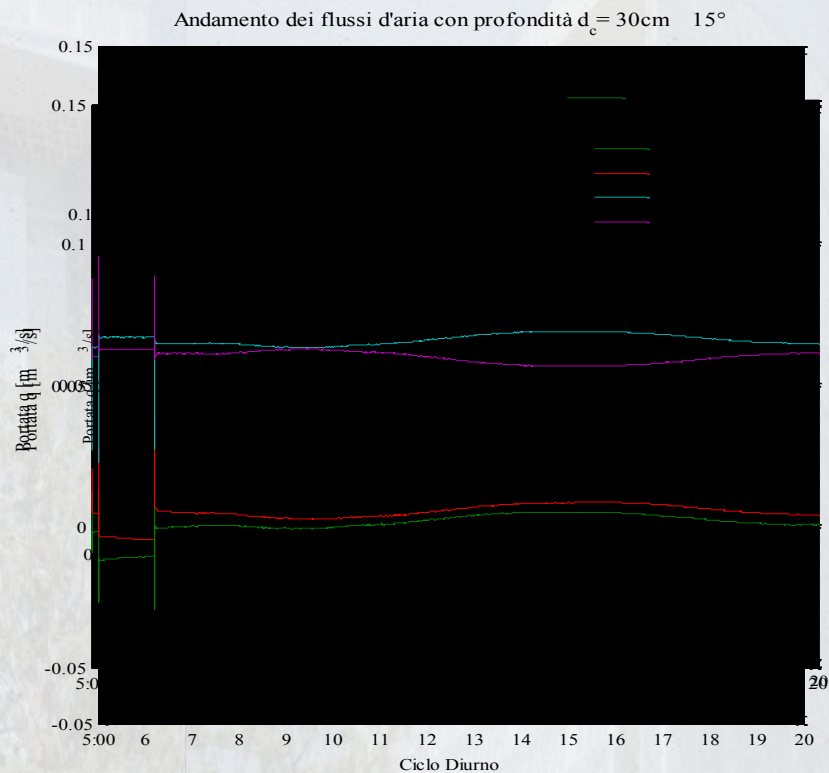
Input geometrici:

- $DSF: 3[m] \times 3[m]$;
- Profondità dell'intercapedine
- $d=0.20 [m]$, $d=0.3 [m]$, $d=0.6 [m]$.
- $H_{deflettore}: 30 [cm]$;
- Veneziiane chiuse posizionate nel mezzo;
- Dimensioni fissate della finestra interna $1.50 \times 1.50 [m]$;
- Angolo di apertura della finestra interna 15° ;
- Deflettore di base aperto.



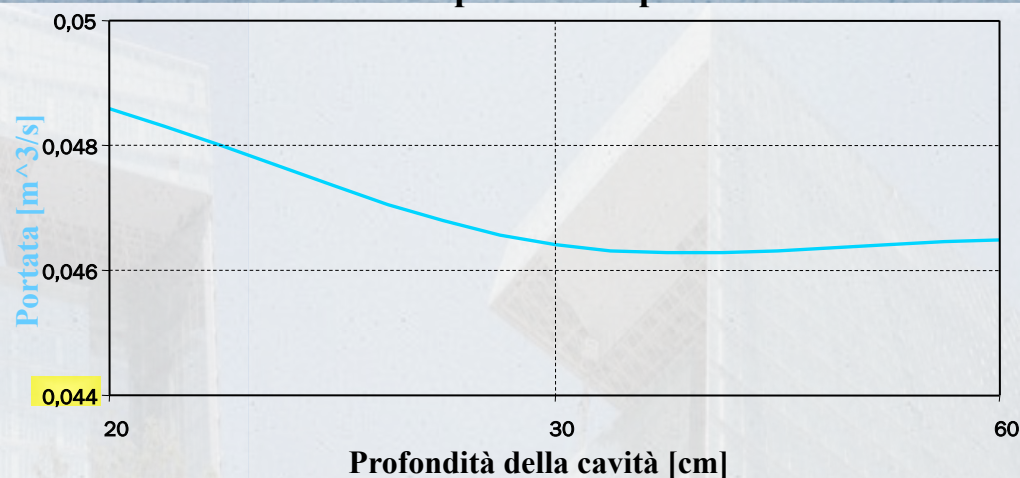
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Risultati Simulazioni: verifica portata d'aria nel periodo invernale

