

Gian Luca Brunetti, DASTU, Politecnico di Milano

gianluca.brunetti@polimi.it

Abstract. Nei contesti in via di sviluppo a clima caldo le soluzioni tecniche delle coperture sono andate incontro a radicali mutazioni per effetto del successo delle lastre metalliche profilate, che ha spesso determinato un peggioramento delle loro prestazioni igrotermiche. Nel presente articolo si esaminano in modo comparativo, attraverso prove computazionali, le prestazioni termiche di configurazioni di copertura oggi disponibili a basso costo per contesti climatici caldi, per ragionare sulle possibili opzioni. I risultati evidenziano l'importanza della ridondanza delle misure ostacolanti la trasmissione del calore in configurazioni "a tetto freddo" per l'ottenimento di prestazioni termiche soddisfacenti a basso costo. Un interessante esempio di configurazione che emerge come adeguato a contesti caratterizzati da scarsità di legno è quello delle coperture in tegoloni di ferrocemento ventilate al controsoffitto.

Parole chiave: Paesi in via di sviluppo, Climi caldi, Coperture, Basso costo, Raffrescamento passivo

Introduzione

Il sistema di copertura nei climi caldi influisce in modo sostanziale sulle prestazioni igrotermiche degli edifici e i paesi ad alto tasso di povertà sono prevalentemente localizzati nei climi caldi. Sovrapponendo una carta climatica della Terra con una carta della distribuzione dei più grandi slum (Fig. 1) si può constatare una spiccata concentrazione di queste aree nei climi caldi.

Il passaggio alle tecnologie moderne nei contesti poveri è spesso avvenuto generando un peggioramento delle condizioni di comfort. La disponibilità merceologica che più ha inciso in questo passaggio è stata quella di lastre metalliche profilate (Oliver, 1969, 1971), che ha scalzato le soluzioni tradizionali.

È cosa oggi riconosciuta che una soluzione vantaggiosa per la riduzione del guadagno solare delle coperture sia quella delle configurazioni cosiddette "fredde". Nell'articolo si portano elementi di riflessione sulle condizioni per la loro applicazione.

Considerations on the environmental performances of deck-ventilated roofs for developing contexts

Abstract. In hot-climate developing contexts roofs have undergone radical changes under the effect of the availability of profiled metal sheets, and that has often determined a decrease of their environmental performances. In the present article the thermal performances of low-cost roofs for hot climates are taken into account through computational experiments and compared, to reason about the available options. The results stress the importance of redundancy of devices hindering the transmission of heat in "cool" roof configurations for obtaining good performances at a low cost. An interesting example of configuration which results to be adequate for contexts characterized by wood scarcity is that of big-size ferroceement tiles ventilated in the hanged-ceiling space.

Keywords: Developing countries, Hot climates, Roofs, Low-cost, Passive cooling

Stato dell'arte delle ricerche sulle coperture fredde

Il termine "copertura fredda" nel gergo tecnologico designa una copertura ventilata, ma nella letteratura scientifica esso è assunto oggi anche nel significato generico di copertura avente la proprietà di mantenere basse le temperature di estradosso ed intradosso. L'ambivalenza del termine nasce dal fatto che è esso utilizzato in due filoni di ricerca distinti. Uno è quello focalizzato sulla riduzione dell'effetto isola di calore urbana, ed è principalmente interessato alle temperature estradosso delle coperture (Synnefa et al., 2006; Carlson et al., 2010). In questo contesto si inquadra il *Cool Roof Project* europeo (Synnefa et al., 2012). Il secondo è quello focalizzato sul controllo delle condizioni ambientali interne agli edifici. In questo caso, il termine "copertura fredda" designa, nel suo significato più completo, la presenza di un'intercapedine ventilata per effetto camino in un sistema di copertura, barriere radianti all'interno dell'intercapedine e una superficie di estradosso di elevata riflettanza solare ed elevata emittanza termica.

Negli studi sul comportamento funzionale delle coperture fredde possono essere distinti da una parte approcci focalizzati su aspetti parziali specifici, come la riflettività solare (Suehrcke et al., 2008), le proprietà radiative complessive (Shen et al., 2011) e gli effetti della ventilazione intra-falda (Lee et al., 2009; Tong et al., 2014); e dall'altra gli approcci integrati mirati a supportare l'ottimizzazione progettuale (La Roche et al., 2002, 2012; Laia et al. 2008; Gentle et al., 2011).

I risultati degli studi sulle coperture fredde generano ricadute su ricerche mirate a condizioni climatiche e socioculturali specifiche di paesi in via di sviluppo (Nguyen et al., 2011; Borge-

Introduction

Roof systems in hot climates have a substantial influence on the thermal performances of buildings, and countries interested by high poverty rates are prevalently set in hot climates. Superimposing a Koppen climatic map with a map of the largest world slums distribution (Fig. 1), a striking correlation can be noticed with hot climates.

In poor contexts, the transition to modern roof technologies has often worsened comfort conditions. The availability of goods which has had the greatest influence on architectural production in hot-climate, low-income contexts has been that of profiled metal sheets for roofs (Oliver, 1969, 1971), which has substituted the competing traditional solutions.

It is today widely recognized that a functionally advantageous solution

for the reduction of solar gain in profiled metal sheet roofs is that of the so-called "cold" configurations. In the article, considerations on the conditions for their application are produced.

State of the art of the research on cold roofs

The definition of "cool roof" in technical jargon is aimed to ventilated roofs, but in research it is also used in the more literal meaning of roof having the capacity of maintaining low temperatures, at the upside and/or at the underside.

The ambivalence of the term derives from the fact that it is used in two distinct streams of research. The first one is focussed on reducing the urban heat island by reducing the surface temperatures of roofs (Synnefa et al., 2006; Carlson et al., 2010). The European *Cool Roof Project* has to be

01 | Sovrapposizione di una carta climatica di Koppen con una carta dei principali slum mondiali, evidenziante la preponderante localizzazione di questi nei climi caldi. (Assemblata da immagini da Wikipedia aventi licenza Creative Commons)

Superimposition of a Koppen world climate map with a map of the main slums cores around the world, stressing the prevailing localization of slums in hot climates. (Built with images from Wikipedia having a Creative Commons license)

Diez et al., 2013; Brito Filho, 2014), che a loro volta alimentano approcci di studio nell'ambito più generale della costruzione a basso costo per tali contesti (Ceragioli et al., 1989; Mathews et al., 1995; Wekesa et al., 2010).

Conseguenze dell'abbandono delle coperture tradizionali nei paesi in via di sviluppo

Le leghe metalliche più utilizzate per la produzione delle lastre profilate per coperture sono gli acciai (zincati) e le leghe di alluminio (anodizzate). Le lastre in acciaio sono più resistenti a livello meccanico, ma sono meno durabili. Le lastre in alluminio sono più conduttive, ma questo non produce differenze significative di comportamento termico delle coperture, sia per i modesti spessori in gioco, sia per il fatto che superfici di entrambi i materiali in questione sono, quando lucide, caratterizzate da bassa emissività. È però l'acciaio zincato a dominare il campo nei paesi in via di sviluppo, dato il suo minor costo.

