

## IL PROGETTO DELLA VETRATA DI PROTEZIONE DELLA VETRATA DELLA BASILICA DI SAN DOMENICO A PERUGIA: UN MODELLO MATEMATICO PER LA VERIFICA DELLE CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE CHE SI INSTAURANO NELL'INTERCAPEDINE

C. Buratti<sup>1</sup>, R. Mariani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Via G. Duranti, 67 – 06125 Perugia

### SOMMARIO

La Soprintendenza ai Beni Ambientali Architettonici Artistici e Storici dell'Umbria, in seguito al restauro della vetrata posta nell'abside della Basilica di San Domenico a Perugia, ha proposto l'adozione di una vetrata esterna di protezione. La vetrata della Basilica è oggetto di studio da parte della Sezione di Fisica Tecnica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dal gennaio 2003, quando ha avuto inizio la fase di monitoraggio delle condizioni microclimatiche in prossimità della vetrata, protrattosi fino al giugno 2004. I risultati del monitoraggio hanno mostrato che nel corso dell'anno la vetrata è sottoposta ad elevati indici di rischio, soprattutto nei mesi più caldi e più freddi, quali Agosto e Febbraio. Sulla base di una proposta di progetto per la vetrata di protezione, è emersa la necessità di verificare le condizioni termoigrometriche che si instaurano nell'intercapedine tra la vetrata artistica e la vetrata di protezione, in quanto nell'intercapedine di aria si creano condizioni di umidità relativa e temperatura diverse da quelle a cui la vetrata è stata sottoposta negli anni. Al fine di effettuare tale verifica, è stato elaborato e implementato un modello matematico in regime variabile, che permette di determinare la temperatura delle due vetrate nel corso della giornata, sia in presenza che in assenza di irraggiamento solare, la temperatura e la velocità dell'aria nell'intercapedine nel caso di convezione naturale; nel presente lavoro sono presentati i primi risultati del modello.

### 1. INTRODUZIONE

La durata di un'opera di interesse storico – artistico è legata al contesto ambientale nel quale è collocata e alla protezione rispetto agli agenti di degrado.

Per musei, palazzi storici, chiese e ogni altro luogo espositivo di opere d'arte, le condizioni termiche, igrometriche e luminose devono essere tali da rendere minimi i processi di degrado delle opere in essi custodite. In particolare occorre che qualsiasi intervento edilizio o impiantistico, che possa modificare la preesistente situazione ambientale, sia preceduto da una attenta analisi delle condizioni attuali, per poi determinare l'impatto che l'intervento potrà causare sull'ambiente e sull'opera d'arte [1, 2, 3, 4].

In questo contesto si inserisce il lavoro che la Soprintendenza ai Beni Ambientali, Architettonici, Artistici e Storici dell'Umbria sta eseguendo sulla vetrata della Basilica di San Domenico a Perugia. La vetrata, di particolare pregio artistico, è situata nell'abside della Basilica, è attualmente in fase di restauro e presto sarà di nuovo posta in opera secondo le modalità con cui era stata installata originariamente e a seguito di successivi restauri.

La polifora absidale costituisce il fulcro visivo dell'edificio; è datata 1411 e l'attribuzione è certa perché riporta i nomi degli autori, il frate domenicano Bartolomeo di Pietro e Mariotto di Nardo da Firenze. Le dimensioni massime sono 23 m di altezza e 8 m di larghezza; l'intero ciclo iconografico raffigura la glorificazione dell'Ordine Domenicano (fig. 1a). In figura 1b è mostrata una foto del ponteggio interno, allestito per il restauro della struttura lapidea che sorregge la vetrata.

Vari interventi e manomissioni hanno interessato il complesso prima del restauro ottocentesco del Moretti (1867 – 1879), che costituisce l'intervento più significativo [5], insieme a quello attuale. Dopo gli interventi morettiani il

processo di degrado è avanzato sia per cedimenti della struttura absidale, sia per continue infiltrazioni di acqua piovana [6].

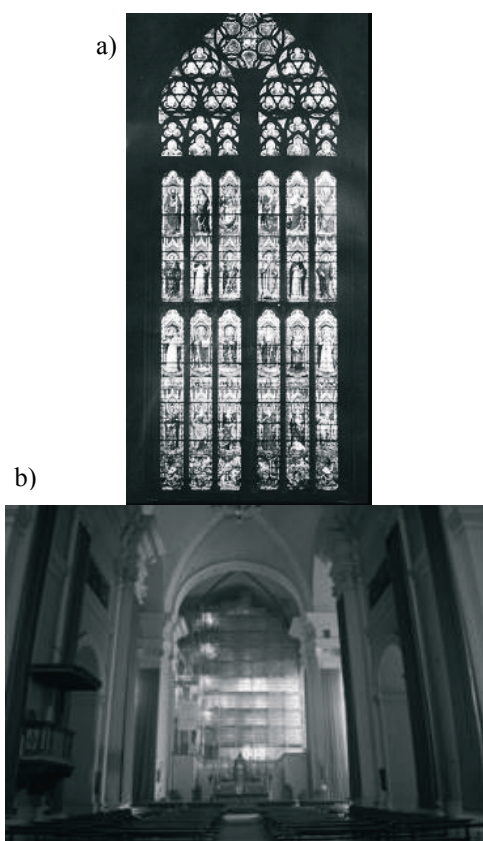


Figura 1: Vista d'insieme della vetrata di San Domenico (a) e del ponteggio interno (b)

