

VALIDAZIONE SPERIMENTALE DI UN CODICE DI CALCOLO PER LA VERIFICA DELLE PRESTAZIONI ILLUMINOTECNICHE DI COPERTURE A SHED

Andrea de Lieto Vollaro^(*), Francesco Asdrubali^(**), Andrea Nicolini^(**)

1. Introduzione

L'illuminazione naturale di edifici industriali viene spesso realizzata ricorrendo all'illuminazione zenitale, mediante lucernari o coperture a shed; numerosi sono infatti i vantaggi di questa soluzione, quali l'esposizione della copertura alla luminanza di tutta la volta celeste, i significativi livelli di illuminamento e la buona uniformità ottenibile; il minore ricorso all'illuminazione artificiale, con significativi risultati in termini di risparmio energetico.

E' pertanto di fondamentale importanza poter valutare in sede di progetto le prestazioni illuminotecniche di una copertura a shed e poter costruire la relativa curva luminometrica sul piano di lavoro; la Letteratura specializzata [1], tuttavia, presenta metodi che forniscono in genere solo l'illuminamento medio sul piano di lavoro, applicabili solo per certe geometrie della copertura. Anche i metodi di tipo puntuale – sebbene più accurati – introducono alcune semplificazioni, quali ad esempio quella di considerare solo la radiazione che traspare direttamente attraverso la vetrata e non quella di albedo riflessa dalla copertura.

In un precedente lavoro [2], si è elaborato un modello di calcolo per la valutazione delle prestazioni di coperture a shed; i risultati incoraggianti hanno suggerito di effettuare una campagna di misure in alcuni edifici-campione, allo scopo di validare sperimentalmente il modello. A tal fine, si sono individuati due edifici industriali significativi, con diverse coperture; si è messa a punto una procedura per l'esecuzione delle misure illuminotecniche; si sono infine confrontati i risultati sperimentali con quelli forniti dal modello proposto e da altri modelli reperiti in Letteratura.

2. L'illuminazione naturale degli edifici industriali

L'esigenza di una buona illuminazione naturale in uno stabilimento industriale è di tale importanza da condizionare in alcuni casi la scelta progettuale tra edifici multipiano e monopiano.

L'illuminazione è di fondamentale importanza infatti ai fini della produttività del lavoro, specialmente in ambienti come quelli industriali in cui si assiste ad una notevole varietà e complessità di compiti visivi.

E' essenziale che il progetto di illuminazione assicuri [3], [4]:

- la massima sicurezza, al fine di prevenire gli infortuni;
- una buona visibilità, per garantire un agevole svolgimento del lavoro;
- un adeguato grado di comfort ambientale.

L'illuminazione naturale comprende le due categorie dell'illuminazione zenitale e laterale.

L'illuminazione zenitale è quella che ha consentito la diffusione di coperture a lucernario e a shed ed è caratteristica di alcune tipologie di industrie quali quelle tessili. Tali coperture presentano il vantaggio di essere esposte alla luminanza di tutta la volta celeste, ma non mancano gli inconvenienti quali la

^(*) A. de Lieto Vollaro, Dipartimento di Fisica Tecnica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

^(**) F. Asdrubali, A. Nicolini, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia

necessità di dotare le vetrate di una certa resistenza meccanica, la tenuta nei confronti dell'acqua piovana, la manutenzione e la pulizia dei materiali trasparenti. Nelle coperture a shed, la parte trasparente è in genere orientata a nord (più raramente a nord-est o a nord-ovest), in modo da impedire che i raggi solari entrino all'interno, ottenendo così una luce naturale diffusa e uniforme. Uno schema tipo di una copertura a shed è riportato in fig. 1; l'angolo superiore presenta in genere un'ampiezza compresa tra 70° e 90°, mentre l'inclinazione della parte trasparente varia tra 50° (limite inferiore) e 90° (parete verticale). Numerosi studi hanno evidenziato che, per massimizzare la componente di luce sul piano orizzontale, è opportuno che l'inclinazione delle superfici trasparenti sia compresa tra 50 e 66° [5]. Ovviamente si possono avere configurazioni diverse rispetto a quella di fig. 1, con superfici curve, presenza di cupolini, vetrate orizzontali, ecc.

L'illuminazione laterale è invece adottata in genere negli edifici con più piani fuori terra. In questo caso la zona del cielo che irradia luce è pari alla metà rispetto all'illuminazione zenitale, con possibilità di ulteriore riduzione per effetto di ostacoli o di edifici vicini. Questo svantaggio è tuttavia compensato dal fatto che con l'illuminazione laterale possono essere disponibili superfici molto più ampie rispetto a quella zenitale; nella illuminazione laterale, inoltre, si ottengono buoni valori di illuminamento anche sui piani verticali.

In un edificio industriale, infine, il ricorso all'illuminazione di tipo misto (zenitale/laterale) consente un maggior sfruttamento ai fini produttivi delle zone in prossimità dei muri perimetrali.

