

AIDI – Associazione Italiana di Illuminazione
Convegno “La civiltà della luce”

Perugia – Assisi, 5 novembre 1999

Il contributo delle vetrate artistiche all'illuminazione naturale

Franco Cotana, Cinzia Buratti, Roberto Baruffa

Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via G.
Duranti 1-A/4, 06125 Perugia



Alcune vetrate del Duomo di Perugia

Il contributo delle vetrate artistiche all'illuminazione naturale

Franco Cotana, Cinzia Buratti, Roberto Baruffa

Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via G. Duranti 1-A/4, 06125 Perugia

Riassunto

Nell'imminenza dell'Evento Giubilare del 2000 sempre più spesso vengono realizzati nuovi impianti di illuminazione all'interno di Chiese e Cattedrali o vengono potenziati gli impianti già esistenti. Ciò risponde da un lato a maggiori esigenze funzionali, legate allo svolgimento delle funzioni religiose spesso oggetto anche di riprese televisive, dall'altro ad una accresciuta domanda di fruibilità delle opere d'arte contenute all'interno dei luoghi sacri. Il funzionamento dei nuovi impianti comporta una sempre maggiore esposizione delle opere d'arte alla radiazione luminosa, in termini sia di intensità che di durata. D'altro canto la luce rappresenta uno dei fattori di accelerazione delle reazioni chimiche responsabili del degrado di molti materiali. Affreschi, quadri, sculture, cori lignei, paramenti sacri sono stati conservati per centinaia di anni all'interno delle chiese, nelle quali l'illuminamento era dovuto al contributo delle candele e della luce naturale che penetra le vetrate artistiche di cui sono adorni questi sacri contenitori; solo negli ultimi decenni l'illuminazione artificiale ha prodotto un rilevante incremento del flusso luminoso. Quanto questo abbia modificato l'equilibrio che le opere d'arte avevano raggiunto con l'ambiente non è dato saperlo; è certo, tuttavia, che la progettazione di qualunque impianto di illuminazione artificiale dovrebbe avere come base di partenza la conoscenza della "storia luminosa" dell'ambiente. Da questo punto di vista risulta particolarmente utile la messa a punto di una metodologia di calcolo che consenta di valutare l'andamento orario, giornaliero e stagionale della radiazione luminosa naturale all'interno di una chiesa per tutto l'arco dell'anno. Tale informazione è utile per valutare in ogni punto il valore massimo, medio e la durata dell'intensità della radiazione lumi-

nosa che ha caratterizzato nei secoli passati il "clima luminoso" dell'ambiente oggetto di studio. Pertanto l'impianto di illuminazione artificiale non deve incrementare la dose annuale di luce sopra i valori massimi consentiti per la conservazione dei materiali di interesse storico-artistico.

1. Introduzione

Le vetrate artistiche che decorano le chiese e le cattedrali svolgono la duplice funzione iconografica nella rappresentazione del sacro e di contributo all'illuminazione naturale. Sicuramente il primo aspetto è preponderante rispetto al secondo, anche se quest'ultimo non è da sottovalutare; infatti, pur essendo la radiazione solare trasmessa da tali vetrate di modesta entità, rappresenta spesso l'unica o la principale fonte di illuminazione. Non va inoltre dimenticato che tale tipo di illuminazione contribuisce a creare un'atmosfera calda, soffusa e di grande raccoglimento, che ben si addice alla destinazione d'uso delle chiese. Lo svolgimento delle funzioni religiose, soprattutto di quelle più solenni, richiede comunque il ricorso all'illuminazione artificiale, come anche la visione di particolari opere di interesse storico-artistico conservate all'interno. Queste ultime, tuttavia, devono essere sottoposte a valori di illuminamento piuttosto modesti e per periodi limitati in quanto la luce contribuisce ad accelerarne i processi di degrado.

