

Collana Tecnico-Scientifica
diretta da Giorgio Galli

Quaderno n. 11

CINZIA BURATTI, FEDERICO ROSSI

LA CONSERVAZIONE DELLA VETRATA DI ARRIGO FIAMMINGO

Ottobre 2000

CIRIAF

Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici

LA CONSERVAZIONE DELLA VETRATA DI ARRIGO FIAMMINGO

INDICE

Autori.....	pag. 5
Riassunto/Abstract	pag. 7
Introduzione	pag. 9
- PARTE PRIMA: Monitoraggio	
1.1 Il sistema di termoventilazione	pag. 13
1.2 Il sistema di monitoraggio	pag. 17
1.3 Elaborazione ed analisi dei dati.....	pag. 19
1.4 Condizioni ottimali di conservazione	pag. 23
1.5 Valutazione degli indici di rischio.....	pag. 24
- PARTE SECONDA: Modello di calcolo	
2.1 Valutazione della radiazione solare incidente.....	pag. 29
2.2 Coefficienti spettrali delle vetrate	pag. 33
2.3 Modello teorico e confronto dei risultati con i dati sperimentali.....	pag. 35
Conclusioni	pag. 41
Elenco dei simboli	pag. 43
Bibliografia	pag. 45

Autori

Cinzia Buratti

Nata a Marsciano (Perugia) nel 1966, si è laureata in Ingegneria Civile per la Difesa del Suolo e la Pianificazione Territoriale nel 1990. Ricercatrice di Fisica Tecnica Ambientale dal 1997 e docente di Tecnica del Controllo Ambientale dall'a.a. 1998/99. E' autrice di circa 40 pubblicazioni scientifiche nel campo delle proprietà termofisiche dei materiali, dell'acustica, del benessere termogrometrico, della conservazione di beni di interesse storico-artistico, dell'energetica.

Federico Rossi

Nato a Città di Castello (Perugia) nel 1966, si è laureato in Ingegneria Elettronica nel 1992, Ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale dal 1997. E' autore di oltre 30 pubblicazioni nel campo delle proprietà termofisiche dei materiali, dell'acustica e della trasmissione del calore. E' docente del Corso di Fisica Tecnica presso il Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali dell'Università degli Studi di Perugia, sede di Terni. Svolge la propria attività di ricerca presso i Laboratori di Acustica e Termotecnica del CI-RIAF.

Riassunto

La vetrata artistica della Cattedrale di Perugia, realizzata nel 1565 da Hendrick van der Broek, nell'ultimo restauro risalente al 1993 fu protetta dagli agenti atmosferici mediante una controvetrata esterna. Per evitare la formazione di condensa sulla vetrata di protezione in inverno e il surriscaldamento di quella artistica in estate fu installato un impianto di termoventilazione, progettato dal Laboratorio di Termotecnica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia, che convoglia aria della Cattedrale all'interno dell'intercapedine formata dalle due vetrate per poi reimmetterla in Cattedrale, controllando così le condizioni termoigrometriche dell'aria che circola nell'intercapedine. Il 15 marzo 1998 è iniziato il monitoraggio delle condizioni termoigrometriche in prossimità della vetrata, i cui dati sperimentali, relativi al periodo 15-3-98 ÷ 30-4-99, sono confrontati con i valori *ottimali* per la conservazione della vetrata, dedotti dalle normative inerenti la conservazione di beni di interesse storico-artistico; è infine valutato l'indice di rischio ambientale della vetrata. Esso risulta piuttosto elevato nelle stagioni molto calde o molto fredde, mentre è accettabile in quelle intermedie. Inoltre, per verificare l'efficacia dell'impianto, è stato elaborato un modello di calcolo che valuta la temperatura delle due vetrate e dell'aria in uscita dall'intercapedine. I risultati del modello sono confrontati con i dati termoigrometrici misurati nell'intercapedine, constatando una sostanziale convergenza. Ciò consente di impiegare il modello per la previsione delle condizioni termoigrometriche in altre vetrate nelle quali si prevedano interventi conservativi simili.

Abstract

The stained-glass of Perugia Cathedral, by Hendrick van der Broek in 1565, is protected against atmospheric pollution by an external-glass. A ventilation system, installed at the bottom of air space between the two glasses, avoids stained-glass overheating in summer and protection against moisture condensation in winter. Furthermore the ventilation system is equipped with an electric resistance that heats air in wintertime. This system is governed by an electronic control device that measures air temperature and relative humidity inside air space.

The authors carried out a program that predicts the temperature of stained and protection glasses and the temperature of the air coming out from the air space. Program results are compared with temperatures measured by ventilation system's probes; data were monitored during the 15-3-98/30-4-99 period.

The measured data were compared with the predicted data: a good agreement was found. So the prediction model can be used for glasses with similar protective systems.

Introduzione

La conservazione di beni di interesse storico – artistico è strettamente legata alle condizioni dell’ambiente in cui essi sono collocati; diverse sono le situazioni possibili: piccoli e grandi manufatti conservati all’interno di musei, oggetti fissi lasciati nei luoghi di ritrovamento, edifici storico-monumentali. Nel caso specifico delle chiese, le condizioni ambientali devono essere tali da preservare non solo l’edificio in sè, ma anche gli oggetti contenuti al suo interno: affreschi, tele, sculture, cori lignei, vetrate.

Le condizioni di conservazione devono essere tali da minimizzare i processi di degrado, tenendo anche in considerazione le effettive condizioni ambientali cui l’oggetto è stato sottoposto nel corso dei secoli, al fine di prevedere l’impatto che un qualsivoglia intervento potrà causare sulle opere d’arte.

In tale contesto si inserisce il lavoro effettuato sulla vetrata di Arrigo Fiammingo, situata nella navata destra del Duomo di Perugia; la vetrata, datata 1565, è realizzata con la tecnica della pittura a grisaglia e rappresenta la Predica di San Bernardino. La Soprintendenza ai Beni Ambientali Architettonici Artistici e Storici dell’Umbria ha completato nel 1993 il restauro della vetrata, a seguito del quale ha proposto l’adozione di una vetrata esterna di protezione, per limitare l’azione degli agenti di degrado: inquinamento dell’aria esterna, condizioni termoigrometriche, vibrazioni. I risultati di uno studio teorico, volto a valutare le condizioni

termoigrometriche nell'intercapedine tra le due vetrate, hanno suggerito l'installazione di un sistema di ventilazione forzata nell'intercapedine stessa, al fine di mantenere condizioni ambientali consone ad una corretta conservazione della vetrata artistica (1994). Il sistema di ventilazione è regolato mediante sonde di temperatura e umidità relativa dell'aria.

Si è effettuato un monitoraggio delle condizioni termoigrometriche in prossimità della vetrata di Arrigo Fiammingo; nel presente lavoro sono presentati i risultati dei dati acquisiti nel periodo 15 marzo 1998 - 30 aprile 1999. I dati sperimentali, opportunamente elaborati, sono stati confrontati con i valori dei parametri ambientali suggeriti dalle normative vigenti per una corretta conservazione della vetrata.

