

Sviluppo, caratteristiche e applicazioni possibili di malte colorate cool per l'ambiente costruito

On the development, characteristics and possible applications of cool colored mortars for the built environment

Federica Rosso*, Marco Ferrero*, Anna Laura Pisello**

* DICEA, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italia, mail: federica.rosso@uniroma1.it; marco.ferrero@uniroma1.it

** Dipartimento di Ingegneria, Università di Perugia, Via G. Duranti 67, 06125 Perugia, Italia, anna.pisello@unipg.it; franco.cotana@unipg.it

Abstract Al fine di garantire condizioni di comfort termico sia all'interno che all'esterno degli edifici e per contrastare e mitigare fenomeni quali l'Isola di Calore e il riscaldamento globale, sono state messe in atto numerose strategie. Il risparmio energetico è stato identificato come fattore fondamentale per raggiungere tali obiettivi, e in quest'ambito il settore delle costruzioni ha un forte impatto. Una delle strategie per ridurre la domanda di energia e garantire condizioni di comfort agli utenti è costituita dall'utilizzo di materiali cool per l'ambiente costruito. La loro caratteristica principale è quella di riflettere buona parte della radiazione solare incidente, consentendo di mantenere temperature superficiali più basse, mentre meno calore penetra nell'edificio. Questi materiali sono solitamente di colore chiaro (alta riflettanza solare nello spettro del visibile), quindi la loro applicazione in contesti urbani storici non è sempre possibile, poiché vi è la necessità di preservare l'identità del contesto. A tale fine sono stati sviluppati pigmenti che ottimizzano la riflettanza nello spettro infrarosso, pur mantenendo colorazioni diverse dal bianco. Questi pigmenti sono stati solitamente utilizzati in pitture o strati di finitura. Nel presente lavoro, tali pigmenti riflettenti nell'infrarosso, di colore bianco, sono stati studiati sperimentalmente quando aggiunti al mix cementizio direttamente in cantiere, insieme a pigmenti tradizionali colorati. Questo permette di acquistare solo due pigmenti diversi (riflettente nell'infrarosso e tradizionale) e mescolarli in sito per ottenere il colore desiderato. Dopo aver sviluppato alcuni prototipi in laboratorio, ne abbiamo verificato le caratteristiche ottiche e termiche e li abbiamo esposti a una camera climatica, per verificare l'effettivo miglioramento delle stesse rispetto a mix cementizi tradizionali. I risultati dimostrano che questi materiali, applicabili nell'involucro edilizio, sono ottimizzati e permettono di mantenere temperature superficiali più basse. Questo studio fornisce quindi dati

d'interesse per i progettisti, sia per costruzioni esistenti sia per edifici di nuova costruzione.

Abstract Multiple strategies are exploited nowadays in order to ensure thermal comfort conditions, both indoor and outdoor, and to mitigate phenomena such as Urban Heat Island and Global warming. Energy saving has been identified as a fundamental factor to achieve these objectives, and the construction sector has a huge potential in this particular field. One of the identified solutions aimed at reducing energy demand while maintaining good comfort conditions for users, is the employment of “cool” materials in the built environment. Their main feature is to reflect a large portion of incident solar radiation, thus they allow keeping lower surface temperatures and less heat penetrates into the building. Cool materials are usually light-colored (they have high reflectance in the visible part of the spectrum), therefore their application in historical urban environment is not always feasible, due to the need to maintain that environment identity. To this aim, colored pigments with optimized reflectance in the infra-red portion of the spectrum have been developed. In the present research, such white-colored infra-red reflecting pigments have been experimentally investigated when added to the cement mix together with traditional colored pigments, directly on site. This methodology permits to just acquire two different pigments (infra-red reflecting white and traditional colored ones) and mix them on site to achieve the desired color and to eventually blend with the historical context. We developed prototypes in lab and verified their thermal-optic characteristics. Then, we exposed them to a climatic chamber to assess the actual improvement of such characteristics with respect to traditional cement mixes. Results confirm the improvement achieved by the considered materials, to be employed for building envelope application, since they maintain lower superficial temperatures. Therefore, this work provides useful information for designers, both for new and existing buildings.

