



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Determinazione delle proprietà termofisiche di
materiali ad elevata riflettanza solare per applicazioni a scala urbana:
limiti e potenzialità

M. Zinzi, E. Carnielo, G. Fasano

Report RdS/2012/227

DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ TERMOFISICHE DI MATERIALI AD ELEVATA RIFLETTANZA SOLARE PER
APPLICAZIONI A SCALA URBANA: LIMITI E POTENZIALITÀ

Michele Zinzi, Gaetano Fasano (ENEA), Emiliano Carnielo (Università degli Studi Roma Tre)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Indice

Sommario	4
Introduzione	5
Effetto isola di calore urbana, caso studio: Roma	7
Analisi ottica di asfalti fotocatalitici e calcestruzzi per pavimentazione stradale	10
<i>Descrizione dei campioni di tinte fotocatalitiche per asfalti</i>	10
<i>Misure di riflettanza in laboratorio delle tinte per asfalti</i>	11
<i>Monitoraggio delle temperature superficiali delle tinte per asfalti</i>	12
<i>Descrizione dei campioni di calcestruzzo per pavimentazione stradale</i>	15
<i>Misure in laboratorio dei campioni di calcestruzzo per pavimentazione stradale</i>	15
Calcolo delle temperature dell'ambiente urbano	17
<i>Descrizione del software di calcolo: ENVI-met</i>	17
<i>Modello ENVI-met di un quartiere, caso studio: Roma Prati</i>	17
<i>Risultati ENVI-met</i>	19
Calcolo del picco di carico di raffrescamento	23
<i>Descrizione del software di calcolo: TRNSYS</i>	23
<i>Modello TRNSYS dell'edificio</i>	24
<i>Risultati di TRNSYS</i>	25
Conclusioni	25
Riferimenti bibliografici	27

Sommario

Si definisce effetto isola di calore urbana (Urban Heat Island) l'aumento della temperatura dell'aria nelle città rispetto alle aree rurali circostanti. Il fenomeno è presente a tutte le latitudini e, associato al riscaldamento globale, ha un forte impatto su ambiente, energia e salute. In questo report è riportato il calcolo dell'intensità dell'isola di calore urbana per la città di Roma, ottenuto elaborando le acquisizioni di diversi termo-igrometri, posizionati sia in zone densamente urbanizzate che in zone di campagna limitrofe alla città. La massima intensità di isola di calore rilevata è stata 7 °C. L'aumento della riflettanza solare dei materiali urbani è una strategia volta a ridurre le temperature di superficie e dell'aria e ad attenuare l'effetto isola di calore urbana. I cool material applicati agli asfalti convenzionali sono una valida tecnologia per il raggiungimento di tale scopo. La caratterizzazione ottica è stata effettuata in laboratorio e all'aperto mostrando le proprietà e le prestazioni avanzate di diverse tinte per asfalti ad elevata riflettanza solare rispetto ai materiali tradizionali. Sono state condotte prove spettrofotometriche anche su campioni di calcestruzzo per pavimentazione stradale, ma l'elevata dimensione dei granuli e la presenza di zone vuote, direttamente paragonabili con la dimensione del fascio generato dallo strumento, ha reso inaccurati i risultati. I dati sperimentali sono stati utilizzati come input per simulare l'ambiente esterno di un quartiere densamente popolato di Roma, consentendo di stimare l'effetto degli asfalti ad alta riflettanza sulla temperatura dell'aria. Le simulazioni effettuate con il software ENVI-met hanno mostrato una significativa riduzione della temperatura dell'aria strettamente correlata con la riflettanza solare dei suddetti materiali. I profili di temperatura ottenuti sono stati utilizzati come input per calcolare l'impatto che le tinte per asfalti hanno a livello energetico su scala di edificio. In tal modo si sono ottenuti, tramite lo strumento di simulazione dinamica TRNSYS, i valori dei carichi energetici di raffrescamento di picco durante la stagione estiva per edifici residenziali tipici di zone densamente urbanizzate. Con i risultati ottenuti per i materiali a riflettanza solare più alta è stata calcolata una riduzione del picco di raffrescamento pari quasi al 19%.

Introduzione

La densità urbana e la progettazione di ambienti costruiti e naturali delle città svolgono un ruolo cruciale nella definizione di modelli sostenibili. Dal momento che si prevede che oltre l'80% della popolazione UE vivrà in aree urbane entro il 2030 [1], è importante esaminare con attenzione strategie energetiche, ambientali e di salute pubblica a livello urbano. I cambiamenti climatici e, in particolare, il riscaldamento globale mettono in evidenza le conseguenze dell'espansione urbana incontrollata: le temperature ambientali aumentano e le ondate di calore si fanno più frequenti con una durata superiore.

