

Un software per la valutazione delle prestazioni del tetto ventilato

L'articolo riporta il risultato finale di una ricerca europea finanziata nell'ambito del progetto LIFE "Climate Change Adaptation" nella quale, attraverso sperimentazioni al vero, i ricercatori hanno messo a punto SENSAPIRO, un software semplificato per la valutazione previsionale dei benefici del tetto ventilato in termini di smaltimento dell'energia solare

Michele Bottarelli

Ricercatore, responsabile scientifico Progetto LIFE Herotile U.O. Dipartimento di Architettura, Università di Ferrara

Giovanni Zannoni

KEYWORDS

Sensapiro

Software Tetto Ventilato

Tegole Ventilate

Sensapiro

Software Vented Roof

Vented Roof Tiles

Above Sheathing

Ventilation

La ricerca del benessere e del comfort indoor

Negli ultimi decenni, il livello di comfort normalmente richiesto dagli utenti per quanto riguarda il benessere indoor si è notevolmente elevato, portando a una minore tolleranza nei confronti dell'oscillazione di alcuni parametri basilari quali, per esempio, la temperatura dell'aria interna. Valori che fino a non più di un paio di generazioni fa erano ritenuti accettabili in funzione delle mutazioni stagionali sono ora considerati troppo alti o troppo bassi e il nostro livello di tolleranza a determinati sbalzi di temperatura si è notevolmente ridotto.

Questo aspetto si è verificato prima di tutto per quanto riguarda la temperatura minima interna nel periodo invernale, che dal dopo-

guerra a oggi è andata innalzandosi dai circa 18°C fino agli attuali 21°C (ancorché superati benché fuori regola), ma soprattutto per quanto riguarda la temperatura massima estiva.

Se fino agli anni '80 avere una macchina con il condizionatore poteva essere considerato un lusso e la climatizzazione degli edifici era riservata a poche costruzioni abbastanza all'avanguardia, adesso certe dotazioni impiantistiche sono considerate irrinunciabili e scontate nella maggior parte dei casi. Che sia estate o inverno, si assiste a manifestazioni di intolleranza non appena il range di temperatura esce dalla ristretta fascia dei 20-24 gradi; in particolare in estate, periodo nel quale, più di tanto, l'abbigliamento non può aiutare, diversamente dall'inverno nel quale perlomeno ci si può ve-

A software for performances evaluation of a ventilated roof

The article introduces the final results of a research on the ventilated roof, developed inside the LIFE "Climate Change Adaptation" European project financing. During the three years of research investigating the behaviour and the performances of the air movement in a vented pitched roof, the team from the University of Ferrara has managed to achieve a software named SENSAPIRO able to predict and quantify the benefits of this technical solution

in terms of energy saving (Wh/m^2) for indoor cooling during Summer season for different types of roof, with different characteristics and locations. SENSAPIRO does not replace other computing codes used for thermal-fluid-dynamic analyses of building components, but offers a simplified evaluation for direct and preliminary comparison of different roof types. In addition to the performances of pitched roofs made using Portuguese roof tiles,

Marseillaise roof tiles and metal slabs on flat roofs, SENSAPIRO is also used to evaluate the two types of Portuguese and Marseillaise roof tiles developed in the HEROTILE project, which increase under-tile ventilation and reduce the energy consumption for air-conditioning in attic rooms. The software is a freeware, and can be freely downloaded from the office project website (www.lifeherotile.eu), the websites of the project partners and other related websites.