3. Modelli di calcolo per l'illuminazione naturale degli edifici industriali

La Letteratura specializzata fornisce diversi modelli per la valutazione delle prestazioni illuminotecniche di coperture a shed, al variare delle forme e dei materiali che le costituiscono.

In particolare, la CIE n. 16 "Daylight" [1] fornisce un metodo basato sull'applicazione di nomogrammi per il calcolo dell'illuminamento sul piano di lavoro, in funzione dell'illuminamento esterno. Il metodo tiene conto della geometria del sistema (larghezza, altezza e inclinazione della parete vetrata; altezza rispetto al piano di lavoro), della trasmittanza del vetro, di un fattore di sporco del vetro stesso ed infine dei coefficienti di riflessione delle superfici interne. Sebbene piuttosto articolato, il metodo non è di validità generale, poiché le tabelle e le figure fornite sono valide solo per determinati valori degli angoli caratteristici e della geometria dello shed. Inoltre, il metodo non tiene in conto le riflessioni esterne sulle superfici che costituiscono la copertura, ma si basa sul solo contributo della radiazione che traspare attraverso la vetrata; infine le riflessioni interne sono valutate con riferimento a valori medi del coefficiente di riflessione di soffitto, pareti e pavimento.

Un metodo simile è fornito in [5]; anche in questo caso si utilizzano dei nomogrammi realizzati dalla Building Research Station (B.R.S.) per il calcolo dell'illuminamento sul piano di lavoro, nell'ipotesi di cielo a radianza standard CIE. Rispetto al metodo della CIE n. 16, è considerata anche la possibilità che vi siano ostruzioni esterne.

Altre fonti, infine [6], [7], [8], valutano le prestazioni illuminotecniche della copertura a shed mediante

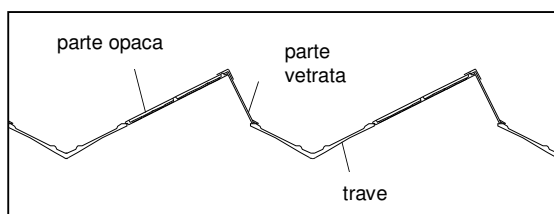


Fig. 1: schema-tipo di una copertura a shed.

la costruzione delle cosiddette curve luminometriche, ricavate dall'applicazione del metodo punto-punto, nell'ipotesi di sovrapposizione degli effetti. Anche in questo caso, però, si tiene conto solo della radiazione luminosa che traspare direttamente attraverso la vetrata.

In conclusione, si possono così sintetizzare i limiti teorici e pratici delle diverse metodologie reperibili in Letteratura:

- sono basate in molti casi su valori standard di radiazione esterna (5000 lux);
- non prevedono il controllo della potenza luminosa riflessa dalle superfici esterne della copertura;
- sono legati a geometrie semplici e predefinite;
- non consentono di definire le proprietà radianti dei materiali;
- possono comportare significativi errori di graficismo e interpolazione delle tabelle.

4. Il modello di calcolo

Il modello di calcolo proposto supera alcuni dei limiti menzionati, in quanto considera anche i seguenti contributi [2]:

- potenza luminosa riflessa e diffusa verso l'interno dalle superfici esterne della copertura;
- potenza luminosa riflessa e diffusa verso l'interno dalle superfici interne della copertura.

Il modello consente di variare a piacere l'inclinazione sia degli elementi trasparenti sia di quelli opachi e di valutare le prestazioni illuminotecniche di una copertura sia nel caso di edificio infinitamente esteso che nel caso di un edificio reale, su un qualsiasi piano orizzontale all'interno nell'edificio.

Le ipotesi adottate per la stima della radiazione solare visibile che attraversa la copertura a shed sono le seguenti:

- esposizione delle superfici trasparenti verso Nord, in modo tale che entri solo radiazione diffusa;
- potenza solare incidente sul piano esterno allo shed costante D_e per ogni direzione (fig. 2);
- potenza solare riflessa dalle diverse superfici perfettamente diffusa (legge del coseno);
- frazione di radiazione visibile riflessa da una superficie che incide su un'altra superficie dello shed calcolata con il metodo dei fattori di vista;
- potenza incidente esternamente sulla superficie del vetro calcolata tenendo conto di tre riflessioni consecutive;
- potenza incidente all'interno, all'intradosso di due travi contigue (D_i), calcolata considerando due riflessioni consecutive (fig. 2)

Il programma di calcolo prevede la schematizzazione della copertura attraverso quattro superfici, aventi proprietà spettrali uniformi, che approssimano la sua reale configurazione e si compone di sei fogli.

Il *Foglio 1* consente il calcolo della radiazione solare visibile che incide sulla superficie vetrata della copertura, una volta definiti:

- la radiazione solare unitaria (in W/m^2);
- le caratteristiche geometriche e dei materiali che costituiscono le superfici (opache e vetrate) della copertura;
- i fattori di vista tra le varie superfici costituenti la copertura.