Sulla base dell'analisi dei dati, effettuata con opportune elaborazioni di tipo statistico, si sono valutati gli indici di rischio ambientale della vetrata relativi ai diversi periodi dell'anno e l'indice di rischio globale riferito all'intero periodo di monitoraggio.

I dati forniti dal monitoraggio sono stati poi confrontati con quelli ottenuti da un modello matematico che fornisce i valori della temperatura delle due vetrate e dell'aria in uscita dall'intercapedine per le varie modalità di funzionamento. Questo strumento analitico consente di individuare le condizioni microclimatiche che possono costituire una potenziale fonte di pericolo per la conservazione della vetrata artistica; esso inoltre può essere convenientemente applicato ad altre vetrate artistiche sulle quali siano previsti interventi di conservazione analoghi.



Fig. 1: *la vetrata di Arrigo Fiammingo; nella svasatura inferiore della monofora è visibile la griglia di aspirazione dell'impianto di termoventilazione.*

PARTE PRIMA: Monitoraggio

1.1 Il sistema di termoventilazione

Il sistema di termoventilazione è collocato in un apposito spazio ricavato nella svasatura interna della finestra, superiormente chiuso da un coperchio in lamiera che ripristina il profilo originario (v. fig. 2). L'aria, prelevata all'interno della Cattedrale, passa attraverso una griglia rettangolare e viene immessa nella sezione di trattamento, costituita da:

- un filtro con pressostato differenziale per la segnalazione della necessità di manutenzione (pulizia del filtro);
- un ventilatore centrifugo della portata di 1700 m³/h e della prevalenza di 200 Pa;
- una resistenza elettrica riscaldante della potenza di 3000 W.

A valle del sistema di trattamento è posizionato un diffusore in acciaio inox che raccorda la bocca premente del ventilatore all'intercapedine. Nel moto ascensionale nell'intercapedine, l'aria scambia calore con le superfici delle due vetrate, quella artistica all'interno e quella di protezione all'esterno che la delimitano, per essere poi reimmessa in Cattedrale attraverso un'apertura praticata lungo l'ogiva della monofora. Il sistema è controllato da una centralina elettronica, alla quale sono collegate due sonde per la misura della temperatura dell'aria e una sonda per la misura dell'umidità relativa.

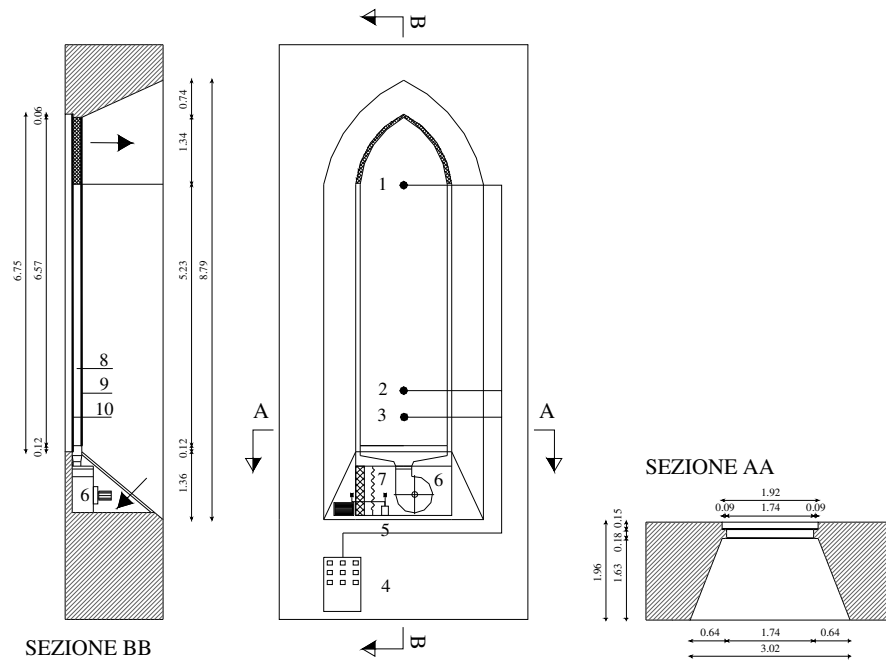


Fig 2: schema dell'impianto di termoventilazione.

1. sensore temperatura aria in prossimità della vetrata di protezione;
2. sensore temperatura aria in prossimità della vetrata artistica;
3. sensore di umidità relativa;
4. centralina di controllo;
5. pressostato differenziale;
6. ventilatore;
7. resistenza;
8. intercapedine;
9. vetrata artistica;
10. vetrata di protezione.

Se la temperatura della vetrata di protezione T_{v1} (sensore 2) raggiunge circa il valore di 14°C (per esempio durante l'inverno o il periodo notturno), il sistema di controllo attiva il funzionamento contemporaneo della resistenza riscaldante e del ventilatore. Una logica cablata del pannello di controllo subordina l'alimentazione elettrica della resistenza all'accensione del ventilatore. Se l'umidità relativa dell'aria Φ_i (sensore 3) supera il valore di circa il 50%, il sistema di controllo, come nel caso precedente, attiva il funzionamento contemporaneo della resistenza riscaldante e del ventilatore.

Se la temperatura della vetrata artistica (sensore 1) supera il valore di circa 30°C , il sistema di controllo attiva il funzionamento del solo ventilatore. L'allarme del manometro differenziale segnala la necessità di pulire o sostituire il filtro dell'aria. In base ai risultati dell'analisi termica e dei valori termoigrometrici dell'aria nella Cattedrale, dal funzionamento dell'impianto ci si attendono le seguenti prestazioni:

- temperatura media della vetrata artistica T_{v2} : escursione annuale compresa tra circa 14 e 30°C , seguendo l'andamento della temperatura media dell'aria della Cattedrale;
- massima differenza di temperatura tra la temperatura media della vetrata e la temperatura dell'aria all'interno della Cattedrale: inferiore a $1,5^{\circ}\text{C}$;
- umidità relativa dell'aria nell'intercapedine Φ_i : valore compreso tra 40 e 50%.

1.2 Il sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio della vetrata di Arrigo Fiammingo consente di acquisire i valori orari delle seguenti grandezze: temperatura dell'aria in prossimità della vetrata artistica (sonda 2) e della vetrata di protezione (sonda 1) dal lato interno dell'intercapedine; umidità relativa dell'aria nell'intercapedine tra le due vetrate (sonda 3); temperatura e umidità relativa dell'aria all'interno del Duomo, temperatura e umidità relativa dell'aria esterna. Uno schema semplificato del sistema è disegnato in fig. 3.

Le sonde del sistema di controllo dell'impianto di termoventilazione sono state collegate, per mezzo di tre ingressi opzionali, ad una centralina microclimatica TCR Tecora collocata a terra, alla base della vetrata, in grado di acquisire e memorizzare i valori orari delle grandezze rilevate dalle sonde. Essa, inoltre, attraverso sonde proprie, rileva la temperatura e l'umidità relativa dell'aria all'interno del Duomo. I dati sono settimanalmente trasferiti in un PC, per mezzo del quale sono analizzati ed elaborati.