L'Umbria possiede un ricco patrimonio di vetrate artistiche nelle sue chiese e cattedrali; basti pensare alla grande vetrata nella Chiesa di San Domenico e alle pregevoli vetrate del Duomo di San Lorenzo a Perugia (fig. 1), oppure alle splendide vetrate nella Basilica Superiore di San Francesco ad Assisi. Da esse si è tratto spunto per il presente lavoro, nel quale è valutato il contributo all'illuminazione naturale nel caso emblematico e significativo delle vetrate artistiche del Duomo di Perugia. Lo studio è stato condotto in quattro fasi:

- a) valutazione della radiazione diretta e diffusa a Perugia, su superfici verticali comunque orientate, per mezzo di un programma di calcolo originale appositamente elaborato;
- b) misure spettrofotometriche volte alla determinazione delle caratteristiche spettrali delle vetrate del Duomo, in particolare del coefficiente di trasparenza;

- c) calcolo della potenza raggianti trasmessa attraverso tutte le vetrate e dell'andamento dell'illuminamento medio sul piano verticale all'interno del Duomo nel giorno tipo dei diversi mesi dell'anno, con validazione di alcuni risultati mediante misure di illuminamento;
- d) calcolo della dose annuale di luce, definita come il prodotto dell'illuminamento per il numero di ore di esposizione in un anno; essa è stata confrontata con i valori massimi consentiti per la corretta conservazione dei materiali di interesse storico-artistico contenuti nel Duomo, che risultano moderatamente sensibili alla luce [1, 2].

2. Determinazione dei coefficienti di trasparenza delle vetrate

Si sono effettuate misure spettrofotometriche su campioni di vetro di diverso colore, aventi caratteristiche simili a quelle dei vetri che costituiscono le vetrate artistiche del Duomo di Perugia. Si sono così ottenuti i valori del coefficiente di trasparenza spettrale per i diversi colori.

Si sono quindi valutati i coefficienti di trasparenza spettrali medi ponderati delle singole vetrate, facendo una media dei valori misurati per i diversi colori e usando come pesi le superfici di ciascun colore. Quindi, per ogni esposizione (Nord, Est, Sud, Ovest) si è valutato l'andamento medio del coefficiente di trasparenza, prendendo in considerazione le vetrate che affacciano su ciascun lato del Duomo. In fig. 2 è riportato l'andamento del coefficiente di trasparenza medio per le diverse esposizioni; esso è simile per le vetrate esposte a Nord, Est e Sud; è invece diverso per quelle esposte a Ovest, vale a dire per le vetrate dell'abside, che sono essenzialmente di colore verde e blu.

3. Calcolo della radiazione diretta e diffusa

Si è elaborato un programma di calcolo originale che permette di determinare la radiazione diretta e diffusa a Perugia, su superfici verticali diversamente orientate. Si sono considerati gli orientamenti principali: Nord, Est, Sud e Ovest, in quanto rispecchiano le esposizioni delle vetrate del Duomo di Perugia; in particolare le vetrate della facciata e

quelle dell'abside sono rispettivamente esposte ad Est ed Ovest, quelle delle navate laterali a Nord e Sud.

Per ciascun mese dell'anno si è considerato un giorno-tipo, il 16°, e sulla base delle coordinate geografiche ed astronomiche del sito si sono inizialmente calcolati, in un sistema di coordinate orizzontali, il



Fig. 1: alcune delle vetrate del Duomo di Perugia.

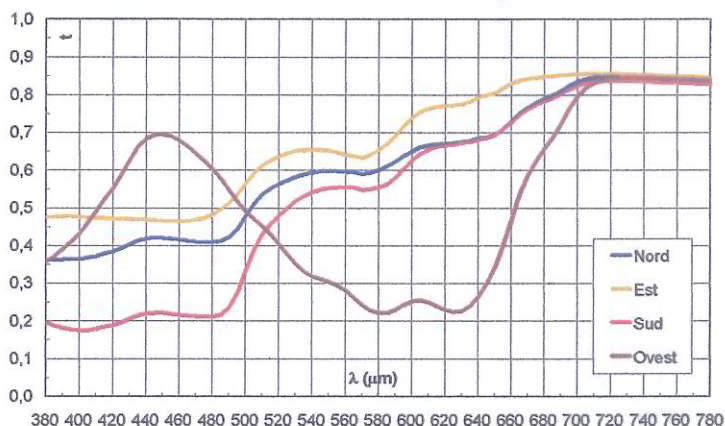


Fig. 2: andamento del coefficiente di trasparenza medio delle vetrate del Duomo di Perugia per le diverse esposizioni.

periodo di irraggiamento per le diverse esposizioni, la durata della radiazione diretta, anch'essa per le diverse esposizioni, e la durata della radiazione diffusa.