Software ENergy SAVings Pitched ROofs

LOCALIZZAZIONE

SELEZIONA FILE EPW Anno 2005

D:\PdR_internazionali\Life CottoPOSSagno\C5 - Sensapiro_FINALE_03\epw\ITA_Bologna-Borgo.Panigale.161400_IJGDG.epw

Latitudine (deg) 44,53

Longitudine (deg) 11,30

Timezone 1

Contesto urbano urbano molto denso

PERIODO

da 15 a 15

Gennaio Febbraio
Marzo Aprile
Maggio Giugno
Luglio Agosto
Settembre Ottobre
Novembre Dicembre

PARAMETRI TETTO

Quota media tetto (m) 8

Tilt tetto (deg) 20

Azimet tetto (deg) 45

Tipo tetto Portoghese STD
Portoghese HERO

Gronda Chiusa
Semichiusa

Temperatura di Setpoint (°C) 26

Fattore ASV 1

lock chart scale

LAYERS

Numero di layers 1 2 3

CALCOLA

Dati orari Dati giornalieri

Salva configurazione Carica configurazione

lifeHEROTILE

With the contribution of the LIFE financial instrument of the European Community

About CHIUDI

La HomePage del software **SENSAPIRO** consente l'inserimento dei dati principali riguardanti la copertura, la località e il periodo di indagine. Nel riquadro di sinistra vengono caricati automaticamente i dati meteorologici della località prescelta derivati dai file già presenti nell'archivio del software o scaricati dall'utente in rete; in basso viene definito il contesto urbano all'interno del quale si trova l'edificio. Nel riquadro centrale si definisce il periodo di indagine (in alto) e il numero di strati che compongono il pacchetto di copertura (in basso). Nel riquadro di destra viene configurato il tetto (altezza, inclinazione della falda, orientamento, tipologia di manto, tipologia di gronda) oltre alla temperatura interna desiderata e alla presenza o meno della ventilazione fra le tegole.

stire maggiormente in caso di freddo. Di conseguenza i consumi energetici per la climatizzazione estiva sono andati aumentando fino a superare, in alcune realtà territoriali, i consumi energetici invernali, con l'aggiunta che per la climatizzazione estiva viene consumata una energia di prima specie, quella elettrica, ben più preziosa di quella utilizzata per il riscaldamento invernale, tipicamente quella termica.

Per limitare i consumi invernali degli edifici si adottano tecnologie costruttive dell'involucro che, parimenti al vestiario personale, "tengono al caldo" l'immobile (si pensi al classico "capotto"), ma per quanto riguarda l'estate la situazione è più complessa, in quanto l'energia radiante che arriva dal sole, di cui si vorrebbe impedire l'ingresso, dispone di una potenza ben maggiore del flusso termico di cui si desidera impedire l'uscita d'inverno.

Per limitare l'ingresso del calore d'estate e contenere l'utilizzo di sistemi di climatizzazione estiva, una delle tecnologie costruttive attualmente efficaci, di costo relativamente limitato, è costituita da intercapedini d'aria ventilate realizzate sui tetti e nelle facciate ventilate, che possono rappresentare, in diverse

condizioni geografiche e costruttive, soluzioni interessanti e sufficientemente performanti. Per quanto riguarda la copertura, che risulta essere la porzione dell'involucro edilizio maggiormente esposta all'irraggiamento solare, l'adozione di questa soluzione tecnologica risulta particolarmente efficace e non porta praticamente ad alcuna modifica estetica della configurazione architettonica del sistema, diversamente da una facciata ventilata che invece in parte modifica dal punto di vista formale la superficie [1][2][3][4].

La valutazione delle prestazioni del tetto ventilato

Trattandosi di aria in movimento, la valutazione e la quantificazione dei benefici di questa circolazione fluida in termini di smaltimento dell'energia solare radiante [5] è però risultata sempre molto complessa, al punto che spesso vengono adottate soluzioni costruttive alternative basate su tecnologie più "solide" e dalle prestazioni meglio quantificabili, come l'incremento della massa dell'involucro.

Per quanto siano infatti disponibili software per la valutazione delle prestazioni delle in-

Cliccando su "configura", nel riquadro centrale in basso della HomePage, si apre la schermata di configurazione del pacchetto di copertura nella quale è presente il numero di strati precedentemente previsti dall'utente, il quale, attraverso un menu a tendina personalizzabile, potrà definire i materiali che compongono il pacchetto di copertura e i relativi spessori. Il software inserisce automaticamente i valori di conducibilità termica, densità e calore specifico di ogni strato, calcolandone il fattore di attenuazione secondo la norma UNI EN ISO 13786:2018.