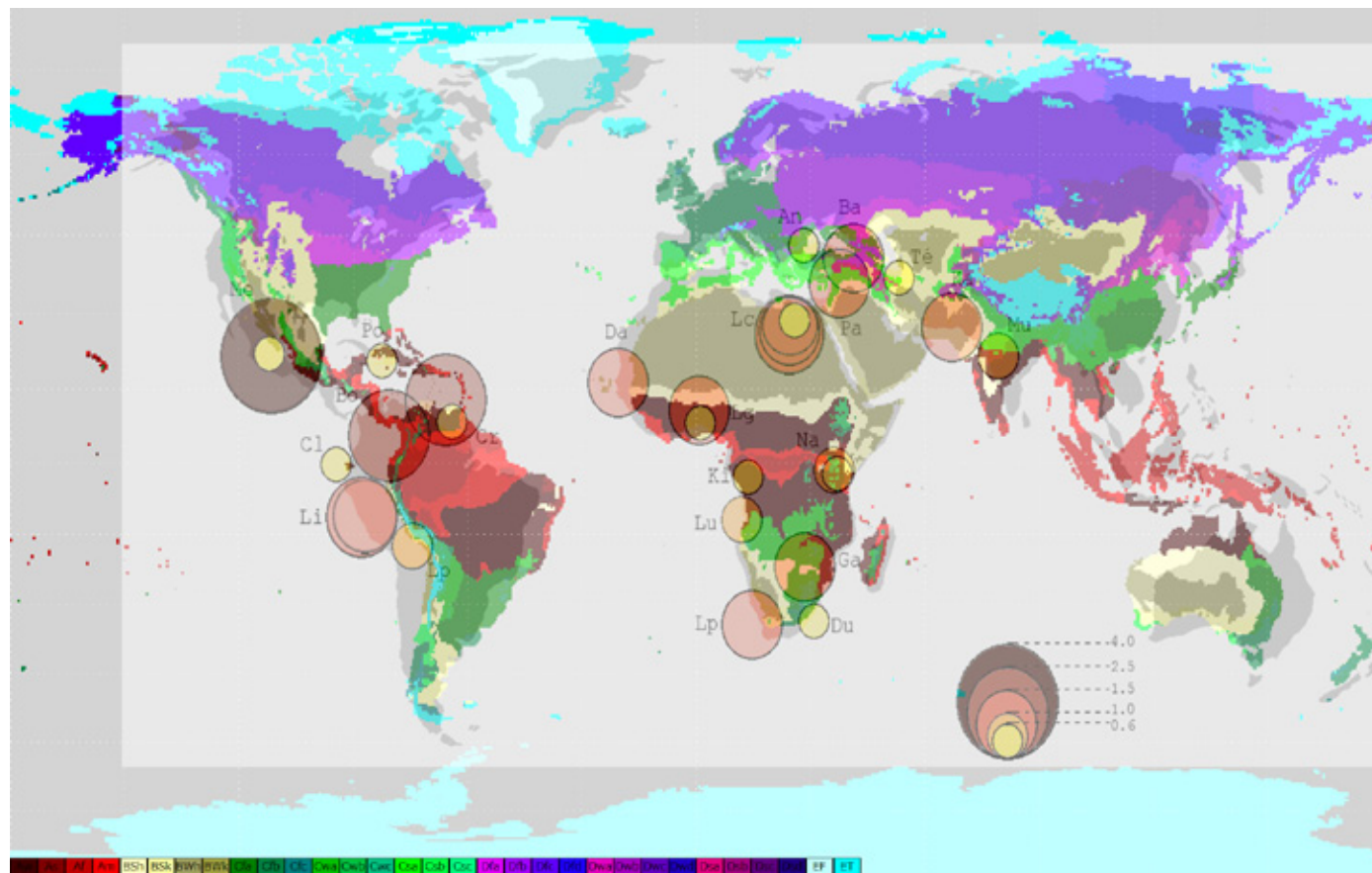
La mutazione tecno-tipologica generata dalla disponibilità di lastre profilate è stata determinata da tre vantaggi funzionali.

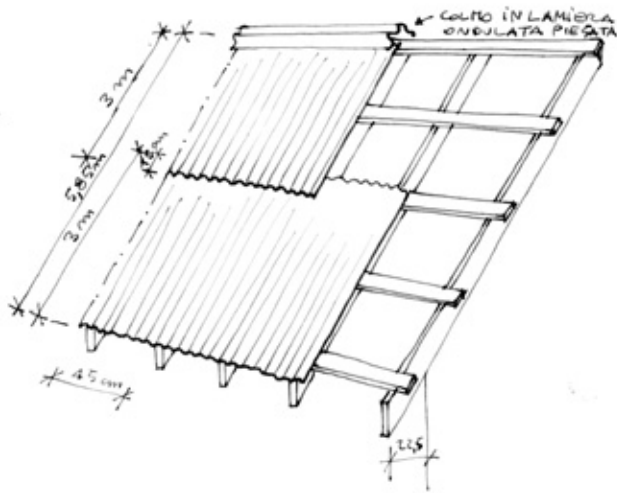
Le leghe metalliche più utilizzate per la produzione delle lastre profilate per coperture sono gli acciai (zincati) e le leghe di alluminio (anodizzate). Le lastre

Il primo è che le lastre profilate, grazie alla buona resistenza a flessione, consentono una consistente spaziatura degli elementi di struttura secondaria su cui si ancorano (gettando le basi per risparmi di materiale). Il secondo è una ragionevole capacità di tenuta all'acqua di pioggia. Il terzo è la rapidità di montaggio.

La spinta esercitata dalle lamiere è stata così forte da dare luogo a mutazioni di interi tipi edilizi; per esempio causando, in numerose zone d'Africa, la mutazione di tipi a pianta circolare (Denyer, 1978; Oliver, 1987) in tipi a pianta rettangolare (Oliver, 1971).

Per le lastre profilate, la soluzione con cui misurarsi è stata costituita, in molte zone del mondo a clima caldo non arido, dalla copertura in paglia (Hall, 1997). Il fatto che le coperture in paglia abbiano avuto la peggio un po' dappertutto non era per niente scontato, perché a fronte di alcuni noti svantaggi, quali la propensione ad ospitare parassiti e la grande quantità di mano d'opera specializzata necessaria alla loro costruzione, esse sono caratterizzate da comportamento igrotermico molto vantaggioso¹. Né era scontato che in climi prevalentemente aridi (in nord-Africa, Medio Oriente, Asia, Centro America) le coperture in





02 | Spaccato assonometrico di una falda di copertura con struttura in legno e chiusura in lamiera ondulata. (Ridisegnato a partire da Batchelder, 1985)
Section view of a wooden-structure, profiled metal sheet roof. (Redrawn from Batchelder, 1985)

lastre profilate prevalessero sulle coperture in terra pressata su struttura in legno, che sono più impegnative dal punto strutturale e costruttivo (Spence et al., 1984; Scudo et al., 1988; Stulz et al., 1988), ma più vantaggiose da un punto di vista termico. Le modalità di realizzazione tuttora prevalenti delle coperture in lastre profilate metalliche per contesti in via di sviluppo si trovano oggi registrate in trattati tecnici disponibili gratuitamente via web. Tra questi si segnalano, per l’Africa subsahariana, le opere generaliste di Dancy (1973), Barchender et al. (1985) e van Winden (1986), e quelle specifiche di Mukeji et al. (1979) e Pokorny et al. (1991), che relativamente ai sistemi di copertura illustrano prevalentemente l’utilizzo di lamiere profilate in configurazioni a strato singolo, supportate da strutture secondarie in legno di agevole realizzazione e non facenti uso di componenti specializzati (Fig. 2).

Implicazioni delle proprietà radiative delle superfici di intercapedine

Nelle architetture neo-vernacolari per contesti a clima caldo, le lamiere sono oggi quasi sempre impiegate come nei succitati testi,

a strato singolo (Fig. 3), nei casi migliori sfruttando l’effetto camino (Fig. 4), o contando sull’effetto barriera dovuto alla bassa emittanza delle lastre metalliche, quando lucide. Questo effetto tende però a ridursi con il tempo, a causa dell’opacizzazione e dell’impolveramento derivanti dall’esposizione agli agenti atmosferici.

Una soluzione idonea ad ovviare a questo stato di cose è quella di sfruttare l’isolamento radiativo in configurazioni ridondanti, in previsione del decadimento funzionale.

Nel caso in cui tutte e due le superfici in una intercapedine siano bassoemissive, la riduzione dell’energia trasmessa per irraggia-

ment is in question and the fact that the surfaces of both kinds of materials, when shiny, are low-emissivity. Anyway, it is steel that rules in developing countries, due to its lower cost.

