

SULLA VENTILAZIONE DI UNA VETRATA ARTISTICA DEL DUOMO DI PERUGIA

C. Buratti - F. Cotana - M. Felli

Istituto di Energetica - Università di Perugia - Perugia

RIASSUNTO

La Soprintendenza per i Beni Ambientali, Architettonici, Artistici e Storici dell'Umbria, in collaborazione con l'Istituto Centrale del Restauro di Roma, in seguito al restauro di una vetrata artistica dovuta ad Arrigo Fiammingo (1565), situata nel Duomo di Perugia, ha proposto l'adozione di una vetrata esterna di protezione. Nel presente lavoro si è studiata dal punto di vista termoigrometrico l'intercapedine fra le pareti vetrate, per verificare se occorrono situazioni dannose per la conservazione della vetrata artistica. Si è considerata la circolazione sia naturale che forzata dell'aria e si sono determinati i parametri collegabili al degrado della vetrata artistica, vale a dire:

- la temperatura massima e le escursioni termiche giornaliere;
- la formazione di condensa superficiale.

Si è dimostrato che, con ventilazione naturale, la temperatura massima della vetrata artistica è superiore a 40°C (luglio) e le escursioni di temperatura arrivano fino a 22°C, inoltre si ha formazione di condensa superficiale sulla vetrata di protezione se l'umidità relativa dell'aria interna è superiore al 60%. Per salvaguardare la vetrata artistica dagli inconvenienti menzionati, che potrebbero essere fonte di danneggiamento, si è adottato un sistema di ventilazione forzata, il quale consente di evitare comunque la formazione di condensa e di limitare a 17 °C l'escursione termica massima.

1. SCOPO DEL LAVORO

Sul lato esterno della navata destra della Cattedrale di San Lorenzo, nella Cappella di S. Bernardino (figg. 1, 2), ad una quota di 6 m dal piano di terra, è situata una splendida vetrata policroma, attribuita ad Heinrich Van Der Broeck detto Arrigo Fiammingo e datata 1565 [1].

Nel 1993 la Soprintendenza per i Beni Ambientali Architettonici Artistici e Storici dell'Umbria si impegnò nel restauro della vetrata; inoltre, sentito anche il parere dell'Istituto Centrale del Restauro di Roma, si decise di installare una controvetrata di protezione, esterna alla vetrata artistica, per limitare i possibili danni derivanti dall'azione degli agenti atmosferici ed inquinanti.

Sia il restauro della vetrata artistica, sia la costruzione della controvetrata, sono stati ultimati da poco; la posa in opera di entrambe le vetrate è prevista entro il 1994. Nel frattempo è sotto tuttavia il dubbio che le condizioni del microclima all'interno dell'intercapedine fra i due vetri

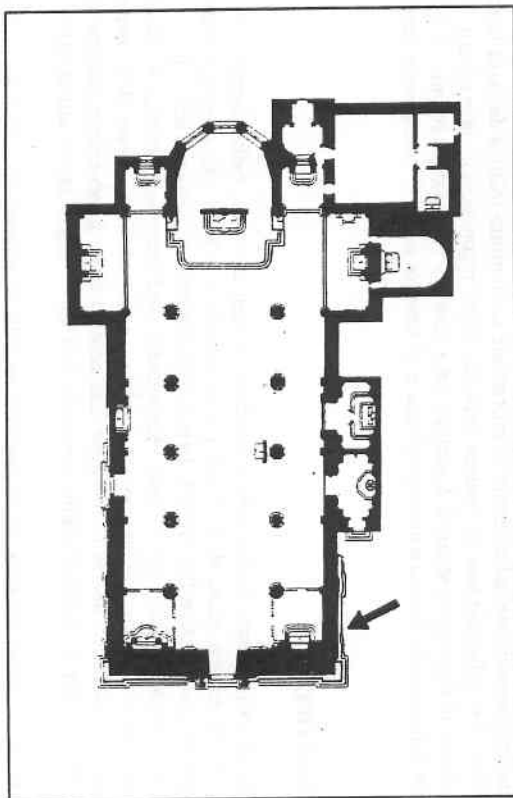


Fig. 1: Pianta del Duomo di S. Lorenzo con indicata la posizione della vetrata di Arrigo Fiammingo.

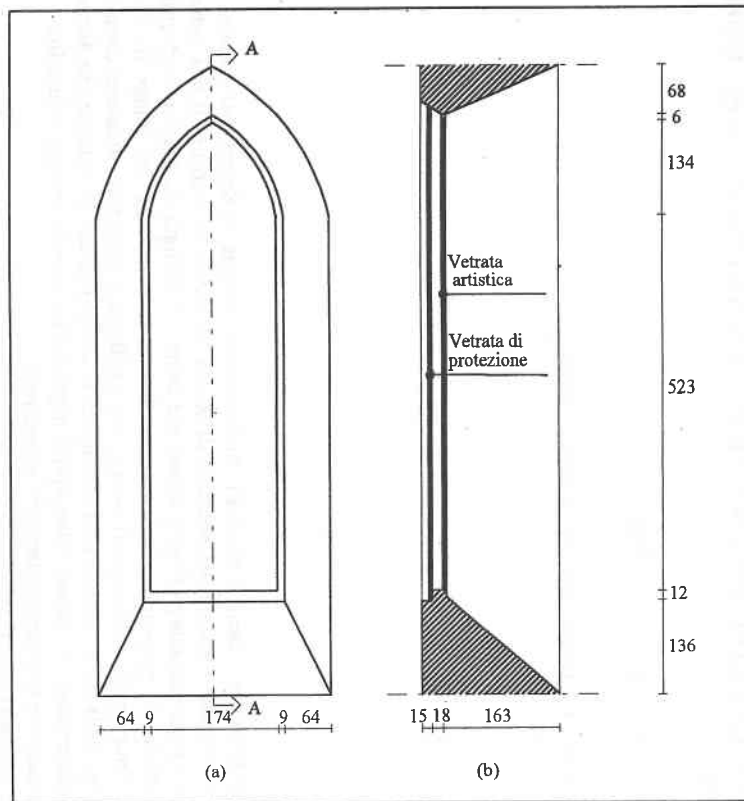


Fig. 2: Vetrata di Arrigo Fiammingo e vetrata di protezione:
 a) prospetto interno alla Cattedrale;
 b) sezione longitudinale A-A
 (dimensioni in cm.).