Le condizioni dell'aria esterna (temperatura e umidità relativa) sono rilevate per mezzo di un termoigrometro Salmoiraghi posizionato nel chiostro della Cattedrale, al riparo dall'irraggiamento diretto e dalle precipitazioni atmosferiche.

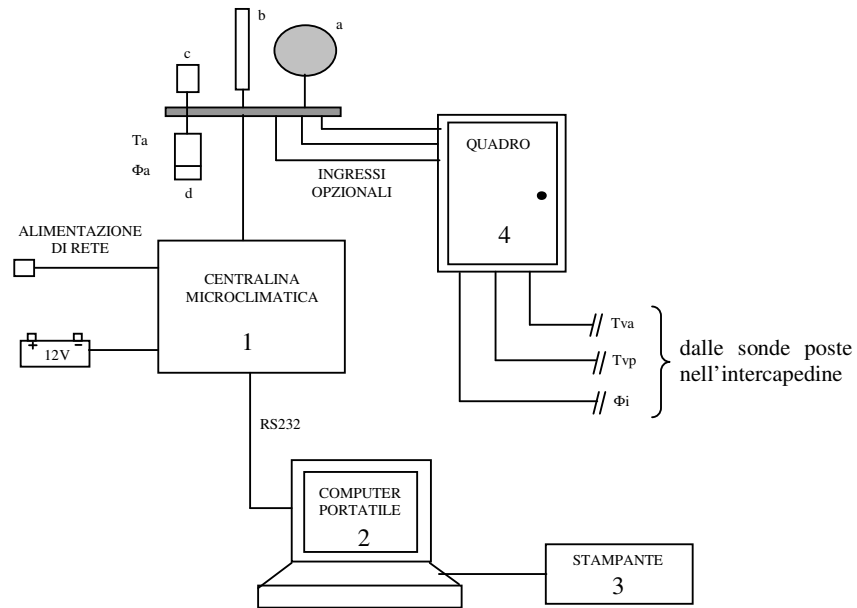


Fig. 3: *schema semplificato del sistema di monitoraggio della vetrata di Arrigo Fiammingo.*

- a. globo nero;*
- b. anemometro a filo caldo.*
- c. temperatura umida naturalmente ventilata*
- d. psicrometro;*

1.3 Elaborazione ed analisi dei dati

I valori orari delle grandezze menzionate nel paragrafo precedente sono stati rilevati per un periodo di oltre un anno; si hanno così a disposizione oltre 60.000 dati, che necessitano di un'opportuna elaborazione.

Per ogni mese dell'anno si è definito il *giorno medio mensile*: per ciascuna ora del giorno si è calcolato il valore medio dei dati rilevati in tutto il mese, relativamente ad una stessa ora; si è ottenuto così, per ciascuna grandezza, l'andamento orario medio mensile. La stessa elaborazione è stata effettuata sulle variazioni orarie e giornaliere dei diversi parametri.

A titolo di esempio, nelle fig. 4 e 5, è disegnato l'andamento orario medio mensile della temperatura dell'aria in prossimità della vetrata di Arrigo Fiammingo T_{va} relativamente ai mesi di luglio 1998 (fig. 4) e dicembre 1998 (fig. 5), che costituiscono le condizioni estreme. Tutte le considerazioni relative all'indice di rischio per la vetrata artistica sono state effettuate sulla base del valore che la temperatura assume in corrispondenza della sonda fissa, connessa alla centralina di rilevamento.

Anche per la temperatura dell'aria in prossimità della vetrata di protezione T_{vp} si è seguito lo stesso procedimento. L'andamento orario di tale temperatura è disegnato in fig. 4 e 5 e una stessa elaborazione è stata effettuata sui dati di umidità relativa dell'aria nell'intercapedine tra le due vetrate, i cui risultati sono anch'essi disegnati in fig. 4 e 5.

La temperatura della vetrata artistica si mantiene sempre superiore a

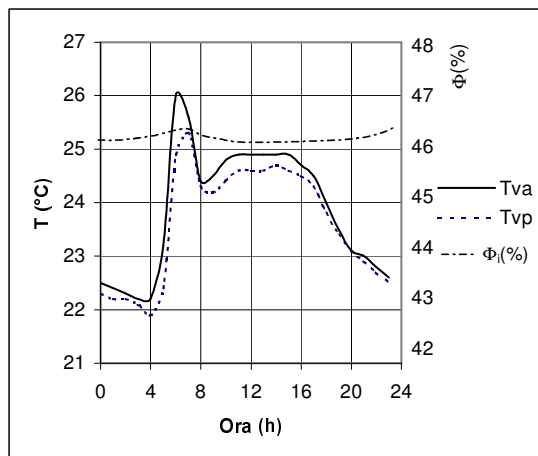


Fig. 4: andamento orario medio mensile di: temperatura superficiale vetrata di Arrigo Fiammingo (T_{va}), temperatura superficiale vetrata di protezione (T_{vp}), umidità relativa aria intercapedine Φ) nel mese di luglio 1998.

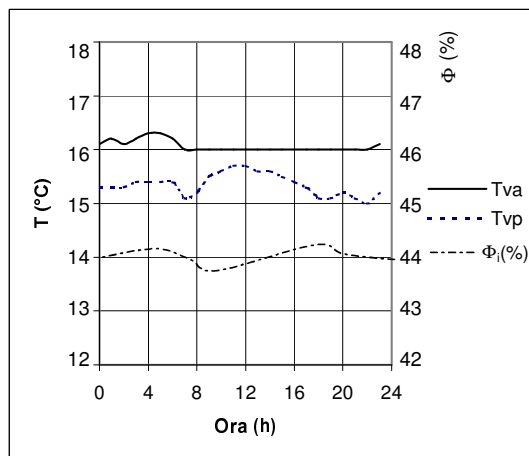


Fig. 5: andamento orario medio mensile di: temperatura superficiale vetrata di Arrigo Fiammingo (T_{va}), temperatura superficiale vetrata di protezione (T_{vp}), umidità relativa aria intercapedine Φ) nel mese di dicembre 1998.

quella della vetrata di protezione, in condizioni sia estive sia invernali. Nel primo caso ci si aspetterebbe il contrario, visto che la temperatura dell'aria esterna è più elevata rispetto a quella dell'aria interna e che la vetrata artistica è montata internamente alla vetrata di protezione; in realtà l'apparente anomalia è legata agli effetti dell'irraggiamento solare ed al fatto che la vetrata artistica presenta valori più elevati del coefficiente di assorbimento per la radiazione solare rispetto alla vetrata di protezione. In condizioni invernali, invece, le temperature più basse sono raggiunte dalla vetrata di protezione, che è direttamente a contatto con l'esterno.

Nel mese di luglio 1998, sulla vetrata artistica, si è avuta mediamente un'escursione giornaliera di temperatura dell'ordine di 4°C, tra 22 e 26°C; nel mese di dicembre 1998 essa si è mantenuta pressoché costante nell'arco delle 24 ore e pari a circa 16°C. La presenza di un'escursione giornaliera di temperatura nel periodo estivo è legata al fatto che, data l'esposizione della vetrata rispetto ai punti cardinali, solo in questi mesi è sottoposta all'irraggiamento solare diretto, mentre nei mesi invernali è soggetta solo alla radiazione diffusa per tutto l'arco della giornata. L'umidità relativa dell'aria nell'intercapedine si mantiene pressoché costante nelle 24 ore e dell'ordine del 44%, sia in luglio sia in dicembre.