LAYERS

| Layer 1 to Layer n | Thickness (mm) | Thermal conductivity (W/mK) | Density (kg/m3) | Specific heat capacity (J/kgK) |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| L1 Intonaco calce cemento | 20 | 0.9 | 1800 | 1000 |
| L2 Solaio in laterocemento (20+6) | 260 | 0.74 | 1150 | 1000 |
| L3 XPS | 60 | 0.032 | 35 | 1450 |
| L4 Membrana in PVC | 5 | 0.15 | 1200 | 900 |

Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods

Calculate

CLOSE

0,15284

Decrement factor = 0,15284

Thermal transmittance phase shift = 9,979 (h)

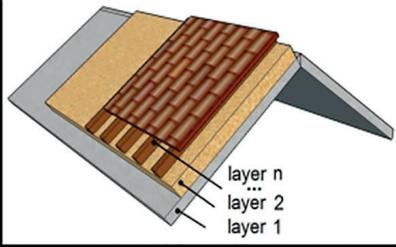
Periodic thermal transmittance = 0,062 (W / m2 K)

Internal thermal admittance = 4,511 (W / m2 K)

External thermal admittance = 0,687 (W / m2 K)

Component thermal resistance = 2,282 (m2 K / W)

System thermal resistance = 2,452 (m2 K / W)



tercapedini ventilanti (COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent, ecc.), il loro impiego necessita di conoscenze, capacità e tempi decisamente non alla portata del progettista medio, il quale non può possedere le competenze specifiche (tempo e risorse) per l'utilizzo di questi sistemi. Per ovviare a questo limite, nel 2015 è stato avviato il progetto di ricerca europeo LIFE HEROTILE (*High Energy savings in building cooling by ROof TILES shape optimization toward a better above sheathing ventilation*) all'interno del programma *LIFE Climate Change Adaptation* finanziato con un budget complessivo di oltre 2,5 milioni di euro di cui circa 1,8 di finanziamento europeo [6][7]. Obiettivi del progetto¹ erano quelli di valutare il comportamento della circolazione d'aria in un tetto ventilato, individuare nuove tecniche costruttive e nuovi prodotti per incrementarne le prestazioni in termini di isolamento al flusso di calore entrante e soprattutto mettere a punto un software speditamente predittivo per la quantificazione di questa prestazione.

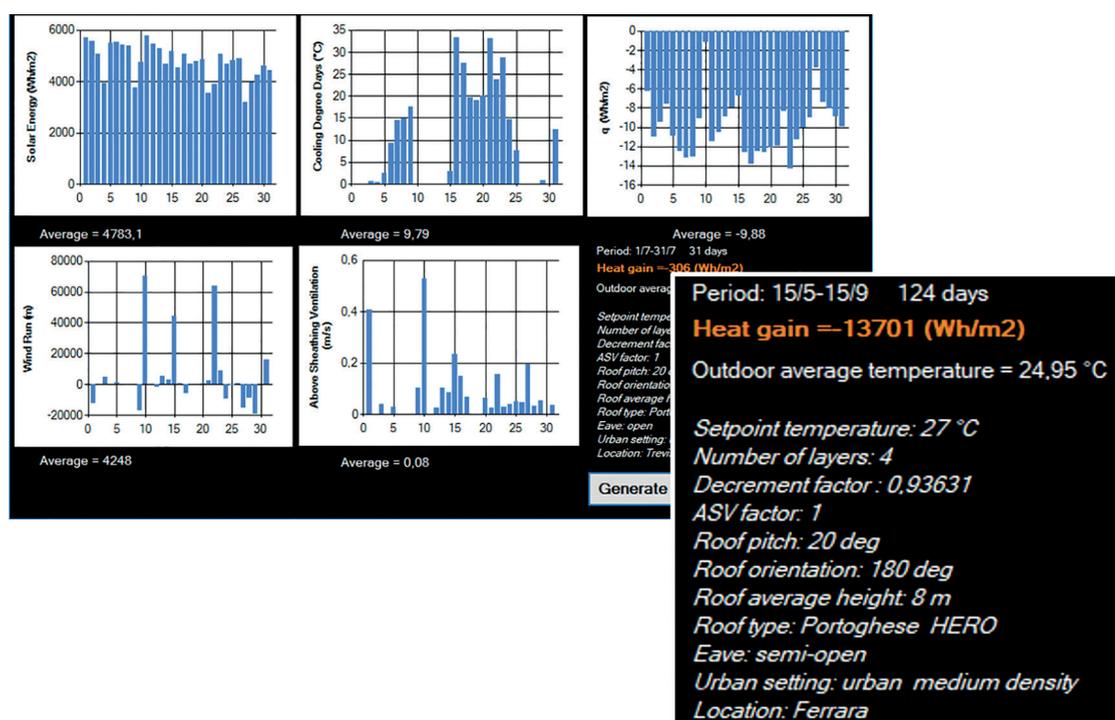
Al termine di tre anni e mezzo di simulazioni e soprattutto di sperimentazioni al vero su quattro edifici sperimentali (mock-up) situati in Italia e in Israele, assieme a ulteriori quattro casi reali costituiti da appartamenti abitati in edifici localizzati in Italia e in Spagna [8][9], l'Unità Opera-

