



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione e valutazione di pavimentazioni riflettenti per applicazioni urbane

M. Zinzi, E. Carnielo, G. Fasano

CARATTERIZZAZIONE E VALUTAZIONE DI PAVIMENTAZIONI RIFLETTENTI PER APLICAZIONI URBANE

M. Zinzi, G. Fasano (ENEA)

E. Carnielo (Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool material)

Responsabile del Progetto: ENEA: Gaetano Fasano



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DEI MATERIALI TESTATI	6
3 CARATTERIZZAZIONE SOLARE	7
4 ANALISI NUMERICA DELL'IMPATTO DEI "COOL PAVEMENT" SU SCALA URBANA	8
5 ANALISI DI COMFORT	10
6 DISCUSSIONI E CONCLUSIONI	11
7 BIBLIOGRAFIA.....	12

Sommario

I “cool material” sono caratterizzati da elevata riflettanza, ottenuta sia attraverso tinte chiare, sia attraverso nuove tecnologie, associate anche a colori più scuri, volte ad innalzare questa proprietà nell’infrarosso vicino. Questi materiali trovano in genere applicazione nel rivestimento degli edifici e in particolare dei tetti, ma possono essere anche usati per pavimentazioni stradali. La loro elevata riflettanza permette di limitare l’innalzamento della temperatura superficiale quando sottoposti a carichi solari. Un’alta emissività inoltre determina un più favorevole rilascio termico in fase notturna del calore immagazzinato durante le ore diurne. Queste caratteristiche influiscono sulla riduzione del flusso di calore trasmesso verso l’interno di un edificio e, nel caso di un’applicazione su pavimentazione urbana, sulla riduzione del calore rilasciato all’ambiente esterno per convezione. In entrambi i casi i “cool material” rappresentano una strategia importante per mitigare due fenomeni emersi già in passato che influenzano negativamente la qualità ambientale ed energetica delle città nei climi temperati: l’incremento dei consumi energetici e l’effetto isola di calore urbana. I “cool material” utilizzati come rivestimento per i tetti, i “cool roof”, sono stati ampiamente studiati e testati negli ultimi anni ed ora sono considerati una tecnologia efficiente e matura per molte tipologie di edifici in differenti climi. Significanti passi avanti si stanno facendo anche sui “cool material” per applicazioni urbane sebbene fino ad ora siano ancora pochi i prodotti disponibili e la penetrazione sul mercato è ancora trascurabile. La prima parte di questo articolo è dedicata alla caratterizzazione di nuovi prodotti usati per strade e marciapiedi. Questi prodotti sono a base di calcestruzzo anziché di asfalto, avendo il primo un potere di riflessione più alto del secondo. La permeabilità della struttura conferisce a questi prodotti un alto potere drenante, caratteristica fondamentale per la sicurezza stradale. La riflettanza solare dei prodotti è stata misurata attraverso un avanzato banco ottico. Le misure sono state condotte sull’intero spettro solare. Ulteriori misurazioni sono state condotte, replicando le prime, con uno spettrofotometro commerciale al fine di testare le tecniche di misura convenzionali su materiali con superfici scabre e non uniformi. Da questi test sono emerse differenze significative tra i due sistemi di misura e i risultati saranno commentati in altre pubblicazioni. La seconda parte di questo studio è dedicata alla valutazione, attraverso un’analisi numerica, del clima urbano quando le superfici ad elevata assorbanza solare delle strade sono sostituite con superfici ad elevata albedo. Diverse simulazioni sono state condotte su un quartiere di una città Mediterranea attraverso il software ENVI-met, il quale è equipaggiato con un motore di calcolo in grado di predire l’evoluzione di alcuni parametri microclimatici in ambiente urbano. I risultati ottenuti riguardano differenti stagioni e differenti ore del giorno e sono stati organizzati in profili di temperature orizzontali e verticali al fine di verificare le performance termiche legate all’applicazione di “cool material” sul tessuto urbano, paragonandole con quelle ottenute con materiali convenzionali. Inoltre sono state anche valutate anche le performance legate al comfort ambientale attraverso un particolare indice.

1 Introduzione

E' stato stimato che più dell'80% della popolazione europea vivrà in aree urbane nel 2030 [1]. Questo processo di concentrazione della popolazione influenzerà la distribuzione di energia, le condizioni ambientali e la salute pubblica. Una conseguenza critica di questi fenomeni, amplificata dal global warming, sarà il rafforzamento del fenomeno dell'isola di calore urbana (UHI). Esso è rappresentato dall'innalzamento delle temperature dell'aria nelle città che raggiungono valori decisamente più elevati rispetto a quelli riscontrati nelle aree rurali. L'isola di calore dipende dalla modifica del territorio operata dall'uomo che ha come conseguenza la sostituzione della vegetazione con superfici costruite, caratterizzate da elevati valori di assorbimento solare, elevata impermeabilità e da proprietà termiche che innalzano la quantità di energia termica immagazzinata. L'isola di calore è anche causata da molte altre attività antropiche: gli scarichi dei mezzi di trasporto pubblici e privati e degli impianti di riscaldamento degli edifici; l'aria calda rilasciata dagli impianti di raffrescamento, etc. Diversi studi hanno quantificato questo fenomeno ed è stato possibile registrare intensità di isola di calore superiori ai 12 °C [2-8].