## 2. UN' IPOTESI DI INTERVENTO PER LA PROTEZIONE DELL'OPERA DOPO IL RESTAURO

I risultati di un monitoraggio delle condizioni microclimatiche nei pressi della vetrata, effettuato nel periodo gennaio 2003 – giugno 2004, hanno mostrato che nel corso dell'anno la vetrata è sottoposta ad elevati indici di rischio, soprattutto nei mesi più caldi e più freddi, quali Agosto e Febbraio [7].

Dalle elaborazioni effettuate è emersa la necessità di proteggere la vetrata dopo il restauro, sia dagli agenti atmosferici che dagli stress termici, mediante l'adozione di una vetrata esterna di protezione. La verifica delle condizioni termoigrometriche nell'ipotesi che la vetrata venga installata è necessaria in quanto nell'intercapedine tra la vetrata artistica e la vetrata di protezione possono instaurarsi condizioni di umidità relativa e temperatura diverse da quelle cui la vetrata è stata sottoposta negli anni e, se la ventilazione non è sufficiente, la temperatura potrebbe raggiungere valori troppo elevati in estate o in presenza di irraggiamento solare o valori troppo bassi in inverno o nelle ore notturne, con la possibilità di formazione di condensa superficiale.

A tal fine la Sezione Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale ha proposto alla Soprintendenza ai Beni Ambientali Architettonici Artistici e Storici dell'Umbria la realizzazione di una vetrata esterna di protezione di tipologia innovativa che prevede una struttura portante costituita da profilati metallici di idonea sezione e 56 lastre di vetro con un sistema di fissaggio puntuale (fig. 2). Gli autori si sono occupati dello studio delle condizioni termoigrometriche nell'intercapedine tra le due vetrate, dello spessore di 50 cm, attraverso l'elaborazione di un apposito codice di calcolo.

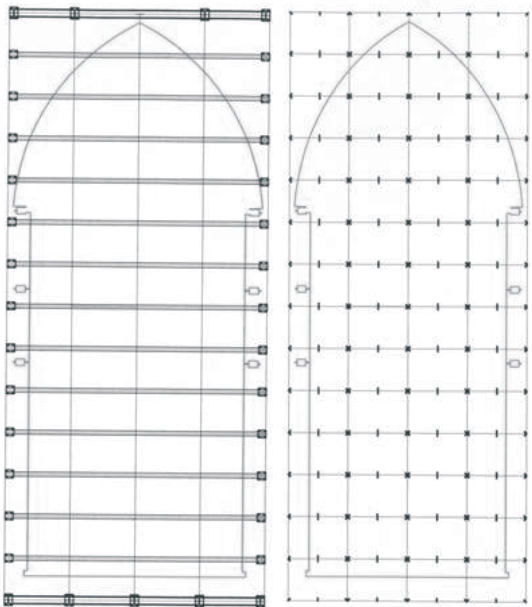


Figura 2: Progetto della vetrata di protezione

## 3. UN MODELLO MATEMATICO PER LA VERIFICA DELLE CONDIZIONI CHE SI INSTAURANO NELL'INTERCAPEDINE TRA LA VETRATA ARTISTICA E DI PROTEZIONE

Scopo del modello matematico proposto è determinare la temperatura della vetrata di protezione, artistica e dell'aria

all'interno dell'intercapedine, sia in presenza che in assenza di irraggiamento solare.

Si fa l'ipotesi di predisporre apposite aperture nella muratura alla base ed alla sommità della vetrata artistica, in modo da permettere la circolazione dell'aria della Basilica all'interno dell'intercapedine. Nell'intercapedine si instaura un moto convettivo naturale, dovuto alla differenza di temperatura tra interno ed esterno; per descrivere il fenomeno fisico è stato considerato un sistema aperto in cui l'aria si muove dal basso verso l'alto quando la temperatura dell'aria esterna è maggiore di quella dell'aria all'interno della Basilica e dall'alto verso il basso, quando la temperatura interna è maggiore di quella esterna (fig. 3).

Al fine della modellazione, date le notevoli dimensioni delle vetrate, si è discretizzato il sistema in 23 elementi di altezza  $\Delta z$  pari ad 1 m, di larghezza pari a quella della vetrata e di spessore pari a quello dell'intercapedine (0.5 m).