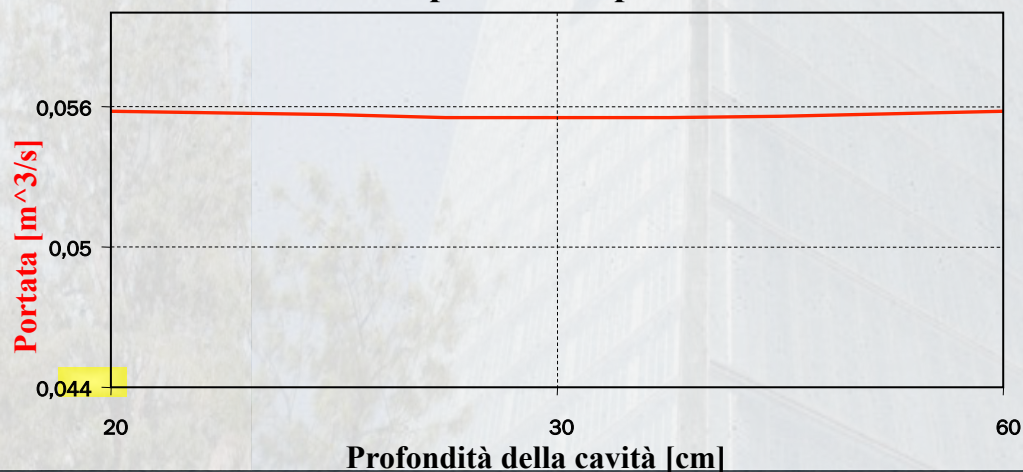


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Andamento della portata nel periodo estivo



Andamento della portata nel periodo invernale



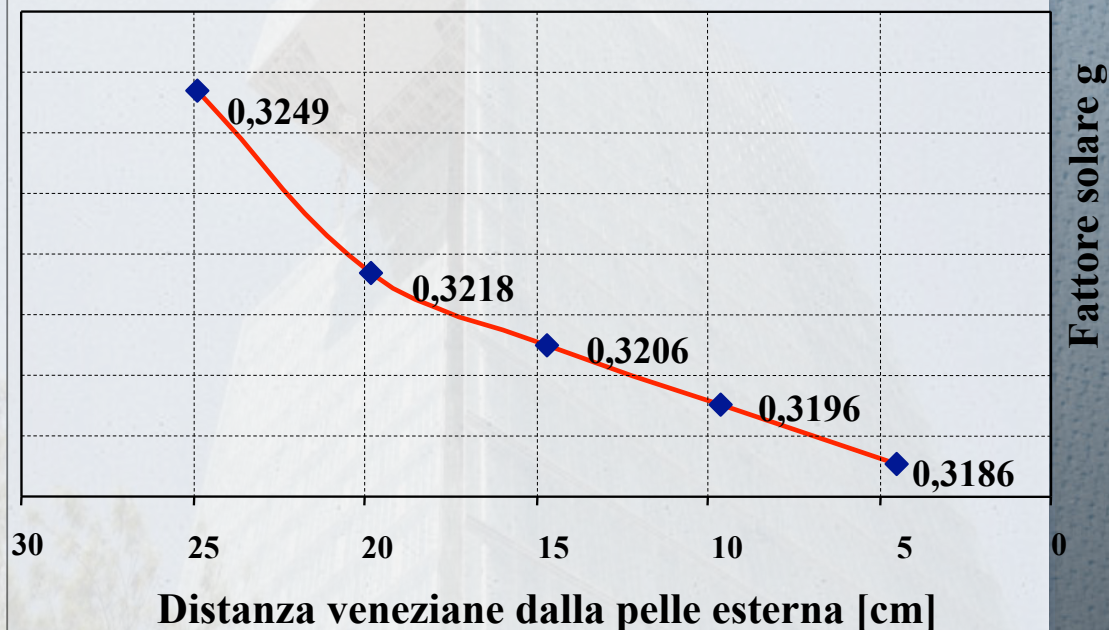
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