L'UHI ha severe implicazioni sulle performance e sui costi energetici degli edifici che rappresentano approssimativamente il 40% dei consumi energetici totali per usi finali e il 36% di emissioni di CO₂ in Europa. Inoltre l'isola di calore è un problema che non riguarda solo il campo energetico, infatti in concomitanza con questo fenomeno si verificano anche problemi di discomfort e un intensificarsi dei problemi di salute durante le ondate di calore. Non è da trascurare inoltre la formazione dello smog e di agenti inquinanti che trovano in un ambiente caldo le condizioni più favorevoli.

La temperatura superficiale di picco dei materiali da costruzione può raggiungere valori elevatissimi, anche 30 °C più alta rispetto a quella dell'aria. L'energia termica immagazzinata viene poi rilasciata nell'ambiente prima attraverso uno scambio termico per conduzione tra gli strati solidi e poi per convezione tra la superficie dei materiali e l'aria, con un conseguente incremento della temperatura ambiente. Strade, marciapiedi, parcheggi, aree pedonali, giocano un ruolo rilevante in questo bilancio energetico, dato che rappresentano tra il 30 e il 45% dell'impronta urbana [9]. I valori di riflettanza solare tipici per i materiali che rappresentano le strutture urbane sono: 5% per gli asfalti appena posati (il conglomerato bituminoso ricopre uniformemente la superficie); 15% per l'asfalto datato; 25% per il calcestruzzo.

I "cool material" sono una particolare categoria di materiali e componenti caratterizzati da elevata riflettanza solare che induce un minor innalzamento della temperatura superficiale quando essi sono soggetti a carichi solari. Questa tecnologia ha destato un crescente interesse sia per la mitigazione delle temperature urbane sia per l'ottimizzazione delle performance degli edifici. Questi materiali presentano anche un'elevata emissività termica. Tale caratteristica consente di irradiare verso il cielo, principalmente durante le ore notturne, l'energia termica accumulata durante il giorno, contribuendo alla diminuzione delle temperature dell'intero agglomerato urbano.

Mentre i "cool material" usati come rivestimento per i tetti, i "cool roof", sono ormai una tecnologia consolidata, la stessa cosa non si può ancora affermare per "cool pavement", pensati per applicazioni sul tessuto urbano. Ciò dipende dal fatto che lo sviluppo della tecnologia risulta essere in quest'ultimo caso più complesso e deve tener conto di tre fattori:

- le condizioni urbane, ovvero l'utilizzo massiccio che si fa in genere di una superficie stradale, sia da parte dei pedoni, che delle autovetture, implicano un più ampio studio termo-fisico delle superfici riguardante i fenomeni di usura, i moti convettivi, che data la presenza di oggetti in movimento sono più difficili da modellare e l'ombreggiamento che risulta condizionato dal numero di persone, dall'entità del traffico stradale e dalla forma degli edifici;
- le temperature superficiali di asfalti e calcestruzzi usati per la pavimentazione risultano influenzate sia da caratteristiche radiative che termiche, a differenza di quella dei "cool roof", dove le proprietà radiative sono le più rilevanti;
- la pavimentazione stradale deve soddisfare funzionalità diverse all'interno di una zona urbana. Il loro impiego va dai sentieri alle autostrade molto trafficate, a differenza dei "cool roof" che svolgono generalmente la stessa funzione e non necessitano di specifiche meccaniche particolari.

I “cool pavement” presentano comunque elevate potenzialità riguardanti la riduzione del consumo elettrico derivante dagli impianti di raffreddamento e il miglioramento della qualità dell’aria [10-16]. Essi possono essere concepiti sia come tinte da applicare direttamente sull’asfalto esistente, sia come materiali composti da calcestruzzo che accoppiano un’elevata riflettanza, superiore a quella degli asfalti convenzionali, ad una struttura permeabile all’acqua [17]. Infatti, sebbene originariamente progettate per il controllo delle acque piovane, le superfici permeabili stanno emergendo come potenziali “cool material”. Queste superfici consentono di immagazzinare aria, acqua e il vapore acqueo nei loro interstizi. Sono classificabili come superfici permeabili: gli asfalti porosi, i calcestruzzi drenanti e alcune particolari pavimentazioni per marciapiedi. Mantenendo come obiettivi principali sia la permeabilità sia le esigenze strutturali legate alla tipologia di traffico previsto, queste pavimentazioni devono essere supportate sia da un’efficiente progettazione che da un’adeguata posa in opera [18].

In particolari condizioni climatiche i suddetti materiali sono in grado di limitare l’innalzamento della loro temperatura superficiale, legata ai carichi solari, attraverso l’evaporazione. Infatti l’acqua immagazzinata durante le piogge all’interno delle cavità e delle porosità della loro struttura funge da serbatoio di calore latente vaporizzando durante l’irraggiamento degli strati esterni del materiale. Questo fenomeno è del tutto simile all’evapotraspirazione operata dalla vegetazione. Per questo motivo esistono alcuni sistemi di pavimentazione permeabile integrati con erba o vegetazione dal basso fusto.

La conformazione superficiale di questi prodotti può anche influenzare i valori della temperatura ambiente. Infatti avere un elevato numero di cavità determina un aumento delle zone d’ombra distribuite su una superficie più ampia. Queste condizioni possono limitare i processi di trasferimento di calore al substrato, sottoponendo comunque la superficie esterna al riscaldamento dovuto alla radiazione solare, ma riducendo l’accumulo di calore e il conseguente rilascio durante le ore notturne [19-20]. Una superficie più ampia, inoltre, favorisce un più efficace rimescolamento dell’aria favorendo i processi di scambio termico convettivo.