The mutation generated by the availability of profiled metal sheets has been mainly prompted by three functional advantages. The first one is that they, thanks to their bending strength, make possible to increase the spacing of the secondary structures onto which they are anchored. The second advantage is a reasonable water tightness. The third is construction speed. The allure exerted by profiled sheets has been so strong that it has prompted the mutation of whole building types. For instance, causing, in several zones of Africa, the mutation of circular building plans (Denyer, 1978; Oliver, 1987) into rectangular ones (Oliver, 1971).

ment is in question and the fact that the surfaces of both kinds of materials, when shiny, are low-emissivity. Anyway, it is steel that rules in developing countries, due to its lower cost. The mutation generated by the availability of profiled metal sheets has been mainly prompted by three functional advantages. The first one is that they, thanks to their bending strength, make possible to increase the spacing of the secondary structures onto which they are anchored. The second advantage is a reasonable water tightness. The third is construction speed. The allure exerted by profiled sheets has been so strong that it has prompted the mutation of whole building types. For instance, causing, in several zones of Africa, the mutation of circular building plans (Denyer, 1978; Oliver, 1987) into rectangular ones (Oliver, 1971).

Consequences of the dismissal of traditional roofs in developing countries

The most used metal alloys for the production of profiled metal sheets for roofs are steels (hot-dip galvanized) and aluminium alloys (anodized). Steel sheets are stronger and can be anchored to more widely spaced – and therefore cheaper – secondary structures, but are less durable. Aluminium sheets are more conductive, but in roofs have behaviour which is a very similar to that of steel, both due to the small thick-

03 |



04 |



03 | Residenza in un compound a Lusaka, Zambia, nella stagione delle piogge. (Foto: Sustainable Sanitation Alliance, licenza Creative Commons)
House in a compound in Lusaka, Zambia during the rainy season (Photo: Sustainable Sanitation Alliance, Creative Commons license)

04 | Residenza con giardino nella prima periferia di Livingstone, Zambia, nella stagione secca. (Foto: Gian Luca Brunetti, licenza Creative Commons)
House with a garden in the near periphery of Livingstone, Zambia, during the dry season (Photo: Gian Luca Brunetti, Creative Commons license)

considered in that context (Synnefa et al. 2012). The second one is aimed to the control of the inner environmental conditions of buildings. In that case, the term “cool roof” is used for ventilated, radiant-barrier-equipped roofs having a low-absorptance and high-emittance upside.

The studies on the thermal behaviour of cold roofs include on one hand studies targeting specific functional aspects, like solar reflectance (Suehrcke et al., 2008), the whole radiation properties (Shen et al., 2011), and the effects of deck-ventilation (Lee et al., 2009; Tong et al., 2014); and on the other hand, defining integrated approaches and support design optimization (La Roche et al. 2002, 2012; Laia et al., 2008; Gentle et al., 2011). The results of the studies on cold roofs produce consequences on researches aimed to specific climatic and so-

mento è generata dall'effetto cumulativo delle due barriere radianti. Tale effetto cumulativo è modesto quando le due superfici siano di emittanza bassa – cosa che solitamente è propria dei fogli/barriere radianti per uso edilizio, tra l'altro molto costosi per gli standard dei paesi in via di sviluppo – ma è alta quando le superfici siano di emittanza media – cosa che è propria di soluzioni quali quelle, più economiche, ottenibili con finitura con vernice riflettente all'alluminio². Ne deriva che quando l'emittanza di una superficie è bassa, ai fini dell'efficienza di investimento, è preferibile che ne sia utilizzata una sola³, mentre quando essa è media, è più efficiente utilizzarne due.

La soluzione caratterizzata da due superfici a media emissività si configura quindi per più motivi più vantaggiosa della prima per i contesti in via di sviluppo: perché è più economica, perché sfrutta in modo più efficiente i materiali impiegati e perché la ridondanza funzionale le conferisce maggiore affidabilità prestazionale nel tempo.

Comune alle due soluzioni e alle configurazioni “a tetto freddo” in generale è il vantaggio di prestarsi all'impiego sia nelle nuove costruzioni, sia nelle riqualificazioni edilizie, potendo esso anche avvenire per riconversione di coperture a strato singolo; nel caso più economico dei quali – quello qui preso in considerazione - la costruibilità e il basso costo di intervento vengono a dipendere in modo importante dalle soluzioni adottate per la costruzione dei soffitti o controsoffitti (Fig. 5).

Metodologia di indagine

Simulazioni termiche in regime dinamico sono state effettuate dall'autore con l'ausilio della nota piattaforma di simulazione a elementi finiti ESP-r. Sono stati presi in considerazione casi di

05 | Spaccato assometrico di una copertura in lamiera profilata ventilata nell'intercapedine del soffitto. Legenda. 1. trave di colmo. 2. Sostegno intermedio. 3. Parete portante. 4. Dormiente. 5. Travetto inclinato. 6. Arcareccio. 7. Lamiera ondulata. 8. Listelli corti spazati. 9. Lamiera piegata. 10. Tavolato sottile. 11. Rete antiinsetti

Section view of a profiled metal sheet roof ventilated in the ceiling cavity.
Legend. 1. Ridge beam. 2. Post. 3. Bearing wall. 4. Plate. 5. Rafter. 6. Purlin. 7. Profiled sheets. 8. Short, spaced listels. 9. Bent flashing. 10. Decking. 11. Anti-insect netting

06 | Configurazione geometrica dei modelli simulati con ESP-r. Da sinistra a destra: copertura a strato semplice su spazio aperto; copertura ventilata su cellula edilizia con pareti massive e finestre piccole; copertura ventilata su cellula con pareti leggere e finestre grandi

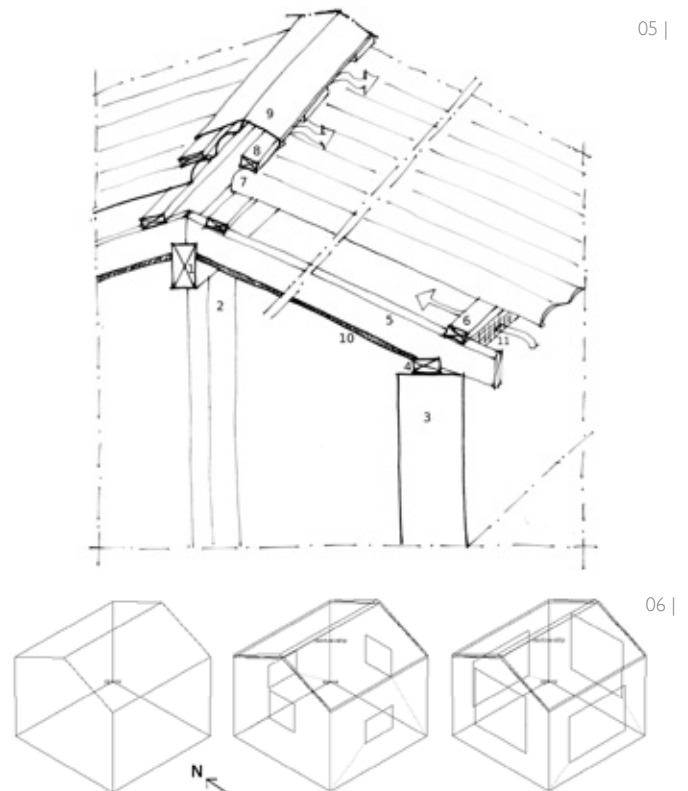
Geometric configuration of the models simulated with ESP-r. From left to right: single-layer roof on an open space; double-layer, ventilated roof on a building cell with massive masonry walls and small windows; double-layer, ventilated roof on a building cell with light wooden walls and large windows

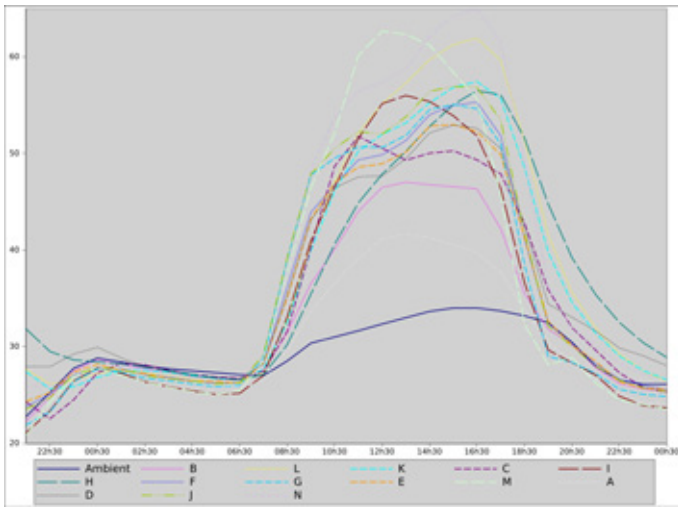
coperture in climi caldo-secchi (si riportano qui risultati relativi al clima di Lodwar, nord-ovest del Kenya, prevalentemente caldo-secco) e in climi caldo-umidi (si riportano dei risultati relativi al clima di Singapore, caldo-umido).