tiva dell'Università di Ferrara, partner del progetto, è riuscita a mettere a punto un software di utilizzo agevole e intuitivo per la preventiva valutazione del risparmio energetico ottenibile da particolari configurazioni del tetto a falde in termini di energia per la climatizzazione indoor.

Il nuovo software **SENSAPIRO** per la valutazione delle prestazioni del tetto ventilato

Dall'inizio di quest'anno è scaricabile gratuitamente dal sito web ufficiale del progetto (www.lifeherotile.eu) la versione Beta del software *SENSAPIRO* "Software for preliminary assessment of ENergy SAVings of Pltched tiled ROofs", basato su correlazioni statistiche ottenute dall'elaborazione di un database, costituito da alcune centinaia di milioni di dati sperimentalmente rilevati.

SENSAPIRO è in grado di stimare in forma semplificata gli apporti termici estivi da gestire per il raffrescamento indoor in regime estivo, che alcune tipologie di tetto e manto di copertura possono determinare. Il software è basato sull'analisi statistica di prolungati rilievi strumentali svolti sugli edifici sperimentali appositamente realizzati e confrontati con casi reali opportunamente monitorati. Non sostituisce



Il risultato del calcolo evidenzia l'apporto termico del tetto in Wh/m² per il periodo definito e sintetizza inoltre i valori precedentemente definiti sulle caratteristiche del tetto, la località e il periodo. Nella schermata vengono inoltre riportati a scala giornaliera i grafici riguardanti l'irraggiamento solare normale, i gradi-giorno per raffrescamento, la ventilazione sottostante, il wind-run e il flusso termico in ingresso.

altri codici di calcolo in commercio che si basano su l'impostazione rigorosa del problema di scambio termico e flusso di massa, ma propone una valutazione preliminare per la comparazione diretta delle prestazioni di differenti tipologie di copertura.

Oltre alle prestazioni di manti di copertura standard realizzati con tegole portoghesi, tegole marsigliesi, lastre metalliche e membrane (tetto piano) attualmente in commercio, *SENSAPIRO* consente anche la valutazione delle prestazioni di due particolari tipologie di tegola portoghese e marsigliese sviluppate all'interno del progetto HEROTILE, al fine di incrementare le prestazioni della circolazione d'aria nel sottostante [10].

Il software è disponibile in versione italiana e inglese con il rispettivo manuale e consente di valutare a priori l'apporto termico di un tetto a falde o piano per un periodo definito, in relazione a:

- ubicazione;
- altezze sul piano campagna;
- contesto urbano circostante;
- orientamento del tetto;
- inclinazione della falda;
- tipologie di griglia parapasseri in linea di gronda;
- tipologia di manto di copertura;

e di conseguenza di valutare quale sia la soluzione con il minor guadagno solare e quindi che necessiterà di minore energia per la climatizzazione indoor.