Il fenomeno del rilascio termico notturno è uno dei contributi più significativi che determinano la formazione dell’isola di calore urbana. Su questo argomento si stanno concentrando diversi studi di università e istituti di ricerca al fine di valutare i reali benefici associati all’utilizzo di materiali permeabili su scala urbana.

La temperatura superficiale di una pavimentazione stradale dipende da molti fattori. Superfici riflettenti limiterebbero gli apporti solari, e materiali permeabili permetterebbero di sfruttare, come detto in precedenza, l’evaporazione dell’acqua accumulata per mantenersi freschi. Tuttavia, oltre la riflettanza solare, l’emissività termica e il potere drenante, sono molteplici i fattori termo-fisici che influenzano le proprietà dei materiali usati per la copertura del manto stradale: la conducibilità termica, lo spessore degli strati, la capacità termica e la convezione. In particolare quest’ultima dipende dalla velocità dell’aria, dalla sua temperatura in prossimità della superficie e dalla rugosità. Alcune pavimentazioni permeabili hanno superfici molto più ruvide rispetto a pavimentazioni convenzionali, ciò determina un incremento dell’area effettiva e della turbolenza favorendo la convezione. Questo fenomeno va però, in alcuni casi, a discapito del potere di riflessione della superficie.

2 Descrizione dei materiali testati

Il materiale testato in questo studio è un calcestruzzo poroso usato come coperture per strade e marciapiedi. E’ caratterizzato da un potere di drenaggio dell’acqua molto superiore rispetto a quello del suolo. Esso è funzione della granulometria e della dimensione delle cavità. Il materiale legante in calcestruzzo è stato trattato superficialmente con tinte per ottenere diverse sfumature di grigio. Per la campagna di misure sono stati selezionati tre diversi colori con due differenti dimensioni dei grani. I quattro campioni testati sono i seguenti:

- Bianco – dimensione dei grani 6 mm;
- Bianco – dimensione dei grani 12 mm;
- Grigio chiaro – dimensione dei grani 12 mm;
- Grigio scuro – dimensione dei grani 12 mm.

3 Caratterizzazione solare

La caratterizzazione ottica dei materiali è stata condotta sia con un banco ottico avanzato, sia con uno spettrofotometro commerciale Perkin Elmer Lambda 950. In questo studio saranno presentati solo i risultati ottenuti con quest'ultimo strumento, rimandando il confronto tra i due strumenti ad una futura pubblicazione. Lo spettrofotometro Lambda 950 è equipaggiato con una sfera integratrice di 15 cm di diametro rivestita in Spectralon, un materiale ad elevata riflettanza su tutto lo spettro solare. L'accessorio della sfera integratrice è necessario per la misurazione dei materiali a comportamento diffondente. Le misurazioni sono state condotte tra i 300 e i 2500 nm, con una risoluzione spettrale di 5 nm. L'apertura della slitta del fascio è stata impostata a 2 nm nella banda del visibile e in modalità "servo" (apertura della slitta variabile in funzione dell'energia ottimale in ingresso) nella banda dell'infrarosso vicino. A causa dell'elevata rugosità dei materiali testati e della limitata impronta del fascio incidente (circa 1 cm²), sono state condotte cinque misurazioni per campione modificando il punto di indagine. I valori integrati, nella banda del visibile, del N.I.R. e solare sono stati calcolati a partire dai valori misurati operando una media pesata sulla distribuzione energetica dello spettro solare in accordo con la procedura definita nella ISO 9050 2003 [21]. Al fine di comparare i valori ottenuti con quelli relativi a materiali convenzionali, sono stati eseguiti due ulteriori test: il primo su un asfalto appena posato, dove il conglomerato bituminoso è ancora nuovo e completamente nero; il secondo su un asfalto datato, la cui superficie appare decisamente più chiara tendente al grigio scuro.

La Figura 1 presenta la riflettanza spettrale dei quattro campioni selezionati e dei due asfaldi nell'intero spettro solare. Nella Tab.1 sono invece riportati i valori integrati. I risultati mettono in evidenza come i materiali in calcestruzzo drenante abbiano una riflettanza decisamente alta se confrontata con quella degli asfaldi. Tra questi, la riflettanza più alta è stata riscontrata nel campione bianco con la dimensione dei grani di 12 mm. Come ci si poteva aspettare la riflettanza minore è stata invece misurata nel campione grigio scuro. La differenza di riflettanza solare ottenuta confrontando i valori ottenuti per i calcestruzzi con l'asfalto nuovo varia dal 18 al 51% (Tabella 1, colonna 5); differenze minori sono state trovate quando i calcestruzzi sono stati messi a confronto con l'asfalto più vecchio, di colore più chiaro. I valori in questo caso vanno dal 6 al 39% (Tabella 1, colonna 6).