possano rivelarsi insoddisfacenti, sia per la temperatura massima sia per l'umidità relativa, per la quale numerose fonti bibliografiche [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] suggeriscono valori compresi fra il 30% e il 60%.

Scopo della presente nota è di valutare le condizioni termoisometriche nell'intercapedine ventilata, al variare delle condizioni climatiche e delle modalità realizzative della ventilazione, e di individuare il sistema di ventilazione più idoneo ai fini di una buona conservazione della vetrata artistica.

2. METODO D'INDAGINE

Nell'intercapedine possono instaurarsi condizioni microclimatiche tali da compromettere una buona conservazione della vetrata artistica: valori dell'umidità relativa dell'aria superiori al 60% favoriscono fenomeni di condensa superficiale; ad escursioni termiche troppo elevate nella vetrata stessa, indotte dalla radiazione solare, si associano stress termici pericolosi. Per limitare queste cause di possibile danneggiamento della vetrata, è opportuno attivare una ventilazione, naturale o forzata, dell'intercapedine.

Dato il particolare pregio artistico dell'ambiente, la ventilazione naturale appare il sistema più idoneo, poiché implica minori interferenze architettoniche. E' infatti sufficiente effettuare delle aperture sulla muratura interna della Cattedrale, in corrispondenza della base e sommità della vetrata, che mettano in comunicazione l'aria dell'intercapedine con l'interno della Chiesa (v. Fig. 3): per effetto delle differenze di temperatura tra le vetrate e l'aria si generano i moti convettivi naturali. Occorre, pertanto, valutare se l'entità di tali moti è sufficiente a garantire condizioni microclimatiche adeguate alla conservazione dell'opera; a tal fine si è costruito un modello matematico della circolazione dell'aria nell'intercapedine in convezione naturale e si è calcolato l'andamento delle principali grandezze termoisometriche.

In alternativa si può realizzare una ventilazione forzata dell'intercapedine; in tal caso la collocazione del sistema è meno agevole, ma sicuramente più efficace. Si è costruito, anche per la ventilazione forzata, un modello matematico e si sono valutate le principali grandezze termoisometriche all'interno dell'intercapedine.

I risultati dei due modelli sono confrontati con riferimento agli andamenti orari giornalieri, per tutti i mesi dell'anno; viene quindi scelto il sistema ritenuto più idoneo per una buona conservazione della vetrata artistica, del quale sono fornite indicazioni progettuali. Ad ultimazione dei lavori è previsto un monitoraggio delle principali grandezze ambientali che caratterizzano l'intercapedine, al fine di verificare sperimentalmente la soluzione proposta ed ottimizzarne il sistema di controllo.

3. DESCRIZIONE DELLA VETRATA

La vetrata di Arrigo Fiammingo ha la forma di una monofora delle dimensioni massime di 1.8 x 7 m, per una superficie di circa 11 m². La vetrata di protezione è montata sulla svasatura esterna della finestra, ad una distanza di circa 18 cm dalla vetrata artistica, della quale ha all'incirca le stesse dimensioni. La configurazione geometrica del sistema costituito dalle due vetrate è disegnata in fig. 2.

La vetrata artistica è realizzata in vetro policromo; la vetrata di protezione è costituita da due lastre accoppiate mediante una resina epossidica, l'una in vetro ordinario, l'altra in vetro di Murano soffiato.

Si sono misurati i coefficienti di trasparenza e riflessione per la radiazione solare e per il flusso luminoso delle due vetrate, per mezzo di un Luxmetro Mavolux, Mod. 7905-1075Y0.