Sono state prese in considerazione tre situazioni architettoniche: copertura su spazio aperto, copertura su edificio massivo con finestre piccole (per climi caldo-secchi) e copertura su edificio leggero con finestre grandi (per climi caldo-umidi); e su questa base sono state esaminate configurazioni a due falde su cellule edilizie dalla dimensione planimetrica di 3 x 3 m, con dislivello tra linea di gronda e colmo di 70 cm e con colmo disposto in direzione Est-Ovest (Fig. 6).

Le soluzioni a lastra singola sono state testate attraverso modelli monozonali e quelle ventilate attraverso modelli bi-zonali, dedicando una zona al vano e una all'intercapedine della copertura. Le simulazioni sono state svolte in fluttuazione termica libera e in condizioni di ventilazione passiva sia relativamente al vano (per quanto dovuto alle finestre), sia alla copertura (per quanto dovuto alle aperture al colmo, all'altezza di gronda e ai bordi) utilizzando una rete nodale di ventilazione, adottando time-step orari e ipotizzando una schermatura completa della componente solare diretta nella zona-vano (quando confinata).

Sono state analizzate le implicazioni di coperture a strato singolo e doppio, leggere e massive, termoisolate e non, ventilate e





non, con superfici di intercapedine altoemissive, bassoemissive o medioemissive, e con estradosso bianco o non. Informazioni sulle stratificazioni considerate sono riportate nella legenda in Fig. 7.

L'indicatore utilizzato per misurare il livello di prestazione delle configurazioni è stato quello della temperatura superficiale di intradosso (minore la temperatura, migliore la prestazione).

Simulazione di coperture su spazi aperti. Risultati e discussione

a più alte prestazioni è quella della lamiera lucida semplice, a strato singolo (Fig. 6). Anche l'alta conduttività delle lamiere in ambiente aperto è emersa essere un vantaggio, perché essa, data la potenzialmente abbondante ventilazione possibile all'intradosso in assenza di pareti, favorisce la dissipazione del calore per convezione da vento. La soluzione del termoisolamento e quella della ventilazione intra-falda sono risultate invece peggiori ai fini del contenimento delle temperature all'intradosso.

For single-layer metal sheet roofs, the solution to beat has been constituted, in several non-arid climate zones of the world, by thatch roofs. But that thatch roofs had to succumb was not to be taken for granted, because, against some well-known disadvantages, like the parasites risk and the substantial need of skilled labour, they are characterized by a very advantageous hygro-thermal behaviour¹. Neither it was to be taken for granted that in several dry climates (in North Africa, Middle East, Asia, Central America) profiled metal roofs prevailed on roofs made of wooden-supported compressed earth, which are more demanding from a structural and constructive point of view (Stulz et al., 1988; Scudo et al., 1988), but more advantageous at thermal level. The today still prevalent construction strategies for profiled metal sheet

roofs in developing countries are recorded in technical treatises which are made available for free via web. Among those, for Sub-Saharan Africa, the comprehensive works by Dancy (1973), Barchender et al. (1985) and van Winden (1986) are notable, together with the more specific ones by Mukeji et al. (1979) and Pokorny et al. (1991), which with regards to roof systems prevalently describe the use of profiled metal sheets in single-layer configurations, supported by easily-buildable wooden structures assembled without specialized components (Fig. 2).

Implications of the radiative properties of cavity surfaces

In neo-vernacular architectures for hot-climate contexts, profiled metal sheets are today most often used, like in the above-cited references, in

- 07 | Esempio di andamento delle temperature prodotte da varie configurazioni di copertura su spazio aperto simulate in relazione al 13 luglio e al clima di Lodwar (Kenya).
 Legenda. A. Tegoloni in ferrocemento con controsoffitto ventilato e superfici di intercapedine a media emissività. Strati (dal basso): tavolato (0,5 cm), vernice rifl., interc. (6 cm), vernice rifl. (emiss: 50%), tegolone (2 cm; rifl.: 50%). B. Lastra in acciaio zincato lucida (emiss.: 20%; rifl.: 80%). C. Copertura ventilata in falda in lastre di acciaio zincato. Strati: lastra (2 mm), interc. (6 cm), lastra. D. Tegoloni in ferrocemento termoisolati all'estradosso con conglomerato di segatura di legno e cemento e ventilata nel controsoffitto avente superfici a media emissività. Strati: tavolato (0,5 cm); vernice rifl. (emiss: 50%); interc., vernice rifl., tegolone (2 cm), conglomerato (10 cm; rifl.: 20%). E. Copertura ventilata in falda in pannelli di legno, superficie di intercapedine inferiore a bassa emissività e manto bianco. Strati: tavolato (0,5 cm), vernice rifl., interc. (6 cm), tavolato, manto (rifl.: 80%). F. Copertura in paglia (20 cm). G. Copertura ventilata in falda in pannelli di legno e manto bianco. Strati: tavolato (0,5 cm), interc. (6 cm), tavolato, manto (rifl.: 80%). H. Tegoloni in ferrocemento (2 cm) termoisolati all'estradosso con conglomerato di segatura di legno e cemento (10 cm; rifl.: 20%). I. Tegoloni in ferrocemento (2 cm). J. Configurazione "a tetto freddo" con soffitto in tavolato e lamiera verniciata di bianco all'estradosso. Strati: tavolato (0,5 cm), vernice rifl., interc., lastra lucida all'intradosso e bianca all'estradosso (rifl.: 80%). K. Configurazione ventilata in falda in tavolato e lamiera profilata in acciaio zincato lucida. Strat: tavolato (0,5 cm), interc. (6 cm), lastra (2 mm; emiss: 20%; rifl: 80%). L. Configurazione "a tetto caldo" moderatamente termoisolata + manto bianco. Strat: tavolato (0,5 cm), pannello lana minerale (3 cm), manto (rifl.: 80%). M. Lamiera di acciaio arrugginita (emiss.: 80%; rifl.: 20%). N. Configurazione "a tetto freddo" termoisolata. Strati: tavolato (0,5 cm), pannello fibra legno bassa densità (10 cm), vernice rifl. (emiss.: 50%) su carta, interc. (6 cm), lastra (emiss.: 20%; rifl: 80%), vernice bianca (rifl.: 80%). O. Copertura in terra pressata. Strati: tavolato in legno (3 cm), manto impermeabile, terra (30 cm). P. Configurazione ventilata in falda in tavolato sottile e lamiera profilata arrugginita finita con vernice riflettente all'intradosso. Strati: tavolato (0,5 cm), interc. (6 cm), vernice rifl. (emiss.: 50%), lastra (emiss.: 80%; rifl: 20%). Q. Configurazione ventilata in falda in tavolato sottile e lamiera profilata in acciaio arrugginita. Strati: tavolato (0,5 cm), interc. (6 cm), lastra (emiss.: 80%; rifl.: 20%).

Example of soffit surface temperatures induced by various roof configurations covering an open space in June 13th, Lodwar climate (Kenya).