Successivamente, interpolando i dati di radiazione giornaliera incidente su superficie orizzontale al suolo e di eliofania rilevati negli ultimi 25 anni dall'Osservatorio Meteorologico della Facoltà di Agraria di Perugia, si è pervenuti all'individuazione dei coefficienti della relazione di Sabbagh [3] e quindi, per mezzo delle procedure di Liu e Jordan [4], all'andamento orario della radiazione diretta e diffusa su superficie verticale comunque orientata. Per quanto qui non espressamente riportato, si rimanda a quanto descritto in [5].

I risultati forniti dal programma di calcolo sono mostrati, per le diverse esposizioni delle superfici verticali, in fig. 3, nella quale è riportato l'andamento orario giornaliero della radiazione diffusa dall'atmosfera e riflessa dalla pavimentazione che circonda il Duomo; in fig. 4 è indicato l'andamento della radiazione diretta.

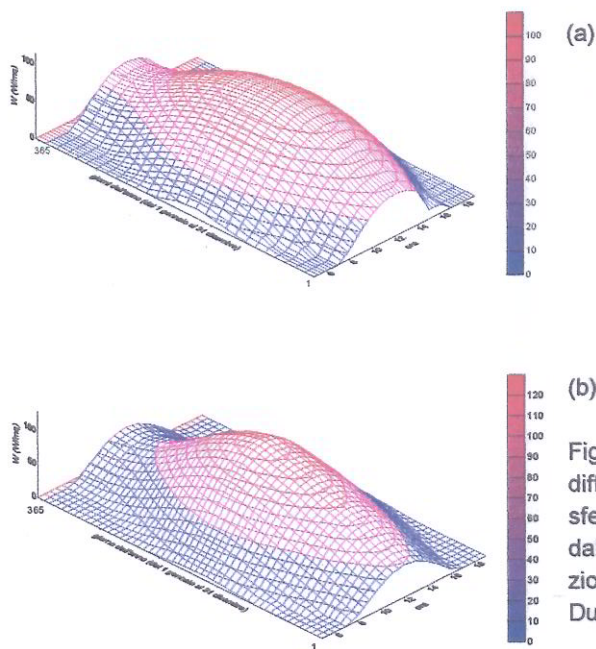


Fig. 3: radiazione diffusa dall'atmosfera (a) e riflessa dalla pavimentazione attorno al Duomo (b).

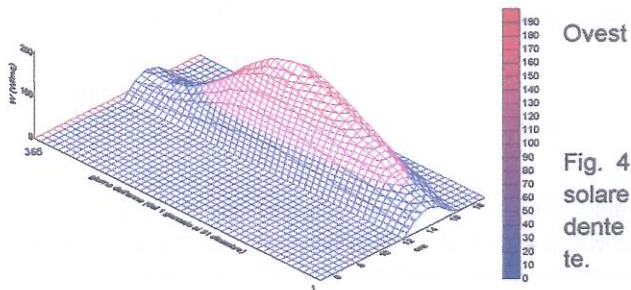
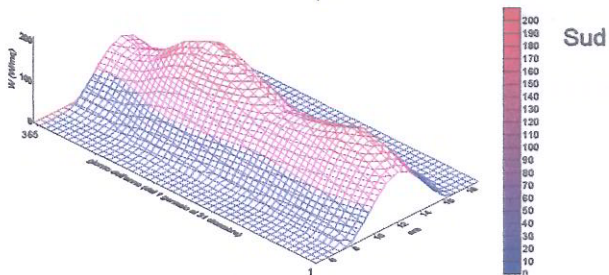
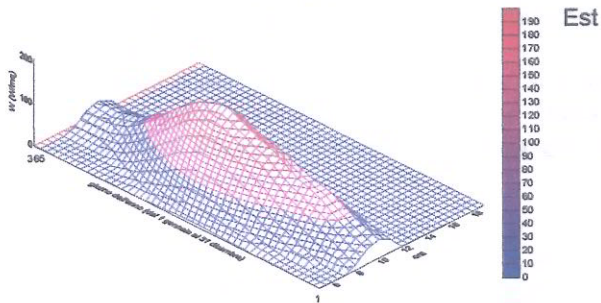
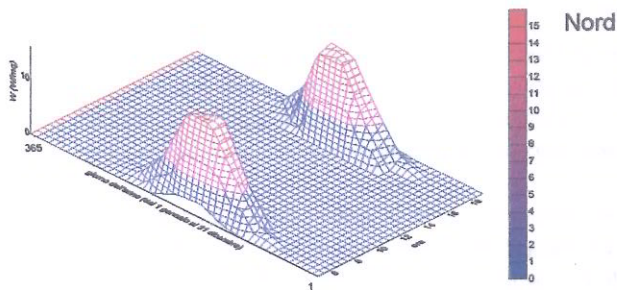


Fig. 4: radiazione solare diretta incidente sulle vetrate.