Un effetto tipico di questa nuova condizione è il fenomeno dell'isola di calore urbana, ossia l'aumento della temperatura dell'aria in ambienti urbani rispetto alle zone rurali circostanti, caratterizzate da profili di temperatura dell'aria più freschi. La causa principale dell'isola di calore urbana è la modifica della superficie terrestre nella zona urbana in cui la vegetazione viene sostituita da superfici edificate (di solito strade lastricate ed edifici), caratterizzate da elevato assorbimento solare oltre ad impermeabilità e proprietà termiche elevate che incrementano l'accumulo di energia e il rilascio di calore. L'aumento della temperatura dell'aria è determinato anche da attività antropiche: scarico dei trasporti pubblici e privati, scarico dei sistemi di riscaldamento degli edifici e calore dissipato dai sistemi di condizionamento d'aria. Un gran numero di studi effettuati a diverse latitudini confermano l'esistenza del fenomeno: sono state misurate intensità di isola di calore urbana fino a 12 °C e sono state condotte diverse indagini in aree urbane in tutto il mondo che mostrano come durante una giornata l'effetto isola di calore urbana vari tra 2 °C e 6 °C [2-8].

L'effetto ha un forte impatto sul comportamento termico degli edifici: la domanda di energia e di picco negli edifici dotati di impianto di raffrescamento aumenta in modo significativo. Ne consegue un aumento dei costi, in particolare a causa del consumo di energia elettrica durante le ore di picco dei caldi pomeriggi estivi. Infine le tecniche di raffrescamento passivo diventano meno efficienti perché le temperature notturne elevate non permettono un favorevole scambio termico tra aria e strutture edilizie [9-12]. Il fenomeno è rilevante se si considera che il settore edilizio rappresenta circa il 40% del consumo energetico complessivo ed è causa del 36% delle emissioni di CO₂ in Europa, con una tendenza in continuo aumento [12]. Da ciò si evince che l'isola di calore urbana non comporta solo rischi energetici: discomfort termico e problemi di salute sono più intensi durante le ondate di calore; le temperature più elevate creano le condizioni favorevoli per la formazione di smog; l'emissione di gas serra aumenta a causa dell'aumento del consumo di energia elettrica.

Come detto in precedenza le superfici costruite sono la causa principale dell'effetto isola di calore urbana: a causa della elevata assorbanza solare, la temperatura di superficie aumenta di molti gradi sopra la temperatura ambiente (fino a 30 °C). L'energia assorbita viene prima immagazzinata all'interno dell'edificio e poi rilasciata nell'ambiente, trasferendo per conduttività il calore attraverso gli strati solidi e per convezione dalla superficie del materiale all'aria. Dal calore liberato deriva l'aumento delle temperature esterne ed interne. Le pavimentazioni stradali giocano un ruolo rilevante in questo bilancio energetico poiché rappresentano una porzione significativa delle aree occupate in città, infatti la percentuale di pavimentazione risulta compresa tra il 29 e il 45% secondo un'indagine condotta in alcune città negli Stati Uniti [13]. Strade, marciapiedi, parcheggi e zone pedonali sono generalmente realizzati in cemento e asfalto e talvolta in pietre aggregate; la riflettanza solare di questa gamma di materiali varia dal 5 al 45%, anche se i valori standard sono: 5% per il nuovo asfalto (il catrame nero copre uniformemente l'aggregato); il 15% per l'asfalto "datato" (l'aggregato emerge sulle superficie di asfalto) e il 25% per il calcestruzzo.

L'aumento della riflettanza solare dei materiali urbani è una strategia emergente che ha suscitato l'interesse degli investitori allo scopo di mitigare le temperature urbane, nonché di migliorare il rendimento energetico degli edifici. I cool material sono una particolare categoria di materiali e componenti in grado di rimanere freschi sotto la radiazione solare. Sono caratterizzati da elevati valori di riflettanza solare che riducono la radiazione solare assorbita dai materiali da costruzione tradizionali e limitano l'aumento della temperatura superficiale in presenza di elevato irraggiamento. Questi materiali sono inoltre caratterizzati da elevati valori di emissività nell'infrarosso in grado di riemettere verso il cielo durante la notte il calore immagazzinato durante la fase diurna. Queste caratteristiche consentono al materiale di aumentare la

propria temperatura superficiale solo di pochi gradi sopra la temperatura ambiente, riducendo il calore scambiato con l'aria esterna per convezione e, di conseguenza, mitigando l'effetto isola di calore urbana.

I cool material trovano da tempo applicazione come rivestimento per i tetti (cool roof). Diversi studi condotti negli ultimi anni mostrano le potenzialità e i limiti di questa tecnologia per ridurre i fabbisogni energetici di raffrescamento e i carichi di picco attraverso prove sperimentali e analisi numeriche [14-21]. I cool roof possono essere bianchi o colorati per soddisfare le esigenze di integrazione architettonica e sono caratterizzati da una riflettanza nel visibile tipica del loro colore e da una riflettanza nell'infrarosso vicino elevata, al fine di ottenere una riflettanza solare superiore anche con colori non chiari.