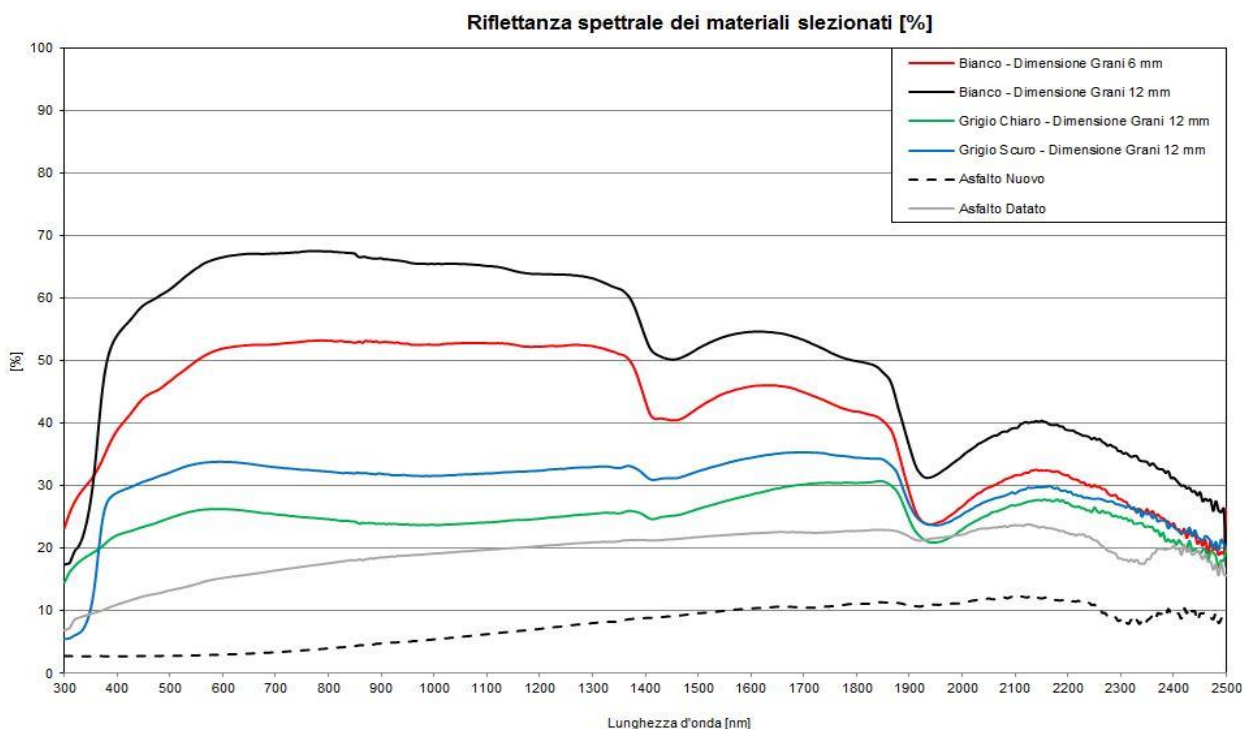


Figura 1: Riflettanza spettrale dei campioni di calcestruzzo e degli asfaldi convenzionali

Tabella 1: Valori integrati di riflettanza dei calcestruzzi drenanti e degli asfalti convenzionali

	ρ_e	ρ_{NIR}	ρ_v	$\rho_e - \rho_{e \text{ asf. nuovo}}$	$\rho_e - \rho_{e \text{ asf. datato}}$
Bianco-Dimensione Grani 6 mm	45	46	46	41	29
Bianco-Dimensione Grani 12 mm	56	56	57	51	39
Grigio chiaro-Dimensione Grani 12 mm	30	31	31	26	14
Grigio scuro-Dimensione Grani 12 mm	22	23	23	18	6
Asfalto nuovo	5	7	3	---	---
Asfalto datato	17	20	14	---	---

Se l'elevata riflettanza solare è già un traguardo importante è bene evidenziare che, da un'attenta osservazione della forma degli spettri, le proprietà di riflessione dei prodotti presentano notevoli margini di miglioramento. In base ai dati esposti nel grafico e nella tabella, infatti, si nota come la riflettanza nell'infrarosso vicino sia pressoché identica a quella nella banda del visibile per tutti i campioni di calcestruzzo. Questo indica che i prodotti non hanno un rilevante comportamento selettivo nella regione dell'infrarosso vicino. L'obiettivo finale è quello, quindi, di incrementare ancora maggiormente la riflettanza solare senza alterare la resa cromatica attuale, cosa attuabile incrementando il potere di riflessione nel N.I.R. e mantenendo inalterato quello nella banda del visibile.

4 Analisi numerica dell'impatto dei "cool pavement" su scala urbana

Le performance dei prodotti oggetto di studio sono state investigate attraverso un'analisi numerica. Il software ENVI-met è stato utilizzato per valutare l'impatto che possono avere questi materiali innovativi sulle temperature esterne. Questo strumento usa un metodo di calcolo deterministico chiamato S.V.A.T. (Soil, Vegetation and Atmosphere Transient) e operando ad un livello di micro-scala è in grado di valutare l'evoluzione temporale di diversi parametri termo-fluidodinamici all'interno di un dominio tridimensionale. Grazie all'interfaccia grafica del software è possibile ricreare nel dominio di calcolo intere porzioni di aree urbane modellando edifici, strade e vegetazione. L'interfaccia con l'utente permette inoltre di modificare le caratteristiche ottiche e termiche delle superfici in gioco come, ad esempio, la temperatura di set-point interno degli edifici, la loro trasmittanza termica, la riflettanza e l'emissività [22]. Il quartiere scelto per lo studio è una porzione di Prati, un'area densamente urbanizzata di circa 580.000 m² collocata al centro di Roma.

L'obiettivo di questa analisi è quello di stimare il possibile decremento della temperatura esterna associato all'applicazione di queste pavimentazioni drenanti in calcestruzzo e ciò è stato possibile modificando l'albedo del suolo nel modello di calcolo. All'interno della mappa implementata sono stati posizionati due recettori per un monitoraggio più accurato della temperatura esterna e dell'umidità relativa in punti progressivamente sempre più distanti dal suolo. Il recettore 1 è stato collocato in un'area verde, mentre il recettore 2 in una zona termicamente più critica in assenza di vegetazione. La Figura 2 mostra l'area selezionata e la posizione dei recettori.