Con questi dati si calcolano la radiazione solare diretta incidente sulla superficie vetrata e quella riflessa dalle superfici opache e incidente sulla superficie vetrata. Immettendo il coefficiente di trasparenza della superficie vetrata, si calcola anche la radiazione solare visibile trasmessa dal vetro.

Il *Foglio 2* consente il calcolo della radiazione solare visibile che incide sulla superficie fittizia D_i che delimita, inferiormente, la parte interna dello shed (v. fig. 2), una volta definite le caratteristiche geometriche e dei materiali che costituiscono le superfici interne della copertura, nonché i relativi fattori di vista.

Il *Foglio 3* consente di determinare l'illuminamento sul piano di lavoro dovuto alle singole superfici che costituiscono lo shed e l'illuminamento, sempre sul piano di lavoro, dovuto al contributo di più shed (convenzionalmente si è assunto che il numero di shed contenuti in 100 m approssimi la condizione di copertura infinitamente estesa).

Il *Foglio 4* contiene il grafico che mostra, per il singolo shed, i diversi contributi all'illuminamento sul piano di lavoro e la loro somma.

Il *Foglio 5* contiene il grafico che mostra l'andamento sul piano orizzontale dell'illuminamento (curva luminometrica); la curva è riferita al piano di lavoro al di sotto di un generico shed.

Il *Foglio 6* consente infine di determinare l'illuminamento medio sul piano di lavoro in un edificio reale, di cui si devono inserire le dimensioni in pianta, i fattori di vista tra le superfici e la potenza solare visibile emessa dalla copertura; si ottengono la potenza totale incidente sul piano di lavoro, la potenza totale incidente unitaria e l'illuminamento medio.

In un precedente lavoro [2], il modello è stato applicato a 11 diverse coperture a shed, di differenti produttori, fornendo risultati attendibili. Si sono pertanto scelte due fra le coperture più interessanti dal punto di vista dell'illuminazione naturale e si sono individuati due edifici reali nei quali effettuare delle misure in opera di verifica.

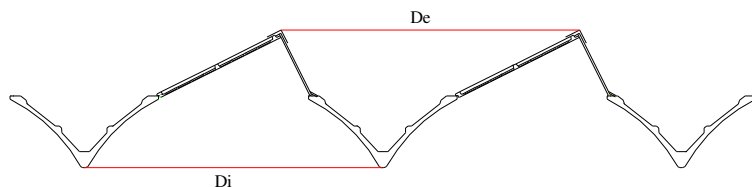


Fig. 2: Modellazione degli shed da parte del codice di calcolo

5. Misure in opera

5.1 Descrizione degli edifici

Gli edifici industriali individuati, che per semplicità di trattazione denomineremo A e B, sono situati rispettivamente in località Faenza (FO) e in località Foligno (PG). Entrambi gli edifici, di recente costruzione, al momento dell'effettuazione delle misure risultavano sostanzialmente sgombri da macchinari, impianti e arredi interni, favorendo l'esecuzione delle misure interne in aree prive di ostacoli e il confronto dei risultati con i valori forniti dal modello.

In particolare, l'edificio A ha una copertura di circa 10.920 m² con una planimetria rettangolare (350 m x 31,2 m), cui si aggiungono vani aggiuntivi per uffici e impianti. La copertura presenta tegole a V di m 1,2 di altezza e 30 di luce, poste ad interasse regolare di m. 5; le superfici trasparenti hanno un'inclinazione di 63° e una larghezza di 1,2 m; al modulo shed viene affiancato un cupolino opaco in c.a.p. conformato a sella. L'intradosso della copertura è posto a m. 8 dal pavimento finito (fig. 3).

L'edificio B ha una superficie coperta di 23.910 m², con planimetria pressoché quadrata di 159,4 m x 150,0 m. La copertura a shed è costituita da travi secondarie a V aperta in c.a.p. di altezza pari a 0,71 m e di luce netta pari a 19,8 m; la superficie trasparente è inclinata di 65° e ha larghezza pari a 1,2 m; anche in questo caso l'intradosso della copertura è posto a 8 m dal pavimento finito (fig. 4).



Fig. 3: particolare copertura e vista interna dell' edificio A



Fig. 4: particolare copertura e vista interna dell' edificio B

5.2 Strumentazione

Le misure in opera presso gli edifici prescelti sono state effettuate con la seguente strumentazione:

- multiacquisitore BABUC MBA020, per le misure esterne di radiazione solare, dotato di sonda radiometrica globale BSR030 (campo di indagine 300-110 nm; range di potenza 0 – 1500 W/m²), posizionato in copertura degli edifici esaminati;
- luxmetro digitale Mavolux Gossen, dotato di dispositivo di correzione per il coseno e di sensibilità spettrale conforme alla curva di visibilità $V(\lambda)$, per le misure di illuminamento (E) all'interno degli edifici.