Mentre i cool roof sono una tecnologia consolidata con buone potenzialità di penetrazione del mercato, lo stesso non vale per i cool material per applicazioni su pavimentazione stradale. Diversi studi hanno dimostrato le potenzialità di pavimentazioni stradali e asfalti ad elevata riflettanza in termini di riduzione dei consumi di energia elettrica per il raffrescamento e miglioramento della qualità dell'aria [22-26]. Al fine di evitare problemi di riverbero eccessivo dovuti all'alta riflettività della pavimentazione stradale, sono necessarie soluzioni caratterizzate da maggiore riflettanza solare e da una riflettanza luminosa moderata. Recenti sviluppi hanno dimostrato che questi materiali esistono e possono essere adeguatamente realizzati con valori di riflettanza solare di gran lunga superiori rispetto a quelli degli asfalti tradizionali [27-28].

Effetto isola di calore urbana, caso studio: Roma

La prima parte del report è volta a misurare l'intensità dell'isola di calore urbana (UHII) nella città di Roma per un periodo che va dal 13 Luglio al 12 Settembre. L'intensità dell'isola di calore è stata ottenuta come il valore massimo della differenza tra le temperature registrate in diversi siti densamente urbanizzati e quelle misurate in un sito di riferimento tipicamente rurale.

$$UHII = MAX(T_{SU} - T_{RR})$$

Avendo indicato con:

T_{SU} la temperatura del sito urbanizzato;

T_{RR} la temperatura del riferimento rurale.

I dati di temperatura sono stati ottenuti mediante centraline composte da sensore termo-igrometrico e scheda di acquisizione alloggiata in un contenitore impermeabile modello DECAGON EM 50. Il passo di acquisizione di temperatura e umidità è stato impostato a 10 minuti.



Fig.1: Termo-igrometro (sinistra) e acquisitore DECAGON EM 50

I siti monitorati sono elencati nella tabella seguente:

Tab. 1: Siti di posizionamento dei termo-igrometri

SITO	TIPOLOGIA
Cornelia	Urbano, vicinanza ad una grande area verde
Barberini	Urbano
Tuscolana	Urbano
Prati	Urbano
Marconi	Urbano
ENEA Anguillara	Sito Rurale Di Riferimento