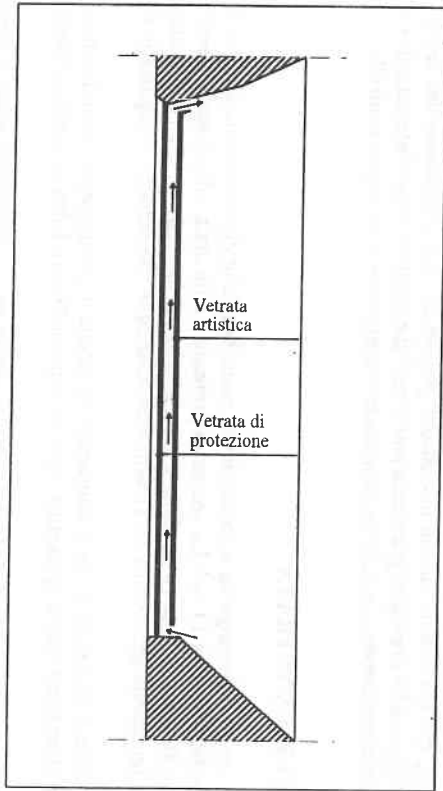


Fig. 3: Ventilazione naturale dell'intercapedine

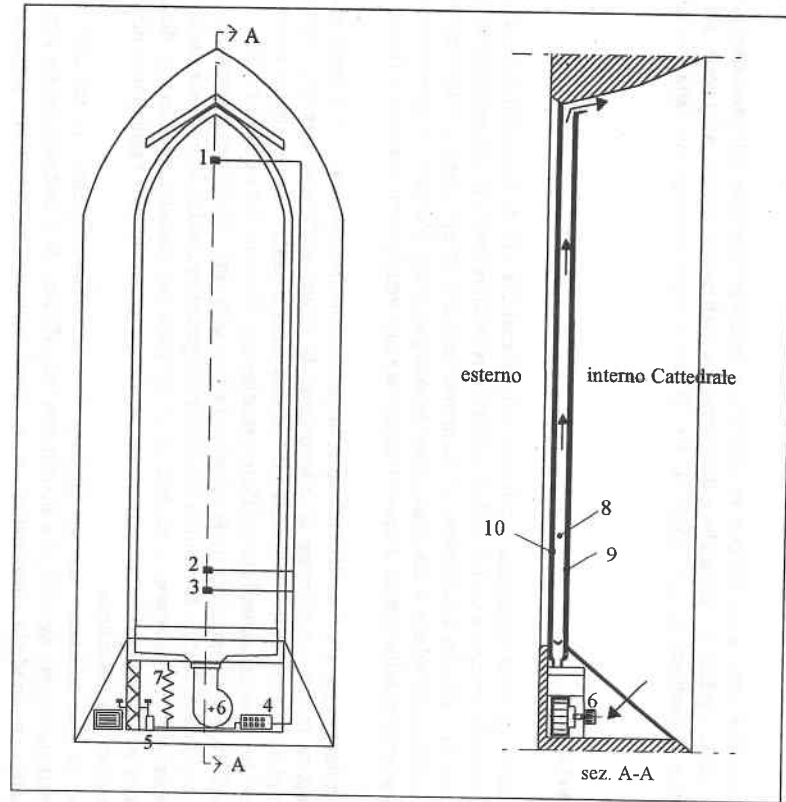


Fig. 4: Ventilazione forzata dell'intercapedine

(1 = sensore massima temperatura; 2 = sensore minima temperatura;
 3 = sensore umidità relativa; 4 = centralina di controllo; 5 = pressostato differenziale;
 6 = ventilatore; 7 = resistenza scaldante; 8 = intercapedine; 9 = vetrata artistica;
 10 = vetrata di protezione).

I coefficienti di trasparenza e riflessione della vetrata artistica per il flusso luminoso sono stati valutati come media, ponderata rispetto alle superfici, dei valori ottenuti per i diversi colori (v. Tab. 1); globalmente si è ottenuto $t=0.02$, $r=0.07$; la vetrata di protezione presenta invece valori di $t=0.81$ e $r=0.13$. I corrispondenti valori dei coefficienti di assorbimento sono 0.91 per la vetrata artistica e 0.06 per la vetrata di protezione. Si sono anche effettuate misure dei coefficienti di trasparenza e riflessione dell'energia radiante, ottenendosi valori di $t=0.01$ e $r=0.07$ per la vetrata artistica, $t=0.80$ e $r=0.13$ per la vetrata di protezione. I corrispondenti valori dei coefficienti di assorbimento sono rispettivamente 0.92 e 0.07.

4. DATI DI PROGETTO

4.1. Grandezze microclimatiche esterne

Le grandezze microclimatiche esterne sono variabili nell'arco della giornata; ciascun mese dell'anno è rappresentato da un "giorno-tipo".

- a) *Temperatura*: si considera un andamento sinusoidale nell'arco della giornata, ottenuto a partire dai valori massimi e minimi giornalieri mediati su un arco di tempo di trenta anni [9]. La funzione sinusoidale ha un'ampiezza pari all'escursione termica giornaliera e un periodo di 24 ore; la fase viene calcolata in modo che il massimo si abbia alle ore 14.00.
- b) *Radiazione solare totale*: ne viene valutato l'andamento orario, su una superficie verticale, in funzione delle coordinate astronomiche del sito, del periodo dell'anno e di un parametro adimensionale che tiene conto delle nuvolosità della zona [10].

4.2. Grandezze microclimatiche interne

Le grandezze microclimatiche interne alla Cattedrale sono state valutate a partire da alcuni rilievi termigrometrici effettuati nei mesi di luglio, ottobre e dicembre 1993.

a) *Temperatura*: i rilievi effettuati mostrano che la temperatura si mantiene sensibilmente costante nell'arco delle ventiquattro ore e che non presenta variazioni apprezzabili con la quota; si è dunque assunto un valore della temperatura dell'aria interna per ogni giorno rappresentativo di ogni mese, come indicato in Tab. 2.

b) *Umidità relativa*: secondo i rilievi effettuati, l'umidità relativa dell'aria interna varia tra il 40% e il 70%, si è assunto pertanto tale intervallo di variabilità per tutti i mesi dell'anno (v. Tab. 2).

4.3. Coefficienti di scambio termico

I coefficienti di scambio termico, desunti da [11], sono stati posti pari a:

- coefficiente di convezione aria esterna - vetrata di protezione: $k_{1e} = 23.20 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- coefficiente di convezione vetrata di protezione - aria intercapedine: $k_{1i} = 8.15 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- coefficiente di convezione aria intercapedine - vetrata artistica: $k_{2i} = 8.15 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- coefficiente di convezione vetrata artistica - aria interna alla Cattedrale: $k_{2e} = 8.15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4.4. Proprietà termofisiche dell'aria umida

Si sono assunti i seguenti valori delle proprietà termofisiche dell'aria umida [12]:

- calore specifico a pressione costante: $\gamma_a = 1.026 \text{ KJ/KgK}$;
- densità in condizioni standard ($T=0^\circ\text{C}$, $P=1\text{atm}$): $\rho_0 = 1.293 \text{ Kg/m}^3$;
- densità media nell'intervallo di temperatura 10-40°C: $\rho_m = 1.166 \text{ Kg/m}^3$;
- coefficiente di dilatazione cubica: $\alpha = 0.00367 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- viscosità dinamica media nell'intervallo di temperatura 10-40°C: $\mu_m = 1.832 \times 10^{-5} \text{ Kg/ms}$.