All'interno del file .ZIP scaricabile dal sito si trovano i seguenti file che costituiscono l'ossatura del programma:

- *Sensapiro.exe*, programma eseguibile in ambiente Windows;
- *ltextsharp.dll*, libreria necessaria all'esecuzione del programma;
- *Parameter.txt*, file editabile che contiene i parametri numerici che servono per configurare l'avvio del programma, nonché valori di default di alcune grandezze necessarie all'algoritmo di calcolo;
- *Layers.txt*, file editabile contenente i parametri termofisici di materiali edilizi mediante i quali costituire un pacchetto tetto;
- *Coeff_Q*, *Coeff_polar*, *ASV* file binari contenenti i parametri dell'analisi statistica.

Per quanto riguarda la localizzazione della copertura, *SENSAPIRO* utilizza i file meteorologici standard del software *EnergyPlus*, aventi estensione*. EPW e che sono scaricabili dal sito <https://energyplus.net/weather>. Tali file costituiscono la caratterizzazione meteorologica attraverso cui *SENSAPIRO* assume l'irraggiamento

Il software riporta, a scala giornaliera e oraria per il periodo precedentemente definito, l'irraggiamento solare, la temperatura a bulbo secco, la velocità e la direzione del vento e la sua componente incidente normalmente. Inoltre i gradi ora giornalieri, il wind-run riferito all'orientamento ortogonale, la velocità media dell'aria di ventilazione e l'energia termica specifica entrante in copertura.

| Giorno | GH | Vw | Z irr | Vasv | q |
|--------|----|--------|-------------------|-------|-----------------------|
| gg/mm | °C | m | Wh/m ² | m/s | Wh/m ² day |
| 01/01 | 0 | 486 | 663 | 0,03 | -2,4 |
| 02/01 | 0 | 0 | 487 | 0 | -2,3 |
| 03/01 | 0 | 17772 | 495 | 0,14 | 8,5 |
| 04/01 | 0 | 0 | 508 | 0 | -2,5 |
| 05/01 | 0 | 573 | 515 | 0,021 | -1 |
| 06/01 | 0 | -1292 | 419 | 0,226 | 15,7 |
| 07/01 | 0 | 35661 | 554 | 0,172 | 10,4 |
| 08/01 | 0 | -5141 | 479 | 0,075 | 3,4 |
| 09/01 | 0 | -24186 | 474 | 0,238 | 15,6 |
| 10/01 | 0 | -12119 | 463 | 0,236 | 15,7 |
| 11/01 | 0 | 0 | 587 | 0 | -3,6 |
| 12/01 | 0 | 31247 | 557 | 0,22 | 13,9 |
| 13/01 | 0 | 16672 | 337 | 0,17 | 12,9 |
| 14/01 | 0 | 5454 | 651 | 0,157 | 7,4 |
| 15/01 | 0 | 702 | 693 | 0,156 | 6,8 |
| 16/01 | 0 | 7954 | 666 | 0,205 | 10,9 |
| 17/01 | 0 | 14166 | 495 | 0,157 | 9,7 |
| 18/01 | 0 | 14495 | 610 | 0,143 | 7,1 |
| 19/01 | 0 | -6548 | 751 | 0,037 | -3,2 |
| 20/01 | 0 | -667 | 714 | 0,181 | 8,3 |
| 21/01 | 0 | 0 | 723 | 0 | -5,5 |
| 22/01 | 0 | -6848 | 726 | 0,072 | -0,2 |
| 23/01 | 0 | 0 | 798 | 0 | -6,5 |
| 24/01 | 0 | 0 | 522 | 0 | -2,7 |
| 25/01 | 0 | 0 | 273 | 0 | 0,7 |
| 26/01 | 0 | -18540 | 587 | 0,14 | 6,7 |