5.3 Metodologia di misura

Le misure sul piano di lavoro all'interno degli edifici sono state effettuate secondo delle griglie costituite da una maglia regolare di m. 2 x 2; in mancanza di riferimenti normativi specifici il numero di punti di misura complessivo è stato determinato in accordo con le verifiche di uniformità del livello di illuminamento ai sensi della UNI 10380/94 [9], che riguarda tuttavia l'illuminazione artificiale.

Il numero di punti minimo ai sensi della UNI, determinato a partire dall'indice del locale, è pari a 25 per entrambi gli edifici; in realtà per l'edificio A si è approntata una griglia di $16 \times 15 = 240$ punti di misura, per l'edificio B di $16 \times 20 = 320$ punti di misura. Le misure sono state effettuate nel periodo marzo-agosto 2001. Al fine di effettuare le misure in maniera speditiva, si sono predisposti dei riferimenti a terra; il luxmetro è stato dotato di una livella e di una sospensione cardanica ad un'altezza di 0,85 m. Al fine di applicare il modello ed effettuare le opportune correlazioni, le misure in esterno si sono protratte per l'intera durata delle misure in interno. Le misure sono state precedute da sopralluoghi e misure a carattere orientativo, volte alla messa a punto della metodologia di misura. Poiché il modello calcola innanzitutto il valore dell'illuminamento all'intradosso della copertura e da questo quello sul piano di lavoro, si sono eseguite anche alcune misure a tale quota.

6 Risultati

Non risulta possibile riportare in questa sede tutti i risultati delle misure eseguite, in quanto, per ciascun edificio, queste sono state ripetute in differenti ore della giornata e in diverse giornate. Inoltre, lo scopo delle misure è stato non tanto quello di verificare le prestazioni illuminotecniche delle coperture esaminate, quanto quello di validare sperimentalmente il codice di calcolo proposto. In ogni caso, a titolo puramente esemplificativo, la fig. 5 riporta una sintesi planimetrica delle misure effettuate sul piano di lavoro all'interno dell'edificio A in una determinata giornata. L'andamento tipico delle misure di illuminamento sul piano di lavoro, lungo una fila longitudinale nella parte centrale dell'edificio, è riportato in fig. 6; la figura indica anche i corrispondenti valori di radiazione solare misurati all'esterno. Si può notare che, nel tempo necessario all'esecuzione delle misure lungo una fila, la radiazione solare esterna si mantiene costante; ai fini dell'applicazione del modello, pertanto, tutti i punti di una fila possono essere correlati ad un unico valore di radiazione esterna.

Sempre con riferimento alla figura 6, si può notare che i valori di illuminamento misurati sono dell'ordine di 570 – 700 lux, con valori di radiazione incidente di circa 1150 W/mq.

Analogamente, per quanto riguarda l'edificio B, l'andamento tipico lungo una fila centrale dell'edificio è riportato in fig. 7; i valori di illuminamento variano tra circa 1050 e 1120 lux, in corrispondenza di radiazione incidente pari a circa 900 W/m². L'edificio B presenta prestazioni illuminotecniche decisamente migliori rispetto all'edificio A, avendo una minore altezza della trave e superfici trasparenti poste ad un'interasse di 5 m anziché di 10 m.

7. Confronto con il modello

Al fine dell'applicazione del modello agli edifici considerati, si sono innanzitutto introdotte nel programma le caratteristiche geometriche (superfici, angoli, fattori di vista) e dei materiali (coefficienti di riflessione) delle due coperture.

Si sono quindi introdotti i dati di radiazione solare esterna rilevati nel corso dell'esecuzione delle misure interne e si è fatto girare il programma con riferimento ad alcune situazioni significative.

La fig.8 presenta il confronto tra i valori di illuminamento ottenuti dalla simulazione per l'edificio A e i valori corrispondentemente misurati in una fila centrale dell'edificio; lo scostamento massimo è inferiore al 2%. Sempre con riferimento all'edificio A, la fig. 9 mostra il confronto tra i valori misurati all'intradosso della copertura e i valori ottenuti dalla simulazione.

La fig. 10 mostra il confronto tra i valori misurati e simulati per una fila centrale dell'edificio B; anche in questo caso la modellazione è accurata, essendo pari a circa l'1% lo scostamento massimo tra le due serie di valori.

I confronti sono effettuati per le file centrali degli edifici, in quanto per esse l'ipotesi di copertura infinitamente estesa, su cui è basato il modello, risulta meglio approssimata.

Si sono a questo punto introdotte nel codice di calcolo le dimensioni reali e le proprietà di riflessione di pareti e pavimenti e si è calcolato l'illuminamento medio sul piano di lavoro dei due edifici. Tale valore, ottenuto a partire da un valor medio della radiazione solare in un determinato intervallo di tempo, è stato confrontato con il valor medio dell'illuminamento corrispondentemente misurato sul piano di lavoro. Si sono ottenuti i seguenti valori:

- edificio A: illuminamento medio misurato 642 lux; illuminamento medio calcolato 697 lux; scarto 6%;

- edificio B: illuminamento medio misurato 1023 lux; illuminamento medio calcolato 1097 lux; scarto 7%.