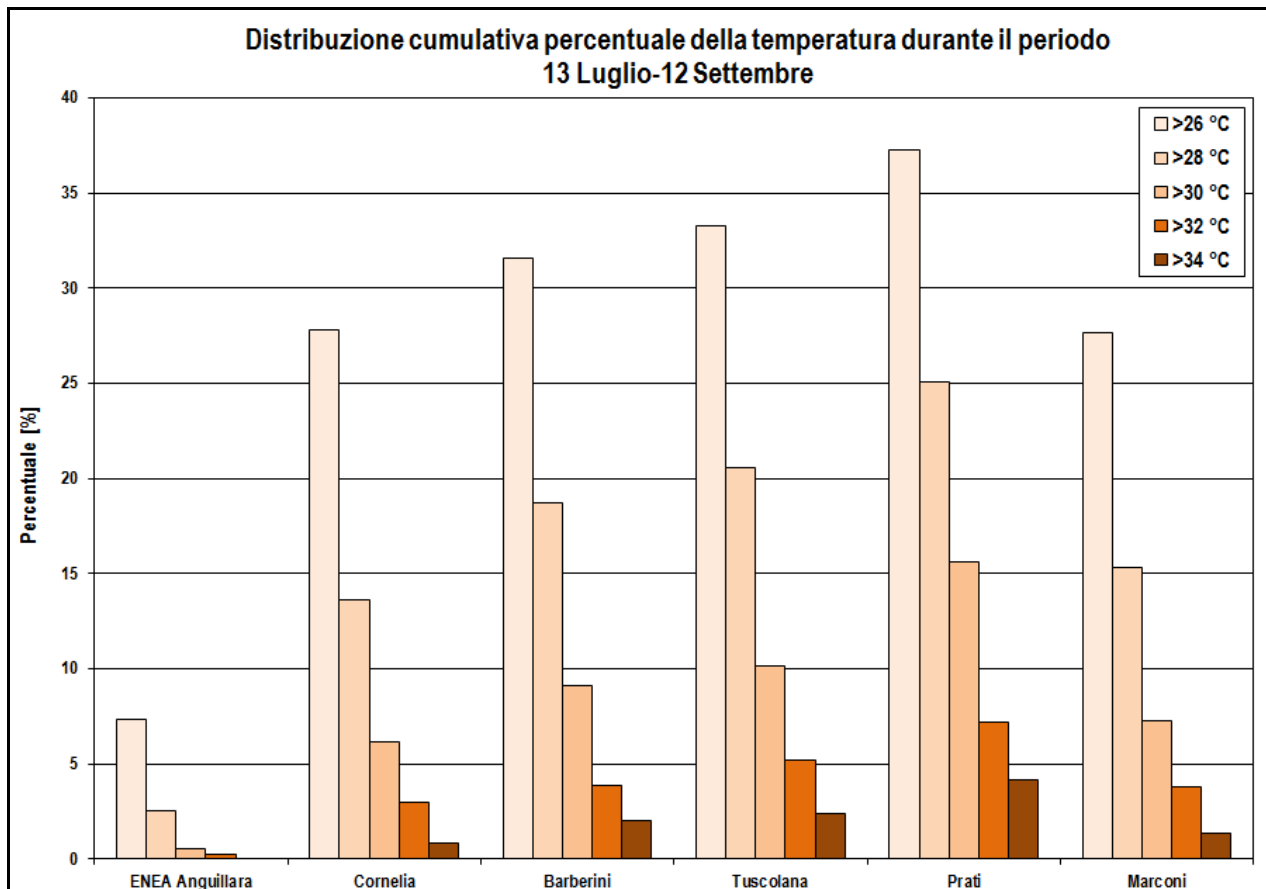


Fig. 2: Distribuzione cumulativa percentuale delle temperature rilevate dai termo-igrometri nel periodo considerato

Attraverso l'analisi dei dati misurati si è potuto costruire un diagramma, riportato in figura 2, che rappresenta la distribuzione cumulativa percentuale delle temperature nei vari siti di interesse. Si è contato il numero di ore nel periodo in cui la temperatura eguaglia o supera un valore prestabilito. Si è poi calcolata la percentuale che il numero di ore rappresenta rispetto al tempo totale di monitoraggio.

E' ben visibile la sostanziale differenza tra il sito di riferimento ENEA Anguillara e i siti urbani. In particolare si nota come nel primo la temperatura non superi mai i 34 °C, cosa che invece accade per tutti gli altri siti. Il caso più critico è rappresentato da Prati in cui per il 37 % del tempo la temperatura ha un valore superiore a 26 °C. Inoltre, per più di un quarto del periodo di monitoraggio, la temperatura è rimasta al di sopra di 28 °C.

Cornelia presenta le percentuali più basse tra le zone urbane e ciò è giustificato dalla presenza di una vasta pineta limitrofa al sito di posizionamento della centralina.

La figura 3 mostra un'ulteriore rappresentazione molto efficace del fenomeno dell'isola di calore individuando in ENEA Anguillara (zona rurale) il campione di riferimento e mettendo a confronto con esso le temperature medie giornaliere degli altri siti nel periodo.