Legend. A. Ferrocement tiles with ventilated hanged ceiling and mid-emissivity cavity surfaces. Layers (bottom-up): wooden decking (0,5 cm); reflective paint (emis. 50%); cavity (6 cm); reflective paint; tile (2 cm; ref.: 50%). B. Galvanized metal sheet roof (emis.: 20%; rifl.: 80%). C. Deck-ventilated roof built with galvanized metal sheets. Layers: sheet (2 mm), cavity (6 cm), sheet. D. Ferrocement tiles insulated at the upside with mortar of sawdust and cement, and ventilated in the hanged ceiling finished with reflective paint. Layers: decking (0,5 cm); reflective paint (emis.: 50%); cavity, reflective paint; tile (2 cm); insulating mortar (10 cm; rifl.: 20%). E. Deck-ventilated roof built with wooden deckings, low-e lower cavity surface and white cover. Layers: decking (0,5 cm), reflective paint, cavity (6 cm), decking, cover (refl.: 80%). F. Thatch roof (20 cm). G. Deck-ventilated roof built with wooden deckings and white cover. Layers: decking (0,5 cm), cavity (6 cm), decking, cover (refl.: 80%). H. Ferrocement tiles (2 cm) insulated at the upside with mortar of sawdust and cement (10 cm; rifl.: 20%). I. Ferrocement tiles (2 cm). J. Deck-ventilated roof built with a wooden ceiling and galvanized sheets painted white at the upside. Layers: decking (0,5 cm), reflective paint, cavity, metal sheet, white paint (refl.: 80%). K. Deck-ventilated roof built with a wooden ceiling and galvanized sheets. Layers: decking (0,5 cm), cavity (6 cm), metal sheet (2 mm; emis.: 20%; rifl: 80%). L. "Hot roof" configuration, lightly insulated, and with white cover. Layers: decking (0,5 cm), mineral wool panel (3 cm), cover (refl.: 80%). M. Rusted steel sheet roof (emis.: 80%; rifl: 20%). N. Deck-ventilated roof with thermal insulation. Layers: decking (0,5 cm), low-density fibre wool panel (10 cm), reflective paint (emis.: 50%) on paper, cavity (6 cm), metal sheet (emis.: 20%; rifl.: 80%), white paint (refl.: 80%). O. Compressed earth roof on wood deck (3 cm). P. Deck-ventilated roof built with decking of rusted steel sheets and cavity finished with reflective paint. Layers: decking (0,5 cm), cavity (6 cm), reflective paint (emis.: 50%), metal sheet (emis.: 80%; rifl.: 20%). Q. Deck-ventilated roof built with decking and rusted steel sheets. Layers: decking (0,5 cm), cavity (6 cm), metal sheet (emis.: 80%; rifl.: 20%).

Nelle configurazioni a strato singolo la bassa emissività delle lastre lucide è risultata vantaggiosa sia all'estradosso, perché riduce il guadagno termico derivante dall'emissione infrarossa, dal cielo, sia all'intradosso, perché svolge la stessa funzione nei confronti dell'infrarosso emesso dal terreno; così come è risultata vantaggiosa l'elevata riflettività solare delle lastre, che riduce il guadagno solare.

Vantaggioso è anche risultato l'impiego di massa termica, come si può vedere in particolare dalle buone prestazioni della copertura in terra pressata. Tale massa non ha però solo generato l'effetto di abbassare le temperature massime, ma anche quello di alzare le temperature minime, notturne; cosa che in climi impegnativi da sola può non bastare ad assicurare condizioni di comfort.

Simulazione di coperture su spazi confinati. Risultati e discussione

Il comportamento termico delle coperture su ambienti confinati (vani) è risultato sensibilmente diverso da quello riscontrato per gli spazi aperti. La bassa emittanza all'intradosso delle falde in lamiera metallica semplice si è rivelata uno svantaggio, poiché ostacolante lo scambio radiante con il pavimento e le pareti; che è, nel caso specifico, vantaggioso, essendo quelle superfici caratterizzate da temperature inferiori a quella ambientale. E neanche l'alta conduttività delle lamiere è risultata essere un vantaggio per la dissipazione convettiva all'intradosso, poiché la quantità di ventilazione che si verifica in ambienti confinati è decisamente minore di quella ottenibile in spazi aperti.

Ne è risultato che per gli spazi confinati le coperture non ventilate, a strato singolo, hanno fornito prestazioni poco soddisfacenti; cosa particolarmente evidente nel caso delle situazioni caratterizzate da maggiore conduttanza all'involucro (Figg. 8-9). La configurazione a più basse prestazioni in assoluto è risultata essere – senza sorpresa – quella più diffusa negli *slum* di un po' tutto il mondo, costituita da lamiera a strato singolo arrugginita o finita con vernici ordinarie (e quindi ad alta emissività) non chiare⁴.

Insufficienti a livello prestazionale sono risultate essere anche le soluzioni non ventilate moderatamente termoisolate.

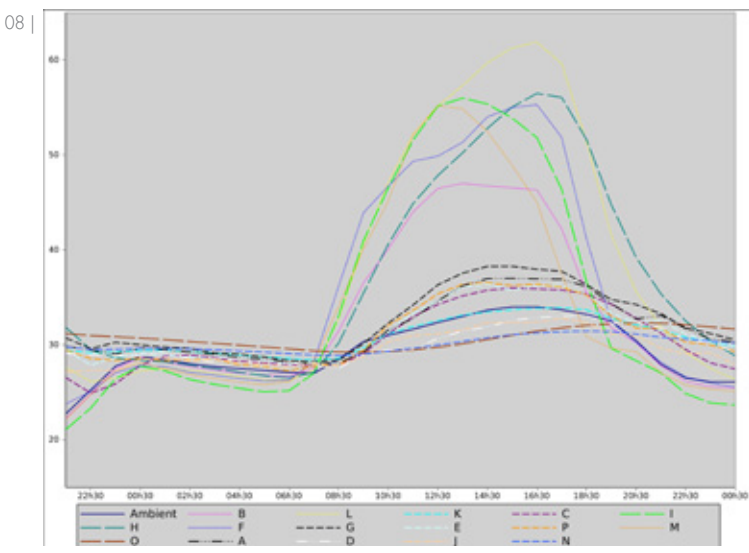
Molto vantaggioso anche per le situazioni confinate in clima caldo-secco ha invece dimostrato di essere l'isolamento capacitivo generato dalla massa termica in terra pressata; ed eccellenti per i climi caldo-umidi si sono confermate le prestazioni delle coperture in paglia.

Il dato complessivamente più interessante che le prove hanno segnalato è il ruolo fondamentale della ventilazione intra-falda

single-layer configurations (Fig. 3); and only in best cases they are used exploiting stack effect (Fig. 4) or relying on the radiant barrier which is formed by the sheets when they are shiny. But that barrier effect tends to fade with time, due to the opacification and dusting deriving from the exposure to weather.

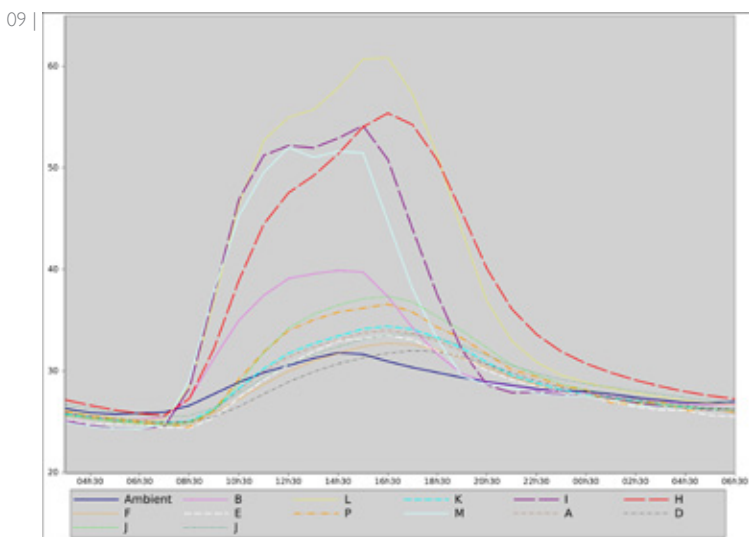
A solution which is suitable for obviating this state of things is that of exploiting radiative insulation in redundant configurations, in anticipation of the functional decay.

