

# IL SISTEMA DI VENTILAZIONE DELLA VETRATA DI ARRIGO FIAMMINGO NEL DUOMO DI PERUGIA: MONITORAGGIO DELLE CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE

*F. Asdrubali - C. Buratti - F. Cotana*

CIRIAE, Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento  
da Agenti Fisici, Perugia

## SOMMARIO

La Soprintendenza ai Beni Ambientali Architettonici Artistici e Storici dell'Umbria, in seguito al restauro del 1993 della vetrata di Arrigo Fiammingo (1565), situata nel Duomo di Perugia, ha proposto l'adozione di una vetrata esterna di protezione e l'installazione di un sistema di ventilazione forzata dell'intercapedine. Nel presente lavoro sono forniti i risultati di un monitoraggio delle condizioni termoisgrometriche in prossimità della vetrata, che ha avuto inizio il 15 marzo 1998 ed è ancora in corso: i dati sperimentali, relativi al periodo 15 marzo '98 ÷ 30 aprile '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 prima e dopo l'installazione della vetrata di protezione e del sistema di ventilazione dell'intercapedine. L'indice di rischio risulta piuttosto elevato nelle stagioni molto calde o molto fredde, mentre è accettabile in quelle intermedie; è tuttavia notevolmente inferiore rispetto alla situazione precedente al restauro.

## 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 storici - monumentali. Nel caso specifico delle chiese, le condizioni ambientali devono essere tali da preservare non solo l'edificio in sé, 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 valutare 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 (fig. 1), 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 Soprintenden-

za 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 termoisometriche, vibrazioni. I risultati di uno studio teorico, effettuato per valutare le condizioni termoisometriche nell'intercapedine tra le due vetrate [1], hanno condotto all'installazione di un sistema di ventilazione forzata nell'intercapedine stessa, al fine di mantenere le condizioni ambientali entro limiti accettabili per una corretta conservazione della vetrata artistica (1994). Il sistema di ventilazione è regolato da alcune sonde di temperatura e umidità relativa dell'aria, collocate in prossimità della vetrata.

Si è effettuato un monitoraggio delle condizioni termoisometriche 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 [2].

Sulla base dell'analisi dei dati, effettuata con opportune elaborazioni di tipo statistico, si sono quindi 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. Una stessa analisi è stata effettuata simulando le condizioni del microclima prima dell'installazione della vetrata esterna di protezione e del sistema di ventilazione; si è quindi effettuato un confronto tra gli indici di rischio nelle due situazioni.

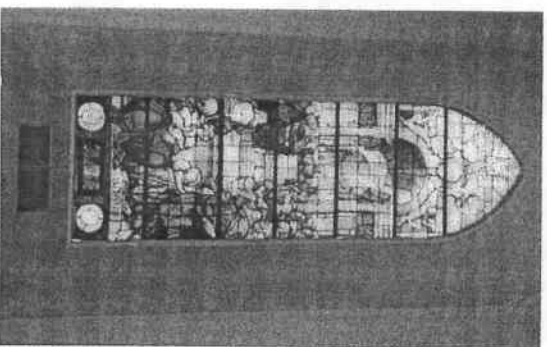


Figura 1. La vetrata di Arrigo Fiammingo nel Duomo di Perugia.

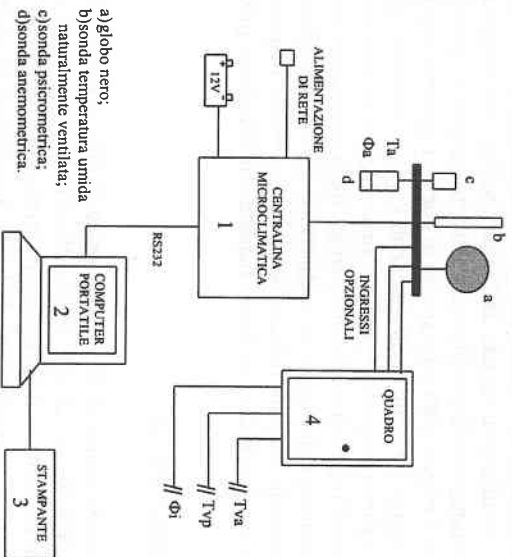


Figura 2. Schema semplificato del sistema di monitoraggio della vetrata di Arrigo Fiammingo.