8. Confronto con altri modelli

Si è infine effettuato un confronto tra i risultati forniti dal modello proposto e quelli derivanti dall'applicazione della metodologia CIE n. 16 "Daylight". Con riferimento all'edificio B, in corrispondenza di un illuminamento esterno pari a 10.500 lux (80% delle ore lavorative), la CIE fornisce un illuminamento medio sul piano di lavoro pari a 890 lux, contro gli 883 lux forniti dal programma di calcolo.

9. Conclusioni

E' stato sviluppato un modello di calcolo originale per la valutazione delle prestazioni illuminotecniche di coperture di edifici industriali a shed.

In un precedente lavoro, il programma è stato testato su undici diverse coperture, di vari produttori; i risultati incoraggianti hanno suggerito di effettuare una verifica sperimentale delle simulazioni fornite dal modello.

Si sono individuati a tal fine due edifici, di recente costruzione, con due differenti coperture a shed e si sono condotte estese e sistematiche campagne di misura di illuminamento esterno ed interno.

I risultati ottenuti mostrano che il modello consente di costruire la curva luminometrica e di stimare l'illuminamento medio sul piano di lavoro di un edificio con una notevole accuratezza; il modello è pertanto un utile strumento per:

- valutare in sede di progetto le prestazioni illuminotecniche di una copertura assegnata;
- ottimizzare le prestazioni stesse, variando ad esempio materiali e/o geometria della copertura;
- stimare il deprezzamento nel tempo delle prestazioni di una copertura, a seguito dell'invecchiamento dei materiali che la costituiscono.

Gli sviluppi della ricerca prevedono l'integrazione nel modello di sistemi di illuminazione artificiale, al fine di pervenire ad una progettazione illuminotecnica integrata dell'edificio industriale, che tenga in conto sia le esigenze di comfort visivo sia quelle di risparmio energetico.

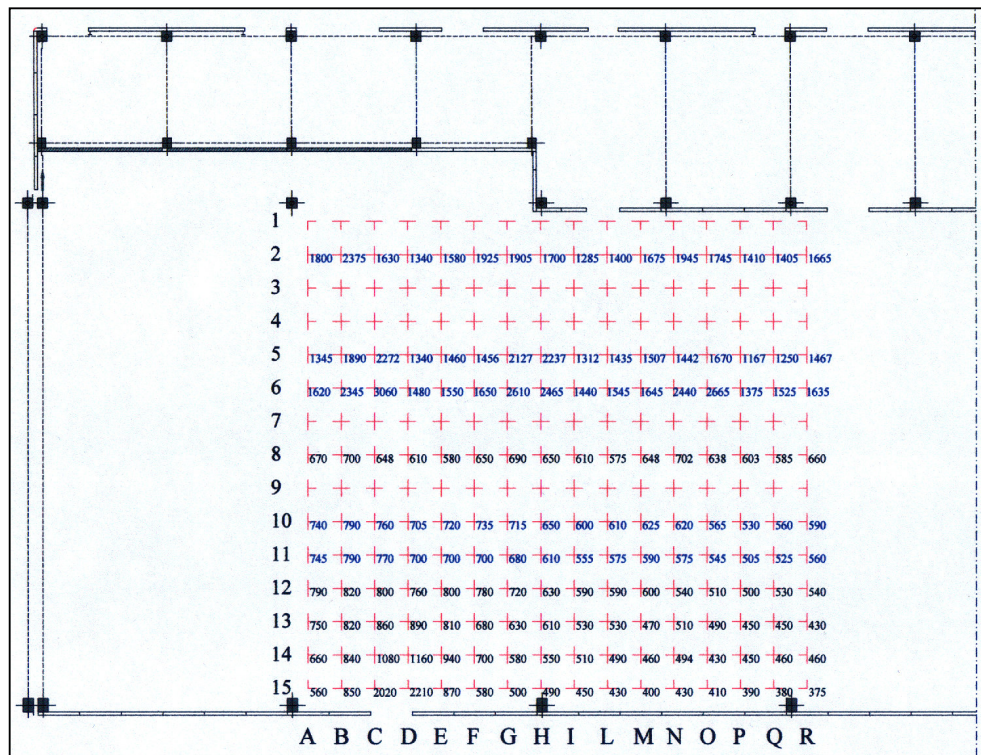


Fig. 5: Sintesi planimetrica della campagna di misure all'interno all'edificio A (illuminamento in lux).