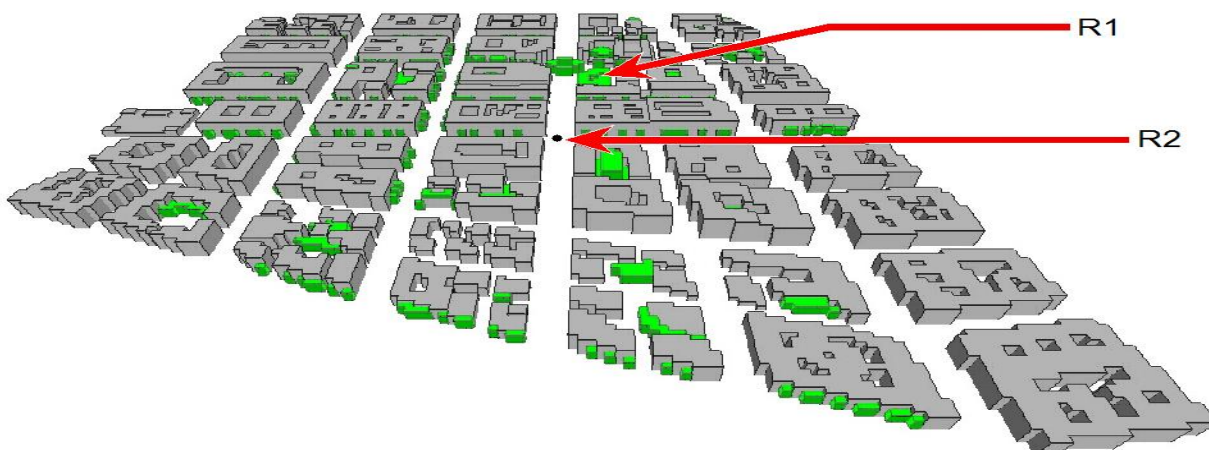


Figura 2: Il quartiere Prati in una vista 3D realizzata con l'interfaccia di ENVI-met

Le simulazioni sono state condotte per valutare i fenomeni termo-fisici in un giorno primaverile e uno estivo monitorando le ore centrali della giornata, dalle 10.00 alle 14.00, con tre diversi valori di riflettanza delle pavimentazioni: 10% per simulare un asfalto convenzionale, 32% e 56% per simulare rispettivamente una pavimentazione in calcestruzzo grigio chiaro e bianco. Le Figure 3 e 4 presentano una panoramica, tratta dai risultati di ENVI-met, incentrata sulla temperatura esterna alle 14.00 e relativa ad un piano orizzontale posizionato parallelamente a 3 metri dal terreno rispettivamente il 20 Aprile e il 20 Luglio. Nelle figure gli edifici sono rappresentati in nero, la vegetazione in verde. In base alla scala cromatica si può asserire che in primavera la temperatura decresce in media di 1,5 °C passando da un tessuto urbano composto da asfalto convenzionale (Figura 3, numero 1) al calcestruzzo drenante grigio (Figura 3, numero 2). Considerando invece il calcestruzzo drenante bianco (Figura 3, numero 3) la temperatura decresce ulteriormente con una differenza media rispetto al materiale convenzionale di 3,3 °C. Durante la stagione estiva la diminuzione di temperatura raggiunge valori anche più alti. Se comparata alla configurazione convenzionale (Figura 4, numero 4), l'applicazione di un calcestruzzo drenante grigio riduce la temperatura ambiente di 2 °C (Figura 4, numero 5); la riduzione di temperatura raggiunge un valore di 4,4 °C per il calcestruzzo drenante bianco (Figura 4, numero 6).

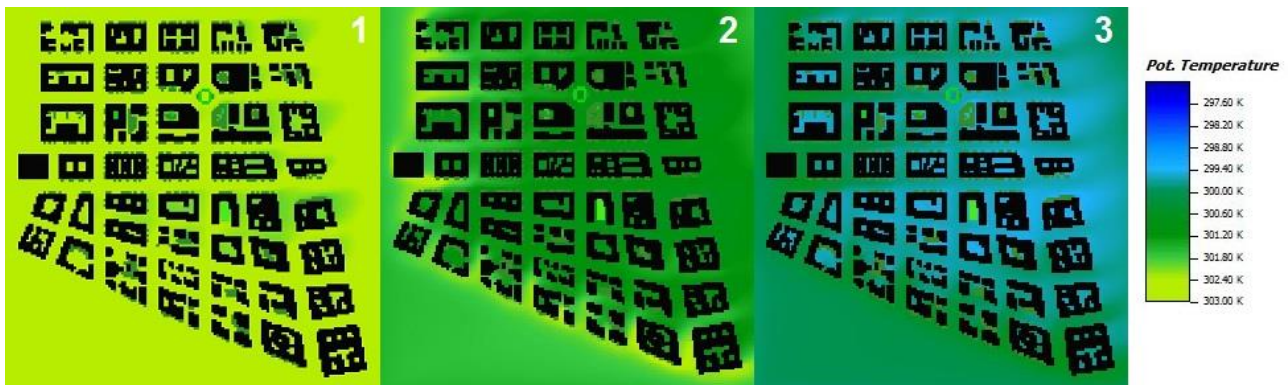


Figura 3: Primavera-Distribuzione orizzontale della temperatura esterna (20 Aprile Ore 14.00)