4. Calcolo dell'illuminamento

Noti i valori orari della radiazione solare incidente su superficie orizzontale e verticale per i vari giorni tipo mensili [5] si passa al calcolo della frazione di energia solare che ricade all'interno del visibile, al fine di determinare l'illuminamento associato ad un dato valore di potenza incidente.

L'energia solare che incide al suolo, e quindi la frazione della stessa che ricade nel visibile, dipende dalla massa d'aria m attraversata dalla radiazione. Si è pertanto proceduto al calcolo dell'attenuazione della radiazione solare da parte dell'atmosfera, utilizzando la legge di Beer [3].

A questo punto, per varie masse d'aria, si è valutato l'irradiazione integrale J e l'irradiazione che ricade nel visibile J_{vis} ; la frazione di energia solare che ricade nel visibile è definita, per un'altezza solare assegnata β_1 , dalla relazione:

$$FS(\beta_1) = \frac{J_{vis}(\beta_1)}{J(\beta_1)} = \frac{\int_{0,38}^{0,78} \varepsilon(\lambda, \beta_1) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, \beta_1) d\lambda} \quad (1)$$

L'illuminamento E associato all'irradiazione solare ricadente nel visibile J_{vis} è fornito dalla relazione:

$$E(\beta_1) = \int_{0,38}^{0,78} v(\lambda) \varepsilon(\lambda, \beta_1) d\lambda \quad (2)$$

in cui $v(\lambda)$ è la curva di visibilità.

Introducendo la distribuzione spettrale della potenza incidente $w(\lambda, \beta)$, la (2) diventa:

$$E(\beta_1) = FS(\beta_1) \int_{0,38}^{0,78} v(\lambda) w(\lambda, \beta_1) d\lambda \quad (3)$$

La relazione (3) consente di determinare l'illuminamento associato ad un qualunque valore di radiazione solare conoscendo l'altezza solare. Nel caso in esame, le vetrare sono colpite esternamente da:

- radiazione solare diretta (di cui si conoscono i valori orari nei giorni tipo mensili sul piano verticale);
- radiazione solare diffusa dall'atmosfera (calcolata a partire dai valori orari di radiazione diffusa su superficie orizzontale nei giorni tipo mensili);
- radiazione solare diffusa dalla pavimentazione (calcolata a partire dai valori orari di radiazione diretta e diffusa su superficie orizzontale nei giorni tipo mensili).

Alla radiazione solare diretta incidente sul piano verticale $W_{\gamma,v}$, a quella diffusa $W_{d,v}$ e a quella riflessa dalla pavimentazione esterna che circonda il Duomo $W_{p,v}$ sono associati rispettivamente gli illuminamenti:

$$E_{\gamma,v}(\beta_1) = FS(\beta_1)v_m W_{\gamma,v}(\beta_1) \quad (4)$$

$$E_{d,v}(\beta_1) = FS(\beta_1)v_m W_{d,v}(\beta_1) \quad (5)$$

$$E_{p,v}(\beta_1) = FS(\beta_1)v_m W_{p,v}(\beta_1) \quad (6)$$

Esternamente alle vetrate, l'illuminamento sul piano verticale $E_{ev}(\beta_1)$ è fornito pertanto dalla somma dei tre contributi:

$$E_{ev}(\beta_1) = E_{\gamma,v}(\beta_1) + E_{d,v}(\beta_1) + E_{p,v}(\beta_1) \quad (7)$$

Per determinare dell'illuminamento sul piano verticale all'interno si deve tener conto della trasparenza dei vetri sui quali incide la radiazione solare e, per la radiazione solare diretta, dell'angolo d'incidenza della radiazione solare stessa. L'illuminamento sul piano verticale all'interno del Duomo è fornito dalla relazione:

$$E_{iv}(\beta_1) = t(\gamma_1)E_{\gamma,v}(\beta_1) + t_{d,p}[E_{d,v}(\beta_1) + E_{p,v}(\beta_1)] \quad (8)$$

dove $t(\gamma_1)$ è il valore medio del coefficiente di trasparenza delle vetrate di un lato del Duomo alla radiazione solare visibile diretta, per un angolo d'incidenza γ_1 , mentre $t_{d,p}$ è il coefficiente di trasparenza medio per la radiazione solare visibile diffusa dall'atmosfera e riflessa dalla pavimentazione.