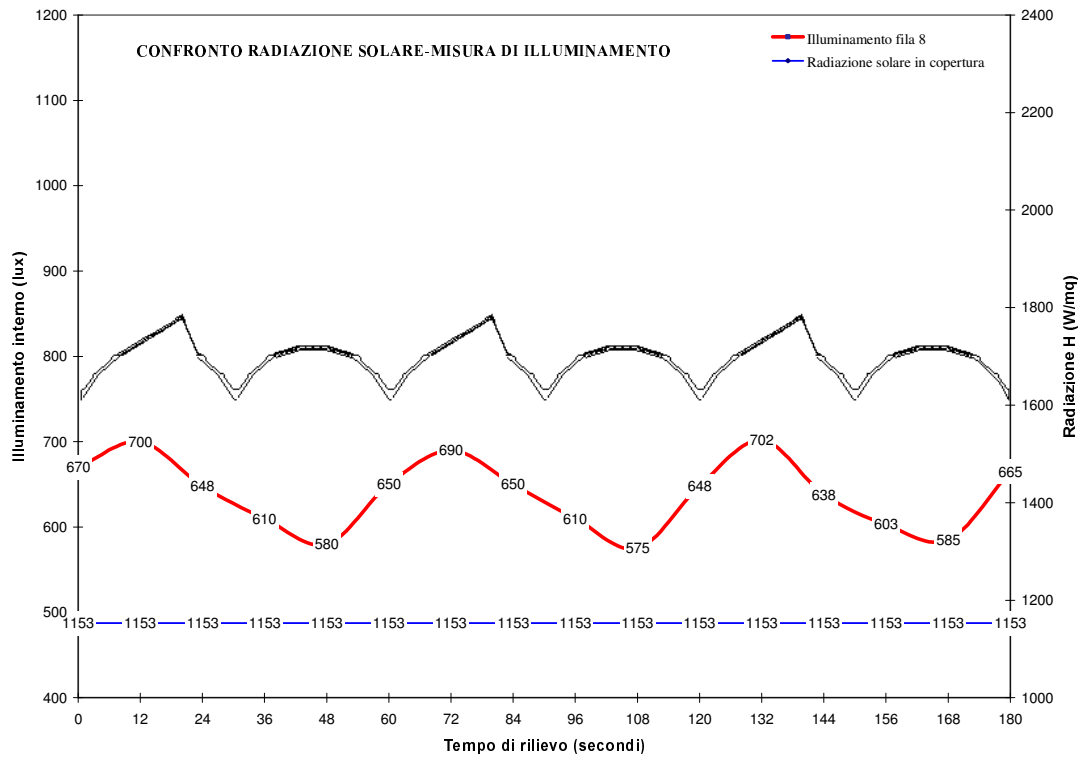


Fig. 6: Confronto tra i valori di illuminamento misurati sul piano di lavoro e i valori di radiazione solare esterna corrispondentemente misurati in copertura (edificio A, fila 8)

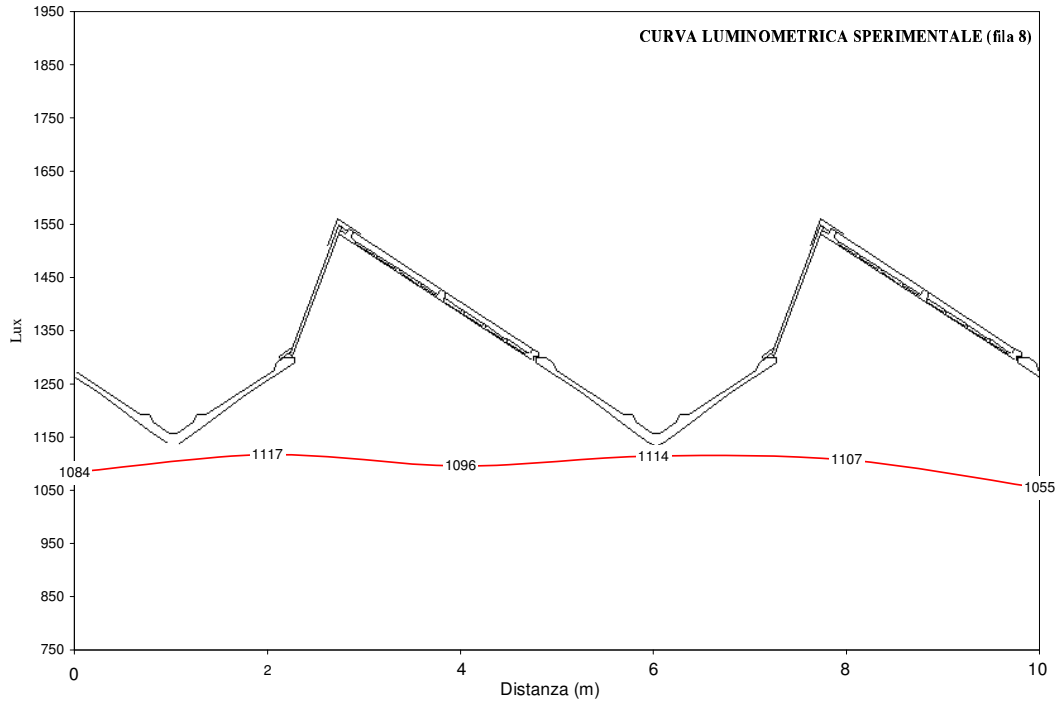


Fig. 7: Valori di illuminamento misurati sul piano di lavoro (edificio B, fila 8)