Modellazione Fisica e Simulazioni

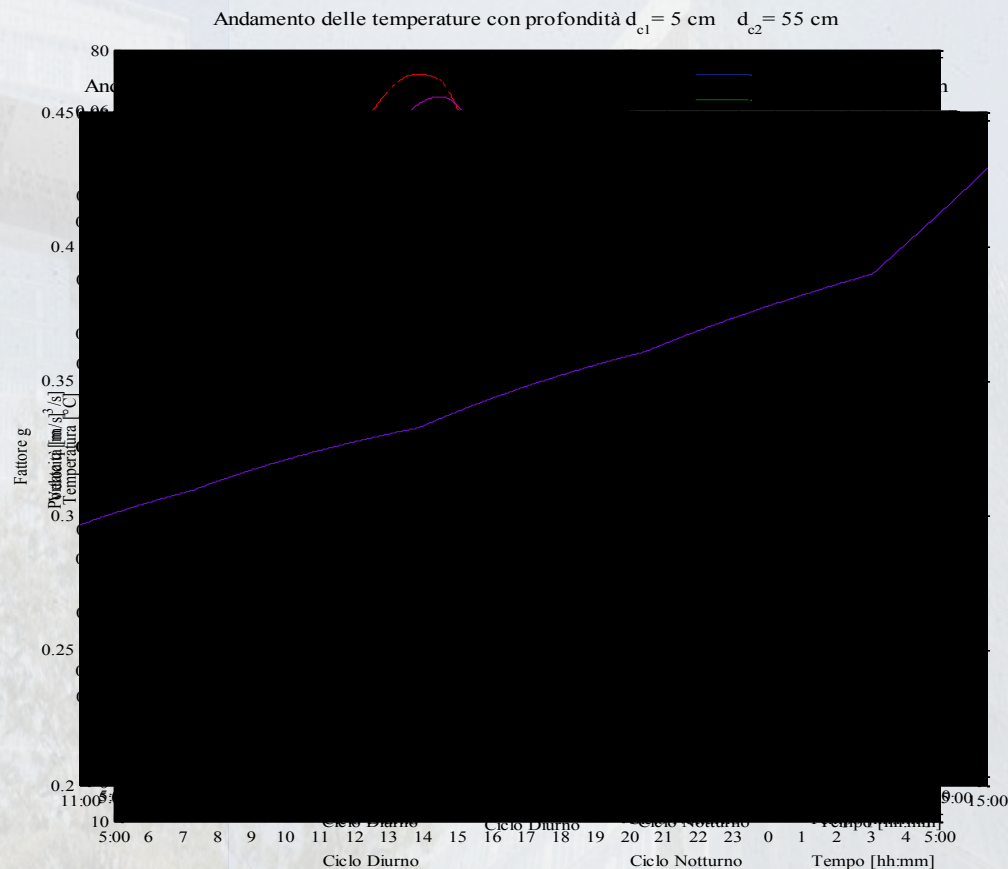
Simulazioni Estate: Variazione delle veneziane verso la pelle esterna



Andamento del fattore solare g al variare della posizione delle veneziane



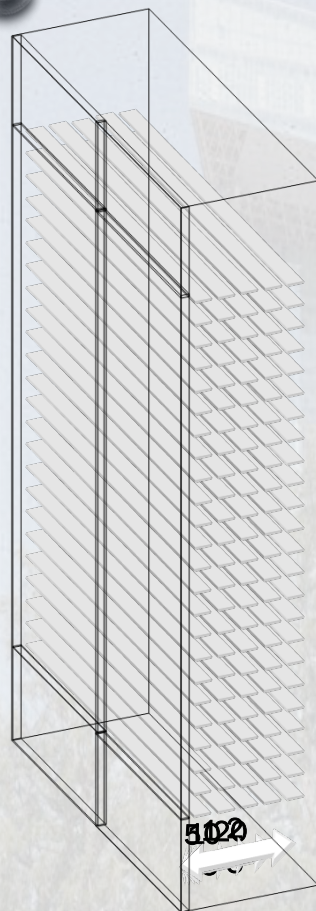
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE:

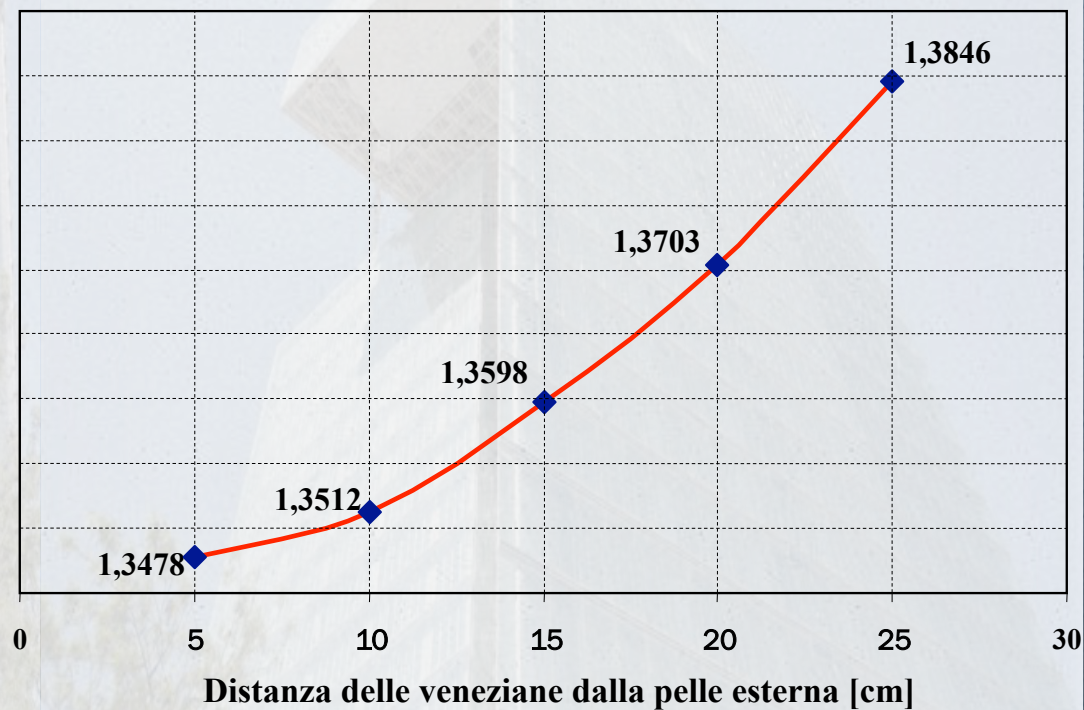
Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Inverno: Variazione delle veneziane verso la pelle interna