## 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 e della vetrata di protezione (lato interno intercapedine); umidità relativa dell'aria nell'intercapedine

tra le due vetrate: 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. 2.

Il sistema di ventilazione della vetrata comprende tre sonde situate nell'intercapedine, connesse ad un quadro di comando che aziona il ventilatore e la resistenza scaldante del sistema di ventilazione: se le temperature dell'aria in prossimità della vetrata artistica e della vetrata di protezione assumono valori esterni all'intervallo impostato, entrano in azione il ventilatore e, nel caso di temperatura troppo basse, anche la resistenza scaldante, in modo da riportare i valori entro i limiti fissati; stessa cosa avviene per l'umidità relativa dell'aria nell'intercapedine. Le sonde sono state collegate, per mezzo di tre ingressi opzionali, anche 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 scaricati settimanalmente per mezzo di un PC, attraverso il quale sono analizzati ed elaborati.

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

## ELABORAZIONE ED ANALISI DEI DATI

Si sono rilevati i valori orari delle grandezze menzionate nel paragrafo precedente, 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, in fig. 3 è disegnato l'andamento orario medio mensile della temperatura dell'aria in prossimità della vetrata di Arrigo Fiammingo  $T_{va}$  (linee continue), relativamente ai mesi di luglio (fig. 3a) e dicembre '98 (fig. 3b), che costituiscono le condizioni estreme. Il valore di temperatura rilevato dalla sonda in prossimità della vetrata artistica è stato considerato rappresentativo di tutta la vetrata, sulla cui superficie la temperatura è stata assunta costante; tale ipotesi è stata verificata attraverso alcune misure di temperatura superficiale, effettuate in diversi punti, in corrispondenza degli incroci di una griglia a maglia quadrata di lato 25 cm. Nei diversi punti della griglia si è riscontrato un valore di temperatura variabile entro un intervallo di ampiezza pari a 1°C. Tutte le considerazioni relative all'indice di rischio per la vetrata artistica sono state pertanto 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. 3 (linee tratteggiate). 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. 3 (linee tratte - punto).

La temperatura della vetrata artistica si mantiene sempre superiore a 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 '98, 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 '98 essa si è mantenuta pressoché costante nell'arco delle 24 ore e pari a circa 15°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 investita solo dalla radiazione diffusa in tutto l'arco della giornata. L'umidità relativa dell'aria nell'intercapedine si mantiene pressoché costante nelle 24 ore e dell'ordine del 45%, 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 in fig. 4 gli andamenti orari medi mensili della temperatura, relativamente ai mesi di luglio e dicembre '98. Dal confronto tra le due temperature si evince che quella interna non risente delle variazioni marcate di quella esterna 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.

## 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. Poiché l'analisi della vetrata di Arrigo Fiammingo prima del restauro ha messo in evidenza una degrado legato soprattutto all'azione degli agenti atmosferici, si è convenuto di adottare una vetrata esterna di protezione e un sistema di ventilazione che mitigasse gli effetti di tale provvedimento sul microclima nell'intorno della vetrata artistica.

Per le condizioni ottimali di conservazione, inoltre, si è fatto riferimento al Progetto di Norma CTI E02.01.304.0 [2]; 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.

Tabella 1. Condizioni ottimali di conservazione assunte per la vetrata di Arrigo Fiammingo [2].