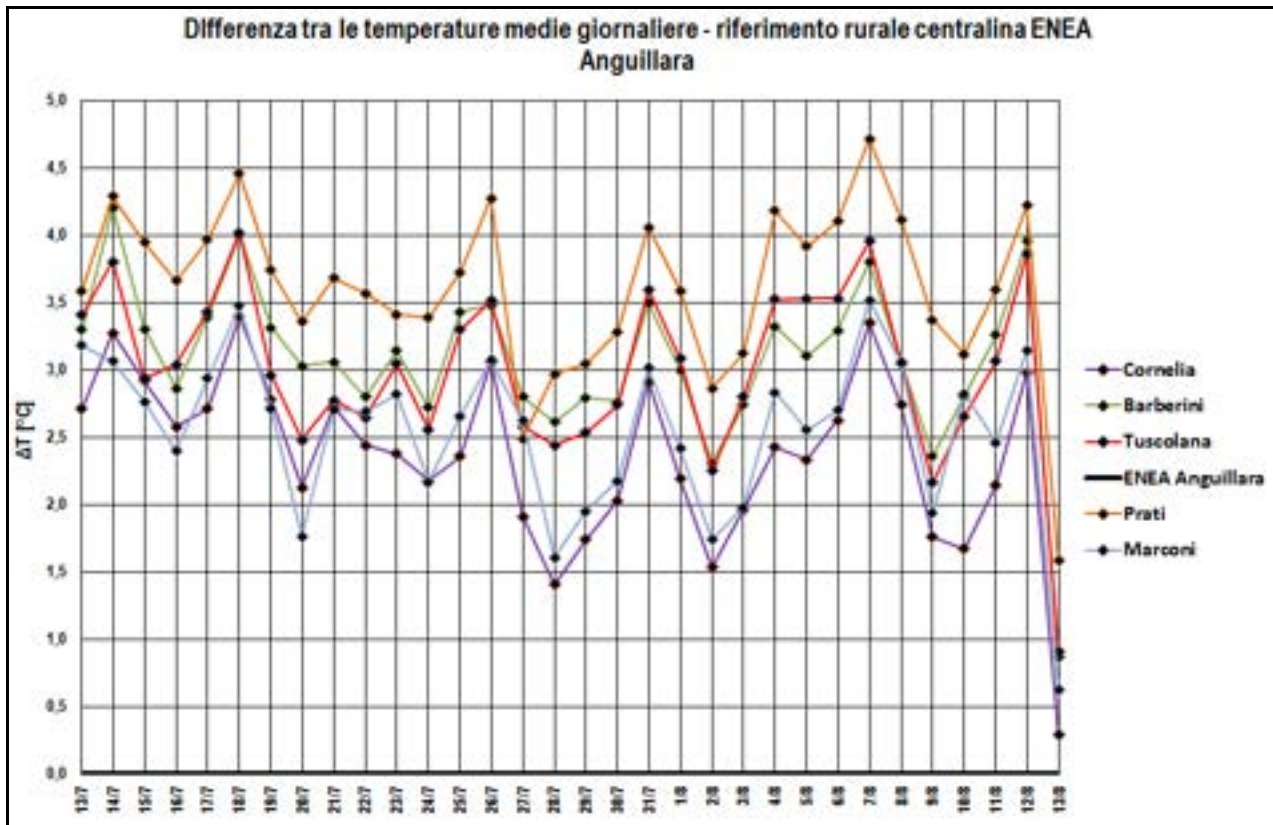


Fig. 3: Differenza tra le temperature medie giornaliere dei siti urbani e del sito rurale ENEA Anguillara

Prati risulta nuovamente essere la zona più critica, infatti essa fa registrare il valore di differenza di temperatura media giornaliera più alto, 4,7 °C il 7 Agosto, a seguire troviamo: Barberini, con un valore di 4,2 °C rilevato il 14 Luglio; Tuscolana con 4 °C il 18 Luglio e il 7 Agosto; Marconi e Cornelia con valori di picco molto vicini prossimi a 3,5 °C. La figura evidenzia, inoltre, come Cornelia sia il sito dove si presentano le differenze minori rispetto al sito rurale di riferimento, sempre a causa dell'effetto favorevole di mitigazione delle temperature legato alla massiccia presenza di vegetazione nella zona .

Infine nella tabella seguente è stato riportato il valore numerico dell'intensità dell'isola di calore urbana, calcolato con la formula precedentemente applicata alle temperature orarie.

Tab. 2: UHII (Urban Heat Island Intensity)

SITO	UHII (°C)	DATA E ORA
Cornelia	6,1	21 Luglio Ore 2.00
Barberini	7,0	21 Luglio Ore 2.00
Tuscolana	6,9	25 Luglio Ore 3.00
Prati	6,9	25 Luglio Ore 2.00
Marconi	5,9	25 Luglio Ore 1.00

L'intensità dell'isola di calore varia da 5,9 a 7 °C e si manifesta in orari distanti da quelli in cui si rilevano le temperature di picco come dimostrato nella figura 4, dove, a titolo di esempio, è riportato l'andamento giornaliero delle temperature per un sito urbano e rurale e la differenza di temperatura del primo rispetto al sito rurale.