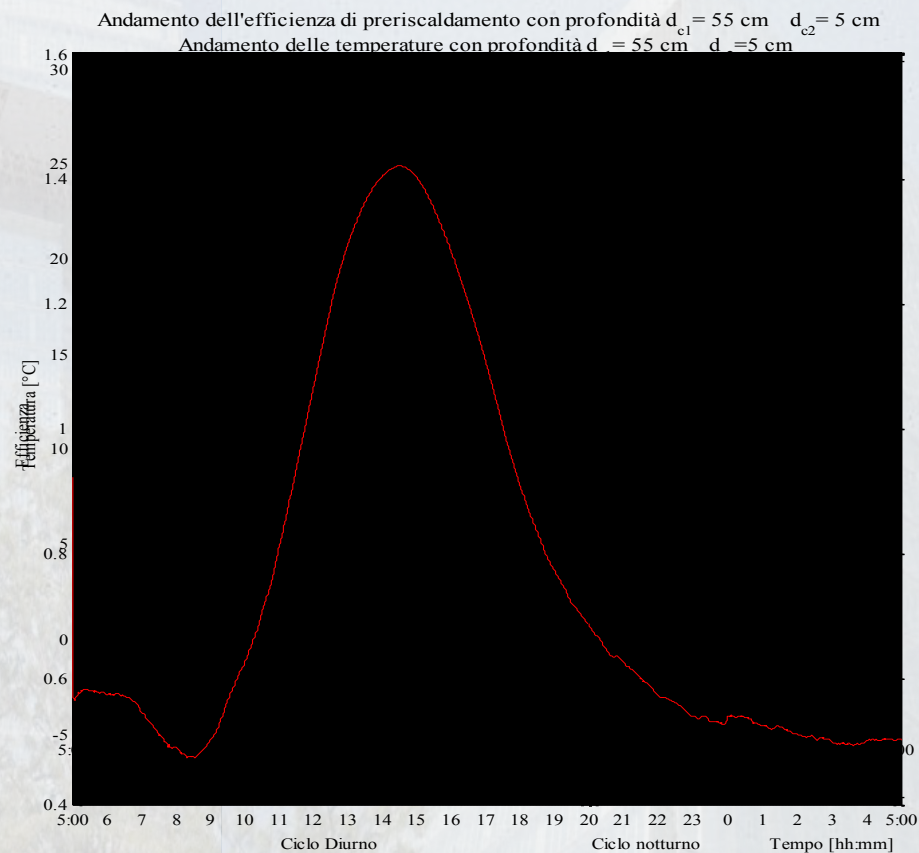


Efficienza η

Efficienza η al variare della posizione delle veneziane



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni





Salford Centre for Research & Innovation *in the Built & Human Environment*

4th International Research Symposium (SCRI)



salford centre for research & innovation
in the built & human environment
an EPSRC funded centre

Double Skin Façades: definition of an ideal depth for cavities



F. Lembo, F.P.R. Marino and G. Lacava

Autrice: Ing. Giusy Lacava



FONDAZIONE DEGLI
INGEGNERI DELLA
PROVINCIA DI
POTENZA

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

SBEIDCO – 1st International Conference on
Sustainable Built Environment Infrastructures in
Developing Countries
ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009

DSF PERFORMANCE EXCHANGING SKINS

F. Lembo, F. Marino, G. Lacava

The Algerian Democratic and Popular Republic
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Higher Educational School of Technological Studies

ENSET ORAN



Civil Engineering Department

Organize

In collaboration with the School of
Architecture University of Liverpool (UK)

**1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON
SUSTAINABLE BUILT ENVIRONMENT
INFRASTRUCTURES IN DEVELOPING
COUNTRIES**

October 12th to 14th, 2009



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Simulazioni Estate: Inversione delle pelli