Si sono infine caratterizzati il microclima interno ed esterno al Duomo per mezzo del rilievo di temperatura e umidità relativa dell'aria; anche in questo caso, a titolo di esempio, sono disegnati gli andamenti orari medi mensili della temperatura dell'aria interna ed esterna relativamente ai mesi di luglio 1998 (fig. 6) e dicembre 1998 (fig. 7). Dal con-

fronto tra le due temperature si evince che la prima non risente delle variazioni marcate della seconda e si mantiene pressoché costante sia nel mese di luglio ($\cong 24^{\circ}\text{C}$) che di dicembre ($\cong 11^{\circ}\text{C}$); ciò è legato all'elevata inerzia termica delle pareti perimetrali del Duomo.

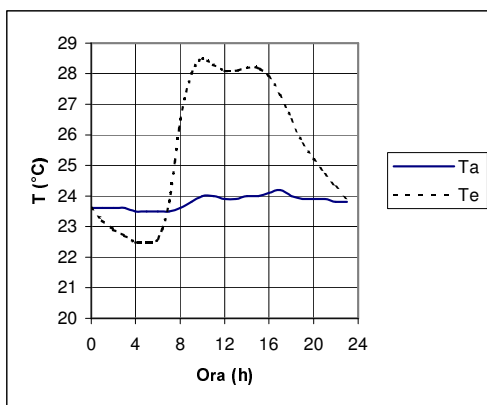


Fig. 6: andamento orario medio mensile di: temperatura dell'aria interna (T_a), temperatura dell'aria esterna (T_e), nel mese di luglio 1998.

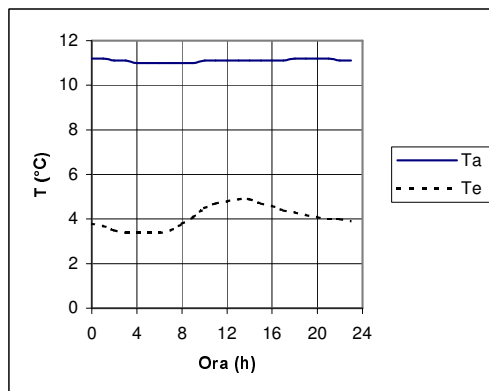


Fig. 7: andamento orario medio mensile di: temperatura dell'aria interna (T_a), temperatura dell'aria esterna (T_e), nel mese di dicembre 1998.

1.4 Condizioni ottimali di conservazione

Nella scelta delle condizioni ottimali di conservazione per una data opera d'arte occorre tenere in considerazione la storia climatica dell'opera, per il fatto che essa entra in equilibrio, nel corso dei secoli, con l'ambiente circostante e con la variabilità delle sue condizioni.

Per le condizioni ottimali di conservazione, si è fatto riferimento alla UNI 10829 *Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione, misurazione ed analisi* (luglio 1999). In essa sono riportati i valori di riferimento dei parametri ambientali relativi alla corretta conservazione di *33 categorie di materiali e oggetti, in condizioni di clima stabile nel tempo*. La Norma suggerisce di rilevare i valori orari delle grandezze di interesse e di elaborare statisticamente i dati ottenuti; sulla base delle distribuzioni statistiche dei parametri ambientali e delle relative curve di frequenza cumulata, si può determinare l'*indice di rischio*, definito come la percentuale di tempo in cui la grandezza in esame si mantiene al di fuori dell'intervallo ritenuto accettabile; ciò vale non solo per i valori assoluti, ma anche per le escursioni massime orarie e giornaliere. Nel presente lavoro si è fatto riferimento ai valori indicati in Tab. 1.

Tab. 1. *Condizioni ottimali di conservazione assunte per la vetrata di Arrigo Fiammingo (da UNI 10829).*

Materiale	T (°C)	ΔT (°C)	Φ (%)	ΔΦ (%)
Vetri instabili, iridescenti, sensibili, mosaici di vetri sensibili	20 ÷ 24	± 1.5	40 ÷ 45	± 6

1.5 Valutazione dell'indice di rischio

L'indice di rischio è stato calcolato su base mensile, come suggerito dalla UNI 10829. Si sono elaborate le distribuzioni statistiche e le frequenze cumulate dei seguenti parametri: temperatura dell'aria in prossimità della vetrata artistica (lato interno intercapedine), umidità relativa dell'aria nell'intercapedine, temperatura e umidità relativa dell'aria interna al Duomo, variazioni orarie e giornaliere di tutte le grandezze menzionate. L'andamento dell'indice di rischio relativamente al periodo dei rilievi (marzo 1998 – aprile 1999) è disegnato nelle figg. 8, 9, 10, 11. Dall'esame delle figure si evince quanto segue:

- a) per la temperatura in prossimità della vetrata di Arrigo Fiammingo (fig. 8) si hanno indici di rischio elevati nei mesi molto freddi, poiché la temperatura scende al di sotto del valore minimo consigliato e nei mesi molto caldi, poiché sale al di sopra del valore massimo; per le escursioni orarie di temperatura si hanno indici di rischio contenuti

entro il 10%, per quelle giornaliere indici di rischio sempre elevati, tranne nei mesi di marzo '98, dicembre '98 e marzo '99;

- b) per l'umidità relativa dell'aria interna all'intercapedine (fig. 9) l'indice di rischio è molto modesto sia per i valori assoluti sia per le escursioni orarie e giornaliere;
- c) per la temperatura dell'aria interna al Duomo (fig. 10) vale quanto detto per quella in prossimità della vetrata di Arrigo Fiammingo; per le escursioni orarie gli indici di rischio sono praticamente nulli, per quelle giornaliere, invece, sono contenuti entro il 20%;
- d) per l'umidità relativa dell'aria interna al Duomo (fig. 11) gli indici di rischio sono quasi sempre elevati; le escursioni orarie sono nulle, quelle giornaliere sono contenute entro il 40%.

Si è infine valutato, sempre per le grandezze menzionate, l'indice di rischio relativo all'intero periodo di monitoraggio (vedi Tab. 2). Esso risulta elevato per i valori assoluti della temperatura dell'aria sia in prossimità della vetrata artistica sia all'interno del Duomo e dell'umidità relativa all'interno del Duomo, nonché per la variazione giornaliera della temperatura in prossimità della vetrata artistica. Risulta basso per tutti gli altri parametri, soprattutto per le escursioni di umidità relativa che rivestono un ruolo particolarmente importante nel degrado delle vetrate di questo tipo.