Materiale	T (°C)	$\Delta T$ (°C)	$\Phi$ (%)	$\Delta\Phi$ (%)
Vetri instabili, iridescenti, sensibili, mosaici di vetri sensibili	20 ÷ 24	± 1.5	40 ÷ 45	± 6

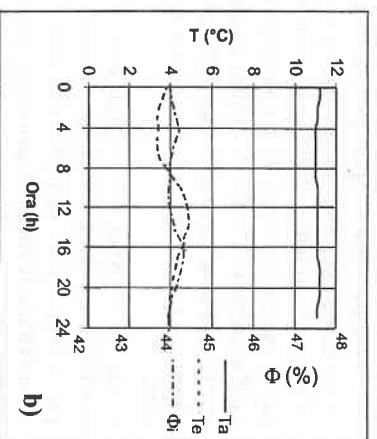
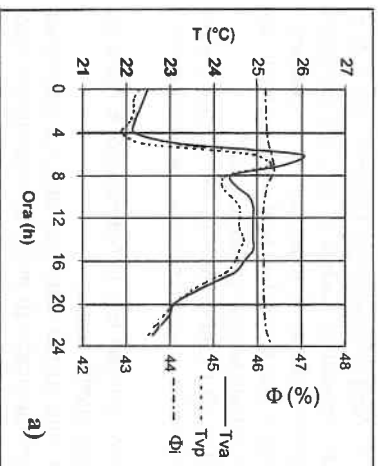


Figura 3. Andamento orario medio mensile di: temperatura dell'aria in prossimità della vetrata di Arriigo Fiammingo (linee continue), temperatura dell'aria in prossimità della vetrata di protezione (linee tratteggiate), umidità relativa aria intercapedine (linee tratto-punto), nelle seguenti condizioni: a) mese di luglio '98; b) mese di dicembre '98.

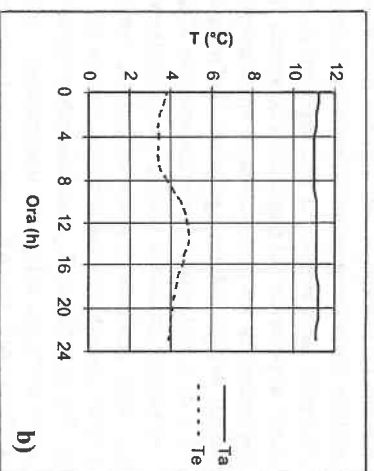
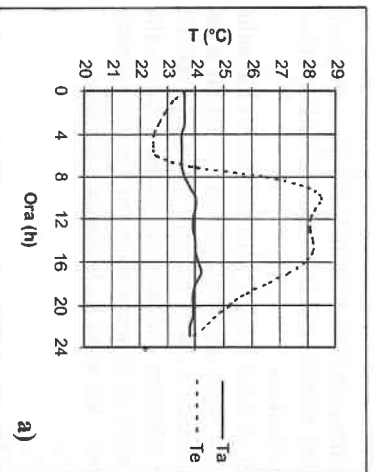


Figura 4. Andamento orario medio mensile di: temperatura dell'aria interna (linee continue), temperatura dell'aria esterna (linee tratteggiate), nelle seguenti condizioni: a) mese di luglio '98; b) mese di dicembre '98.

## VALUTAZIONE DELL'INDICE DI RISCHIO

L'indice di rischio è stato calcolato su base mensile, come suggerito dalla Norma CTI. 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 '98 ÷ aprile '99) è disegnato in Fig. 5. In particolare, dalla Fig. 5a), relativa a temperatura e umidità relativa dell'aria misurate nell'intercapedine tra la vetrata di Arriigo Fiammingo e la vetrata di protezione, si evince quanto segue:

- a) per la temperatura in prossimità della vetrata di Arrigo Fiammingo 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 praticamente nulli, per quelle giornaliere indici di rischio accettabili in quanto sempre inferiori al 20%;
- b) per l'umidità relativa dell'aria dell'intercapedine gli indici di rischio sono quasi sempre elevati; per le escursioni orarie sono nulli, per quelle giornaliere sono contenuti entro il 60%.