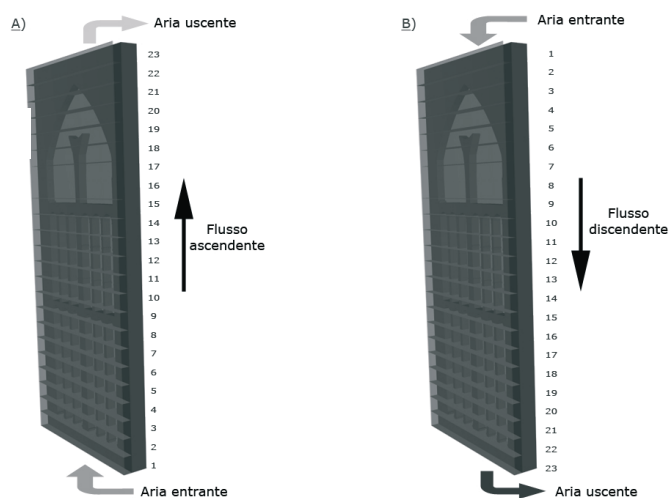


Figura 3: Schema semplificato del sistema

Nella fase iniziale si è supposto che il sistema fosse costituito da solo vetro e si è assunto un regime stazionario; successivamente è stato considerato il sistema reale costituito dal vetro e dalla struttura lapidea ed è stato elaborato un altro modello, in regime variabile, che tenesse conto dell'accumulo di calore delle parti in pietra e del tempo di ritardo con cui esso è restituito. Nel presente articolo viene presentato il modello in regime variabile ed i relativi risultati ottenuti.

Per ognuno dei 23 elementi è stata calcolata l'area di competenza per i diversi materiali (tab. 1) ed è stato scritto il bilancio energetico relativo al vetro di protezione, alla struttura lapidea, alla vetrata artistica ed il bilancio energetico dell'aria contenuta nell'elemento.

Nelle equazioni alla base del modello sono state fatte le seguenti ipotesi semplificative:

- si è trascurato il contributo dovuto alla riflessione del vetro artistico;
- si è considerata la temperatura costante all'interno dei vetri, poiché lo spessore degli stessi è molto piccolo.

### Bilancio energetico della vetrata protettiva

In condizioni stazionarie la potenza termica assorbita dall'elemento n-esimo della vetrata di protezione in presenza di irraggiamento solare è trasferita per adduzione in parte verso l'esterno, in parte verso l'intercapedine; pertanto si può scrivere:

$$a_{vp} W_i = K_e (T_{vp}(n) - T_e) + K_{ip} (T_{vp}(n) - T_i(n)) \quad (1)$$

dove la temperatura dell'aria nell'intercapedine in corrispondenza dell'elemento n-esimo è considerata costante pari alla media dei valori che essa assume in ingresso e in uscita dall'elemento stesso:

$$T_i(n) = \frac{T_{in}(n) + T_u(n)}{2} \quad (2)$$

Si può pertanto ricavare  $T_{vp}(n)$  in funzione di  $T_u(n)$ :

$$T_{vp}(n) = \frac{a_{vp} W_i + K_e T_e + K_{ip} T_i(n)}{K_e + K_{ip}} \quad (3)$$

Tabella 1: Aree di competenza dei materiali che costituiscono la vetrata artistica

Elemento	Area vetrata (m <sup>2</sup> )	Area lapidea (m <sup>2</sup> )	Area totale (m <sup>2</sup> )
1	1.58	8.52	10.10
2	5.43	4.67	10.10
3	5.52	4.58	10.10
4	5.49	4.61	10.10
5	5.49	4.61	10.10
6	5.49	4.61	10.10
7	5.52	4.58	10.10
8	5.44	4.66	10.10
9	3.20	6.90	10.10
10	5.65	4.45	10.10
11	5.67	4.43	10.10
12	5.73	4.38	10.10
13	5.63	4.47	10.10
14	5.46	4.64	10.10
15	2.48	7.62	10.10
16	7.13	2.97	10.10
17	7.14	2.96	10.10
18	6.65	3.45	10.10
19	5.59	4.51	10.10
20	4.82	5.28	10.10
21	2.84	7.26	10.10
22	0.45	9.65	10.10
23	0.00	10.10	10.10

#### Bilancio energetico della vetrata artistica

In condizioni stazionarie la potenza termica assorbita dall'elemento n-esimo della vetrata artistica in presenza di irraggiamento solare è trasferita per adduzione in parte verso l'interno della Basilica, in parte verso l'intercapedine; pertanto si può scrivere:

$$t_{vp} a_{va} W_i = K_{ia} (T_{va}(n) - T_i(n)) + K_b (T_{va}(n) - T_b) \quad (4)$$

da cui si può ricavare  $T_{va}(n)$  in funzione di  $T_u(n)$ :

$$T_{va}(n) = \frac{t_{vp} a_{va} W_i + K_b T_b + K_{ia} T_i(n)}{K_b + K_{ia}} \quad (5)$$