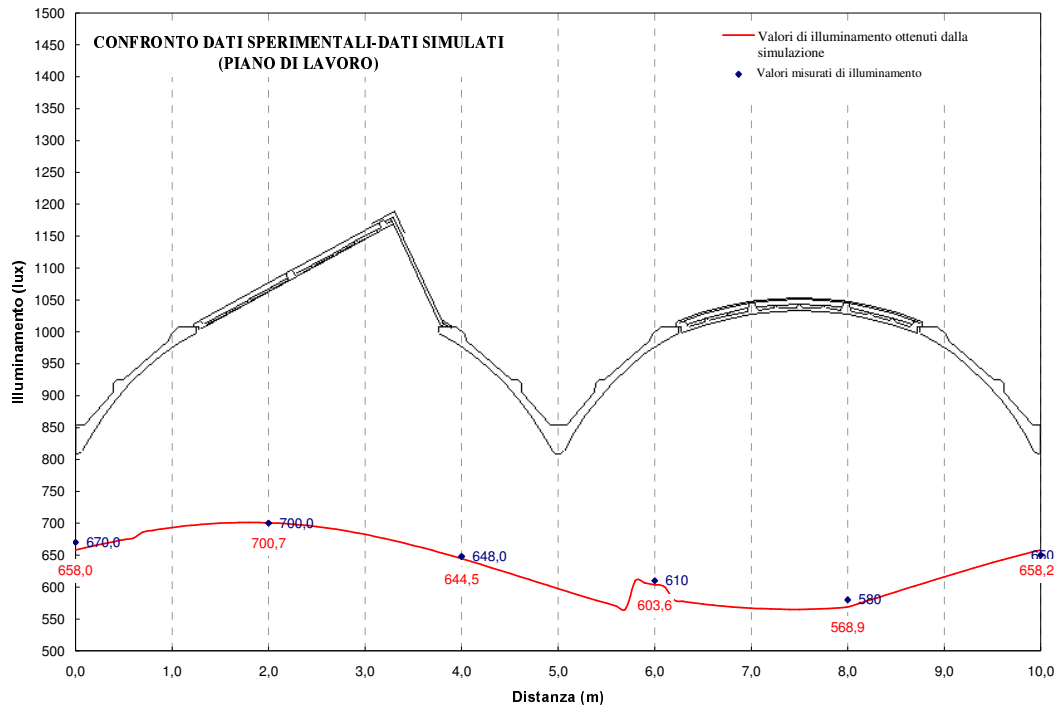


Fig. 8: Confronto tra i valori di illuminamento simulati e misurati per una fila centrale dell'edificio A, quota piano di lavoro