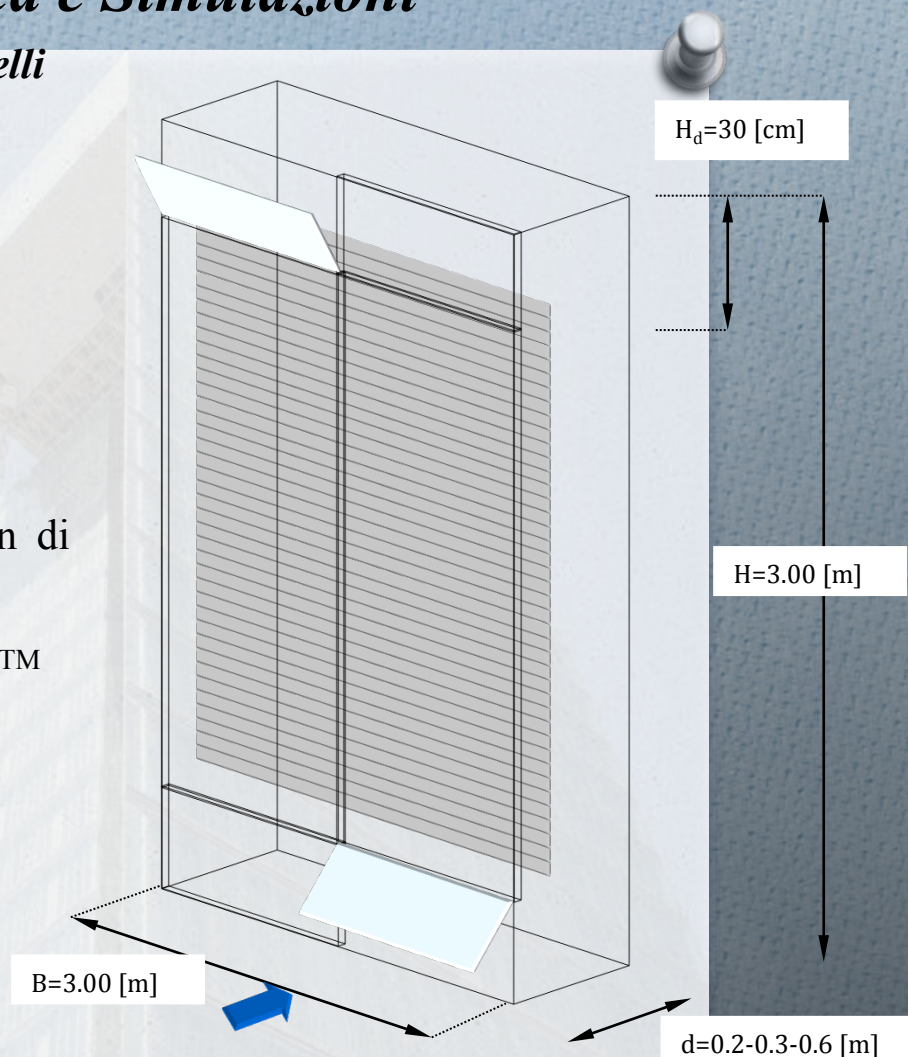
Input geometrici:

- $DSF: 3[m] \times 3[m]$;
- $H_{deflettore}: 30 [cm]$;
- *Cavità ideali: 20_30_60 [cm];*
- *Veneziane chiuse posizionate nel mezzo;*
- *Deflettori aperti;*
- **Pelle esterna:** Vetro camera Pilkington di sicurezza;
- **Pelle interna:** Vetro Pilkington Optilam™

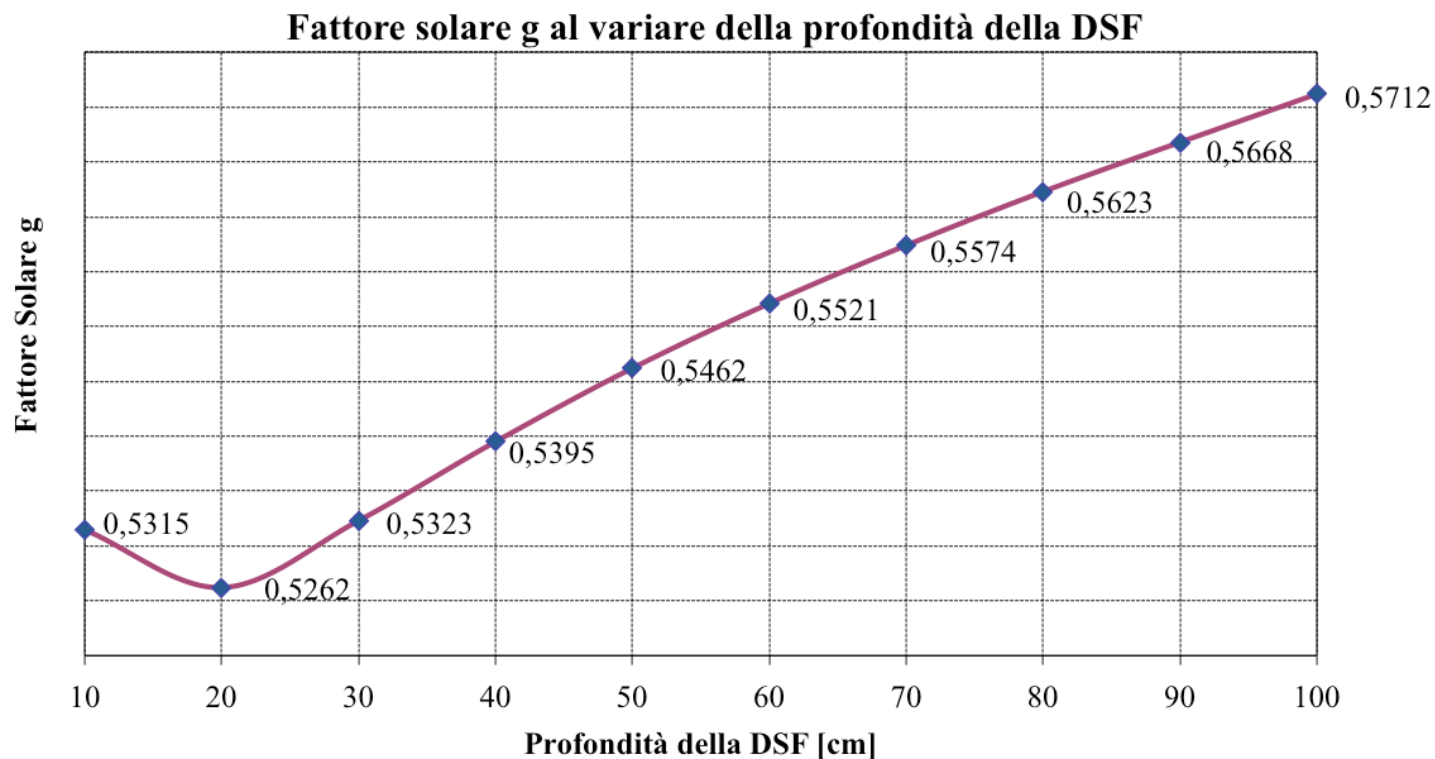
Output:

Calcolo del fattore solare g e confronto con le precedenti simulazioni.

$$g = \frac{DT \cdot q_{sun} + \alpha_i \cdot (\theta_{surface} - \theta_{inside})}{q_{sun}}$$



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni



STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

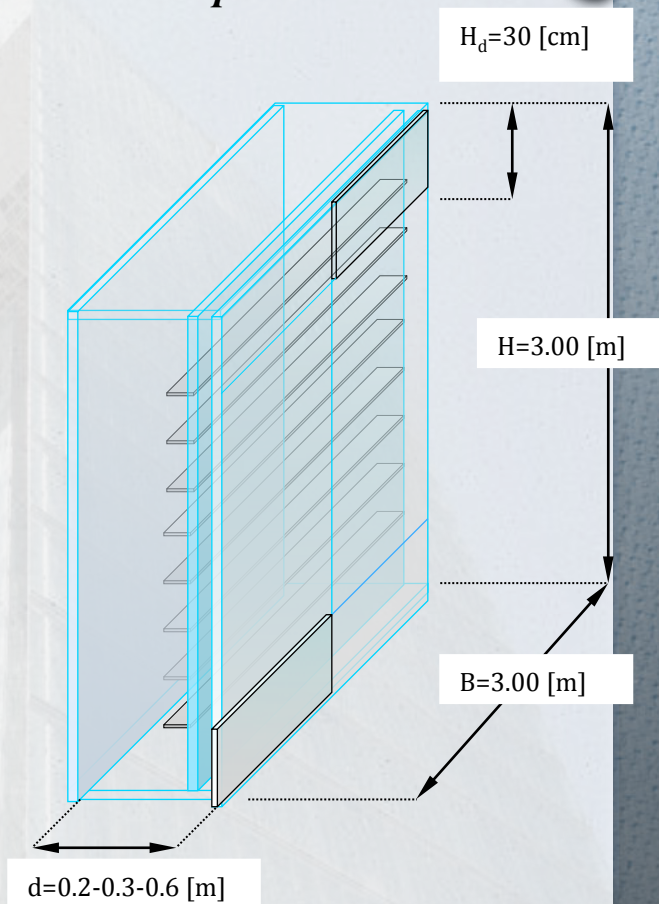
Input geometrici: *Simulazioni Inverno: Inversione delle pelli*

- DSF: 3[m]x3[m];
- $H_{\text{deflettore}}$: 30 [cm];
- Cavit  ideali: 20_30_60 [cm];
- Venezie aperte posizionate nel mezzo.
- Deflettori chiusi;
- **Pelle esterna:** Vetro camera Pilkington di sicurezza;
- **Pelle interna:** Vetro Pilkington OptilamTM

Output:

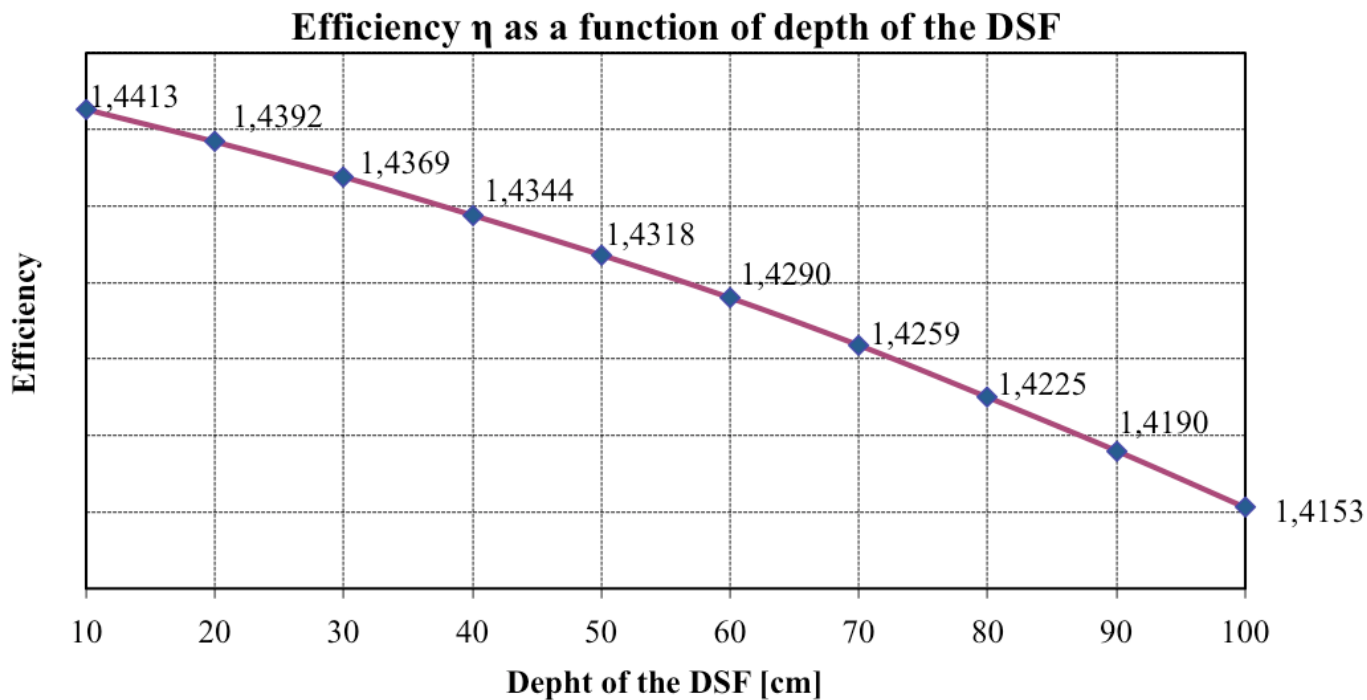
Calcolo dell'efficienza di riscaldamento η e confronto con le precedenti simulazioni.

$$\eta = \frac{T_{\text{room}} - T_{\text{cavity}}}{T_{\text{room}} - T_{\text{out}}}$$