Tab. 1: Coefficienti di trasparenza della vetrata artistica in funzione del colore del vetro

COLORE DEL VETRO	S/S _{tot} (%)	t	COLORE DEL VETRO	S/S _{tot} (%)	t
Rosso	30	0.010	Viola	3	0.006
Blu	30	0.003	Rosa	3	0.030
Nero	5	≅0	Marrone	3	0.002
Verde	15	0.034			
Giallo	11	0.090	Globale	100	0.020

Tab. 2: Valori medi della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria interna alla Cattedrale nei vari mesi dell'anno.

MESE	T _i (°C)	Φ (%)	MESE	T _i (°C)	Φ (%)
Gennaio	15	40-70	Luglio	22	40-70
Febbraio	16		Agosto	21	
Marzo	18		Settembre	18	
Aprile	19		Ottobre	17	
Maggio	20		Novembre	16	
Giugno	21		Dicembre	15	

5. CONVEZIONE NATURALE

Il sistema di ventilazione dell'intercapedine per effetto della convezione naturale è disegnato in fig. 3. L'aria nell'intercapedine è in diretta comunicazione con l'interno della Cattedrale, per mezzo di due aperture praticate sulla muratura, in corrispondenza della base e della sommità della vetrata artistica; così, a seconda dei valori assunti dalle temperature di aria e vetri, si generano moti convettivi naturali ascendenti o discendenti dell'aria all'interno dell'intercapedine.

La temperatura e l'umidità relativa dell'aria sulla sezione di ingresso dell'intercapedine sono eguali a quelle dell'aria interna.

Le temperature delle vetrate sono fornite dalle seguenti relazioni:

$$\text{vetrata di protezione:} \quad T_{v1} = \frac{a_1 W + k_{fi}(T_i + T_f) / 2 + k_{ie} T_e}{k_{ie} + k_{fi}} \quad (1)$$

$$\text{vetrata artistica:} \quad T_{v2} = \frac{t_{a2} W + k_{2e}(T_i + T_f) / 2 + k_{2i} T_i}{k_{2e} + k_{2i}} \quad (2)$$

La quantità di calore scambiata dall'aria nell'intercapedine con le due vetrate è data pertanto da:

$$q_i = A \left[k_{fi} \left(T_{v1} - \frac{T_i + T_f}{2} \right) + k_{2e} \left(T_{v2} - \frac{T_i + T_f}{2} \right) \right] \quad (3)$$

essendosi considerato un andamento lineare rispetto alla quota della temperatura del vetro. Si è verificato che questa assunzione induce un errore su q_i minore del 2%. Si ha inoltre:

$$q_i = S \bar{v} \gamma_a (T_f - T_i) \quad (4)$$

Le perdite di carico ripartite sono state calcolate con il metodo della sezione equivalente [13]:

$$\Delta P = \frac{2}{D_{eq}} f v \rho_m^{-2} (Z + Z_o) \quad (5)$$

essendo Z_c il contributo delle perdite concentrate, valutato con i metodi classici [13]. Il coefficiente di attrito f_i per superfici lisce e per $0.5 < Pr < 100$, è dato da [14]:

$$f = 0.046 Re^{-0.2} \quad (6)$$

La "prevalenza naturale" associata ai moti convettivi può essere espressa come [15]:

$$\Delta P = 3g\rho_o\alpha(T_f - T_i) \quad (7)$$

Dal confronto delle (5), (6) e (7) è possibile calcolare la velocità mediana \bar{v} :

$$\bar{v} = \left[\frac{32.6g\rho_o\alpha D_{eq}^{1.2} (T_f - T_i)}{\rho_m \mu_m^{0.8} (Z + Z_o)} \right]^{-5/9} \quad (8)$$

inoltre, esplicitando la (4) rispetto a T_f si ottiene:

$$T_f = T_i + \left[\frac{q_i}{S \gamma_a} \right]^{0.64} \cdot \left[\frac{32.6g\rho_o\alpha D_{eq}^{1.2}}{\mu_m^{0.2} (Z + Z_o)} \right]^{-0.36} \quad (9)$$

La (1), la (2), la (8) e la (9) costituiscono un sistema di equazioni nelle incognite T_{v1} , T_{v2} , \bar{v} e T_f che può essere risolto per iterazioni successive.

La portata d'aria sulla sezione terminale è infine data da:

$$G_v = S \cdot \bar{v} \quad (10)$$

Le relazioni scritte consentono di calcolare la temperatura dei vetri al variare delle condizioni al contorno ed anche, quindi, di effettuare la verifica di condensa (v , par. 7).

6. CONVEZIONE FORZATA

Il sistema per la ventilazione forzata dell'intercapedine è disegnato in fig. 4. L'aria, aspirata dall'interno della Cattedrale da un ventilatore posto nella parte bassa della svatura interna della finestra, è inviata nell'intercapedine attraverso un diffusore ed espulsa in sommità, verso l'interno della Chiesa. Il ventilatore consente di evitare la formazione di condensa nella maggior parte dei casi (v par. 7); è prevista tuttavia, per sicurezza, la presenza di una resistenza scaldante.