Keywords: involucro edilizio; materiali freschi colorati; risparmio energetico; comfort termico; centri storici.

1. Introduzione

Il consumo di energia da parte dell'uomo appare al giorno d'oggi come una delle maggiori problematiche che richiedono di essere affrontate. È infatti il consumo di energia e la conseguente emissione di anidride carbonica ed altri inquinanti ad essere stata individuata come una delle concause di fenomeni quali il riscaldamento globale e l'isola di calore urbano (*Urban Heat Island*, UHI) [1]. Il riscaldamento

globale causa un progressivo innalzamento delle temperature della superficie terrestre, pari a più di 0.15 °C ogni dieci anni [2]. Nelle aree urbane, le temperature possono raggiungere valori di circa 10°C superiori rispetto alle aree rurali circostanti, andando a formare delle isole di calore urbano (*Urban Heat Island*, UHI) [3]. In particolare, il fenomeno dell'isola di calore influisce negativamente sul benessere termico e sulla salute dei cittadini, impoverendo la qualità dell'aria, esacerbando le ondate di calore [4] e causando ulteriori consumi di energia al fine di raggiungere condizioni di benessere termico all'interno degli ambienti e, di conseguenza, ampliando il fenomeno in un circolo vizioso [5]. L'isola di calore è causata, oltre che dal calore antropogenico come accennato sopra, anche dall'alta percentuale di superfici impermeabili nelle aree urbane, che diminuiscono il fenomeno dell'evapotraspirazione, e dall'alto assorbimento di calore da parte delle superfici urbane stesse [6]. In aggiunta all'aumento di popolazione previsto per il prossimo futuro (+3 miliardi per il 2050, [7]), e la concentrazione della stessa nelle aree urbane, è stato valutato che le porzioni di territorio urbano costruito cresceranno a un ritmo doppio rispetto alla crescita di popolazione [8]: queste previsioni evidenziano l'importanza di trovare delle contromisure per limitare il consumo di energia e aumentare il benessere dei cittadini allo stesso tempo.

In termini di mitigazione dei consumi energetici e mitigazione dell'isola di calore, i materiali cosiddetti "*cool*" (freschi) sono riconosciuti dalla comunità scientifica e dalle istituzioni come una delle soluzioni per fronteggiare le criticità descritte [9]. Questi materiali riflettono un'alta percentuale della radiazione solare incidente e sono così in grado di mantenere temperature superficiali più basse: in questo modo, una minore quantità di calore penetra all'interno dell'edificio, che ha bisogno di meno energia per il raffrescamento per garantire condizioni adeguate di benessere termico agli utenti durante la stagione calda [10]. Questi materiali sono stati considerati per applicazioni in copertura (*cool roofs*, tetti freschi) [11], come involucro esterno dell'edificio [12] e infine come pavimentazione urbana [13]. I materiali cool sono solitamente di colore chiaro, riflettendo nella porzione visibile dello spettro solare (Vis). Questo tuttavia pone dei limiti alla varietà architettonica dell'ambiente costruito, soprattutto per quanto riguarda l'involucro edilizio. Proprio per risolvere questo problema, numerose ricerche si sono concentrate sullo studio di materiali cool colorati, che sono ottimizzati nella parte infrarossa, non visibile, dello spettro solare (IR). Levinson e colleghi hanno sviluppato dei prototipi di tegole *cool* a base cementizia, di colore rosso, marrone, verde e blu [14]. Similmente, Synnefa e colleghi [15] hanno implementato degli strati di rivestimento colorati per tegole in cemento, che sono in grado, quando esposti alla radiazione solare, di mantenere la temperatura superficiale più bassa (-10°C) rispetto ad elementi colorati standard.