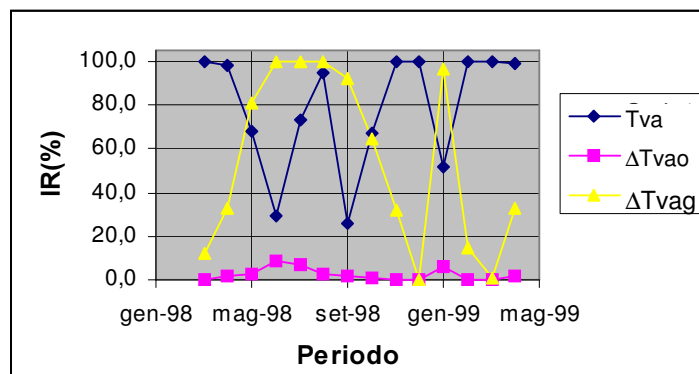


Fig. 8: andamento dell'indice di rischio nel periodo di rilevamento (marzo 1998–aprile 1999) per la temperatura dell'aria che lambisce la vetrata di Arrigo Fiammingo dal lato dell'intercapedine e relative variazioni orarie e giornaliere.

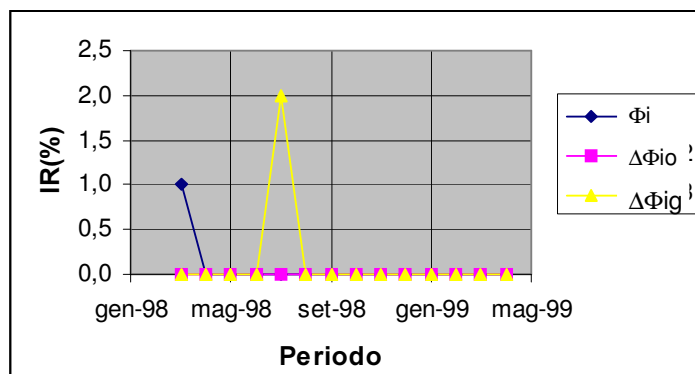


Fig. 9: andamento dell'indice di rischio nel periodo di rilevamento (marzo 1998–aprile 1999) per l'umidità relativa dell'aria che lambisce la vetrata di Arrigo Fiammingo dal lato dell'intercapedine e relative variazioni orarie e giornaliere.

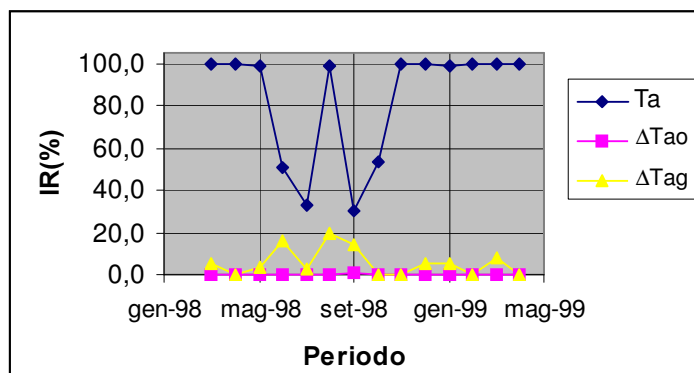


Fig. 10: andamento dell'indice di rischio nel periodo di rilevamento (marzo 1998–aprile 1999) per la temperatura dell'aria interna al Duomo e relative variazioni orarie e giornaliere.

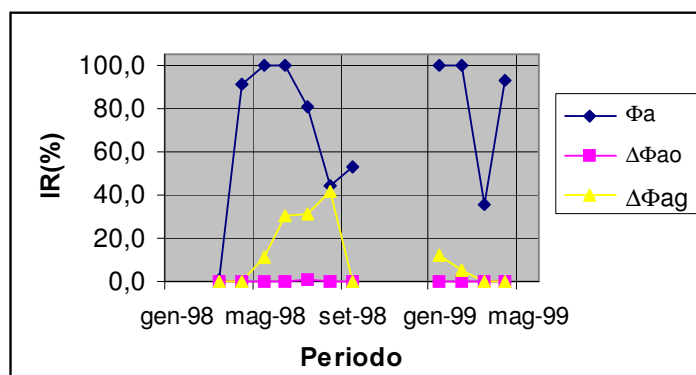


Fig. 11: andamento dell'indice di rischio nel periodo di rilevamento (marzo 1998–aprile 1999) per l'umidità relativa dell'aria interna al Duomo e relative variazioni orarie e giornaliere.

Tab. 2. *Indici di rischio della vetrata di Arrigo Fiammingo per l'intero periodo di monitoraggio (marzo 1998 – aprile 1999).*

Parametro	Simbolo	IR%
Temperatura della vetrata artistica	T_{va}	51
Escursione oraria della temperatura della vetrata artistica	ΔT_{vao}	3
Escursione giornaliera della temperatura della vetrata artistica	ΔT_{vag}	84
Umidità relativa dell'aria dell'intercapedine	Φ_i	0
Escursione oraria dell'umidità relativa dell'aria dell'intercapedine	$\Delta \Phi_{io}$	0
Escursione giornaliera dell'umidità relativa dell'aria dell'intercapedine	$\Delta \Phi_{ig}$	1
Temperatura dell'aria della Cattedrale	T_a	62
Escursione oraria della temperatura della Cattedrale	ΔT_{ao}	0
Escursione giornaliera della temperatura della Cattedrale	ΔT_{ag}	7
Umidità relativa dell'aria della Cattedrale	Φ_a	77
Escursione oraria della umidità relativa dell'aria della Cattedrale	$\Delta \Phi_{ao}$	0
Escursione giornaliera della umidità relativa dell'aria della Cattedrale	$\Delta \Phi_{ag}$	9

PARTE SECONDA: Modello di calcolo

2.1 Valutazione della radiazione solare incidente

Nella stesura del programma di calcolo per la simulazione delle condizioni del microclima in prossimità della vetrata di Arrigo Fiammingo, per ciascun mese dell'anno, si è resa necessaria la valutazione della radiazione solare incidente sulla vetrata. A tal fine è stato considerato, per ciascun mese, un giorno tipo, il 16°, per il quale si sono calcolati, in un sistema di coordinate orizzontali:

- periodo di irraggiamento diretto e diffuso;
- andamento orario dell'area colpita dalla radiazione diretta (v. tab. 3);
- andamento orario dell'angolo d'incidenza della radiazione diretta (v. tab. 3).

Seguendo la procedura riportata in fig. 12 sono stati interpolati i dati di radiazione giornaliera incidente su superficie orizzontale al suolo H_T e di eliofania n , rilevati negli ultimi 25 anni dall'Osservatorio Meteorologico della Facoltà di Agraria di Perugia, pervenendo alla individuazione dei coefficienti della relazione di Sabbagh, che assume la seguente forma (v. fig. 13):

$$H_T = H_o \left(0,206 + 0,450 \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

Ricorrendo alle procedure di Liu e Jordan, sono stati individuati, per ciascun giorno tipo mensile, gli andamenti orari della radiazione diffusa $W_{d,h}$ e diretta $W_{\varphi,h}$ che incide sulla vetrata di protezione. Le interpolazioni di $W_{d,h}$ e $W_{\varphi,h}$ sono riportate in fig. 14.