La velocità dell'aria nell'intercapedine è pari a 1.5 m/s, valore che consente di evitare la formazione di condensa nella maggior parte delle condizioni operative e di ottenere una temperatura massima della vetrata artistica inferiore a quella che si aveva prima del restauro, in assenza di vetrata di protezione esterna. Valori più elevati della velocità sono stati esclusi per ragioni di rumore e di ingombro del ventilatore.

Il coefficiente di convezione h_c tra i vetri e l'aria nell'intercapedine è dato dalla [13]:

$$h_c = 5.62 + 3.9v \quad (11)$$

La temperatura T_{v1} della vetrata di protezione viene supposta di 2°C superiore rispetto alla temperatura di rugiada dell'aria interna, al fine di evitare la formazione di condensa; in condizioni stazionarie l'incremento ΔT_{v1} è ottenuto con un incremento medio di temperatura dell'aria nell'intercapedine pari a:

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta T_{v1}(h_c + k_{1e})}{h_c} \quad (12)$$

al quale corrisponde un incremento di temperatura sulla vetrata artistica pari a:

$$\Delta T_{v2} = \frac{\Delta T_1 h_c}{h_c + k_{2i}} \quad (13)$$

La quantità di calore fornita dalla resistenza scaldante (q_R) all'aria immessa nell'intercapedine viene in parte trasmessa all'esterno attraverso la vetrata di protezione (q_{ev}), in parte all'interno della Cattedrale attraverso la vetrata artistica (q_{iv}), in parte è trasportata dall'aria in uscita dall'intercapedine (q_a); il bilancio energetico è pertanto esprimibile come:

$$q_R = q_{ev} + q_{iv} + q_a \quad (14)$$

L'incremento di temperatura dell'aria sulla sezione di ingresso, in base alla (14), è:

$$\Delta T_R = \frac{k_{1e} \Delta T_{v1} + k_{2i} \Delta T_{v2} + 2SvP_m \gamma_a \Delta T_1}{2SvP_m \gamma_a} \quad (15)$$

Nota ΔT_R è possibile determinare la quantità di calore da fornire all'aria immessa nell'intercapedine, sulla base della quale viene dimensionata la resistenza scaldante:

$$q_R = SvP_m \gamma_a \Delta T_R \quad (16)$$

L'aria all'ingresso dell'intercapedine si porta pertanto ad una temperatura:

$$T_a = T_f + \Delta T_r \quad (17)$$

Indicando con T_f la temperatura dell'aria sulla sezione di uscita dell'intercapedine, la quantità di calore scambiata dall'aria con le vetrate è fornita dalla:

$$q_1 = h_o A \left[\left(T_{v1} - \frac{T_a + T_f}{2} \right) + \left(T_{v2} - \frac{T_a + T_f}{2} \right) \right] \quad (18)$$

q_1 è esprimibile anche come:

$$q_1 = S_{VP_m} \gamma_a (T_a - T_f) \quad (19)$$

Uguagliando la (18) e la (19) si ricava il valore di T_f :

$$T_f = \frac{h_o A (T_{v1} + T_{v2} - T_a) + S_{VP_m} \gamma_a T_a}{h_o A + S_{VP_m} \gamma_a} \quad (20)$$

in cui T_{v1} e T_{v2} sono fornite dalle seguenti relazioni:

$$T_{v1} = \frac{a_1 W + h_o (T_a + T_f) / 2 + k_{1e} T_a}{k_{1e} + h_o} \quad (21)$$

$$T_{v2} = \frac{t_{a2} W + h_o (T_a + T_f) / 2 + k_{2i} T_a}{h_o + k_{2i}} \quad (22)$$

La (20), la (21) e la (22) costituiscono un sistema di equazioni nelle incognite T_f , T_{v1} e T_{v2} , che possono essere così determinate.

7. RISULTATI

7.1 Ventilazione naturale

La ventilazione naturale è insufficiente a garantire nell'intercapedine condizioni microclimatiche idonee per una buona conservazione della vetrata artistica, in presenza di radiazione solare, con elevati valori dell'escursione termica giornaliera; inoltre spesso si ha formazione di condensa sulla vetrata di protezione.

Nella figura 5 è disegnato l'andamento giornaliero di T_{v2} nei mesi di gennaio e luglio: i valori più elevati si hanno sempre in corrispondenza delle prime ore del pomeriggio, quando, data l'esposizione a nord-ovest, l'intensità della radiazione solare è massima. Nella fig. 6 è riportato l'andamento della T_{v2} massima (a) e dell'escursione giornaliera di temperatura (b) sulla vetrata artistica nel corso dell'anno; i valori maggiori di T_{v2} si hanno nel mese di luglio e risultano superiori a 40°C; l'escursione termica giornaliera è sempre molto elevata e compresa nell'intervallo 10-20°C.

I risultati relativi alla formazione di condensa sulla vetrata di protezione sono sintetizzati in fig. 7: anche quando i valori di Φ sono relativamente bassi (50%), si hanno, nei mesi invernali, periodi di condensa significativi nell'arco della giornata; all'aumentare di Φ il fenomeno risulta accentuato ed esteso ai mesi autunnali e primaverili.

7.2 Ventilazione forzata

Con la ventilazione forzata è possibile eliminare la formazione di condensa sulla vetrata di protezione e ridurre l'entità delle sollecitazioni termiche sulla vetrata artistica. La velocità media è di 1.5 m/s, con una portata d'aria di 1700 m³/h; se necessario, viene attivata una resistenza scaldante di 3 KW (fig. 8).