Quando l'ambito di intervento è in contesti urbani storici, che caratterizzano tutto il territorio nazionale, ma anche europeo, è indispensabile intervenire tenendo in considerazione il patrimonio presente, come prescritto dalla normativa [16], sia nel caso di edifici esistenti che nel caso di edifici di nuova costruzione, al fine di mantenere e preservare l'identità del luogo. In questo caso, al fianco di un aspetto estetico in accordo con l'intorno, le tecnologie costruttive scelte dal pro-

gettista devono garantire prestazioni e caratteristiche in accordo con le necessità sopra indicate, cioè la riduzione dei consumi e la mitigazione dell'isola di calore. Per questo fine, nel presente studio è descritto lo sviluppo e la caratterizzazione di apposite malte colorate cool a base cementizia, al momento oggetto di un deposito di brevetto da parte degli autori, la cui applicazione sia possibile anche in contesti urbani storici. In particolare, questo materiale è ottimizzato tramite l'aggiunta di pigmenti di colore bianco riflettenti nell'infrarosso e contiene anche pigmenti colorati. Il mix di questi due componenti può essere scelto in base al contesto storico di riferimento e alla colorimetria desiderata, e realizzato in cantiere. Dopo aver sviluppato alcuni prototipi di questo materiale in laboratorio, in diverse colorazioni e con diversa percentuale di pigmenti riflettenti nell'infrarosso, le caratteristiche ottiche e termiche sono state verificate e i prototipi sono stati esposti all'ambiente esterno, per verificare l'effettivo miglioramento delle prestazioni rispetto a mix cementizi tradizionali. La finalità del presente studio è non solo la quantificazione e verifica delle caratteristiche termiche e ottiche dei materiali sviluppati, ma anche l'analisi della prestazione energetica dell'edificio in cui tali materiali sono applicati.

2. Materiali e metodo

Lo studio, sviluppato sperimentalmente, è stato portato avanti tramite i seguenti passaggi: (i) dapprima è stata studiata la composizione dei materiali, e sono stati sviluppati i prototipi; poi (ii) sono stati caratterizzati in laboratorio i prototipi ottenuti; (iii) sono stati scelti due edifici caso di studio, (iv) svolte le simulazioni dinamiche con il software Design Builder e infine (v) svolta l'analisi dei dati ottenuti, per verificare l'efficacia dei materiali considerati nel diminuire le temperature superficiali e ridurre il consumo di energia per il raffrescamento.

Nelle prossime sottosezioni, questi passaggi sono spiegati più approfonditamente.

2.1 Materiali e loro caratterizzazione

La scelta del materiale oggetto dello studio deriva dall'osservazione di quelli che sono i colori preponderanti nei centri storici delle città italiane per quanto riguarda gli involucri degli edifici esistenti. I colori principali sono il rosso, il bianco, il grigio. Questi colori, tolto il caso del colore bianco, quanto più sono saturi quanto più implicano una bassa riflettanza solare nella porzione visibile dello spettro, che causa maggiori consumi di energia annualmente [17]. Per rendere più efficienti energeticamente gli edifici esistenti o di nuova costruzione all'interno dei centri storici, una soluzione è quindi agire sul materiale che caratterizza l'involucro: questo dovrà essere colorato per mantenersi in linea con l'identità e le caratteristi-

che del luogo, ma anche ottimizzato dal punto di vista delle caratteristiche termo-ottiche per migliorare la prestazione dell'edificio stesso. Questa soluzione, a fronte di un intervento di restauro o ristrutturazione, ma anche nel caso di edifici di nuova costruzione, si delinea come meno gravosa tecnicamente ed economicamente, rispetto alla sostituzione degli impianti o altre strategie implementate tradizionalmente.