In the case in which both surfaces facing a cavity are low-emittance, the reduction of energy transmitted by radiation through the cavity is due to the cumulative effect of the two radiant barriers. But that cumulative effect is small if the two surfaces already have a very low emittance - which is usually typical of the low-



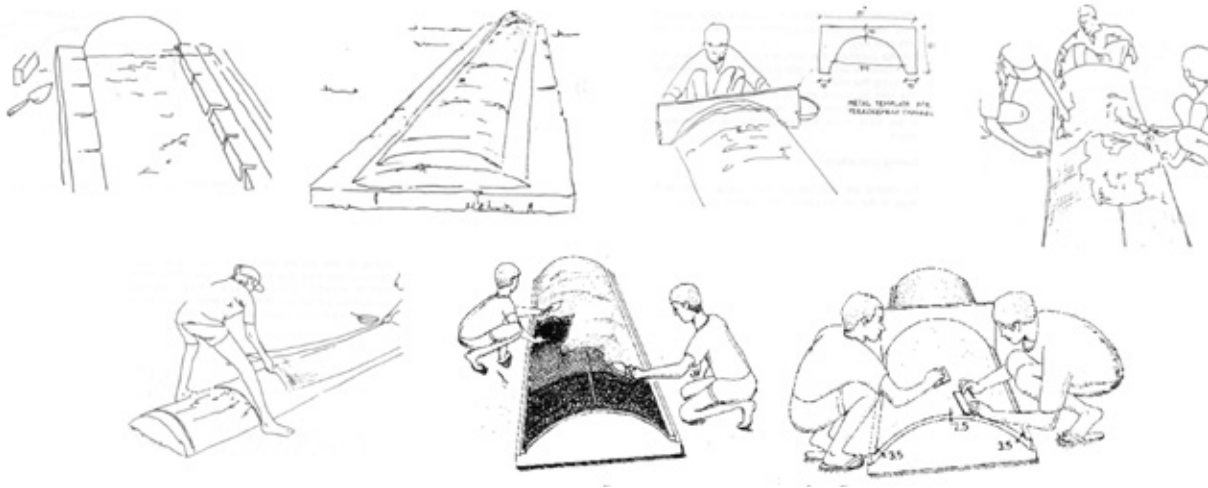
08 | Esempio di andamento delle temperature prodotte da varie configurazioni di copertura su una cellula edilizia massiva con finestre piccole simulate in relazione al 13 luglio e al clima di Lodwar (Kenya). Legenda: vedi Fig. 7

Example of soffit surface temperatures induced by various roof configurations covering a massive building cell with small windows in July 13th; Lodwar climate (Kenya). Legend: see Fig. 7



09 | Esempio di andamento delle temperature prodotte da varie configurazioni di copertura su una cellula edilizia "leggera" con finestre grandi simulate in relazione al 7 luglio e al clima di Singapore. Legenda: vedi Fig. 7

Example of soffit surface temperatures induced by various roof configurations covering a light building cell with large windows in July 7th; Singapore climate. Legend: see Fig. 7



10 | Sintesi delle operazioni necessarie alla produzione dei tegoloni in ferrocemento secondo il metodo utilizzato dal Centro Auroville, India. Da sinistra a destra e dall'alto in basso: 1. preparazione del letto di posa della forma inferiore in materiale murario e malta di calce; 2. costruzione della forma inferiore e finitura con malta di calce; 3. profilatura della forma inferiore con una sagoma di legno; 4. cospargimento di olio per il disarmo sulla forma inferiore e applicazione del primo strato di malta di cemento; 5. posizionamento della rete in acciaio (previo stiramento) e degli eventuali tondini longitudinali; 6. applicazione del secondo strato di malta di cemento; profilatura dello strato di malta con una seconda sagoma di legno. (Disegni 1-5: da Baetens, 2004. Disegni 6, 7: da UNCHS-Habitat and Auroville Building Centre (2001), *Ferrocement Channels*, 2001: poster)

*Synthesis of the operations for producing ferrocement tiles following the method devised by the Auroville Centre, India. From left to right and top-down the following phases are shown: 1. preparation of the bed for the construction of the masonry formwork; 2. construction of the masonry formwork with lime mortar and finishing; 3. profiling of the mortar with a wooden silouhette; 4. oiling of the mortar and application of the first layer of cement mortar; 5. placement of the steel wire (after stretching it) and the optional steel rebars; 6. application of the second layer of cement mortar, and shaping of the mortar with a second wooden silouhette. (Drawings 1-5: from Baetens (2004). Drawing 6, 7: from UNCHS-Habitat and Auroville Building Centre (2001), *Ferrocement Channels*, 2001: poster)*

in combinazione con configurazioni radiative ridondanti ai fini della dissipazione termica delle coperture sugli ambienti confinati; in combinazione, più specificamente, con una alta riflettanza solare all'estradosso e con la presenza di strati basso- o medio-emissivi nell'intercapedine. La ridondanza rende questa

emittance radiant barriers in foil for buildings, which by the way are very costly for the standards of developing countries - but it is substantially higher when the surfaces are mid-emittance - which is typical of solutions like the (lower-cost) ones which can be obtained by applying aluminium paint². It follows that when the emittance of a barrier-in-foil is very low, for investment efficiency it is preferable if only one barrier is used³, whilst when it is mid-level, it is preferable if two are used. The solution characterized by two mid-emissivity surfaces is for several reasons more advantageous for low-income countries that that of adopting one low-emittance surface: because it is lower cost, because it exploits more efficiently the materials that it is made of, and because its functional redundancy assures performances which are more stable in time.

Common to the two solutions and the "cold" configurations in general is the advantage of being suitable for both the use in new buildings and building rehabilitations, because it can take place by modification of existing single-layer roofs. In the framework of the lowest-cost strategy of intervention - the one that is here taken into account - constructability and low cost are markedly dependant from the technical solutions adopted to construct the ceiling or the hanged ceiling (Fig. 5).

Assessment methodology

Free-floating thermal simulations have been carried out with the well-known ESP-r finite element simulation platform. Cases regarding hot-dry climates (here reported are some results relative to the prevalently hot-dry climate of Lodwar in north-west-

famiglia di soluzioni "robusta", adeguata a fornire prestazioni di alto livello anche in condizioni di deterioramento funzionale - o di scarsa qualità iniziale - di alcuni anelli della catena dei componenti. Ciò è stato evidenziato dal fatto che più le misure sopra descritte sono risultate operanti sinergicamente nelle configurazioni testate, tanto meno è risultato importante il contributo di resistenza termica degli strati termoisolanti specializzati e dello strato di chiusura intradossale (soffitto o controsoffitto).

La soluzione in assoluto più vantaggiosa a livello termico è risultata essere quella "a tetto freddo" termoisolato, da manuale, che presenta però ben note criticità, costituite dal costo elevato delle barriere radianti ad alte prestazioni e dalla scarsa durata nel tempo sia delle proprietà bassoemissive delle barriere radianti stesse, sia della elevata riflettanza solare delle superfici di estradosso. Alla luce di questo fatto, le soluzioni emerse come complessivamente, olisticamente più vantaggiose in situazioni di fortissima necessità di contenimento dei costi sono da considerarsi quelle ventilate caratterizzate dall'impiego di vernici all'alluminio, che mantengono una prospettiva di vantaggio anche prendendo in conto la necessità di riverniciature periodiche (decennali, ventennali) delle superfici di intercapedine.

ern Kenya) and hot-humid climates (here reported are some results relative to the hot-humid climate of Singapore) have been taken into account. Three architectural configurations have been put to trial: roof over an open air space, roof on a massive masonry building cell with small windows (for hot-dry climates), and roof on a light wooden building cell with large windows (for hot-humid climates). In that framework, building cells sized 3m x 3m have been taken into account, with a difference in height of 70 cm between ridge and eaves, and with the ridge set along the East-West axis (Fig. 6).

The unventilated solutions have been tested through single-zone models, and the double-layer, ventilated ones have been tested through two-zone models (dedicating one zone to the cell and one to the roof cavity). The

simulations have included passive ventilation for both the cell (due to windows) and the roof cavity (due to the openings at the ridge and eaves), modelled through a nodal flow network, at hourly time-steps, and imposing the hypothesis of a thorough shading of the direct solar component (for cells enclosed by walls).

The implications of single- and double-layer roofs have been assessed, as well as light and massive, insulated and uninsulated, ventilated and unventilated, with high-emittance, single-layer-low-emittance, and double-layer-mid-emittance surface cavities, and with a white or untreated upside. (Information about the considered roof layers is reported in the legend to Figure 7.)