GH, l'irraggiamento solare caricato dal file EPW [$W m^{-2}$];
 T dry bulb, la temperatura di bulbo secco caricata dal file EPW [$^{\circ}C$];
 Wv, la velocità del vento caricato dal file EPW [$m s^{-1}$];
 W α , la direzione del vento caricato dal file EPW [deg];
 W α_{new} , la componente del vento incidente normalmente al tetto [$m s^{-1}$].

| Data e ora | G0 | T dry bulb | Wv | Wv new | Wd |
|------------------|------------------|------------|-----|--------|-----|
| gg/mm/aaaa hh:mm | W/m ² | °C | m/s | m/s | deg |
| 01/01/2005 00:00 | 0 | 1 | 0 | 0 | 218 |
| 01/01/2005 01:00 | 0 | 0,4 | 0 | 0 | 203 |
| 01/01/2005 02:00 | 0 | -0,6 | 0,8 | 0,732 | 59 |
| 01/01/2005 03:00 | 0 | -1,8 | 0,8 | 0,732 | 50 |
| 01/01/2005 04:00 | 0 | -2 | 0,8 | 0,732 | 276 |
| 01/01/2005 05:00 | 0 | -1,8 | 1,6 | 1,463 | 46 |
| 01/01/2005 06:00 | 0 | -1,2 | 1,6 | 1,463 | 252 |
| 01/01/2005 07:00 | 0 | -0,6 | 1,6 | 1,463 | 28 |
| 01/01/2005 08:00 | 36 | 0,2 | 1,6 | 1,463 | 339 |
| 01/01/2005 09:00 | 100 | 1,2 | 0,8 | 0,732 | 155 |
| 01/01/2005 10:00 | 156 | 2,5 | 0,8 | 0,732 | 274 |
| 01/01/2005 11:00 | 193 | 4 | 0 | 0 | 78 |
| 01/01/2005 12:00 | 200 | 5,8 | 0 | 0 | 84 |
| 01/01/2005 13:00 | 176 | 6,7 | 0 | 0 | 335 |
| 01/01/2005 14:00 | 129 | 7,2 | 0 | 0 | 96 |
| 01/01/2005 15:00 | 71 | 7,4 | 0 | 0 | 66 |
| 01/01/2005 16:00 | 13 | 7,1 | 0 | 0 | 313 |
| 01/01/2005 17:00 | 0 | 6,5 | 0 | 0 | 91 |
| 01/01/2005 18:00 | 0 | 5,4 | 0 | 0 | 46 |
| 01/01/2005 19:00 | 0 | 5,1 | 0 | 0 | 134 |
| 01/01/2005 20:00 | 0 | 5 | 0 | 0 | 30 |
| 01/01/2005 21:00 | 0 | 5 | 0 | 0 | 113 |
| 01/01/2005 22:00 | 0 | 4,9 | 0 | 0 | 352 |
| 01/01/2005 23:00 | 0 | 4,7 | 0 | 0 | 202 |
| 02/01/2005 00:00 | 0 | 4,6 | 0 | 0 | 105 |
| 02/01/2005 01:00 | 0 | 4,5 | 0 | 0 | 241 |
| 02/01/2005 02:00 | 0 | 4,4 | 0 | 0 | 213 |

GH, i gradi ora giornalieri riferiti al setpoint scelto [$^{\circ}C$];
 Wv, il wind run secondo l'orientamento del tetto [m];
 Z irr, l'irraggiamento per la sola quota ortogonale al tetto [$Wh m^{-2}$];
 V α_{ASV} , la velocità media dell'aria nella camera di ventilazione [$m s^{-1}$];
 q, l'energia termica specifica entrante dalla copertura [$Wh m^{-2}$].

solare, il regime anemometrico, la temperatura dell'aria nonché le principali informazioni (longitudine, latitudine, ecc) della località nella quale il progettista intende effettuare la valutazione delle prestazioni della copertura. Grazie a questa scelta è possibile effettuare queste valutazioni in una moltitudine di località nel globo.