A tal fine si è deciso di sviluppare delle malte cool ma colorate di rosso, bianco o grigio, con saturazione variabile a seconda della necessità. Questo obiettivo, similmente a quanto precedentemente fatto per altri materiali e colori [14, 18, 19], è raggiunto mediante l'utilizzo di pigmenti riflettenti nell'infrarosso (IR) [20]. In particolare, è stato deciso di utilizzare pigmenti IR di colore bianco-crema, in modo da poterli aggiungere a qualsiasi pigmento tradizionale (non IR) colorato, ottimizzandolo e modificandone solo il livello di saturazione, non la tonalità di colore. Questo permette quindi di acquistare due soli tipi di pigmento, quello tradizionale e quello IR, mescolandoli in cantiere al mix della malta per raggiungere la saturazione desiderata. La malta, ipotizzabile sia a base di calce, per una maggiore compatibilità in alcuni tipi di applicazione, che a base cementizia, è stata per il momento sviluppata come prototipo in base cementizia. I componenti del mix sono cemento portland bianco, acqua, aggregati fini in vetro riciclato e infine i pigmenti. Ai fini di questo studio, sono state prese in considerazione due diverse percentuali di pigmenti all'interno del mix, una minima, corrispondente allo 0.5% in peso, e una massima, pari al 5% in peso, per scopi comparativi. I campioni hanno pari quantità di pigmenti IR (di colore bianco) e colorati: quelli con lo 0.5% di pigmento sono quindi di colore più chiaro, mentre quelli con il 5% sono più saturi e raggiungono conseguentemente colorazioni più scure. Contestualmente, sono stati preparati campioni colorati "tradizionali", non ottimizzati ma apparentemente identici per colore ai prototipi innovativi cool, da cui differiscono solo per la presenza di pigmenti IR, mentre il mix risulta identico per quanto riguarda tutti gli altri componenti.

Tutti i prototipi sono stati caratterizzati in laboratorio, secondo la normativa vigente, per la riflettanza solare [21], l'emissività termica [22] e la conducibilità termica [23].

Inoltre, al fine di investigare sul campo l'effetto dei pigmenti IR all'interno del mix, i campioni ottimizzati e quelli tradizionali sono stati esposti all'ambiente esterno durante la giornata del 31 Agosto, e la temperatura superficiale è stata misurata con una termo-camera.

2.2 Caso di studio e simulazione dinamica

A seguito della misurazione sul campo delle caratteristiche termo-ottiche dei materiali, si è deciso di sviluppare un'analisi preliminare della prestazione energetica di due edifici caso di studio, sul cui involucro si è ipotizzata l'applicazione della malta in esame. È stato quindi considerato un edificio residenziale, sviluppato su

tre livelli per una superficie totale di 114 mq, con copertura a falde e pareti trasversali considerate adiabatiche in quanto in adiacenza con altri edifici. Le pareti longitudinali, finestrate e rivolte a nord e a sud, affacciano invece su strada. Il file climatico utilizzato nella simulazione è quello della città di Roma. L'impianto HVAC considerato consiste in radiatori alimentati da una caldaia a metano e chiller per l'aria condizionata. Sono state modellate nel dettaglio tutte le zone termiche all'interno dell'edificio, corrispondenti alle varie attività svolte dagli abitanti (cucina, spazi di passaggio, camera da letto, sala). Mantenendo invariate le caratteristiche sopra descritte, sono state invece considerate due stratigrafie murarie, corrispondenti in un caso a una muratura tradizionale sulla quale non sono stati effettuati interventi di *retrofit* (Caso 1), e nell'altro a un involucro di nuova costruzione con isolamento a cappotto (Caso 2). La trasmittanza termica del Caso 1 è più alta (pari a 0.84 W/m²K), mentre nel Caso 2 è uguale a 0.32 W/m²K. Come strato di finitura esterno, in entrambi i casi è stata considerata la malta colorata, nelle varie colorazioni rosso (R), grigio (G) e bianco (B), sia ottimizzata (IR) che tradizionale (T), per scopi comparativi. In particolare, la malta IR modellata per la simulazione è quella con il maggior contenuto di pigmenti IR e colorati (5%), quindi quella di colore più scuro. I valori del materiale misurati in laboratorio sono stati inseriti nel software, per ottenere risultati più realistici. Le simulazioni, dodici in tutto, sono richiamate con sigle in cui la prima lettera indica il colore (R è rosso, G grigio e B bianco), la seconda la presenza di pigmenti (IR o T) e infine la terza l'appartenenza al Caso 1 o al Caso 2 (Tabella 1). Nonostante quindi le caratteristiche termo-ottiche della finitura esterna varino, la trasmittanza termica dell'involucro rimane costante (all'interno del Caso 1 e poi del Caso 2), permettendo di stabilire la variazione nella prestazione esclusivamente dovuta all'applicazione della malta.