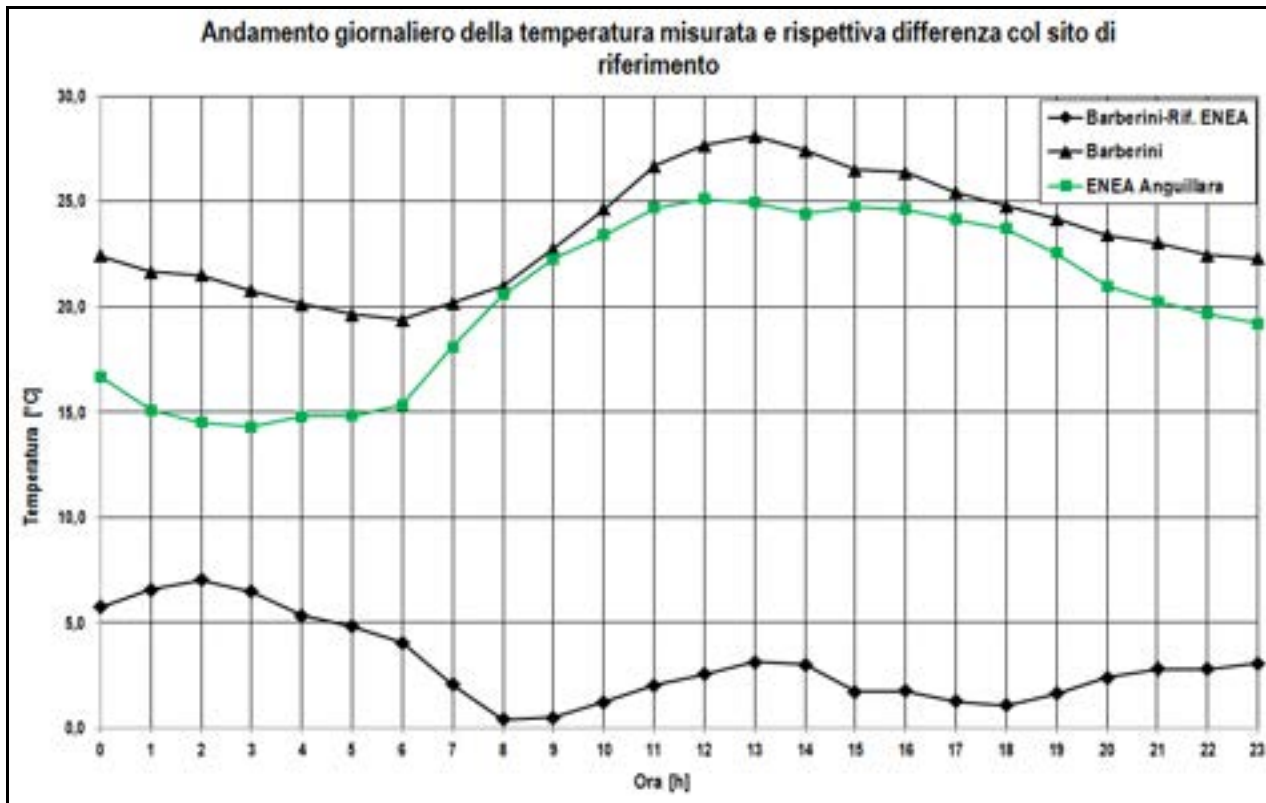


Fig. 4: Temperatura oraria rilevata il 13 Luglio nel sito Barberini e andamento delle differenze rispetto al sito ENEA Anguillara

La temperatura si discosta in maniera minore da quella del campione di riferimento nella parte centrale della giornata aumentando in modo sensibile nelle ore iniziali. Tale aumento è legato a fenomeni di accumulo del calore nel costruito durante le ore di picco di irraggiamento con conseguente maggior difficoltà di rilascio nelle ore seguenti, a causa dell'inerzia termica dei materiali.

Analisi ottica di asfalti fotocatalitici e calcestruzzi per pavimentazione stradale

Questa fase del report riguarda l'analisi delle caratteristiche superficiali di due tipologie di materiali per l'edilizia: una tinta fotocatalitica per asfalto e un materiale a base di calcestruzzo utilizzato per il rivestimento e la pavimentazione di strade ed aree urbane.

Descrizione dei campioni di tinte fotocatalitiche per asfalti

La prima tipologia di materiale esaminata in questo studio è un prodotto premiscelato in polvere costituito da cemento fotocatalitico (a base di biossido di titanio), inerti selezionati di dimensioni speciali e additivi brevettati. Diverse tipologie di pigmenti possono essere aggiunti per dare al prodotto la colorazione desiderata. Il prodotto agisce come un rivestimento da posare sull'asfalto esistente coprendo i fori e le cavità. Lo strato sottile di materiale uniforme depositato può essere preparato secondo una vasta gamma

di colori. Il prodotto, già presente sul mercato, non è stato inizialmente sviluppato come cool material bensì come materiale dalle proprietà fotocatalitiche. Le potenzialità di mitigazione della temperatura urbana sono emerse in una fase successiva. Per tale motivo è stata necessaria una campagna di misurazione e di studio sul campo al fine di valutarne a pieno le qualità. Sono stati selezionati cinque colori di riferimento per lo studio: bianco, grigio, verde, rosso, blu. Con ogni colore è stato dipinto un supporto di 15x15 cm preparato per la caratterizzazione in laboratorio. Le tinte sono state inoltre applicate su una strada a traffico limitato nel Centro Ricerche ENEA per il monitoraggio continuo della temperatura superficiale dei cinque colori selezionati. Ogni tinta occupa una spazio di quattro metri quadrati.

Misure di riflettanza in laboratorio delle tinte per asfalti

Le misure di riflettanza sono state effettuate con uno strumento commerciale: uno spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 950, dotato di una sfera integratrice del diametro di 15 centimetri, rivestita in Spectralon, materiale ad elevato potere di riflessione in tutto lo spettro solare. La sfera di integrazione è strettamente necessaria durante i test su materiali diffondenti, come quelli in esame. Le misurazioni sono state effettuate tra 300 e 2500 nanometri, con una risoluzione spettrale di 5 nanometri. L'apertura della slitta è stata impostata a 2 nanometri nel visibile e in modalità "servo" (apertura variabile della slitta a seconda dell'input energetico ottimale) nell'infrarosso vicino. A causa della rugosità dei campioni e della geometria del fascio di luce sorgente (circa 1,5 cm), sono state condotte tre misurazioni su ciascuno dei cinque campioni. I valori integrati di riflettanza sono stati calcolati a partire dalle misure spettrali secondo le procedure e le curve di ponderazione per la gamma solare e visibile definite nella normativa ISO 9050 2003 [29]. Allo scopo di un confronto sono state testate anche due tipologie di asfalto tradizionale:

- Asfalto nuovo (il catrame nero copre completamente gli aggregati);
- Asfalto "invecchiato" (il catrame non copre completamente gli aggregati e il colore superficiale è grigio scuro).