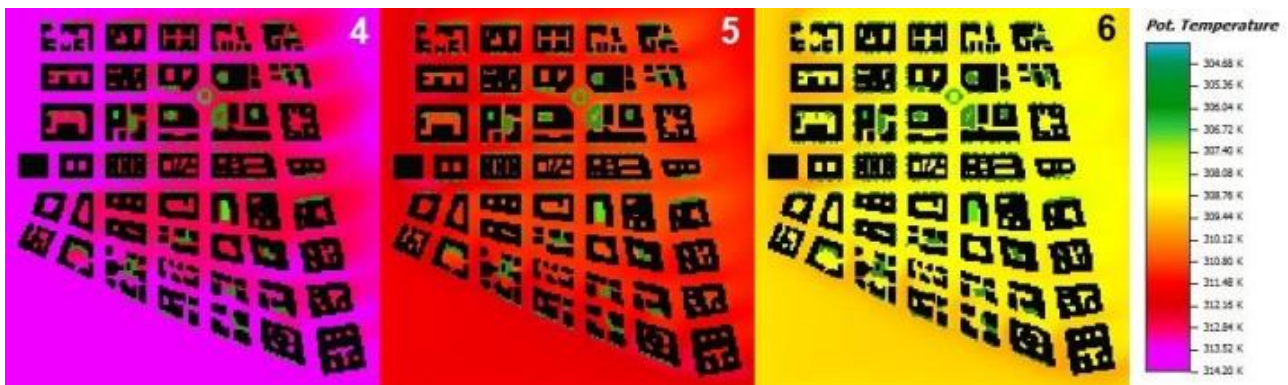


Figura 4: Estate-Distribuzione orizzontale della temperatura esterna (20 Luglio Ore 14.00)

I calcestruzzi grigio e bianco rimangono quindi più freschi sotto il sole, a causa del loro alto fattore di riflessione. La loro temperatura superficiale si attesta a valori più bassi rispetto all'asfalto convenzionale. Una minore temperatura superficiale induce un minor scambio termico convettivo e radiativo con l'aria avendo come effetto una riduzione del valore di temperatura di quest'ultima.

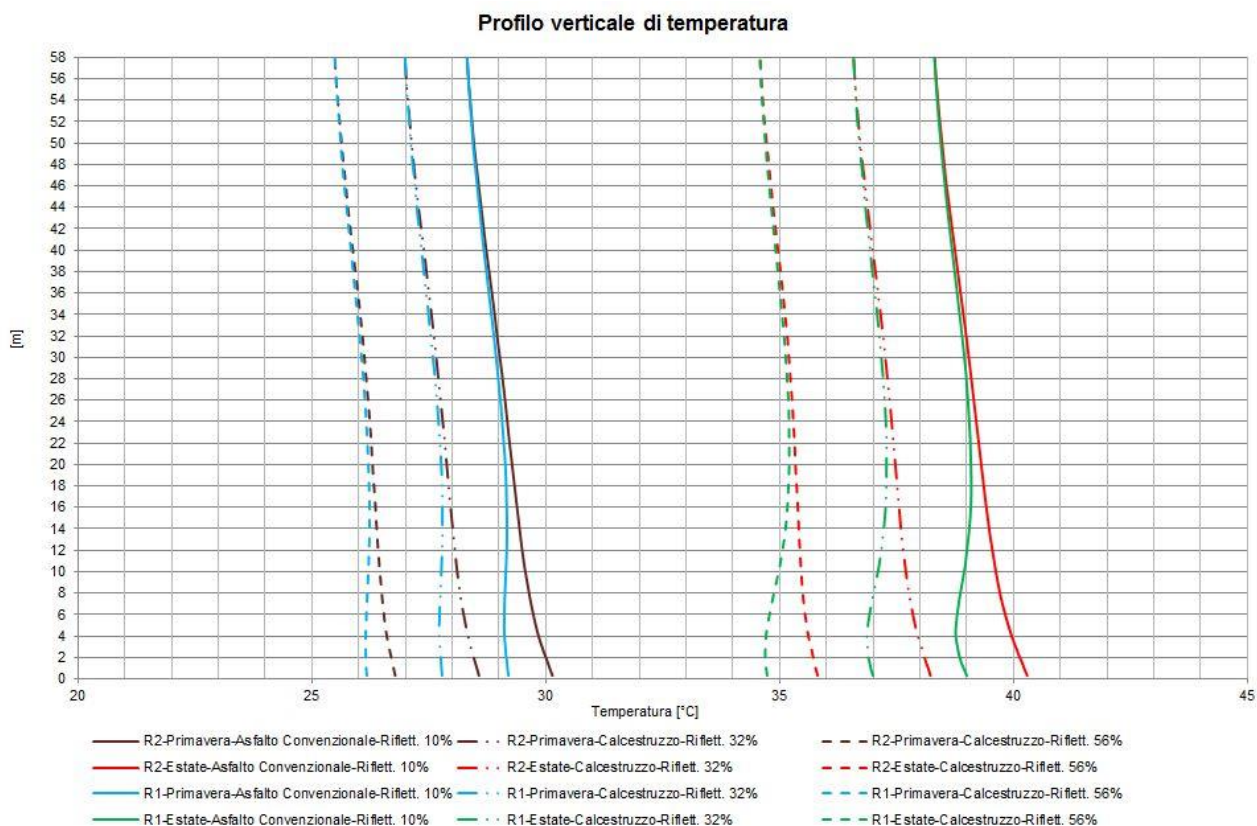


Figura 5: Distribuzione verticale della temperatura dell’aria esterna per i recettori 1 e 2 in primavera ed estate