	Trasmittanza	Rosso T	Rosso IR	Grigio T	Grigio IR	Bianco T	Bianco IR
Caso 1	0.84 W/m ² K	R-T-1	R-IR-1	G-T-1	G-IR-1	B-T-1	B-IR-1
Caso 2	0.32 W/m ² K	R-T-2	R-IR-2	G-T-2	G-IR-2	B-T-2	B-IR-2

Tabella 1. Simulazioni effettuate per i due casi di studio.

3. Risultati e discussione

In questa sezione sono presentati i risultati della caratterizzazione dei materiali e quelli inerenti la prestazione energetica dell'edificio con involucro da questi composto. Sono anche svolti confronti con le caratteristiche e le prestazioni di materiali tradizionali di pari colore.

3.1 Caratterizzazione dei materiali

I risultati dimostrano come i pigmenti IR siano in grado di ottimizzare la riflettanza nella parte IR dello spettro solare, soprattutto quando analizzati nella percentuale massima considerata (5%) (Tabella 2, Fig. 1). Similmente a quanto fatto per le simulazioni, i prototipi sono stati nominati in modo che l'ultimo carattere indichi in questo caso la percentuale di pigmento presente (0.5% o 5%). A parità di colore, quindi comparando i campioni IR-0.5 con i T-0.5 e poi gli IR-5 con i T-5, si nota come differenze tra i 16 e 4 punti percentuali siano riscontrabili nel vicino infrarosso per i campioni 5%, più scuri ma con un più ampio contenuto di pigmenti IR, mentre differenze inferiori, di 5-2 punti percentuali, sono quantificate per i pigmenti chiari, con minore concentrazione di IR. Confrontando invece i pigmenti IR-0.5 e IR-5, più chiaro il primo e più scuro il secondo, la riflettanza nel vicino infrarosso aumenta notevolmente (escludendo il campione grigio), a fronte di una diminuzione della stessa nel visibile.

Le caratteristiche termiche non variano invece al variare del colore o della percentuale di pigmento: l'emissività si attesta intorno al valore 0.89-0.90, mentre la conducibilità tra 1.00-1.01 W/mK.

	B-IR	B-T	B-IR	B-T	G-IR	G-T	G-IR	G-T	R-IR	R-T	R-IR	R-T
[%]	0.5	0.5	5	5	0.5	0.5	5	5	0.5	0.5	5	5
UV	42,9	33	22,7	12	15,7	35,1	15	12,5	22,2	26,2	11,3	10,1
VIS	66,5	66,5	69,9	60,5	31,7	40,4	19,8	18,3	34,7	45	24	22,6
NIR	55,1	53,3	66,3	49,8	32,9	27,5	16,9	12,4	47,2	49,7	51,1	46,7

Tabella 2. Riflettanza solare nelle varie parti dello spettro solare.

Per quanto riguarda le temperature superficiali, dopo un'esposizione di tre ore alla radiazione solare, sono state prese le misure con la termo-camera, che hanno riscontrato differenze, soprattutto tra i campioni con concentrazione di pigmento pari al 5%, dell'ordine di 1-2 °C.