#### Bilancio energetico della struttura lapidea

La capacità termica della struttura lapidea non è trascurabile, pertanto nel bilancio energetico deve essere preso in esame il calore assorbito e rilasciato in tempi successivi o all'interno della Basilica o all'aria nell'intercapedine, a seconda delle temperature a cui si trovano gli elementi che partecipano agli scambi di calore. Si considera che la potenza termica assorbita dal materiale lapideo sia in parte ceduta all'aria nell'intercapedine per adduzione e in parte trasmessa

verso l'interno:

$$t_{vp} a_m W_i = K_{im} (T_m(n) - T_i(n)) + q_c(n) \quad (6)$$

Si può quindi ricavare  $T_m(n)$  in funzione di  $T_u(n)$ :

$$T_m(n) = \frac{t_{vp} a_m W_i + K_{im} T_i(n) - q_c(n)}{K_{im}} \quad (7)$$

#### Bilancio energetico dell'aria nell'intercapedine

L'aria presente nell'intercapedine è a contatto con tre materiali diversi (vetrata artistica, vetrata protettiva e struttura lapidea), con cui avviene scambio di calore per adduzione:

$$\begin{aligned} \gamma_a G (T_u(n) - T_{in}(n)) &= A_{vp} K_{ip} (T_{vp}(n) - T_i(n)) + \dots \\ &+ A_{va} K_{ia} (T_{va}(n) - T_i(n)) + \dots \\ &+ A_m K_{im} (T_m(n) - T_i(n)) \end{aligned} \quad (8)$$

Le incognite del sistema costituito dalle equazioni (2), (3), (5), (7) e (8) sono  $T_{va}(n)$ ,  $T_{vp}(n)$ ,  $T_u(n)$ ,  $T_i(n)$ ,  $T_m(n)$ ,  $q_c(n)$  e  $G$ ; per risolvere il problema è necessario calcolare il calore  $q_c$  e la portata d'aria  $G$  mediante ulteriori equazioni.

#### Calcolo del termine $q_c(n)$

Il calore assorbito dalla struttura lapidea può essere calcolato mediante l'approssimazione del gradino di temperatura, in quanto ciò che interessa determinare non è il calore trasmesso all'interno della Basilica, ma la temperatura della struttura lapidea sulla superficie a contatto con l'aria dell'intercapedine. Le ipotesi su cui si basa tale approssimazione sono:

- materiale omogeneo ed isotropo;
  - proprietà termofisiche del mezzo indipendenti dalla temperatura;
  - assenza di sviluppo interno di calore;
- esse possono ritenersi verificate nel caso in esame.

Si consideri la superficie lapidea sottoposta ad un gradino di temperatura, variabile da ora a ora; per ogni elemento del sistema si ha [8]:

$$q_c(n) = b \frac{(T_m(n) - T_i)}{\sqrt{\pi t}} \quad (9)$$

dove  $b = \sqrt{\lambda \rho \gamma}$  è il coefficiente di penetrazione del calore,  $T_i$  è la temperatura nell'ora precedente a quella considerata dal calcolo.

Sostituendo la (9) nella (7),  $T_m(n)$  è funzione solo di  $T_i(n)$ .

#### Calcolo della portata d'aria $G$

Per mezzo di un bilancio energetico del sistema aperto, applicato tra la sezione di ingresso e di uscita dell'aria (sommità o base del sistema considerato), è possibile calcolare la velocità media dell'aria, considerata costante su tutta l'intercapedine. La temperatura dell'aria nell'intercapedine viene posta pari alla media delle temperature calcolate in ogni elemento. Le equazioni considerate sono:

*Equazione di continuità tra la sezione di ingresso e di uscita dell'aria alla base e alla sommità del sistema*

$$G = \rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (10)$$

Bilancio energetico del sistema aperto tra la sezione di ingresso e di uscita dell'aria alla base e alla sommità del sistema

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho_a} + gH + \frac{1}{2}v_2^2 - \frac{1}{2}v_1^2 + R = 0 \quad (11)$$

Poiché le due sezioni aperte del sistema (base e sommità) sono a contatto con l'atmosfera, la differenza tra la pressione nella sezione 2 (sommità) e la pressione nella sezione 1 (base) può essere espressa per mezzo della legge dell'equilibrio idrostatico:

$$P_2 - P_1 = -\rho_b gH \quad (12)$$

Le perdite di carico totali possono essere espresse mediante la relazione (13), considerando il diametro equivalente della sezione e una altezza equivalente del sistema:

$$R = \frac{2}{D_{eq}} f v^2 (\Delta z + \Delta z_{eq}) \quad (13)$$

dove  $f$  è il fattore di attrito e può essere espresso mediante la relazione:

$$f = 0,046 Re^{-0,2} \quad \text{con} \quad Re = \frac{\rho_a v D_{eq}}{\mu_a}$$

$$\text{Ponendo} \quad \rho = \rho_0 \frac{273}{273 + \bar{T}_i} \quad \text{con} \quad \bar{T}_i = \sum (T_i \Delta z) \sum \Delta z \quad \text{e}$$

sostituendo nella relazione (11), di ottiene una equazione nell'incognita  $G$ .