Nella Figura 5 è riportato il profilo verticale delle temperature per le due stagioni scelte sempre alle ore 14.00. Le temperature sono state calcolate da un’altezza di 0 m fino a 58 m. Quest’ultimo valore rappresenta il limite superiore del dominio di calcolo tridimensionale. Gli andamenti delle temperature per le tre configurazioni di riflettanza sono molto simili nella forma anche se traslati a parità di configurazione. Per questo motivo le differenze di temperatura, già evidenziate nelle precedenti figure, si mantengono costanti indipendentemente dall’altezza. Questo risultato è un’ulteriore dimostrazione di come i prodotti analizzati in questo studio riescano a modificare radicalmente le condizioni termiche dell’agglomerato urbano anche ad altezze significativamente elevate dal livello stradale, ben oltre l’altezza media degli edifici (circa 22 m). E’ importante notare il differente andamento dei profili tra 0 e 25 metri dovuto alla presenza di piante ad alto fusto che modificano le temperature in prossimità del recettore 1 in seguito al fenomeno dell’evapotraspirazione. La massima differenza tra i 2 recettori è 1,3 °C a 4,5 m d’altezza registrata in estate per la configurazione convenzionale. Oltre il limite dei 25 m i due andamenti di temperatura tendono a sovrapporsi poiché le temperature registrate dal recettore non sono più influenzate dalla presenza di vegetazione.

5 Analisi di comfort

Con i risultati ottenuti dalle simulazioni è stato calcolato il livello di comfort usando il Discomfort Index (DI), sviluppato da E.C. Thom [23]. Esso combina, all’interno di un singolo valore, l’effetto della temperatura, dell’umidità e del movimento dell’aria sulla sensazione di calore o freddo percepita dal corpo umano. Temperatura e umidità relativa sono state estrapolate dai dati registrati dal recettore 2. L’indice è stato calcolato usando la seguente equazione lineare:

$$DI = 0,4 \cdot (T_a + T_w) \cdot 0,48$$

avendo indicato con T_a e con T_w rispettivamente la temperatura a bulbo secco e quella a bulbo umido. L'indice è stato ricavato sia per il 20 Aprile che per il 20 Luglio dalle 10.00 alle 14.00. La Figura 6 evidenzia come l'indice sia influenzato positivamente dall'incremento di riflettanza delle superfici della pavimentazione urbana.