In fig. 5 è riportato l'andamento dell'illuminamento sul piano verticale per le diverse esposizioni; i risultati mostrano che esso è più elevato in corrispondenza dell'esposizione Est, dove nel periodo estivo raggiunge il valore di circa 32 lux.

I risultati delle simulazioni sono stati raffrontati con alcuni dati sperimentali relativi al periodo autunnale; il confronto mostra che esiste un buon accordo tra i dati calcolati e quelli misurati.

Si è quindi calcolata la dose annuale di luce all'interno del Duomo e si è ottenuto un valore di circa 163.000 lux ora/anno. Considerando che, secondo diversi autori [1, 2], la dose annuale di luce deve essere inferiore a 500.000 lux ora/anno per materiali definiti delicati, ossia moderatamente sensibili alla luce, quali quelli conservati nel Duomo di Perugia, si può dire che nel corso dei secoli essi si sono trovati in condizioni ottimali di illuminazione. Si deve pertanto evitare che si abbiano incrementi troppo significativi della dose annuale di luce dovuti all'impianto di illuminazione artificiale.

5. Conclusioni

Si è valutato il contributo all'illuminazione naturale delle vetrate artistiche del Duomo di Perugia. In particolare, dopo aver elaborato un programma di calcolo originale per la valutazione della radiazione solare incidente su superficie verticale comunque orientata, si sono calcolati, sulla base di alcune misure spettrofotometriche di Laboratorio, i valori dei coefficienti di trasparenza medi spettrali delle vetrate del Duomo con diversa esposizione. A questo punto si sono valutati i valori di illuminamento sul piano verticale per le diverse esposizioni. I risultati mostrano che i valori massimi, relativi alle ore centrali della giornata nel periodo estivo, variano tra un minimo di 16 e un massimo di 32 lux rispettivamente per le esposizioni Nord ed Est.

I risultati della simulazione sono stati confrontati con alcuni dati sperimentali misurati presso il Duomo nel periodo ottobre–novembre 1999; il confronto mostra che esiste un buon accordo tra dati misurati e dati calcolati, per tutte le diverse esposizioni. Il calcolo della dose annuale di luce ha inoltre dimostrato che essa è sensibilmente inferiore ai valori suggeriti in Letteratura per la corretta conservazione di materiali

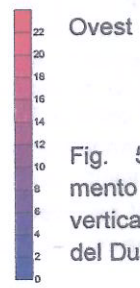
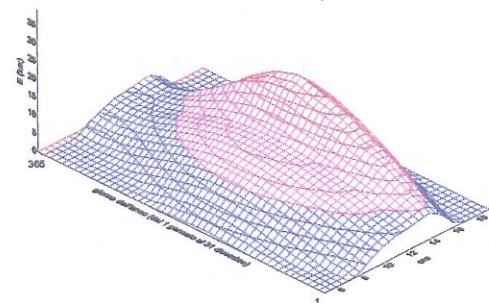
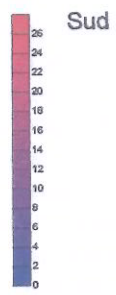
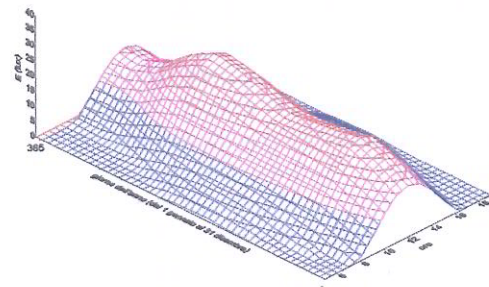
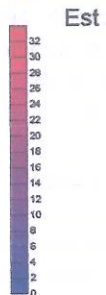
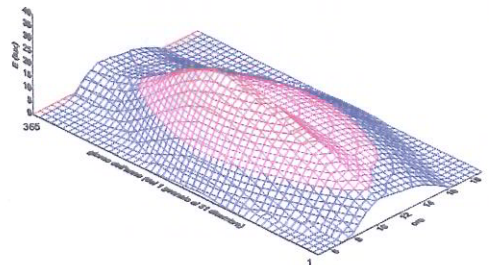
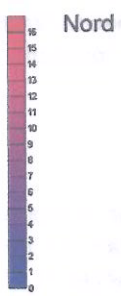
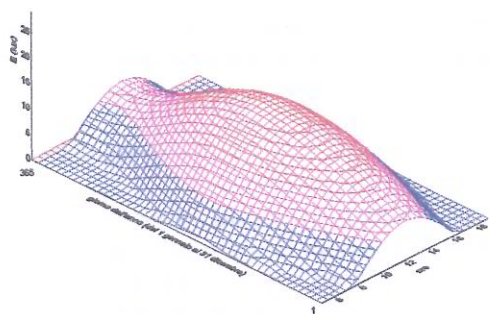