Si ipotizza un valore di  $G$  di primo tentativo, si risolve il sistema delle equazioni (2), (3), (5), (7) e (8) e si ricava la temperatura dell'aria in ogni elemento; si calcola quindi la temperatura media dell'aria nell'intercapedine ( $\bar{T}_i$ ), si risolve la (11) e si determina un nuovo valore della portata d'aria  $G$  da confrontare con quello ipotizzato; il processo è iterativo fino a che i due valori di portata non differiscono per meno dello 0,01%.

Per la risoluzione del modello matematico è stato implementato il modello in Matlab.

#### Dati di ingresso al programma

La fase di monitoraggio ha fornito alcuni dei valori di input del modello, in particolare la temperatura dell'aria all'interno della Basilica, all'esterno e la radiazione solare incidente sulla vetrata [7]; per tutte le altre grandezze ci si è riferiti a dati di Letteratura [9]. Per quanto riguarda le proprietà termofisiche dell'aria e i coefficienti di scambio termico tra l'aria e le pareti con cui è a contatto, si sono assunti i valori riportati in tabella 2.

Tabella 2: Proprietà termofisiche dell'aria e coefficienti di scambio termico [8,11].

Proprietà termofisiche dell'aria [8]	
Calore specifico a pressione costante	1.026 kJ/kg°C
Densità in condizioni standard	1.2928 kg/m³
Viscosità dinamica	1.832 · 10 <sup>-5</sup> kg/ms
Coefficienti di scambio termico [11]	
Fattore di adduzione aria esterna – vetrata di protezione	23.2 W/m²K
Fattore di adduzione vetrata di protezione – aria intercapedine	8.14 W/m²K
Fattore di adduzione aria intercapedine – vetrata artistica	8.14 W/m²K
Fattore di adduzione aria intercapedine – struttura lapidea	8.14 W/m²K
Fattore di adduzione vetrata artistica – aria interna alla Basilica	8.14 W/m²K

Tabella 3: Mese di Agosto: dati di input derivanti dal monitoraggio [7].

Ora	Temp. Esterna (°K)	Temp. Interna (°K)	Radiaz. Solare (W/m²)
1.00	298	300	0.0
2.00	297	300	0.0
3.00	297	299	0.0
4.00	297	299	0.0
5.00	296	299	0.0
6.00	296	299	21.0
7.00	296	299	43.0
8.00	296	299	300.0
9.00	299	299	264.0
10.00	302	299	190.0
11.00	304	300	104.0
12.00	306	300.5	225.0
13.00	307	301	315.0
14.00	308	301	373.0
15.00	307	301	390.0
16.00	306	301	360.0
17.00	305	301	43.0
18.00	304	300.5	21.0
19.00	303.5	300.5	0.0
20.00	303.5	300.5	0.0
21.00	301	300	0.0
22.00	300	300	0.0
23.00	299	300	0.0
0.00	298.5	299.5	0.0

Tabella 4: Mese di Febbraio: dati di input derivanti dal monitoraggio [7].

Ora	Temp. Esterna (°K)	Temp. Interna (°K)	Radiaz. Solare (W/m²)
1.00	273.9	278.8	0.0
2.00	273.8	278.7	0.0
3.00	273.6	278.7	0.0
4.00	273.4	278.6	0.0
5.00	273.2	278.6	0.0
6.00	273.0	278.5	0.0
7.00	273.1	278.5	0.0
8.00	278.0	278.6	256.1
9.00	281.7	279.0	285.2
10.00	282.9	279.4	302.8
11.00	284.9	279.7	281.0
12.00	285.5	279.9	219.2
13.00	284.8	280.0	134.7
14.00	284.4	279.9	60.5
15.00	283.3	279.9	45.5
16.00	279.1	279.8	21.7
17.00	278.0	280.0	0.0
18.00	276.7	279.6	0.0
19.00	275.9	279.4	0.0
20.00	275.4	279.3	0.0
21.00	275.1	279.1	0.0
22.00	274.9	279.0	0.0
23.00	274.6	279.0	0.0
0.00	274.0	278.8	0.0

## 4. RISULTATI

Per mezzo del modello implementato è stato possibile ottenere i valori della temperatura del vetro di protezione, della vetrata artistica e dell'aria all'interno dell'intercapedine, per ciascun elemento in cui è stata suddivisa la vetrata, nell'arco del giorno medio mensile di Febbraio ed Agosto. Per ogni ora dei giorni medi mensili considerati sono stati calcolati i valori medi delle temperature; le figure 4 e 5 riportano tali valori, l'andamento della temperatura interna ed esterna e l'indicazione delle ore in cui è presente l'irraggiamento solare.