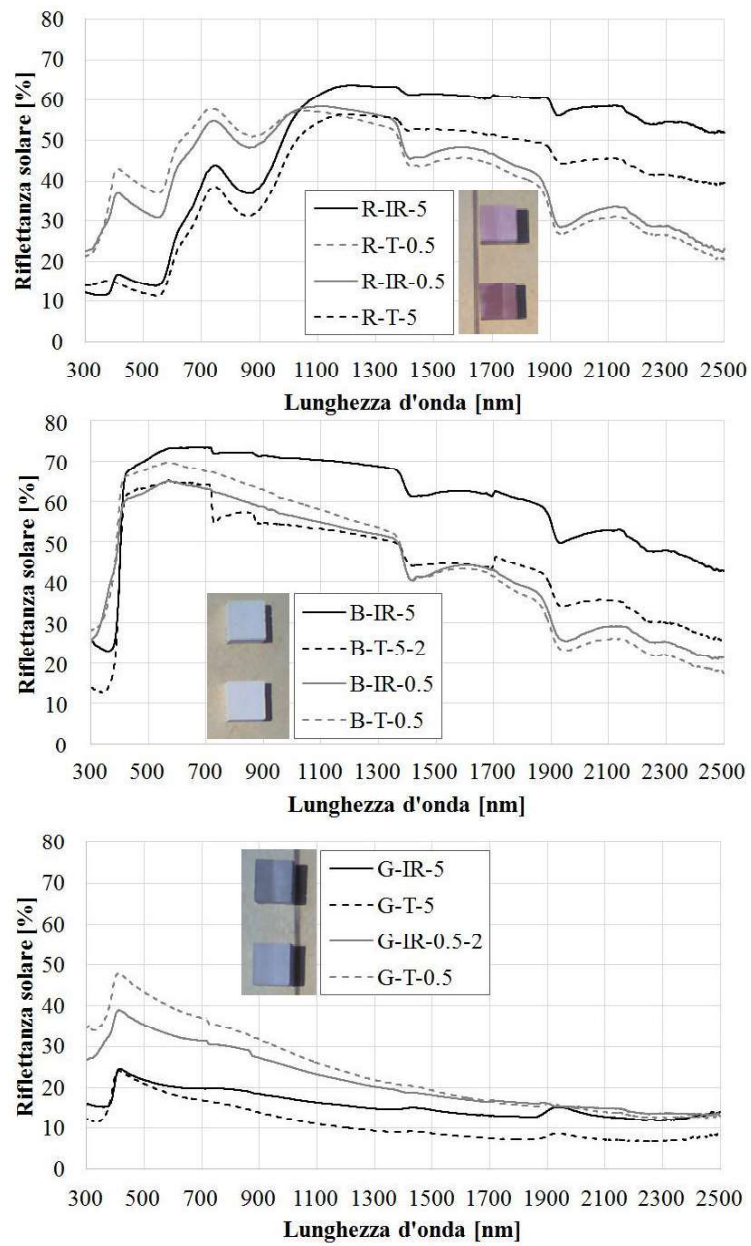


Fig. 1. Riflettanza solare delle malte lungo tutto lo spettro solare (300-2500 nm).

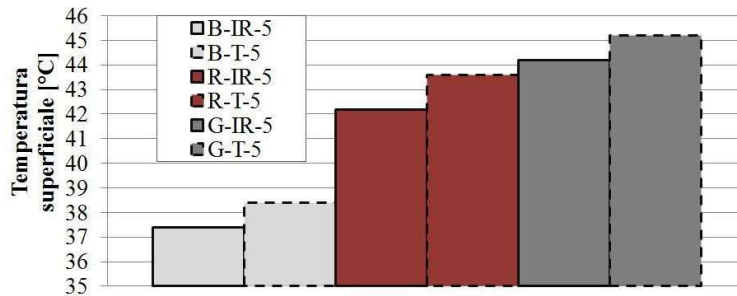


Fig. 2 Temperature superficiali misurate con la termo-camera, sul campo.

3.2 Prestazione energetica

I risultati della simulazione dinamica mostrano un trend uniforme, ossia la diminuzione della richiesta di energia all'aumentare della riflettanza, ma diversa significatività analizzando il Caso 1 e il Caso 2 (Fig. 3-Fig. 4): nel Caso 1 infatti, il maggiore spessore dell'involucro fa sì che l'effetto dell'applicazione di materiali cool sia di minore entità [24]. Si hanno risparmi di energia per il raffrescamento estivo pari all'1.7% per l'involucro grigio, del 2.5% per il rosso e del 3.6% per il bianco (Fig. 3). Queste percentuali si abbassano considerando il fabbisogno annuale, comprensivo di riscaldamento. Prendendo invece in considerazione il Caso 2, di edificio di nuova costruzione, il risparmio di energia per il raffrescamento estivo è sempre dell'1% per l'involucro di colore grigio, ma molto superiore per quello rosso (-8.8%) e bianco (-10.9%) (Fig. 4). Come nel Caso 1, queste percentuali si abbassano considerando il bilancio annuale, che tiene conto delle penalità invernali.