Tab. 3: *area della vetrata di protezione esposta ad irraggiamento diretto e angolo d'incidenza.*

Ora	5:00 e 19:00		6:00 e 18:00		7:00 e 17:00		8:00 e 16:00	
Mese	Area (%)	Ang. (°)	Area (%)	Ang. (°)	Area (%)	Ang. (°)	Area (%)	Ang. (°)
Aprile	-	-	73,5	72	50,9	81	-	-
Maggio	86,5	55	80,6	66	67,6	76	11,0	86
Giugno	87,8	52	82,8	63	73,9	73	48,4	83
Luglio	87,2	53	81,9	64	71,8	74	38,3	84
Agosto	-	-	77,4	69	62,3	78	-	-
Settembre	-	-	69,1	74	-	-	-	-

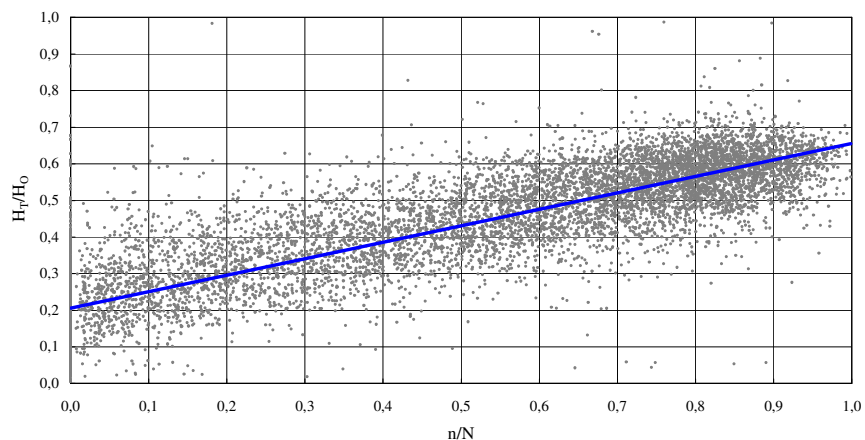


Fig. 13: relazione di Sabbagh per Perugia.

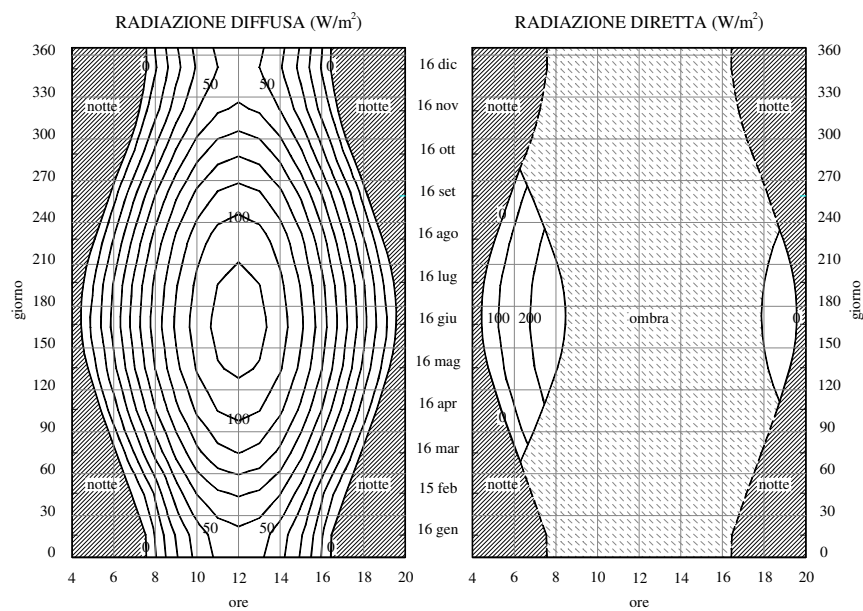


Fig. 14: andamento orario della radiazione solare diffusa $W_{d,h}$ e diretta $W_{\phi,h}$ incidente sulla vetrata di protezione. La vetrata è orientata a NNE.

2.2 Coefficienti spettrali delle vetrate

In Laboratorio sono state effettuate prove spettrofotometriche su campioni di vetro colorato, simili a quelli della vetrata artistica, e su un campione appartenente alla vetrata di protezione. Si sono così misurati i coefficienti di trasmissione, assorbimento e riflessione spettrali dei diversi vetri che costituiscono la vetrata, con lo scopo di determinare la radiazione solare diffusa e diretta assorbita dalle due vetrate; i risultati sono riportati in fig. 15. Per la radiazione diretta si è ipotizzato che i coefficienti di assorbimento, riflessione e trasparenza assumano un valore costante per un angolo d'incidenza compreso tra 0 e 45° e che varino con legge parabolica tra 45 e 90°. Mediando tra 0 e 90° il valore dei coefficienti a , r e t si sono ottenuti i corrispondenti coefficienti per la radiazione diffusa (vedi fig. 15).