Nel mese di Agosto, dal confronto tra la temperatura dell'aria interna e esterna con la temperatura dell'aria dell'intercapedine (Fig. 4), si può notare come alle ore 9:00

circa si abbia un'inversione della direzione del flusso di calore. Nelle ore precedenti risulta più elevata la temperatura interna rispetto a quella esterna ed il calore si trasmette dall'interno verso l'esterno, mentre nelle ore successive si ha il passaggio del calore dall'esterno verso l'interno, fino alle ore 22:00, dove si ha un'altra inversione. Una ulteriore conseguenza dell'inversione del flusso termico è che la temperatura della vetrata artistica è superiore a quella della vetrata protettiva; questo perché l'aria a contatto con la vetrata artistica è più calda in quelle ore; successivamente, man mano che la temperatura esterna aumenta, aumenta anche la temperatura della vetrata protettiva, fino a diventare superiore rispetto a quella della vetrata artistica dalle ore 11:00 alle ore 22:00. Nel mese di Febbraio, dal confronto tra la temperatura dell'aria interna e esterna con la temperatura dell'aria dell'intercapedine (Fig. 5), si può notare come alle ore 10:00 circa si abbia un'inversione nella direzione del flusso di calore, in analogia al caso di Agosto; alle ore 18:00 si ha un'altra inversione; in questo periodo è preponderante il flusso termico che va dall'interno verso l'esterno, situazione opposta rispetto a quella che si verifica nel mese di Agosto. La temperatura della vetrata artistica risulta essere sempre superiore rispetto a quella della vetrata protettiva.

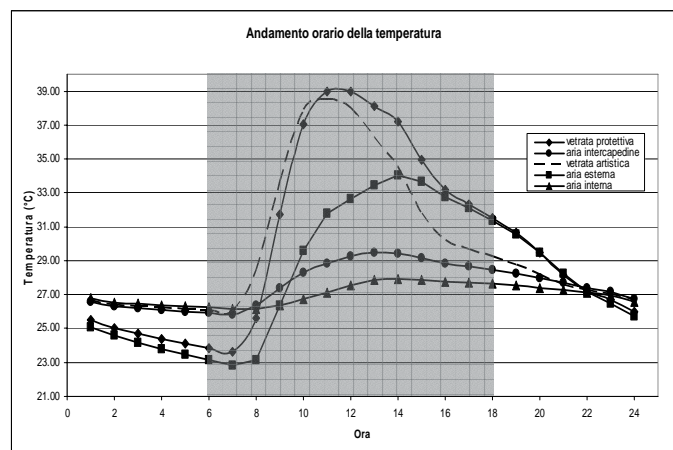


Figura 4: Agosto - Andamento delle temperature nel giorno medio mensile (l'area grigia indica la presenza di irraggiamento solare)

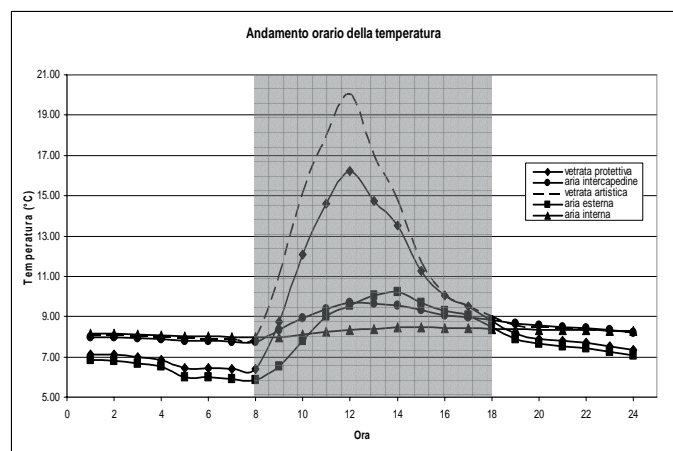


Figura 5: Febbraio - Andamento delle temperature nel giorno medio mensile (l'area grigia indica la presenza di irraggiamento solare)

I valori medi della temperatura della vetrata artistica in

presenza di vetro di protezione sono stati confrontati con i valori medi in assenza di vetro di protezione [7], come mostrato nelle figure 6 e 7. Dalla figura 6 si può notare come nel mese di Agosto la temperatura della vetrata artistica sia troppo elevata rispetto all'intervallo (19 – 24 °C) consigliato dalla normativa UNI 10829 [10].