The indicator that has been used to measure the configuration performances has been that of the soffit sur-



08 | Da sinistra a destra e dall'alto in basso: sagome di legno per la profilatura dei tegoloni all'intradosso e all'estradosso; profilatura della forma inferiore; vista del sito di esercitazione durante una pausa; dettaglio dei tegoloni durante l'applicazione del conglomerato di segatura e cemento all'estradosso. (Foto: Gian Luca Brunetti, licenza Creative Commons)

From left to right and top-down: wooden silhouettes for shaping the tiles; shaping of the masonry formwork; the workshop site during a break; detail of the tiles during the application of the sawdust and cement mortar at the upside of the tiles. (Photo: Gian Luca Brunetti, Creative Commons license)

Considerazioni sulla soluzione di nicchia costituita dai tegoloni in ferroceamento

seggi in molti paesi in via di sviluppo) per le cassaforme.

Manuali generalisti come quelli Van Lengen (1986) e Stulz et al. (1988) descrivono versioni non ventilate di tali soluzioni. Nelle simulazioni, è stata la configurazione dei tegoloni ventilati nell'intercapedine intra-falda e termoisolati all'estradosso a rivelare buone prestazioni a copertura di ambienti confinati, mentre la configurazione ventilata non termoisolata si è dimostrata ottimamente performante a copertura di spazi aperti⁵. Nelle configurazioni non ventilate, i tegoloni in ferroceamento non hanno invece dato prova buona. Questo suggerisce che la funzione del soffitto o controsoffitto sia essenziale per lo sfruttamento delle potenzialità di queste soluzioni.

L'autore ha verificato le modalità di produzione di questi componenti nell'ambito di un corso per trasferimento di *know-how* che ha avuto luogo nel 2012 presso la scuola *Youth Community Training Centre (YCTC)* di Livingstone, Zambia, nell'ambito del

Un aspetto particolarmente interessante delle soluzioni di copertura in tegoloni di ferroceamento è che esse possono non richiedere l'impiego di legno (che scar-

face temperature (the lower the temperature, the better the performance).

Roofs on open spaces. Results and discussion

The results regarding roofs on open spaces signal, counterintuitively, that the most performant solution is that of a single-layer shiny roof (Fig. 6). Even the high conductivity of metal sheets in those cases has resulted to be an advantage, because, due to the potentially abundant ventilation at the underside (allowed by the absence of walls) it favours heat dissipation by wind. The solutions of thermal insulation and deck-ventilation are on the contrary resulted to be disadvantageous for keeping underside roof temperatures low over open spaces.

In the single-layer configurations, the low emittance of the shiny sheets has resulted to be an advantage at both

the upside and the underside, probably because it reduces the thermal gain deriving from both the infra-red emission from the sky and the ground. The high reflectivity has resulted to be useful as well, because it reduces solar gain.

Thermal mass has shown to be advantageous as well. This can be especially noted in the case of the roof made of compressed soil on a wooden structure. However, that mass had not only the effect of lowering maximum temperatures, but also that of increasing minimum, nightly ones, which in demanding climates may not be sufficient to assure comfort levels.

Roofs on rooms. Results and discussion

The thermal behaviour of roofs on rooms has turned out to be very different from that which has been re-

progetto *Learning by Doing*, finanziato con fondi da bando CA-RIPL0 e coordinato dalla prof.ssa Lidia Diappi del Politecnico di Milano. La soluzione produttiva che è stata adottata è quella perfezionata dall'Auroville Building Centre (Tamil Nadu, India), che prevede: 1) l'impiego di forme inferiori realizzate con materiale murario e calce aerea; 2) l'eliminazione delle casseforme grazie all'utilizzo di sagome per la profilatura manuale degli estradossi di forme e tegoloni; 3) la realizzazione dell'armatura dei tegoloni con reti in acciaio di piccolo calibro in uno o più strati (anche non elettrosaldate) ed eventuali barre longitudinali; 3) l'adozione di una miscela di conglomerato ricca, formata da una parte di cemento e due di sabbia in volume (Fig. 10).

La produzione dei tegoloni è avvenuta con dovizia di mezzi (elevato spessore - 3 cm -, doppia armatura in rete di acciaio, toncini di acciaio posizionati sia alle imposte, sia in chiave) perché questi, per motivi didattici, dovevano essere messi in opera a soli cinque giorni dal posizionamento sulle forme. La soluzione tecnologica è stata riscontrata flessibile e di facile approccio. L'esperienza ha però anche fatto emergere come necessità importanti la limitazione dello spessore dei tegoloni e della quantità di cemento da impiegarsi; che a loro volta suggeriscono una riduzione delle luci massime, la definizione di misure aggiuntive per aumentare la tenacità dell'amalgama (per esempio mediante addizione di fibre) e il livello di protezione delle armature dalla corrosione, e la programmazione di tempi di maturazione adeguatamente lunghi.

corded for open spaces. The low emittance of the underside of single-layer metal sheet roofs has shown to be a disadvantage, hindering the radiant exchange with walls and floor; which in the specific case would be advantageous, because the temperatures of those surfaces are lower than the ambient one. Neither the high conductivity of metal sheets has proved to be an advantage for the dissipation of heat at the roof underside, because in rooms the quantity of ventilation that takes place at the roof underside is substantially lower than that which can be obtained in open spaces.

As a result, on rooms unventilated roofs have produced unsatisfactory performances; which is particularly evident in situations characterized by high envelope conductance (Fig. 8-9). The less performant configuration has resulted to be - unsurprisingly - the

commonest one in the slums all over the world, constituted by single-layer rusted or painted (and therefore high-emittance) steel sheets⁴.

Particularly insufficient at performance level have proven to be the moderately-insulated non-ventilated solution.

The capacitive insulation created by the thermal mass in the compressed earth roof has instead proven to be very beneficial in hot-dry climates; and thatch roofs have confirmed to be unsurpassed in hot-humid climates.

The most interesting information that these trials on roof for rooms have stressed is the fundamental role of deck-ventilation in combination with redundant radiative configurations for the dissipation of heat; more specifically, in combination, with a high solar reflectance at the upside and with low or mid-emittance layers in the venti-

NOTE

¹ Le vantaggiose prestazioni termiche delle coperture in paglia sono dovute al fatto che esse sono nello stesso tempo caratterizzate da trasmittanza termica molto bassa, bassa permeabilità all'acqua e alta permeabilità all'aria e al vapore.

² In prima approssimazione: una superficie dall'emissività pari al 10% (bassa) affacciata su un'intercapedine darà luogo a una trasmissione radiativa pari al 10% di quella massima possibile (di un corpo nero ideale). Due superfici dall'emissività del 10% sulle facce dell'intercapedine daranno luogo a una trasmissione del 10% del 10%, ossia dell'1%: un aumento di prestazione del 9% a seguito di un aumento del 100% dei mezzi impiegati. Due superfici affacciate di emissività pari al 50% (media) daranno luogo a una trasmissione radiativa pari al 50% del 50%, e dunque al 25%: un aumento di prestazione del 25% a seguito di un aumento del 100% dei mezzi.

³ In quella situazione non importa molto su quale faccia dell'intercapedine la superficie a bassa emissività sia posizionata: l'effetto barriera da essa operato ha luogo sia in assorbimento, sia in emissione.

⁴ Il caso dell'utilizzo di lamiere finite con vernici è frequente, perché aumenta la durabilità delle lamiere stesse. Ma tali vernici usualmente non sono bassoemissive e ciò va a discapito dell'isolamento radiativo.

⁵ A livello costruttivo, lo spazio per la ventilazione in falda può essere ottenuto per mezzo di una soffittatura ancorata direttamente alla struttura secondaria (Fig. 5) o di un controsoffitto appeso.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio sentitamente l'amico Brother Yosep Pai per il prezioso supporto datomi nelle attività svolte presso il Youth Community Training Centre a Livingstone.

lated cavity. Redundancy makes that lineage of solution robust, adequate to produce high-level performances even in conditions of functional deterioration (or poor initial quality) of some units in the chain of components. This has been highlighted by the fact that the more the cited devices have been combined, the less the contribution of specialized thermal insulation layers and of the ceiling has resulted to be important for performances.