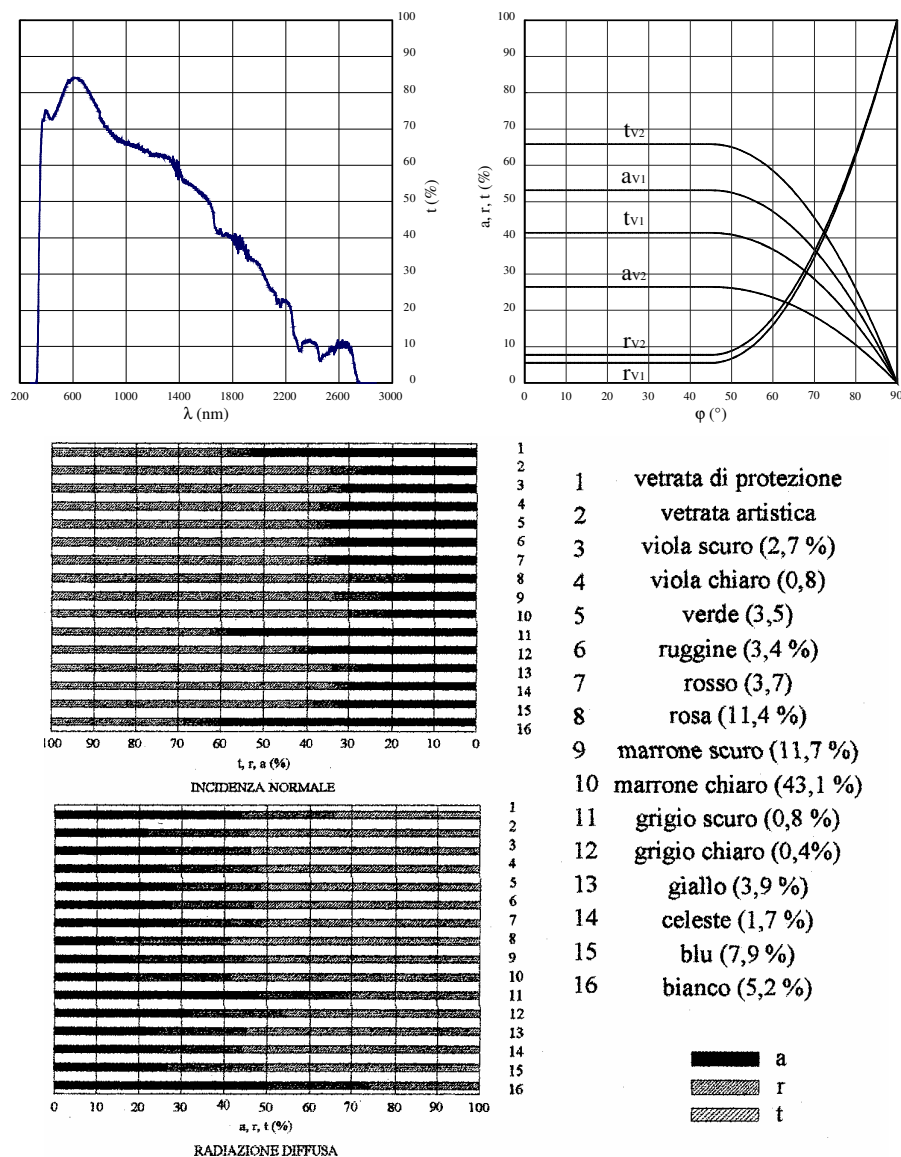


Fig. 15: coefficienti a , r , e t dei campioni di vetri; per la vetrata artistica è stato calcolato come media ponderata dei vetri colorati che la compongono.

2.3. Modello teorico e confronto dei risultati con i dati sperimentali

Impostando il bilancio energetico tra i vari elementi che costituiscono il sistema sono state ricavate le relazioni (2), (3) e (4) che forniscono rispettivamente i valori della temperatura media della vetrata di protezione T_{vp} , della vetrata artistica T_{va} e dell'aria in uscita dall'intercapedine T_f :

$$T_{vp} = \frac{W_{\varphi,h} a_{vp,\varphi} \left(l + \frac{r_{vp} t_{vp}}{l - r_{vp} r_{va}} \right) \frac{A_{\varphi}}{A} + W_{d,h} a_{vp,d} \left(l + \frac{r_{vp} t_{vp}}{l - r_{vp} r_{va}} \right)_d + h_{vp,e} T_c + h_i \left(\frac{T_b + T_f}{2} \right)}{h_{vp,e} + h_i} \quad (2)$$

$$T_{va} = \frac{W_{\varphi,h} \left(l + \frac{a_{va} t_{vp}}{l - r_{va} r_{vp}} \right) \frac{A_{\varphi}}{A} + W_{d,h} \left(l + \frac{a_{va} t_{vp}}{l - r_{va} r_{vp}} \right)_d + h_{va,c} T_c + h_i \left(\frac{T_b + T_f}{2} \right)}{h_{2c} + h_i} \quad (3)$$

$$T_f = \frac{2h_i A (T_{vp} + T_{va}) + h_i sp (T_e + T_c) + T_b (2Sv\rho\gamma - 2h_i A - h_i sp)}{2h_i A + h_i sp + 2Sv\rho\gamma} \quad (4)$$

dove la temperatura dell'aria alla base dell'intercapedine T_b è uguale a T_c nel caso che la resistenza sia spenta, altrimenti è pari a:

$$T_b = T_c + \frac{Q_r}{Sv\rho\gamma} \quad (5)$$

Le (2), (3) e (4) sono state implementate in un programma di calcolo i cui dati di ingresso a sono riportati in tab. 4. In tab. 5 sono riportati i valori di T_{va} confrontati con quelli misurati durante la campagna di monitoraggio. Tali valutazioni sono state effettuate con riferimento ai mesi estivi, quando è massima la radiazione diretta. In questo periodo l'impianto è spento (convezione naturale) o funziona con la resistenza spenta.

Il confronto tra la temperatura dell'aria misurata dalla sonda 2 con quella teorica della vetrata artistica, stimata con il modello, mostra differenze inferiori a $2,4^{\circ}\text{C}$ (v. tab. 5). In particolare le differenze minime si registrano durante le ore notturne, mentre le deviazioni massime si hanno in corrispondenza delle prime ore del mattino, quando la vetrata è colpita dalla radiazione diretta (v. fig. 16). Tale circostanza è dovuta al fatto che il modello non tiene conto della radiazione riflessa dalle superfici prospicienti le vetrate.

Tab. 4: dati di ingresso del programma; si è ipotizzato per la temperatura dell'aria esterna un andamento sinusoidale, mentre quella interna rimane costante.

Coefficienti di convezione		naturale	forzata			
Vetrata di protezione-aria esterna		-	23,2			
Vetrata artistica-aria Cattedrale		8,2	-			
Aria intercapedine – pareti vetrate e opache delimitanti		8,2	11,5			
Velocità dell'aria nell'intercapedine (m/s)		0,65	1,50			
Proprietà termofisiche dell'aria						
Calore specifico (kJ/kg °C)		1,026				
Densità media 10-40°C (kg/m ³)		1,116				
Caratteristiche geometriche del sistema						
Area vetrata di protezione (m ²)		10,7				
Spessore intercapedine (m)		0,18				
Perimetro intercapedine (m)		11,5				
Condizioni termoigrometriche, radiazione solare su superficie orizzontale (cal/cm² giorno), eliofania						
Mese	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	T _c (°C)	ur _c (%)	H _T	n (min)
Aprile	15,8	7,9	15,0	59	303	381
Maggio	20,8	12,8	18,0	63	457	504
Giugno	26,4	16,7	20,0	68	485	637
Luglio	30,0	19,4	24,0	60	709	563
Agosto	30,3	19,9	26,0	54	594	481
Settembre	22,5	14,4	23,0	57	431	304

Tab. 5: confronto tra la temperatura dell'aria misurata dalla sonda 2 e quella teorica della vetrata artistica. (*) ΔT è la differenza tra il valore reale e quello teorico.

Mese	Valore	T mis.	Conv. Nat.		Conv. Forz.	
			T	ΔT (*)	T	ΔT (*)
Aprile	med	16,7	15,1	1,6	15,1	1,6
	max	17,2	15,9	2,2	15,7	2,1
	min	16,5	14,6	0,9	14,7	1,1
Maggio	med	19,0	18,4	0,6	18,3	0,7
	max	20,1	19,1	1,2	18,9	1,3
	min	17,9	17,7	-0,6	17,8	-0,4
Giugno	med	21,4	20,6	0,8	20,5	0,9
	max	23,5	21,3	2,1	21,1	2,4
	min	19,6	19,8	-0,6	19,9	-0,5
Luglio	med	24,9	24,6	0,3	24,4	0,4
	max	27,0	25,5	1,7	25,2	1,9
	min	23,2	23,7	-1,4	23,8	-1,2
Agosto	med	26,4	26,3	0,1	26,3	0,2
	max	27,7	27,1	0,9	26,9	1,0
	min	25,0	25,6	-1,6	25,7	-1,4
Settembre	med	22,3	23,0	-0,7	23,0	-0,7
	max	23,9	23,7	0,2	23,6	0,3
	min	21,2	22,5	-2,1	22,6	-2,1
Media				$\pm 1,1$		$\pm 1,1$