L'andamento della temperatura della vetrata artistica è qualitativamente analogo a quello che si ha in ventilazione naturale, però con una consistente riduzione dei valori massimi e delle escursioni termiche giornaliere (v. figg. 5 e 9).

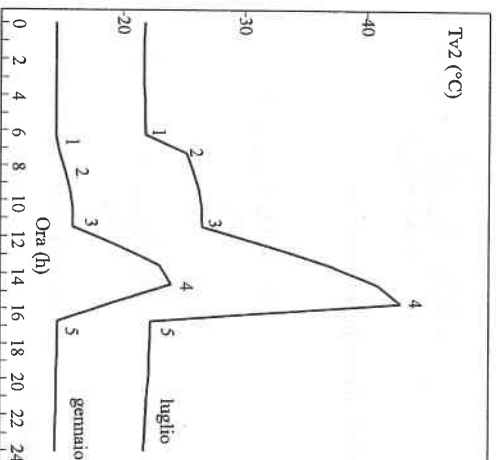


Fig. 5: andamento della temperatura della vetrata artistica nell'arco della giornata con ventilazione naturale;

1-2 e 2-3: presenza di radiazione solare diffusa,
3-4 e 4-5: presenza di radiazione solare diretta.

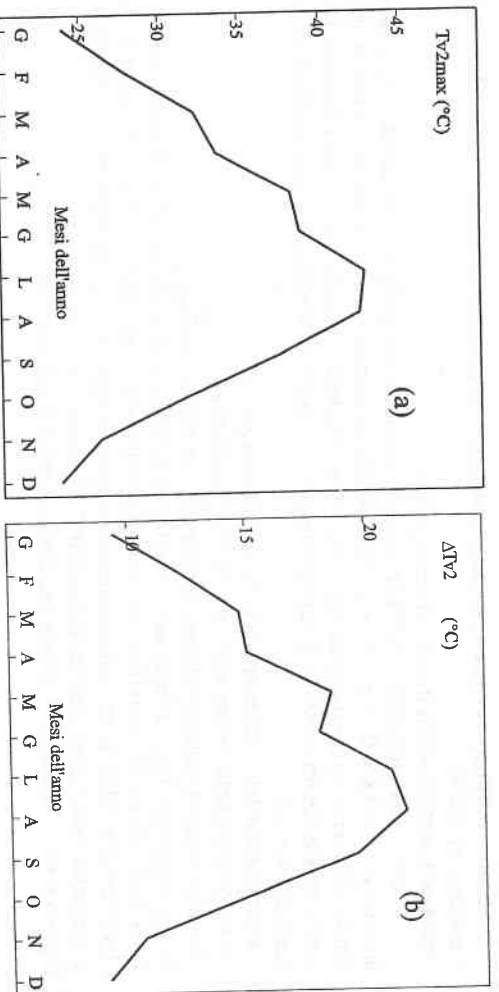


Fig. 6: Andamento della temperatura massima (a) e della massima escursione di temperatura (b) sulla vetrata artistica nel corso dell'anno, con ventilazione naturale.

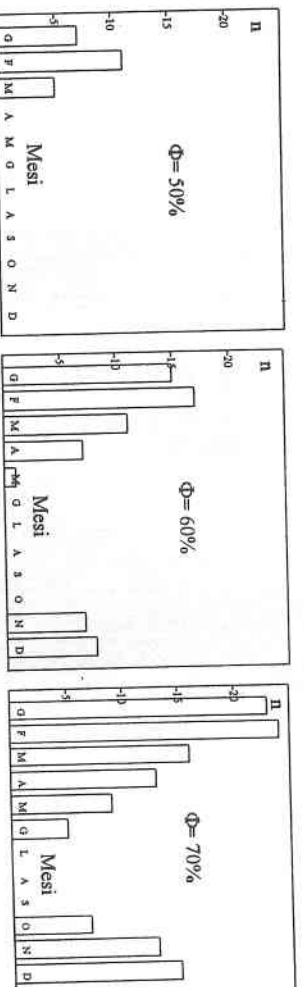


Fig. 7: Numero di ore giornaliere in cui si ha formazione di condensa sulla vetrata di protezione, per diversi valori dell'umidità relativa, con ventilazione naturale.

8. PROGETTO DEL SISTEMA DI VENTILAZIONE

Soltanto con un sistema di ventilazione forzata, dunque, si è in grado di garantire che la formazione di condensa sarà evitata, pur facendo ricorso, per certi periodi dell'anno, al riscaldamento artificiale dell'aria. Inoltre, rispetto alla ventilazione naturale, si ha una certa riduzione dei picchi e delle oscillazioni termiche.

Si è pertanto effettuato il progetto di un sistema di ventilazione forzata, illustrato nella fig. 4, le cui caratteristiche essenziali sono:

- alloggiamento nella parte bassa della svasatura interna della finestra;
- aspirazione dell'aria dall'interno della Cattedrale, mediante una griglia di presa;
- elemento filtrante di materiale sintetico, munito di pressostato differenziale;

- ventilatore centrifugo con motore elettrico monofase, della portata nominale di $1700 \text{ m}^3/\text{h}$ e della prevalenza di 200 Pa;

- resistenza elettrica scaldante della potenza di 3 KW.

L'aria viene introdotta nell'intercapedine mediante un diffusore in acciaio inox delle dimensioni di $0,18 \times 0,18 \times 1,8 \text{ m}$ e, dopo averla attraversata, viene espulsa alla sommità delle vetrate attraverso un'apertura praticata nella parte alta della svasatura interna della finestra. Una centralina elettronica controlla il funzionamento del sistema di ventilazione; essa è dotata di tre sonde che rilevano:

- la temperatura della vetrata artistica (1), con allarme per T_{max} ;

- la temperatura della vetrata di protezione (2), con allarme per T_{min} ;

- l'umidità relativa dell'aria nell'intercapedine (3), con allarme per Φ_{max} .