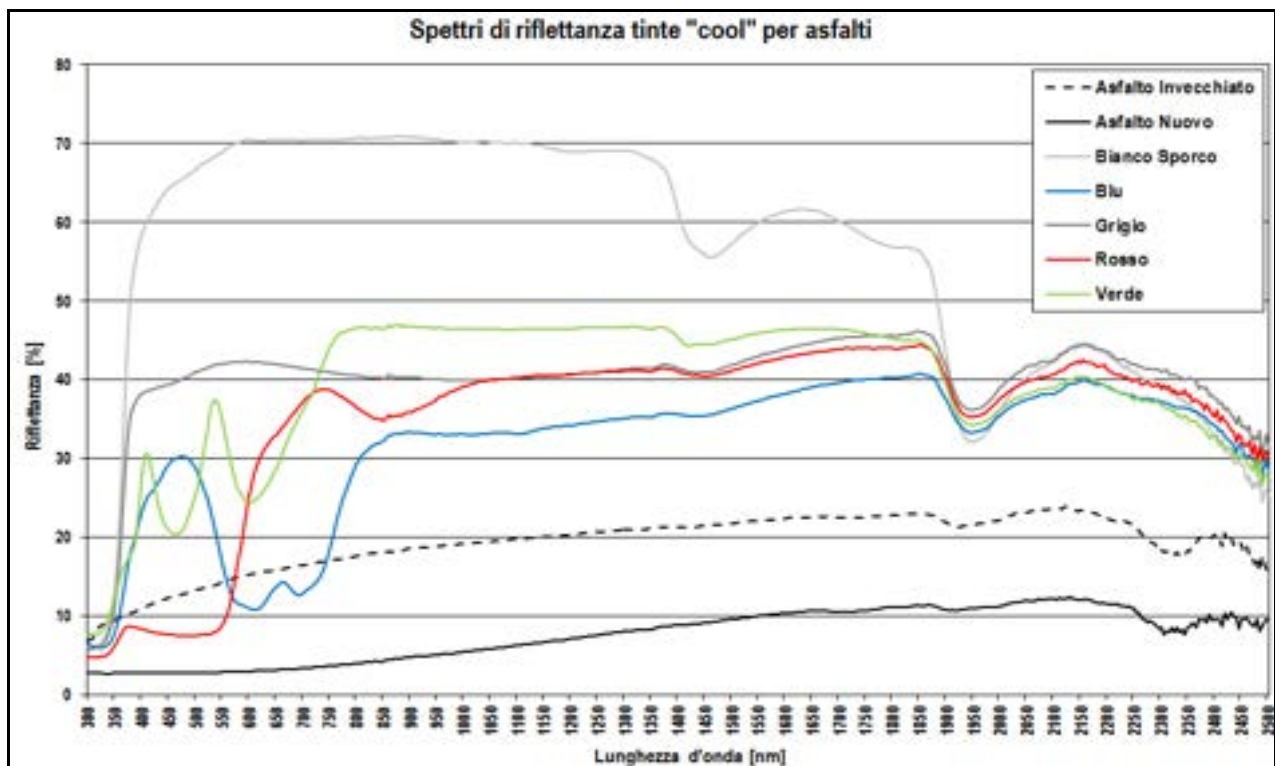


Fig. 5: Riflettanza spettrale tinte per asfalti

La tabella 3 presenta i valori integrati nei relativi spettri (visibile, infrarosso vicino e solare) degli asfalti tradizionali e delle tinte per asfalto.

Tab. 3: *Valori integrati di riflettanza delle tinte per asfalti secondo la norma ISO 9050 2003*

Tinte Asfalti	ρ_e (%)	ρ_{NIR} (%)	ρ_v (%)
Asfalto Nuovo	4,5	6,7	2,9
Asfalto Invecchiato	16,3	19,5	14,2
Bianco Sporco Cool	65,7	65,9	68,9
Grigio Cool	40,3	41,0	41,9
Blu Cool	25,3	34,2	17,6
Verde Cool	36,2	45,7	29,8
Rosso Cool	27,9	39,1	13,9

Le misurazioni mostrano che gli asfalti colorati hanno una maggiore riflettanza solare rispetto agli asfalti convenzionali, caratteristica principale per mantenere la superficie fredda sotto la radiazione solare. L'asfalto nuovo ha una riflettanza nettamente inferiore rispetto all'asfalto "invecchiato" in tutto lo spettro solare: nella gamma del visibile il colore nettamente più scuro del primo determina una riflettanza luminosa quasi 5 volte inferiore rispetto al secondo. Anche le riflettanze nell'infrarosso vicino e solare sono decisamente inferiori, rispettivamente di 4 e 3 volte circa.

Come si evince dalle curve piatte in figura 5 e dai valori in tabella 3 è interessante notare che i colori bianco sporco e grigio non presentano significative proprietà selettive: i valori di riflettanza nell'infrarosso vicino e nel visibile sono praticamente gli stessi per i due materiali. La stessa situazione non si verifica per i campioni colorati, per i quali si registra sempre un aumento della riflettanza nell'infrarosso vicino rispetto a quella nel visibile. La differenza di riflettanza tra le bande del N.I.R. e visibile varia tra 16 % (verde) e 25 % (rosso). In termini relativi, ciò significa che la riflettanza nell'infrarosso vicino è superiore alla riflettanza luminosa da 1,5 a 3 volte. La differenza tra la riflettanza nell'infrarosso vicino e quella solare è, ovviamente, inferiore e varia tra il 9 % (blu) e 11 % (rosso).