Con l'adozione della vetrata protettiva la situazione migliora quando è presente irraggiamento solare; si ha un abbassamento della temperatura massima raggiunta dalla vetrata artistica, ma si ha un lieve peggioramento quando non è presente l'irraggiamento solare.

Dalla figura 7 si può notare come nel mese di Febbraio, essendo la temperatura della vetrata artistica più bassa rispetto all'intervallo (19 – 24 °C), l'adozione della vetrata protettiva comporta un miglioramento della situazione in quanto si ha un innalzamento generale della temperatura alla quale si trova la vetrata artistica.

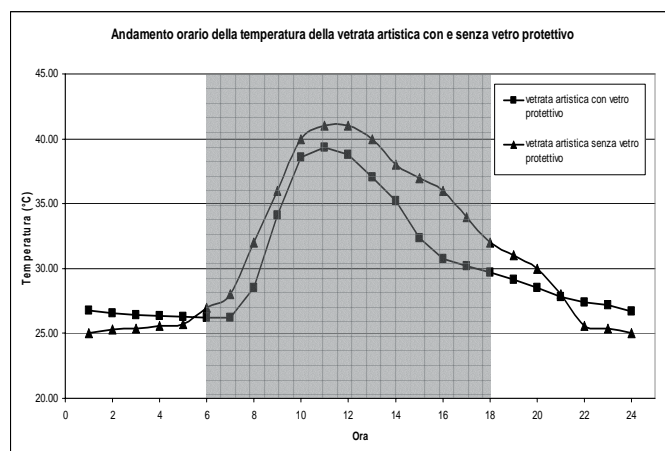


Figura 6: Agosto - Andamento della temperatura della vetrata artistica in presenza e assenza del vetro di protezione (l'area grigia indica la presenza di irraggiamento solare)

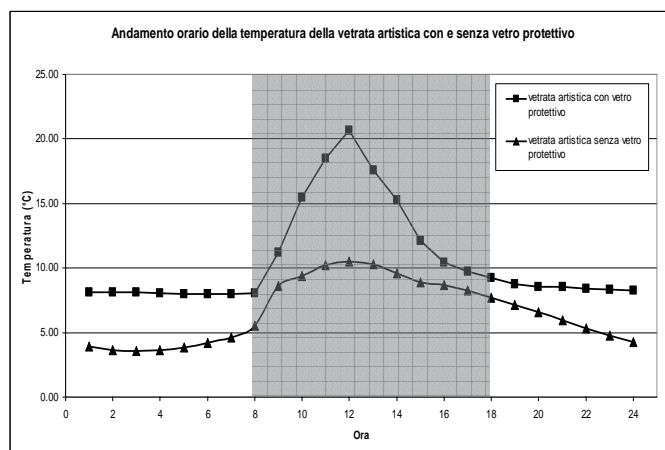


Figura 7: Febbraio - Andamento della temperatura della vetrata artistica in presenza e assenza del vetro di protezione (l'area grigia indica le ore in cui è presente irraggiamento solare)

## 5. CONCLUSIONI

La vetrata absidale della Basilica di San Domenico a Perugia è attualmente in fase di restauro; è emersa la necessità di proteggerla dagli agenti atmosferici e dagli stress termici

quando sarà ricollocata nella sua posizione originaria, mediante l'installazione di una vetrata esterna di protezione.

A tal fine è stato elaborato un progetto e la sua eventuale realizzazione farà sì che la vetrata artistica si troverà in condizioni termoisometriche diverse da quelle alla quali è stata esposta per secoli. E' stato quindi necessario determinare le nuove condizioni termoisometriche cui la vetrata sarebbe sottoposta nel caso in cui la Soprintendenza ai Beni Ambientali Architettonici Artistici e Storici dell'Umbria decidesse di realizzare il progetto proposto. E' stato implementato un modello matematico in convezione naturale, che ha permesso di determinare l'andamento della temperatura della vetrata di protezione, della vetrata artistica e dell'aria all'interno dell'intercapedine nel giorno medio mensile dei due mesi che al termine della fase di monitoraggio erano risultati essere i più gravosi: Agosto e Febbraio [7].

I risultati mostrano che, in presenza di ventilazione naturale dell'intercapedine tra la vetrata di protezione e la vetrata artistica, la temperatura media della vetrata artistica si abbassa nel mese di Agosto (nelle ore in cui è presente irraggiamento solare) e si innalza nel mese di Febbraio. Rispetto all'intervallo ottimale (19 – 24 °C) l'indice di rischio continua ad essere del 100% nel mese di Agosto e scende al 95% nel mese di Febbraio (IR = 100% in assenza di vetro di protezione).