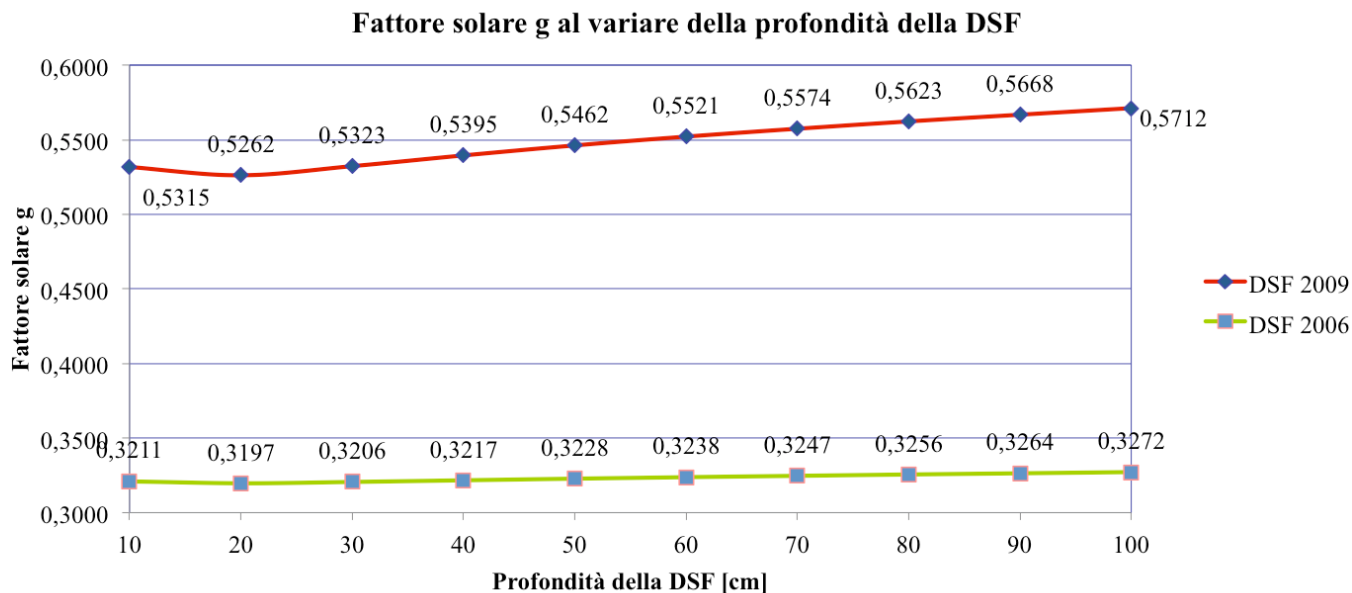


STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

EDIZIONI ACCADEMICHE ITALIANE



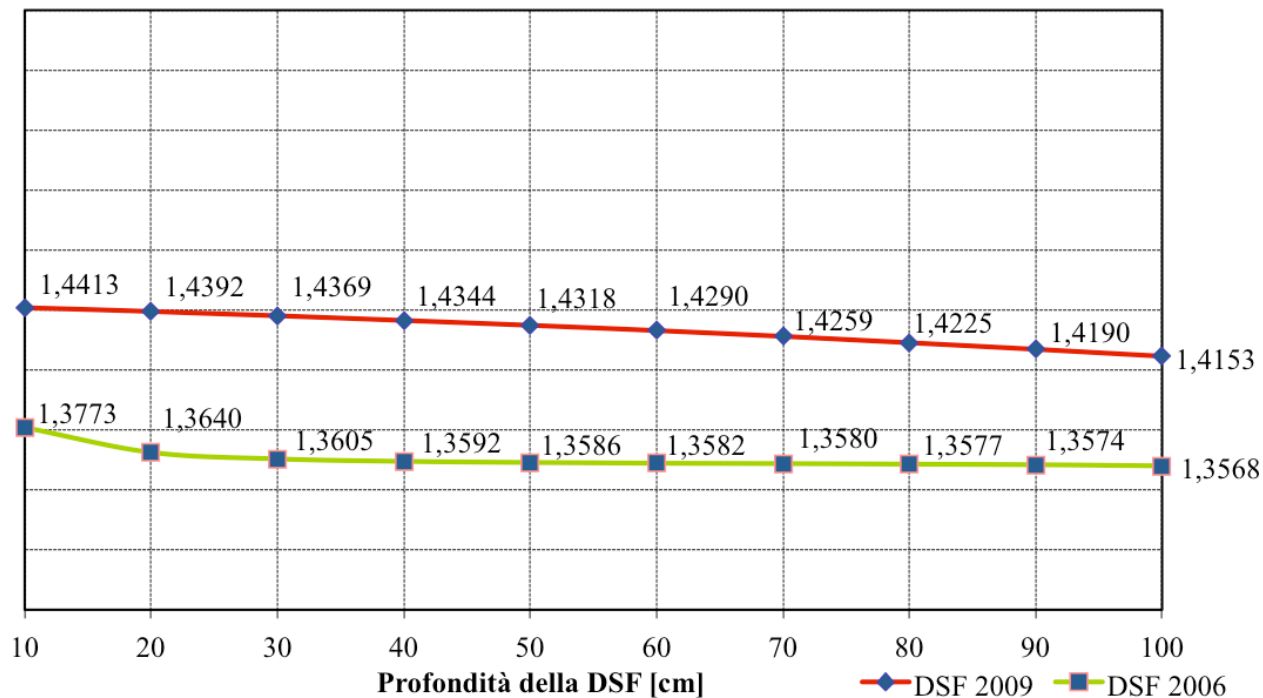
STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni



Confrontando i valori del fattore solare g nelle due simulazioni si nota, invertendo le pelli della DSF, un incremento eccessivo della quantità di calore trasferita all'interno attraverso gli strati della DSF.

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

Efficienza al variare della profondità della DSF



Confrontando i valori dell'efficienza nelle due simulazioni si nota, invertendo le pelli della DSF, un incremento lieve del preriscaldamento dell'aria all'interno delle cavità della DSF.

STUDIO DELLE FACCIATE A DOPPIA PELLE: Modellazione Fisica e Simulazioni

<i>Profondità ideale</i>	<i>Fattore solare 2007</i>	<i>Fattore solare 2009</i>	<i>Percentuale [%]</i>
20 cm	0.3197	0.5262	+65
30 cm	0.3206	0.5323	+66
60 cm	0.3238	0.5521	+70

<i>Profondità ideale</i>	<i>Efficienza η 2007</i>	<i>Efficienza η 2009</i>	<i>Percentuale [%]</i>
20 cm	1.3640	1.4392	+5.5
30 cm	1.3605	1.4369	+5.6
60 cm	1.3582	1.4290	+5

GRAZIE PER LA VOTRA ATTENZIONE