Fig. 5: illuminazione sul piano verticale all'interno del Duomo.

delicati [1, 2], infatti un eventuale impianto di illuminazione artificiale ha un margine di dose di luce di circa 300.000 lux ora/anno.

6. Bibliografia

- [1] Asdrubali F., Buratti C., 1999, Condizioni ottimali di conservazione delle opere d'arte: rassegna bibliografica ed analisi critica, *Atti 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 14-17 settembre 1999*.
- [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, p. 475.
- [3] Sayigh A. A. M., 1977, *Solar Energy Engineering*, Academic Press.
- [4] Liu B.Y.H., Jordan R.C., 1960, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy*, n. 3.
- [5] 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.
- [6] Rossi F., Baruffa R., 1999, Simulazione delle condizioni termoi-grometriche di una vetrata della Cattedrale di Perugia, *Atti 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 14-17 settembre 1999*.
- [7] Asdrubali F., Buratti C., Cotana F., 1999, Il sistema di ventilazione della vetrata di Arrigo Fiammingo nel Duomo di Perugia: monitoraggio delle condizioni termoigrometriche, *Atti 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 14-17 settembre 1999*.
- [8] Buratti C., Cotana F., Sciarpi F., 1997, Rilievo della qualità dell'aria in alcuni spazi espositivi della Galleria Nazionale dell'Umbria, *Atti Giornata Seminariale Microclima, Qualità dell'Aria e Impianti negli Ambienti Museali, Firenze, 7 febbraio 1997*, 119.
- [9] Bonomo M., 1997, Una guida per l'illuminazione delle opere d'arte, *Atti Giornata Seminariale Microclima, Qualità dell'Aria e Impianti negli Ambienti Museali, Firenze, 7 febbraio 1997*, 67.
- [10] Bassi P., 1996, Illuminazione e clima negli spazi museali, *Luce*, n. 4, aprile 1996, p. 70.

- [11] Bonomo M., 1993, Protezione delle opere d'arte dai danneggiamenti causati da radiazioni, *Atti Giornata di Studio AIDI-AICARR. La protezione delle opere d'arte: condizionamento e illuminazione*, Assisi, 12 novembre 1993.
- [12] Bellomo G., 1993, Illuminazione delle opere d'arte: cause di danneggiamento e misure di salvaguardia, *Atti Giornata di Studio AIDI-AICARR. La protezione delle opere d'arte: condizionamento e illuminazione*, Assisi, 12 novembre 1993.

7. Elenco dei simboli

E	=	illuminamento (lux)
FS	=	frazione di irradiazione integrale visibile (-)
J	=	irradiazione integrale (W/m^2)
t	=	coefficiente di trasparenza (-)
T	=	fattore di trasmittanza (-)
v	=	coefficiente di visibilità (-)
W	=	potenza solare (W/m^2)
β	=	altezza solare (rad)
γ	=	angolo d'incidenza (rad)
λ	=	lunghezza d'onda (μm)

Pedici

d	=	diffuso dall'atmosfera
e	=	esterno
i	=	interno
m	=	medio
p	=	riflesso dalla pavimentazione
v	=	verticale
vis	=	visibile
γ	=	diretto
1	=	posizione del sole nelle coordinate orizzontali