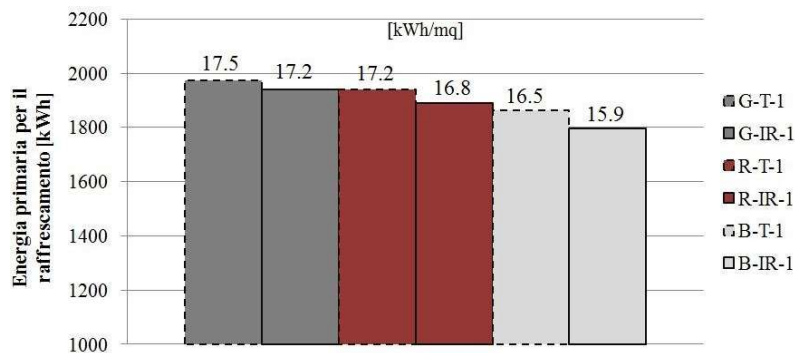


Fig. 3 Energia primaria per il raffrescamento, Caso 1.

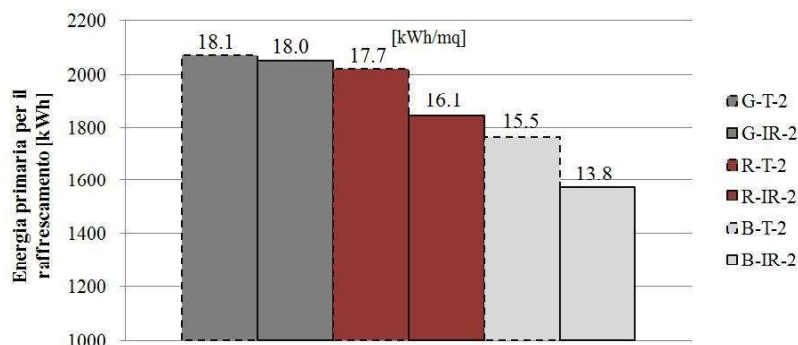


Fig. 4 Energia primaria per il raffrescamento, Caso 2.

4. Conclusioni

Materiali colorati ma *cool* (freschi) sono stati implementati in laboratorio e considerati per l'applicazione in contesti in cui è necessario mantenere un involucro colorato, ad esempio nei centri storici, per edifici esistenti o di nuova costruzione. Si tratta di malte ottenibili grazie all'aggiunta di due tipi di pigmento, uno bianco che ottimizza la prestazione nell'infrarosso (IR) e uno colorato (rosso, grigio o bianco), permettendo di scegliere quindi il colore e il livello di saturazione direttamente in cantiere.

La quantificazione delle caratteristiche termiche e ottiche ha permesso di valutare l'effetto dell'aggiunta dei pigmenti IR. Confrontando i campioni ottimizzati con campioni tradizionali di pari colore e con campioni con minore contenuto di pigmento IR, è stato possibile vedere come la riflettanza nella parte di spettro infrarosso aumenti all'aumentare della quantità di pigmento. Non sono state riscontrate differenze tra i vari campioni in termini di caratteristiche termiche, poiché emissività e conducibilità termica si sono attestate su valori molto simili per tutti i campioni (0.89 e 1.00 W/mK rispettivamente). La temperatura superficiale, misurata sul campo dopo aver esposto i campioni al sole, ha verificato che i campioni ottimizzati restano di 1-2 °C più freschi rispetto ai campioni tradizionali di pari colore.

Questo si riflette positivamente sulla domanda di energia per il raffrescamento, ridotta fino a un massimo del 10.9% nei casi considerati. È interessante notare come nel Caso 1, con spessore murario più ingente, l'effetto dei materiali *cool* sia di ridotta entità rispetto al Caso 2: questo è un aspetto che potrebbe essere investigato più nel dettaglio in studi futuri, insieme alla validazione della simulazione tramite campagne di monitoraggio sul campo. Inoltre, anche se sono ipotizzabili risultati simili, si potrebbe svolgere una simile analisi per malte a base calce, come anticipato nell'introduzione.