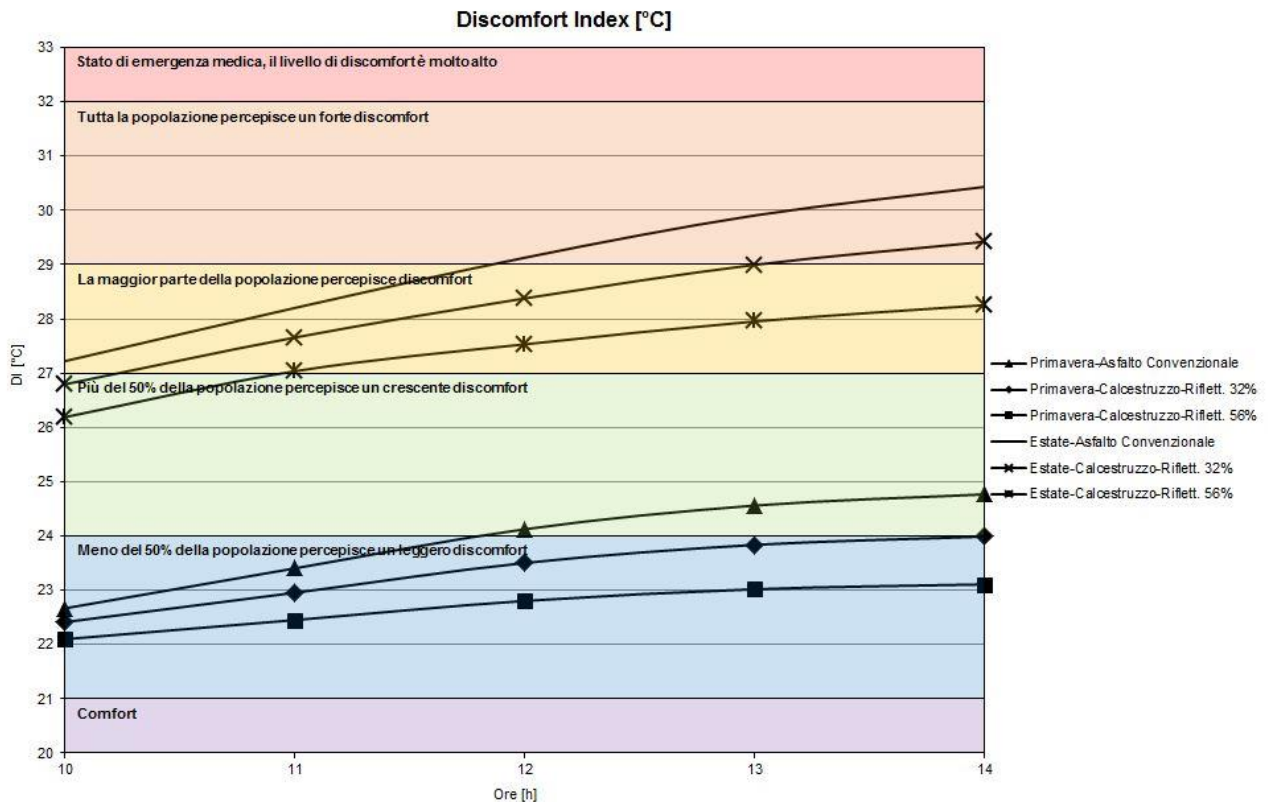


Fig.6: Discomfort Index DI calcolato in primavera ed estate

6 Discussioni e conclusioni

La pavimentazione drenante in calcestruzzo, presenta una riflettanza solare maggiore rispetto a quella dei materiali convenzionali. L'incremento delle proprietà solari unito all'alta porosità fanno di questo prodotto un materiale interessante se applicato su scala urbana. In termini di caratteristiche ottiche i principali risultati sono:

- la riflettanza solare aumenta in funzione del colore del materiale; più il materiale è chiaro più è alto il potere di riflessione;
- la riflettanza solare è direttamente proporzionale alla dimensione dei grani, almeno per quanto riguarda i prodotti testati;
- il prodotto non presenta elevata riflessione nel N.I.R. e questo fattore è migliorabile poiché gioca un ruolo cruciale nei "cool material" al fine di poter produrre materiali dalle elevate proprietà solari senza incidere sul colore.

Un'analisi numerica condotta con ENVI-met, un software che usa un metodo di calcolo deterministico, è stata condotta per investigare i possibili vantaggi termici legati alle caratteristiche ottiche della pavimentazione in calcestruzzo. I risultati mettono in evidenza come questi materiali possano avere un impatto sensibile, dovuto ai loro bassi profili di temperatura superficiale, sul decremento della temperatura medie dell'agglomerato urbano anche ad altezze significative dal suolo. Il decremento massimo di temperatura registrato ha raggiunto i 4,4 °C in un giorno estivo, mantenendo questa differenza costante anche oltre l'altezza media degli edifici. L'uso massiccio di questa tecnologia innovativa combinato con un

aumento delle aree verdi porterebbe ad una sostanziale diminuzione dell'effetto isola di calore urbana con un sensibile aumento del livello di comfort termico per la popolazione ed un abbattimento dei consumi energetici per gli usi finali negli edifici.

7 Bibliografia

- [1] World Energy Outlook 2008-2009, International Energy Agency Geneva; 2008-2009.
- [2] Goldreich Y. Ground and top of canopy layer urban heat island partitioning on an airborne image. *Remote Sensing of Environment* 2006; 104: 247-255.
- [3] Hassid S, Santamouris M, Papanikolaou N, Linardi A, Klitsikas N. The effect of the heat island on air conditioning load. *Journal of Energy and Buildings* 2000; 32(2): 131-141.
- [4] Huang L, Li D, Zhao J, Zhu J. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing. *Building and Environment* 2008; 43: 7-17.
- [5] Kolokotroni M, Zhang Y, Watkins R. The London heat island and building cooling design. *Solar Energy* 2007;81(1):102-110.
- [6] Rosenzweig C, Solecki W, Parshall L, Choppingc M, Pope G, Goldberg R. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey. *Environmental Hazards* 2005; 6: 51-62.
- [7] Santamouris M. Heat island research in Europe, the state of the art. *Advances Building Energy Research* 2007;1: 123-150.
- [8] Taha H, Chang SC, Akbari H. Meteorological and air quality impacts of heat island mitigation measures in three U.S. Cities. Lawrence Berkeley National Laboratory Report, Berkeley, CA, 2000.
- [9] Rose LS, Akbari H, Taha H. Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Greater Houston, Texas. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51448, Berkeley, CA, 2003.
- [10] Cambridge Systematics, Inc. Cool pavements draft report, http://www.epa.gov/hiri/resources/pdf/CoolPavementReport_Former%20Guide_complete.pdf, 2005. Available on line at.
- [11] Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 2001; 70(3): 295-310.
- [12] Rosenfeld AH, Akbari H, Romm JJ, Pomerantz M. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy Build* 1998; 28: 51-62.
- [13] Taha H. Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin. *Atmospheric Environment* 1997; 31(11): 1667-1676.
- [14] Taha H. Meteorological and Air Quality Impacts of Increased Urban Surface Albedo and Vegetative Cover in the Greater Toronto Area, Canada, Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. LBLN-49210, Berkeley, CA, 2002.
- [15] Synnefa A, Karlessi K, Gaitani N, Santamouris M, Assimakopoulos DN, Papakatsikas C. Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment* 2011; 46: 38-44.
- [16] Kinouchi T, Yoshinaka T, Fukae N, Kanda M. Development of cool pavement with dark colored high albedo coating. Fifth Conference for the Urban Environment, Vancouver, Canada, 2004.
- [17] Carnielo E, Zinzi M. Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand. *Building and Environment* 2013; 60: 56-65.
- [18] Ferguons B., Porous Pavements, 2005.
- [19] Haselbach L. Pervious concrete and mitigation of the Urban Heat Island Effect. Transportation Research Board Annual Meeting 2009.
- [20] Kevern J, Schaefer V R, Wong K. Temperature behavior of a pervious concrete system. Transportation Research Board Annual Meeting 2009

[21] ISO 9050. Glass in building-Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors, 2003.

[22] ENVI-met Version 3.1, www.envi-met.com, 2010.

[23] Thom E C, Bosen J F. The discomfort index. Weatherwise 1959; 12:57-60.