La Fig. 5b) è invece relativa agli indici di rischio connessi con la temperatura e l'umidità relativa dell'aria interna al Duomo. Da essa si deduce quanto segue:

- a) per la temperatura dell'aria interna al Duomo vale quanto detto per quella in prossimità della vetrata di Arrigo Fiammingo; per le escursioni orarie gli indici sono contenuti entro il 10%, per quelle giornaliere, invece, sono sempre molto elevati, tranne nei mesi di marzo '98, dicembre '98, marzo '99;
- b) per l'umidità relativa dell'aria interna al Duomo l'indice di rischio è molto modesto, sia per i valori assoluti, sia per le escursioni orarie e giornaliere.

Si è infine valutato, sempre per le grandezze menzionate, l'indice di rischio relativo all'intero periodo di monitoraggio, che assume i valori indicati in 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.

Per mezzo di un programma di simulazione [3], si sono valutati gli indici di rischio sulla vetrata di Arrigo Fiammingo prima dell'installazione della vetrata esterna di protezione e del sistema di ventilazione dell'intercapedine. Confrontando i valori ottenuti con quelli relativi alla situazione attuale si ottiene una considerevole riduzione dell'indice di rischio relativo alla temperatura dell'aria in prossimità della vetrata artistica; in particolare per l'indice valutato nell'intero periodo di monitoraggio (marzo '98 - aprile '99) si hanno le seguenti riduzioni:

- dal 87% al 51% per  $T_{va}$ , con una riduzione del 41%;
- dal 67% al 3% per  $\Delta T_{va}$ , con una riduzione del 50%;
- dal 95% al 84% per  $\Delta T_{va}$ , con una riduzione del 12%.

Tabella 2. Indici di rischio della vetrata di Arrigo Fiammingo per l'intero periodo di monitoraggio (marzo '98 ÷ aprile '99).

IR (%)	$T_{va}$	$\Delta T_{va}$	$\Delta T_{va}$	$\Phi_1$	$\Delta\Phi_{10}$	$\Delta\Phi_{98}$	$T_a$	$\Delta T_{a0}$	$\Delta T_{98}$	$\Phi_a$	$\Delta\Phi_{a0}$	$\Delta\Phi_{98}$
	51	3	84	0	0	1	62	0	7	77	0	9

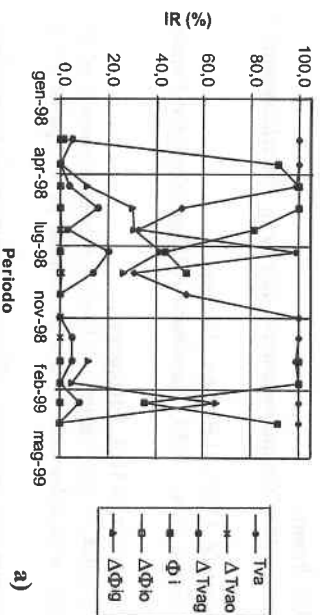
## CONCLUSIONI

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.

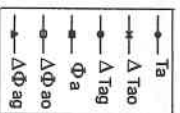
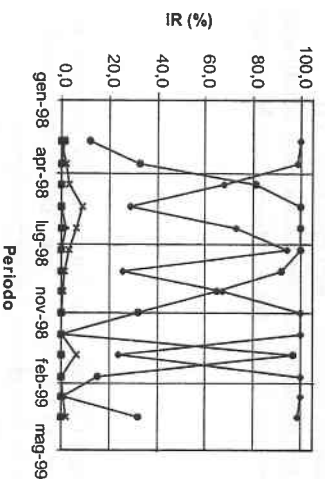
Nel presente lavoro sono presentati i risultati del monitoraggio delle condizioni del microclima in corrispondenza della vetrata artistica, relativamente al periodo 15 marzo '98 ÷ 30

aprile '99. 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 in materia. 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.