Se T_{v1} raggiunge T_{min} , ad esempio in condizioni invernali o nelle ore notturne, il sensore 2 (v. fig. 4) invia un segnale alla centralina, che attiva il ventilatore e la resistenza scaldante; il sensore 3, che rileva l'umidità relativa, attiva la resistenza scaldante, in ogni caso, quando $\Phi > 60\%$. Se, inoltre, la temperatura della vetrata artistica supera i 30°C , il sensore 1 attiva il ventilatore. Il pressostato differenziale 5, infine, segnala la necessità di pulire i filtri.

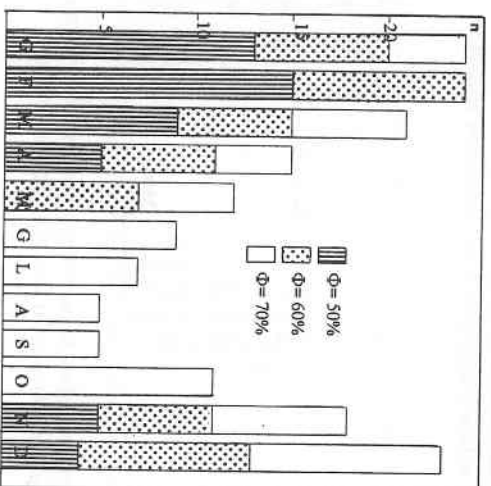


Fig. 8: Ore giornaliere di funzionamento della resistenza scaldante nei vari mesi dell'anno, per diversi valori dell'umidità relativa dell'aria interna.

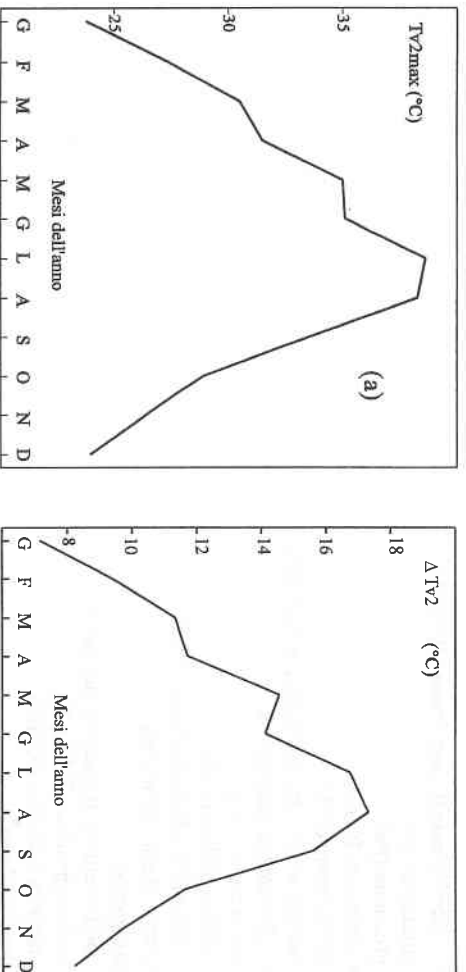


Fig. 9: Andamento della temperatura massima (a) e della massima escursione di temperatura (b) sulla vetrata artistica nel corso dell'anno, con ventilazione forzata.

9. CONCLUSIONI

E' stato studiato il problema della ventilazione dell'intercapedine tra una vetrata artistica e una vetrata di protezione del Duomo di Perugia.

Si sono sviluppati dei programmi di calcolo per la simulazione delle condizioni termoisometriche dell'intercapedine nel corso dell'anno, con ventilazione sia naturale che forzata, per i parametri relativi alle condizioni esterne ed interne alla Cattedrale si è fatto riferimento ai dati storici disponibili e ad alcune misure effettuate.

In base ai risultati ottenuti si può concludere che, al fine di evitare il fenomeno della condensa superficiale nonché temperature eccessive della vetrata artistica e, soprattutto, eccessivi valori dell'escursione termica giornaliera, è necessario installare un sistema di ventilazione forzata. In tal modo si ottengono valori soddisfacenti dei parametri termoisometrici lungo gran parte dell'anno, per un certo numero di ore al mese, durante l'inverno, è tuttavia necessario attivare una resistenza scaldante al fine di evitare la condensa sulla vetrata di protezione. Nell'esecuzione del progetto di ventilazione forzata, considerato il particolare pregio artistico dell'opera oggetto di studio, grande attenzione è stata posta ai dispositivi di sicurezza, in grado di fornire degli allarmi in caso di malfunzionamento o di guasto del sistema.

10. LISTA DEI SIMBOLI

- a = coefficiente di assorbimento;
- A = area della vetrata (m^2);
- D_{eq} = diametro equivalente della sezione trasversale dell'intercapedine (m);
- f = fattore di attrito;
- g = accelerazione di gravità (m/s^2);
- G_V = portata d'aria (m^3/h);
- h = ora del giorno;

h_c , k = coefficiente di convezione (W/m^2K);
 n = numero di ore;
 P = pressione (Pa);
 Pr = numero di Prandtl;
 q = flusso termico (W);
 S = sezione trasversale dell'intercapedine (m^2);
 t = coefficiente di trasparenza;
 T = temperatura ($^{\circ}C$);
 v = velocità dell'aria (m/s);
 W = radiazione solare incidente (W/m^2);
 Z = altezza della vetrata (m).