Bibliografia

1. Haines A, Kovats RS, Campbell-Lendrum D, Corvalan C (2006) Climate change and human health: Impacts, vulnerability and public health. *Public Health* 120:585–596. doi: 10.1016/j.puhe.2006.01.002
2. Hansen J, Ruedy R, Sato M, Lo K (2010) Global surface temperature change. *Rev Geophys*. doi: 10.1029/2010RG000345
3. Oke TR (1982) The energetic basis of the urban heat island. *Q J R Meteorol Soc* 108:1–24. doi: 10.1002/qj.49710845502
4. Moriarty P, Honnery D (2015) Future cities in a warming world. *Futures* 66:45–53. doi: 10.1016/j.futures.2014.12.009
5. Santamouris M, Cartalis C, Synnefa A, Kolokotsa D (2015) On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy Build* 98:119–124. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.09.052
6. Santamouris M (2014) Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol Energy* 103:682–703. doi: 10.1016/j.solener.2012.07.003
7. United Nations (2014) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. <http://esa.un.org/unpd/wup/CD-ROM/Default.aspx>. Accessed 22 Jan 2016
8. Angel S, Parent J, Civco DL, et al (2011) The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Prog Plann* 75:53–107. doi: 10.1016/j.progress.2011.04.001
9. Taha H, Akbari H, Rosenfeld A, Huang J (1988) Residential cooling loads and the urban heat island—the effects of albedo. *Build Environ* 23:271–283. doi: 10.1016/0360-1323(88)90033-9
10. Rosso F, Pisello A, Cotana F, Ferrero M (2014) Integrated Thermal-Energy Analysis of Innovative Translucent White Marble for Building Envelope Application. *Sustainability* 6:5439–5462. doi: 10.3390/su6085439
11. Hosseini M, Akbari H (2016) Effect of cool roofs on commercial buildings energy use in cold climates. *Energy Build* 114:143–155. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.050
12. Rosso F, Pisello A, Jin W, et al (2016) Cool Marble Building Envelopes: The Effect of Aging on Energy Performance and Aesthetics. *Sustainability* 8:753. doi: 10.3390/su8080753
13. Rosso F, Pisello AL, Cotana F, Ferrero M (2016) On the thermal and visual pedestrians' perception about cool natural stones for urban paving: A field survey in summer conditions. *Build Environ* 107:198–214. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.07.028
14. Levinson R, Akbari H, Berdahl P, et al (2010) A novel technique for the production of cool colored concrete tile and asphalt shingle roofing products. *Sol Energy Mater Sol Cells* 94:946–954. doi: 10.1016/j.solmat.2009.12.012
15. Synnefa A, Santamouris M, Apostolakis K (2007) On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Sol Energy* 81:488–497. doi: 10.1016/j.solener.2006.08.005
16. Decreto Legislativo (2004) Codice dei beni culturali e del paesaggio.

17. Rosso F, Pisello AL, Cotana F, Ferrero M (2017) Cool, Translucent Natural Envelope: Thermal-optics Characteristics Experimental Assessment and Thermal-energy and Day Lighting Analysis. *Energy Procedia* 111:578–587. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.220
18. Uemoto KL, Sato NMN, John VM (2010) Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy Build* 42:17–22. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.07.026
19. Ihara T, Jelle BP, Gao T, Gustavsen A (2016) Accelerated aging of treated aluminum for use as a cool colored material for facades. *Energy Build* 112:184–197. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.12.014
20. Song J, Qin J, Qu J, et al (2014) The effects of particle size distribution on the optical properties of titanium dioxide rutile pigments and their applications in cool non-white coatings. *Sol Energy Mater Sol Cells* 130:42–50. doi: 10.1016/j.solmat.2014.06.035
21. ASTM E903 - 12 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres; American Society of Testing Materials: West Conshohocken, PA, USA, 1996. <http://www.astm.org/Standards/E903.htm>. Accessed 7 Dec 2015
22. American Society for Testing Materials. ASTM C1371-04a(2010)e1 Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers; American Society for Testing Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2010. <http://www.astm.org/Standards/C1371.htm>. Accessed 20 Jan 2016
23. International Organization for Standardization, ISO 22007-2:2008 - Plastics -- Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity -- Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method, Geneva, Switzerland. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=40683. Accessed 4 Feb 2016
24. Piselli C, Pisello AL, de Gracia A, et al (2017) Optimization of Coupled Building Roof Solar Reflectance Capability and Insulation Level for Annual Energy Saving under Italian Climate zones. In: 17 th CIRIAF Natl. Congr. Perugia, pp 1–20.