Si dovrà pertanto analizzare la possibilità di effettuare una ventilazione forzata dell'aria nell'intercapedine mediante il progetto di un opportuno impianto di ventilazione, in grado di riportare i valori della temperatura il più possibile vicini agli intervalli ritenuti ottimali e consigliati dalla Norma UNI 10829, senza indurre stress termici, estremamente dannosi per la conservazione delle tessere vitree.

## ELENCO DEI SIMBOLI

a = coefficiente di assorbimento  
f = coefficiente di attrito  
g = accelerazione di gravità, m/s<sup>2</sup>  
n = elemento n-esimo  
q = quantità di calore, W  
t = coefficiente di trasparenza  
v = velocità, m/s  
A = superficie, m<sup>2</sup>  
D = diametro, m  
G = portata d'aria, m<sup>3</sup>/s  
H = altezza, m  
K = coefficiente di adduzione, W/m<sup>2</sup>K  
P = pressione, kg/m<sup>2</sup>  
R = perdita di carico, kg/m  
Re = numero di Reynolds  
W = radiazione solare, W/m<sup>2</sup>  
T = temperatura, °C  
Δz = altezza elemento, m  
γ = calore specifico, kJ/kg°C  
λ = conducibilità termica, W/mk  
ρ = densità, kg/m<sup>3</sup>  
μ = viscosità dinamica, kg/ms  
*Pedici*  
1 = sezione ingresso aria (base)  
2 = sezione uscita aria (sommità)  
a = aria  
vp = vetrata protettiva  
va = vetrata artistica  
m = struttura lapidea  
i = incidente, intercapedine  
in = ingresso  
e = esterno  
eq = equivalente

b = basilica  
c = conduzione  
ip = interfaccia aria intercapedine – vetro di protezione  
ia = interfaccia aria intercapedine – vetro artistico  
im = interfaccia aria intercapedine – struttura lapidea  
u = uscita

## BIBLIOGRAFIA

- [1].C. Buratti, F. Cotana, M. Felli, *Sulla ventilazione di una vetrata artistica nel Duomo di Perugia*, 49° Congresso Nazionale ATI, Perugia, 1994.
- [2].F. Asdrubali, C. Buratti, 1999, *Condizioni ottimali di conservazione delle opere d'arte: rassegna bibliografica ed analisi critica*, 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 1999.
- [3].F. Asdrubali, C. Buratti, F. Cotana, *Il sistema di ventilazione della vetrata di Arrigo Fiammingo nel Duomo di Perugia: monitoraggio delle condizioni termoisometriche*, 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, settembre 1999.
- [4].C. Buratti, *Analysis of the thermal stress and strain on Arrigo Fiammingo's artistic window in the Cathedral of Perugia*, Journal of Heat Transfer, ASME, Vol. 123, 2001.
- [5].F. Asdrubali, C. Buratti, R. Mariani, *Misura delle proprietà spettrofotometriche di alcuni pannelli restaurati della vetrata di San Domenico a Perugia*, Congresso Nazionale ATI, Padova – San Martino di Castrozza, 8 – 12 settembre 2003.
- [6].F. Abbozzo (1995): *Mariotto di Nardo e Bartolomeo di Pietro: storia e conservazione della vetrata absidale di S. Domenico 1411*, Il complesso di S. Domenico a Perugia, Perugia 19 – 21 ottobre 1995, p. 63.
- [7].C. Buratti, R. Mariani, *The artistic glass of S. Domenico's Basilica in Perugia: measurements and simulations of the micro – climate conditions*, Proceedings of 4th ICCHMT, May 17–20, 2005, Paris-Cachan, FRANCE.
- [8].M. Felli, *Lezioni di Fisica Tecnica. Volume secondo. Trasmissione del calore, energia solare, ambiente globale*, Perugia, Morlacchi Editore, 1999;
- [9].F. Asdrubali, C. Buratti, R. Mariani, G. Baldinelli, E. Moretti, *Misure spettrofotometriche su materiali trasparenti: recenti attività di ricerca del Laboratorio di Termotecnica dell'Università di Perugia*, CIRIAF – Collana Tecnico – Scientifica, Quaderno n. 22, 2004.
- [10].UNI 10829, *Beni di interesse storico artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione e analisi*, 1999.
- [11].UNI 10355, *Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo*, 1994.

## SUMMARY

The artistic glass of the S. Domenico's Basilica (1411) in Perugia was recently restored. During the restore phase, a monitoring of the micro – climate conditions of the air was carried out in the period January 2003 – June 2004. Results showed that the micro – climate conditions near the artistic glass present high Risk Indexes: therefore an external glass will be realized in order to protect the window from deterioration. The Risk Index after the installation of the glass shield were evaluated through a simulating programme, under the hypothesis of natural convection of the air space between the two glasses. The Risk Index is still high, so a forced ventilation system of air between the two glasses should be realized.