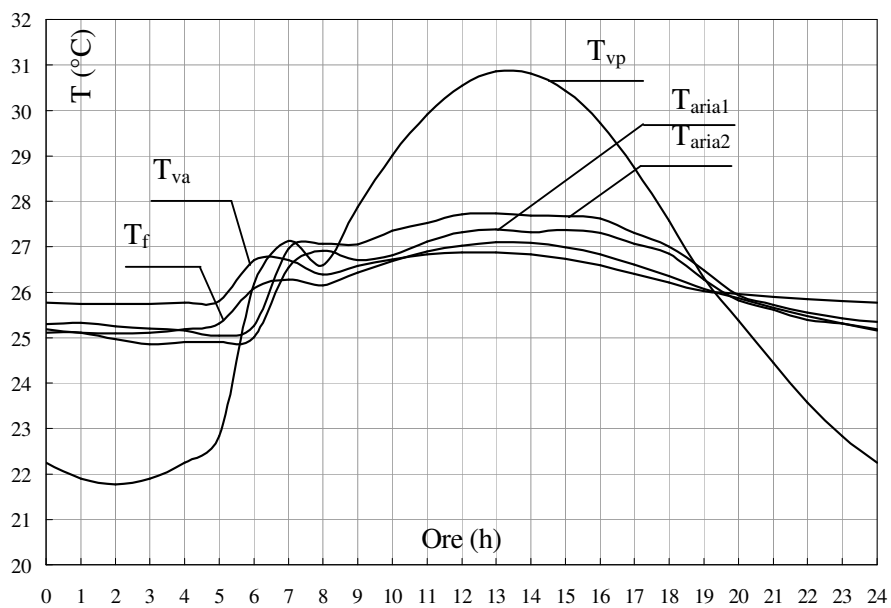


Fig. 16. Confronto tra i dati misurati e quelli forniti dalla simulazione per il caso di convezione forzata con resistenza spenta nel mese di agosto 1998.

10. Conclusioni

La vetrata di Arrigo Fiammingo (1565), nel Duomo di Perugia, è stata recentemente restaurata e posta in opera con una vetrata esterna di protezione; le condizioni del microclima nell'intercapedine tra le due vetrate sono controllate da un sistema di ventilazione appositamente realizzato, dopo accurati studi e simulazioni.

Nel presente lavoro sono presentati i risultati del monitoraggio delle condizioni del microclima in corrispondenza della vetrata artistica, relativamente al periodo 15 marzo 1998 – 30 aprile 1999. I parametri monitorati (valori orari di temperatura e umidità relativa all'interno e all'esterno del Duomo, temperatura e umidità relativa nell'intercapedine tra le due vetrate, per un totale di oltre 60.000 dati), opportunamente elaborati con analisi di tipo statistico, sono confrontati con le condizioni ottimali di conservazione suggerite dalla Letteratura specializzata e da Normative specifiche. Per le diverse grandezze esaminate è valutato l'*indice di rischio*, ovvero la percentuale di tempo, nell'arco di un determinato periodo, durante il quale i parametri cadono al di fuori dell'intervallo di variabilità consigliato. L'indice di rischio è stato calcolato sia mese per mese che per l'intero periodo di monitoraggio. I valori risultano piuttosto elevati nei mesi estremi, più contenuti nelle stagioni intermedie.

Si è inoltre sviluppato un programma di calcolo originale per la previsione delle condizioni microclimatiche in prossimità della vetrata di Arrigo Fiammingo.

I risultati forniti dal modello sono stati confrontati con quelli misurati; i valori di temperatura calcolati differiscono mediamente di $\pm 1,1$ °C sia per la vetrata artistica sia per la vetrata di protezione. Il buon accordo tra i risultati teorici e quelli sperimentali incoraggia all'impiego del modello per la simulazione delle condizioni termoigrometriche su vetrate per le quali si prevedano interventi conservativi simili a quelli adottati nella Cattedrale di San Lorenzo per la vetrata di Arrigo Fiammingo.

11. Elenco dei simboli

- a = coefficiente di assorbimento (-)
 A = superficie vetrate (m^2)
 h = coefficiente di convezione. ($W/m^2\text{°C}$)
 H = radiazione solare giornaliera (W/m^2)
 IR = indice di rischio (%)
 n = eliofania (minuti)
 N = durata del dì (minuti)
 p = perimetro intercapedine (m)
 Q = potenza termica (W)
 r = coefficiente di riflessione (-)
 s = spessore intercapedine (m)
 S = area trasversale intercapedine (m^2)
 t = coefficiente di trasmissione (-)
 T = temperatura ($^{\circ}C$)
 v = velocità aria intercapedine (m/s)
 W = potenza solare (W/m^2)

Lettere greche

- Δ = escursione
 γ = calore specifico dell'aria ($J/kg^{\circ}C$)
 ρ = densità dell'aria (kg/m^3)

Pedici

b = base dell'intercapedine

c = cattedrale

d = diffuso

e = esterno

f = uscita dall'intercapedine

g = giornaliero

h = orario

i = intercapedine

O = al di fuori dell'atmosfera

r = resistenza elettrica

T = al suolo

va = vetrata artistica

vp = vetrata di protezione

φ = diretto

Bibliografia

- [1] **M. L.Cianini Pierotti:** *Una città e la sua Cattedrale. Il Duomo di Perugia*, Ed. Chiesa S. Severo, Perugia, 1992.
- [2] **C.Buratti, F.Cotana, M.Felli:** *Sulla ventilazione di una vetrata artistica del Duomo di Perugia*, Atti del 49° Congresso Nazionale ATI, Perugia 26-30 settembre 1994.
- [3] *UNI 10829, Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione, misurazione ed analisi*, luglio 1999.
- [4] **A. A. M.Sayigh:** *Solar Energy Engineering*, Academic Press, New York, 1977.
- [5] **L.Rocco, G.Cellai:** *Fondamenti degli impianti di climatizzazione*, PER, Milano, 1991.
- [6] *ASHRAE, Handbook of Fundamentals SI edition*, Atlanta, 1989
- [7] **W. M.Rohsenow, J. P.Hartnett, Y. I.Cho:** *Handbook of Heat Transfer*, Mc Graw Hill, Singapore, 1998.
- [8] ICCROM, *La conservazione nei musei. Il controllo del clima. Il controllo dell'illuminazione*, Roma 1982.
- [9] **M. Filippi:** *Gli impianti nei musei*, Condizionamento dell'aria, Riscaldamento e Refrigerazione, n. 8, 1988.
- [10] **J.P. Holman:** *Heat Transfer*, Mc Graw Hill, Singapore, 1989,
- [11] **M.Filippi, C.Lombardi, C.Silvi:** *Conservazione di beni di interesse storico ed artistico*, Condizionamento dell'aria, Riscaldamento e Refrigerazione, n. 4, 1994.

- [12] **G. Raffellini:** *La qualità ambientale nei musei*, Giornata Seminariale Microclima, qualità dell'aria e impianti negli ambienti museali, Firenze, 7 febbraio 1997.
- [13] **C., Aghemo, M. Filippi, E. Prato:** *Ricerca bibliografica comparata sulle condizioni termoigrometriche per la conservazione delle opere d'arte*, Atti 49° Congresso Nazionale ATI, Perugia, 26 – 30 settembre 1994.