Il file *Layers.txt* è un file di testo editabile che contiene una lista di default dei possibili materiali edilizi e delle soluzioni tecniche che l'utente potrà utilizzare per configurare il proprio personale "pacchetto di copertura" [11]. Il formato di ogni record del file contiene:

- nome attribuito allo strato;
- coefficiente di conducibilità termica [W/mK];
- calore specifico [J/kgK];
- densità [kg/m^3].

Per esempio: *Blocco forato;0,35;840;750*

In questo modo l'utente può aggiungere nuovi record corrispondenti a nuovi personali prodotti o materiali o modificare quelli già esistenti semplicemente sovrascrivendo questo file in funzione di proprie specifiche esigenze.

Uso del software

Il programma si avvia lanciando direttamente il file eseguibile *Sensapiro.exe*.

All'avvio, la finestra principale consente di:

- selezionare il file meteo (*.EPW) con i dati meteorologici della località nella quale si

trova la copertura. Laddove tale località non sia già presente nell'archivio di SEN-SAPIRO, l'utente potrà scaricare il relativo file dal database del software *EnergyPlus* (<https://energyplus.net/weather>), salvando il file nella propria libreria personale per successivi utilizzi;

- specificare il contesto urbano all'interno del quale si colloca l'edificio il cui tetto è oggetto di valutazione;
- scegliere il periodo di calcolo, definendo il giorno e il mese di inizio e di fine;
- definire la configurazione del "pacchetto di copertura" e quindi scegliere i materiali degli strati e i relativi spessori del pacchetto strutturale sottostante il manto di copertura. Una volta compilata la configurazione della struttura, il programma calcolerà e visualizzerà il fattore di attenuazione e una serie di altre grandezze ai sensi della norma UNI EN ISO 13786:2018;
- definire la configurazione del tetto precisando:
 - l'altezza di riferimento del tetto rispetto al suolo, [m];
 - l'inclinazione del tetto rispetto all'orizzontale, [deg];
 - l'orientamento del tetto rispetto al nord, [deg];
 - la tipologia del manto di copertura;
 - la configurazione dell'apertura in gronda;
 - la temperatura di setpoint interna, [$^{\circ}C$].

- specificare il fattore ASV (Above Seathing Ventilation), parametro variabile tra 0 e 1, che agisce direttamente sul contributo legato alla ventilazione del sottomanto. Modificando tale parametro da 1 a 0 si elimina ogni beneficio dato dalla permeabilità all'aria delle tegole. Il valore 0 corrisponde quindi all'ipotesi di completo intasamento delle fessurazioni tra la sovrapposizione tegole e quindi nessuna permeabilità all'aria del manto impermeabile.

Conclusioni

SENSAPIRO esegue statisticamente la valutazione preliminare dell'apporto termico trasmesso in periodo estivo attraverso le coperture, in particolare quelle ventilate, tenendo conto della attenuazione data dalla ventilazione sottotegola.

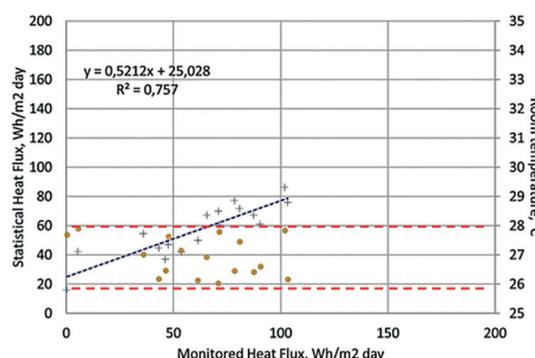
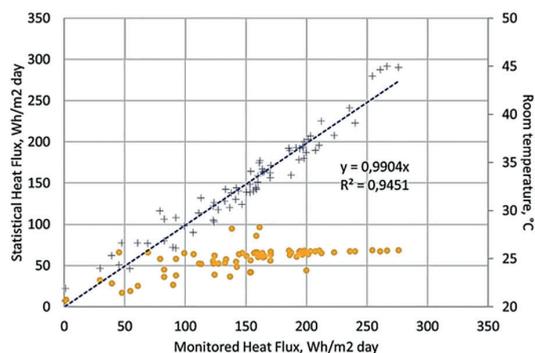
Questo apporto termico concorre alla domanda energetica per il raffrescamento dello spazio sottotetto e può quindi essere convertito in energia elettrica attraverso il coefficiente SEER del sistema di climatizzazione supposto. Il software può essere impiegato come sistema di supporto decisionale, attraverso il confronto diretto di più soluzioni. *SENSAPIRO* risulta particolarmente user friendly, intuitivo nel suo impiego, leggero dal punto di vista dell'impegno del sistema operativo e affidabile per quanto riguarda i dati di output. Soprattutto, *SENSAPIRO* è il primo pratico tool in grado di fornire al progettista la possibilità immediata di confrontare le prestazioni energetiche del tetto ventilato ed effettuare di conseguenza la scelta che riterrà più vantaggiosa.