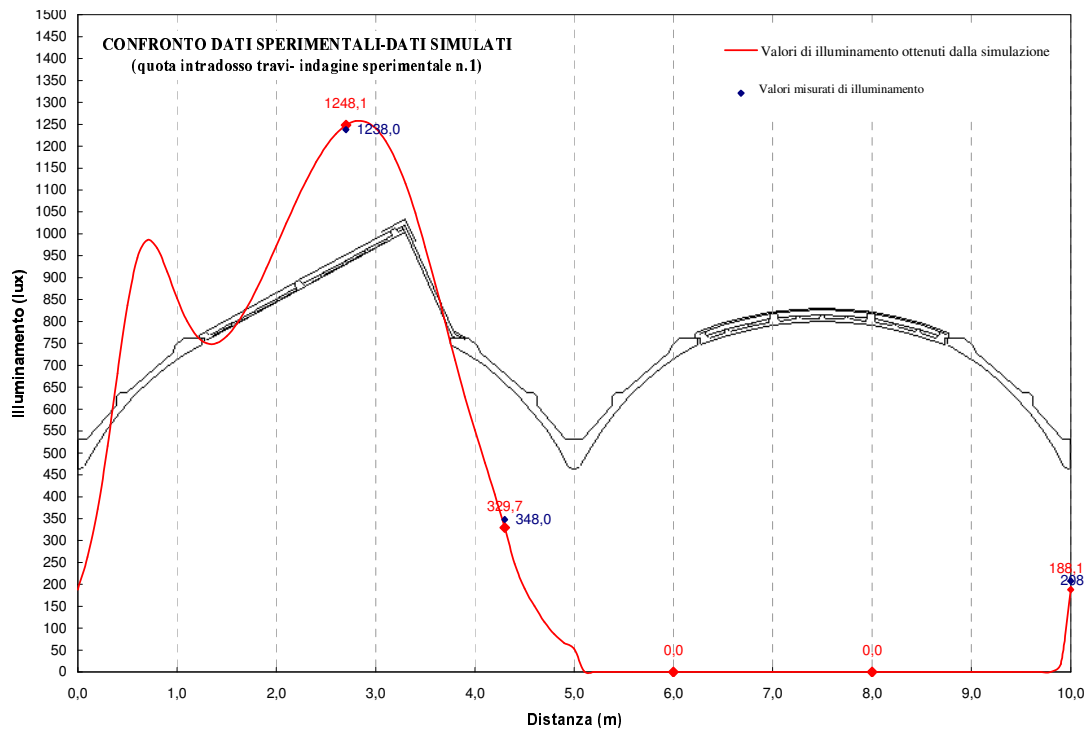


Fig. 9: Confronto tra i valori di illuminamento simulati e misurati per una fila centrale dell'edificio A, quota intradosso copertura

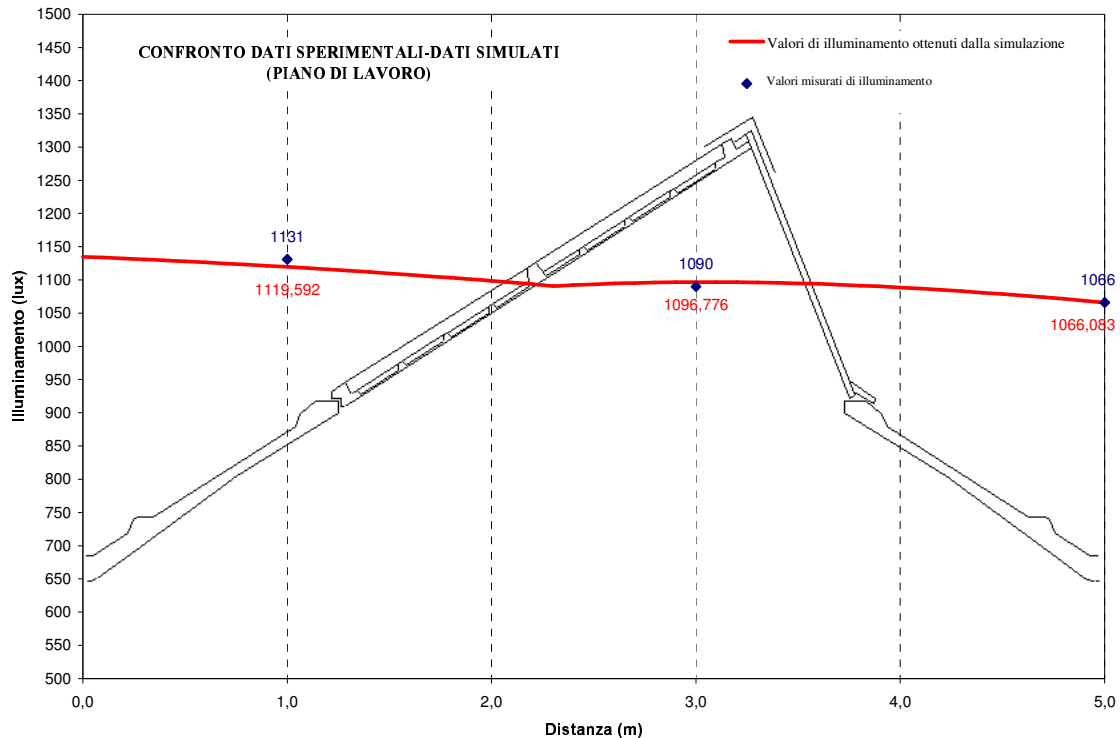


Fig. 10: Confronto tra i valori di illuminamento simulati e misurati per una fila centrale dell'edificio B, quota piano di lavoro

10. Bibliografia

- [1] Commission Internationale de l'Eclairage, Pub. N. CIE 16 «Daylight», 1970 ;
- [2] F. Asdrubali, C. Buratti: "Illuminazione naturale prestazioni illuminotecniche di coperture a shed di diverso tipo", Atti del Convegno Nazionale AIDI, Montecatini Terme, novembre 2000;
- [3] L. Fellin, G. Forcolini, P. Palladino: "Manuale di Illuminotecnica", Tecniche Nuove, Milano 1999.
- [4] UNI 10530, "Principi di ergonomia nella progettazione di sistemi di lavoro", gennaio 1997
- [5] M. Sala, M.C. Torricelli, S. Secchi: "Daylight: la luce del giorno", Alinea, Firenze 1995.
- [6] A. Melis: "Gli edifici per le industrie", Lattes, Torino 1953.
- [7] O. Pierfederici: "Illuminazione e colore negli ambienti di lavoro", Maggioli, Rimini, 1993.
- [8] Illuminating Engineering Society of North America "Recommended Practice for Daylighting"; New York 1993
- [9] UNI 10380/94: "Illuminotecnica – Illuminazione di interni con luce artificiale", ottobre 1999.

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano l'Ing. Luca Frezzini per la preziosa collaborazione fornita