I risultati mostrano che le condizioni microclimatiche nell'immediato intorno della vetrata presentano indici di rischio elevati nei mesi estremi, troppo caldi o troppo freddi; nelle stagioni intermedie si riscontrano invece indici molto bassi o comunque accettabili. Dal confronto tra le condizioni del microclima prima e dopo l'installazione della vetrata esterna di protezione e del sistema di ventilazione forzata dell'intercapedine si ha una sensibile riduzione degli indici di rischio relativi alla temperatura dell'aria in prossimità della vetrata artistica.



a)



b)

Figura 5. Andamento dell'indice di rischio nel periodo di riferimento (marzo '98 ÷ aprile '99) per le seguenti grandezze: a) temperatura e umidità relativa dell'aria che lambisce la vetrata di Arrigo Fiammingo dal lato dell'intercapedine e relative variazioni orarie e giornaliere; b) temperatura e umidità relativa dell'aria interna al Duomo e relative variazioni orarie e giornaliere.

## ELENCO DEI SIMBOLI

### Perfici

- IR = indice di rischio %  
 T = temperatura °C  
 Φ = umidità relativa %  
 ΔT = escursione di temperatura °C  
 ΔΦ = escursione di umidità relativa %
- a = aria interna al Duomo  
 e = aria esterna  
 g = giornaliero  
 i = intercapedine  
 o = orario  
 va = vetrata di Arrigo Fiammingo  
 vp = vetrata di protezione

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Felli M., Buratti C., Cotana F., 1994, Sulla ventilazione di una vetrata artistica nel Duomo di Perugia, *Atti 49° Congresso Nazionale ATI, Perugia, 26 - 30 settembre 1994*, 387.
- [2] Progetto di Norma CTI E02.01.304.0, 1994, Analisi e valutazione delle condizioni ambientali, termiche, igrometriche e luminose per la conservazione di beni di interesse storico - artistico, *Condizionamento dell'aria, Riscaldamento e Refrigerazione, n. 4, aprile 1994*, 475.
- [3] Rossi F., Baruffa R., 1999, Simulazione delle condizioni ambientali di una vetrata della Cattedrale di Perugia, *54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 14-17 settembre 1999*.
- [4] Cianini Pierotti M. L., 1992, *Una città e la sua Cattedrale. Il Duomo di Perugia*, Ed. Chiesa S. Severo, Perugia.
- [5] ICCROM, 1982, La conservazione nei musei. Il controllo del clima. Il controllo dell'illuminazione, 1982 *ICCROM, Roma*.
- [6] Filippi M., Gli impianti nei musei, 1988, *Condizionamento dell'aria, Riscaldamento e Refrigerazione, n. 8, 1988*.
- [7] ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*, 1997, SI Edition, Atlanta.
- [8] Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Ganic E.N., 1985, *Handbook of Heat Transfer Fundamentals*, Mc Graw Hill, New York.
- [9] Holman J.P., *Heat Transfer*, 1989, Mc Graw Hill, Singapore.
- [10] Filippi M., Lombardi C., Silvi C., 1994, Conservazione di beni di interesse storico ed artistico, *Condizionamento dell'aria, Riscaldamento e Refrigerazione, n. 4, aprile 1994*, 487.
- [11] Raffellini G., 1997, La qualità ambientale nei musei, *Giornata Seminarsiale Microclima, qualità dell'aria e impianti negli ambienti museali, Firenze, 7 febbraio 1997*, VII.
- [12] Aghemo C., Filippi M., Prato E., 1994, Ricerca bibliografica comparata sulle condizioni termoiigrometriche per la conservazione delle opere d'arte, *Atti 49° Congresso Nazionale ATI, Perugia, 26 - 30 settembre 1994*, 341.

## SUMMARY

Arrigo Fiammingo's large window (1565) in Perugia Cathedral has been recently restored; an external glass shield has been put into place to protect the window from deterioration and a forced ventilation system of the air space between the two glasses has been realized.

A monitoring of the environmental conditions of the air space has been carried out in the period march 15, 1998 ÷ april 30, 1999; a comparison between experimental data and ideal preservation conditions is made and *risk index* is evaluated. The index is high in the extremal seasons (december, july), but it's acceptable in the intermediate seasons. The risk index before the installation of the glass shield and of the ventilation system is also evaluated through a simulating programme: it is considerably higher than the same index after the restore.