The most beneficial solution has resulted to be that of the ordinary, complete "cold roof" one, which however presents the well-known criticalities constituted by a high cost of high-performance radiant barriers and the low reliability of both the low-e surface properties and the high solar reflectance of the upside. For this reason, the solutions which have emerged as the most advantageous may be con-

sidered the ones based on the use of aluminium paint, which maintains a perspective of benefit even considering the necessity of re-painting the cavity surfaces at regular intervals (of the order of 10 or 20 years).

Considerations on the niche solution constituted by big-size ferrocement tiles

A particularly interesting aspect of the solutions based on big-size ferrocement tiles is that they do not require the availability of wood (which is scarce in many developing countries) for the construction of formworks.

Wide-spectrum handbooks like that of Van Lengen (1986) and Stulz et al. (1988) describe unventilated versions of that solution. In the present trials, it is the configuration of ventilated and insulated ferrocement tiles that has been proven particularly performant

REFERENCES

Araújo Prado, R.T. and Lourenço Ferreira, F. (2005), "Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials", *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 295–300.

Auroville Building Centre and Development Alternatives (1997), *Ferrocement Roofing Channels. Code of Practice for Production and Use*, Technical Report, Auroville (Tamil Nadu, India).

Baetens, T. (2004), *Manufacturing and Specifications of Prefabricated Ferrocement Channels*, Technical Report, Auroville (Tamil Nadu, India), Auroville Building Centre.

Batchelder, D., Caiola, R.E., Davenport, S.W. (1985), *Construction Reference Manual: A Sourcebook for the Use of Local Materials in Construction*, Brattleboro (Vermont, USA), The Experiment Press.

Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A., Pérez-Molina, C., Castro-Gil, M. (2013), "Passive climatization using a cool roof and natural ventilation for internally displaced persons in hot climates: Case study for Haiti", *Building and Environment*, Vol. 59, pp. 116–126.

Brito Filho, J.P., Oliveira Santos, T.V. (2014), "Thermal analysis of roofs with thermal insulation layer and reflective coatings in subtropical and equatorial climate regions in Brazil", *Energy and Buildings*, Vol. 84, pp. 466–474.

Ceragioli, G., Comoglio Maritano, N. (1989), *Note introduttive alla Tecnologia dell'Architettura*, Torino, CLUT.

Dancy, H.K. (1973), *A Manual on Building Construction*, London, Intermediate Technology Publications.

Denyer, S. (1978), *African Traditional Architecture*, London, Heinemann.

Gentle, A.R., Aguilar, J.L.C., Smith, G.B. (2011), "Optimized cool roofs: Integrating albedo and thermal emittance with R-value", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 91. 95, pp. 3207–3215.

Laia, C.M., Huangb, J.Y., Chioub, J.S. (2008), "Optimal spacing for double-skin roofs", *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 1749–1754.

for rooms, and it is the configuration of ventilated and uninsulated tiles that has excelled in open spaces⁵. In the unventilated configurations, ferrocement tiles have instead not performed well. It follows that the function of the ceiling or hanged ceiling is essential for the exploitation of that solutions.

The author have verified the technique of production of those tiles in a course aimed to know-how transmission which has taken place in 2012 at the *Youth Community Training Centre (YCTC)* in Livingstone, Zambia, in the framework of the project *Learning by Doing*, funded on the basis of a CARIPLO call and coordinated by prof. Lidia Diappi of the Politecnico di Milano. The productive solution that has been adopted has been refined by the Auroville Building Centre (Tamil Nadu, India - Fig. 10), envisaging: 1) the use of masonry material and lime

for fixed formworks; 2) avoidance of the use of formworks thanks to the use of wooden silouhettes to shape the mortar manually; 3) reinforcement of the tiles with light steel wire (possibly chicken wire) plus some optional rebars; 3) the preparation of a rich mortar mix, formed by one part of cement and two of sand, in volume (Fig. 10). The production of the tiles has taken place with abundance of means (huge thickness - 3 cm - steel wire in double layer, additional rebars) because, for class reasons, the tiles had to be put at work after only five days of curing. The technological solution has proven to be flexible and manageable, but some opportunities for improvement have been identified. Those are reductions of the tiles thickness and the amount of cement; which in turn calls for a reduction of maximum spans, the definition of additional strategies

Lee, S., Park, S.H., Yeo, M.S., Kim, K.W. (2009), "An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof", *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 1431–1439.

Mathews, E. H., Richards, P.G., Van Wyk, S.L., Rousseau, P.G. (1995), "Energy Efficiency of Ultra-Low-Cost Housing", *Building and Environment*, Technical Report, Technical Report, Vol. 30, pp. 427–432.

Miranville, F., Hamada Fakra, A., Guichard, S., Boyer H., Praene, J.-P., Bigot D. (2012), "Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: Experimental study from field measurements", *Energy and Buildings*, Vol. 48, pp. 79–90.

Mukerji, K., Whipple, J.H., Escobar, R.C. (1979), *Roof Constructions for Housing in Developing Countries*, Bonn, GTZ.

Oliver, P. (Ed, 1969), *Shelter and Society*, London, Barrie and Jenkins.

Oliver, P. (Ed, 1971), *Shelter in Africa*, London, Barrie and Jenkins.

Pokorny, T., Riegler, F. (1991), *Carpentry for Vocational Schools. A Teacher's Handbook*, Bonn, GTZ.

Scudo, G. and Morfini, L. (1988), *Materiali, clima e costruzione. Tecniche esecutive congruenti ai contesti a clima caldo arido del continente africano*, Milano, Clup.

Shen, H., Tan, H., Tzempelikos, A. (2011), "The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption—An experimental study", *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 573–580.

Stulz, R. and Mukerji, K. (1988), *Appropriate Building Materials: A Catalogue of Potential Solutions*, St. Gallen (Switzerland), SKAT.

Suehrcke, H., Peterson, E.L., Selby, N. (2008), "Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate", *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 2224–2235.

Synnefa, A., Santamouris, M., Livada, I. (2006), "A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment", *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 968–981.

for increasing the tenacity of the mix (for instance through the addition of fibres), additional strategies for protecting the steel wire from corrosion and the possibility of scheduling an adequately longer curing time.

ACKNOWLEDGEMENTS

I'd like to thank heartily my friend Brother Yosep Pai for the precious support given me in the activities I performed at the Youth Community Training Centre in Livingstone.

NOTES

¹ The advantageous thermal performances of thatch roofs are due to the fact they are characterized in the same time by low thermal transmittance, low water permeability and high permeability to air and vapour.

² In first approximation: a surface having an emissivity of 10% (low) facing a

cavity will produce a radiative transmission of about 10% of the highest possible amount of heat (that of an ideal black body). Two surfaces on the opposite sides of the cavity having an emissivity of 10% will produce a transmission amounting to 10% of 10%, that is 1% of the maximum amount possible: an increase of performance of 9% against an increase of 100% of the means employed. Two surfaces on the opposite side of the cavity having an emissivity of 50% will produce a transmission of about 50% of 50%, that is 25%: a performance increase of 25% against an increase of 100% of the means employed. Much better.

³ In that situation it is not very important which face the radiant barrier is on: its barrier effect takes place both in emission and absorption.

⁴ The case of metal sheets finished with paint is frequent for roofs be-

Synnefa, A., Santamouris, M. (2012), "Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The Cool Roofs project", *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 35–41.

Tong, S. and Li, H. (2014), "An efficient model development and experimental study for the heat

transfer in naturally ventilated inclined roofs", *Building and Environment*, Vol. 81, pp. 296–308.

Van Lengen, J. (1987), *Manual del arquitecto descalzo*, Mexico City, Pax Mex Editorial.

Van Winden, J. (1986), *Rural Building*, Vol. 3: *Construction*, Maastricht, Stichting Kongregatie P.I.C.

Wekesa, B.W., Steyn, G.S., Otieno, F.A.O. (2010), "The response of common building construction technologies to the urban poor and their environment", *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 2327–2335.

cause paint increases their durability. But non-low-e paints are ordinarily used, which is detrimental for the radiative insulation.

⁵ At construction level, the space for the deck ventilation may be obtained by the means of a ceiling directly anchored to the secondary structure (Fig. 5), or a hanged ceiling.