Lettere greche:

α = coefficiente di dilatazione cubica ($^{\circ}C^{-1}$);
 γ_a = calore specifico ($KJ/Kg K$);
 μ = viscosità dinamica (Kg/ms);
 ρ = densità (Kg/m^3);
 Φ = umidità relativa (%).

Pedici:

a = aria scaldata dalla resistenza;
 e = esterno;
 f = relativo alla sezione di uscita dell'intercapedine;
 i = interno;
 max = massimo;
 min = minimo;
 o = condizioni standard;
 r = rugiada;
 $v1$ = vetrata di protezione;
 $v2$ = vetrata di Arriigo Flamingo.

11. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Cianini Pierotti, M. L. (1992) "Una città e la sua Cattedrale. Il Duomo di Perugia", Ed. Chiesa S. Severo, Perugia 1992.
- [2] A.A.M. (1977): "Protection of Collection during Emergencies". Energy Workshop Planning Committee - 26 settembre 1977.
- [3] Turner, I.K. (1980): "Museum Showcase. A Design Brief". British Museum - London 1980.
- [4] ICCROM (1982): "La conservazione nei musei. Il controllo del clima. Il controllo dell'inquinazione" - ICCROM, Roma 1982.
- [5] Zambelli, A. (1983): "Note tecniche" in Prva, A.: "La costruzione del museo contemporaneo", Ed. Jaca Book, Milano 1983.
- [6] Hall, M. (1987): "On Display, a Design Grammar for Museum Exhibition" - Lund Hempricks, Londra 1987.
- [7] Coccito, G. (1988): "Umidità e musei, una sfida continua", Rassegna Beni Culturali, luglio-agosto 1988.
- [8] Filippi, M. (1988): "Gli impianti nei musei" - Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione, n. 8.
- [9] ISTAT - "Annuario di Statistiche Meteorologiche" - Edizioni dal 1960 al 1990.

- [10] Felli, M. et Al. (1993): "Soluzioni di integrazione impiantistica nel recupero", Progetto Finalizzato Edilizia, Relazione finale del Triennio di Attività, maggio 1993.
- [11] UNI-CTI 7357-74 (1974): "Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento di edifici" - Milano 1974.
- [12] Perry, R.H., Green, D. (1984): "Perry's Chemical Engineers' Book", Sixth Edition, Mc Graw Hill, 1984.
- [13] ASHRAE - Handbook of Fundamentals - SI Edition - Atlanta 1989.
- [14] Colburn, A.P. (1933): "A method of Correlating Forced Convection Heat Transfer Data and a Comparison with Fluid Friction.", AICHE vol. 29, pag. 174, 1933.
- [15] Coppi, M., Cotana, F., De Lieto Vollaro, A., De Santoli, L. (1989) : "Un criterio per la selezione dei fluidi utilizzabili nei diodi termici", Congresso Internazionale Energia Ambiente e Innovazione Tecnologica, Caracas ottobre 1989.

12. APPENDICE: I PROGRAMMI DI CALCOLO

I modelli teorici descritti sono stati implementati in programmi di calcolo appositamente elaborati in linguaggio Basic, che consentono di simulare le condizioni termoisolometriche dell'intercapedine relativamente alla convezione naturale, alla formazione di condensa e alla convezione forzata. I tre programmi consistono di una parte iniziale comune, nella quale vengono acquisiti i dati relativi alle caratteristiche geometriche e ai materiali costituenti il sistema, ai coefficienti di scambio termico e alle proprietà termofisiche dell'aria interna; successivamente vengono richiesti come dati di ingresso la temperatura per la simulazione, la temperatura e l'umidità relativa dell'aria interna alla Cattedrale e vengono calcolate la temperatura dell'aria esterna e la radiazione solare per ciascuna ora del giorno.

Il programma denominato NAT.BAS, relativo alla simulazione in convezione naturale, consente di determinare le temperature delle due vetrate T_{v1} e T_{v2} , la temperatura media, la velocità media e la portata d'aria sulla sezione di uscita dell'intercapedine, secondo le formule (1), (2), (8), (9), (10), in corrispondenza delle diverse ore del giorno.

Il programma per la verifica della formazione di condensa superficiale, denominato COND.BAS, consente di determinare la temperatura di rugiada dell'aria interna T_r e la temperatura della vetrata di protezione T_{vi} ; viene effettuato quindi, per ciascuna ora del giorno, il confronto tra T_r e T_{vi} , con segnalazione della presenza di condensa quando $T_{v1} < T_r$.

Il programma FORZ.BAS, relativo alla simulazione in convezione forzata, consente di determinare l'andamento orario della temperatura media dell'aria sulla sezione di uscita dell'intercapedine e delle temperature della vetrata di protezione e della vetrata di Arrigo Fiammingo, secondo le relazioni (20), (21) e (22), prevedendo il funzionamento del ventilatore e della resistenza scaldante se $T_{v1} < T_r$ e del solo ventilatore se $T_{v2} > 30^\circ\text{C}$.

Per ulteriori informazioni relative ai programmi di calcolo gli interessati possono direttamente rivolgersi agli Autori.

ABSTRACT

After the restoration of the Arrigo Fiammingo glass window (1565), in the right aisle of Perugia Cathedral, the Umbrian Monuments and Fine Arts Office and the Central Institute of Restoration in Rome decided to put into place an external glass shield to protect the artistic glass window against atmospheric agents and air pollution.

The thermoigrometric conditions in the interspace between the glass windows have to be controlled to prevent damages of the artistic glass window, caused by solar radiation or high relative humidity. A ventilation system in the interspace has been therefore proposed; in the present paper the interspace thermoigrometric conditions are evaluated both in natural and forced ventilation and a design for the chosen system is given.