Ringraziamenti

Il Progetto HEROTILE (LIFE14 CCA/IT/000939), *High Energy savings in building cooling by ROof TILES shape optimization toward a better above sheathing ventilation*, fa parte del programma Europeo LIFE "Climate Change Adaptation" (www.lifeherotile.eu/).

Note

1. Delle finalità della ricerca LIFE HEROTILE si è già parlato in precedenti articoli di *Costruire in Laterizio* citati in Bibliografia.



BIBLIOGRAFIA

- [1] Ciampi M, Leccese F, Tuoni F. Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. *Solar Energy* 2005; 79:183–92.
- [2] Miller W, Keyhani M, Stovall T et al. 2007. Natural convection heat transfer in roofs with above-sheathing ventilation. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings*, X. Clearwater Beach, FL, ASHRAE.
- [3] De With G, Cherry N, Haig J. Thermal benefits of tiled roofs with above sheathing ventilation. *Int J Build Phys* 2009; 33:171–94.
- [4] Gagliano A, Patania F, Nocera F et al. Thermal performance of ventilated roofs during summer period. *Energy Build* 2012; 49:611–8.
- [5] D'Orazio, M., Di Perna, C., Principi, P. & Stazi, A. Effects of roof tile permeability on the thermal performance of ventilated roofs: Analysis of annual performance. *Energy and Buildings* Vol. 40, pp. 911-916 (2008). doi:10.1016/j.enbuild.2007.07.003.
- [6] M. Bottarelli, G. Zannoni, R. Allen. N. Nigel, *Analisi CFD e confronto sperimentale di nuove tegole ventilanti*, *Costruire in Laterizio* 168 (2016) 68-73.
- [7] M. Bortoloni, G. Dino, M. Bottarelli, G. Zannoni, *Tetto ventilato, design innovativo per tegole tradizionali*, *Costruire in Laterizio* 175 (2018) 60-66.
- [8] Bortoloni M, Bottarelli M, Piva S. Summer thermal performance of ventilated roofs with tiled coverings. *J Phys: Conf Ser* 2017; 796:1–10.
- [9] Bottarelli M, Bortoloni M, Zannoni G et al. CFD analysis of roof tile coverings. *Energy* 2017. in press.
- [10] Bottarelli M, Zannoni G, et al. *Analisi CFD e confronto sperimentale di nuove tegole ventilanti*. *Costruire in laterizio* n. 168.
- [11] UNI 9460:2008, *Coperture discontinue - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione di coperture realizzate con tegole di laterizio o calcestruzzo ICS : [91.060.20-20] [91.060.20]*

Il confronto fra i dati sperimentamente raccolti durante i tre anni di misura e i valori forniti dal software *SENSAPIRO* mostrano una buona correlazione, pari a $R^2=0,94$ per l'edificio sperimentale presso il Teknehub dell'Università di Ferrara, in cui le condizioni al contorno erano stabili, e $R^2=0,75$ per il tetto del caso reale dell'edificio di Saragozza, nel quale era presente la rilevante variabile comportamentale degli abitanti e degli apporti interni.