Monitoraggio delle temperature superficiali delle tinte per asfalti

Piccole porzioni di asfalto di una strada del Centro Ricerche ENEA sono state trattate con le tinte analizzate precedentemente. La temperatura superficiale di questi materiali è stata continuamente monitorata durante l'estate 2011, dal 11 Agosto al 30 Agosto. Anche se questo lasso di tempo non corrisponde al periodo più intenso in termini di irraggiamento solare, il monitoraggio è stato attuato per controllare la risposta dei materiali in condizioni reali. I cool material sono stati applicati su un substrato di asfalto moderatamente invecchiato, che rappresenta il materiale di riferimento per il confronto. I sensori di temperatura di superficie sono stati collocati al centro dei vari campioni di colore e sono stati schermati dalla radiazione solare attraverso un sottile strato di tinta campione sulla parte superiore del sensore.

La figura 6 presenta il sito di monitoraggio.



Fig. 6: Area di asfalto dipinta con le tinte ad elevata riflettanza solare.

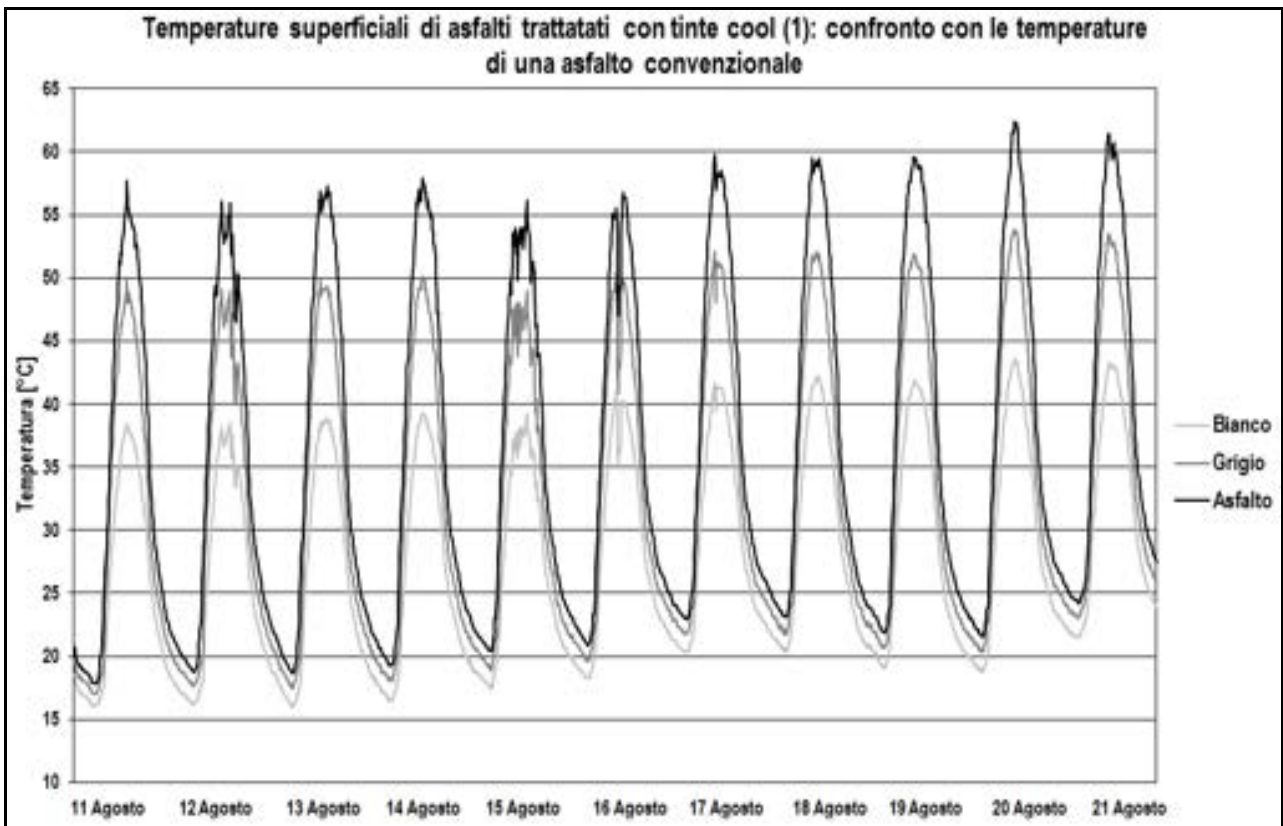


Fig. 7: Temperature superficiali monitorate, confronto asfalto convenzionale, bianco e grigio cool

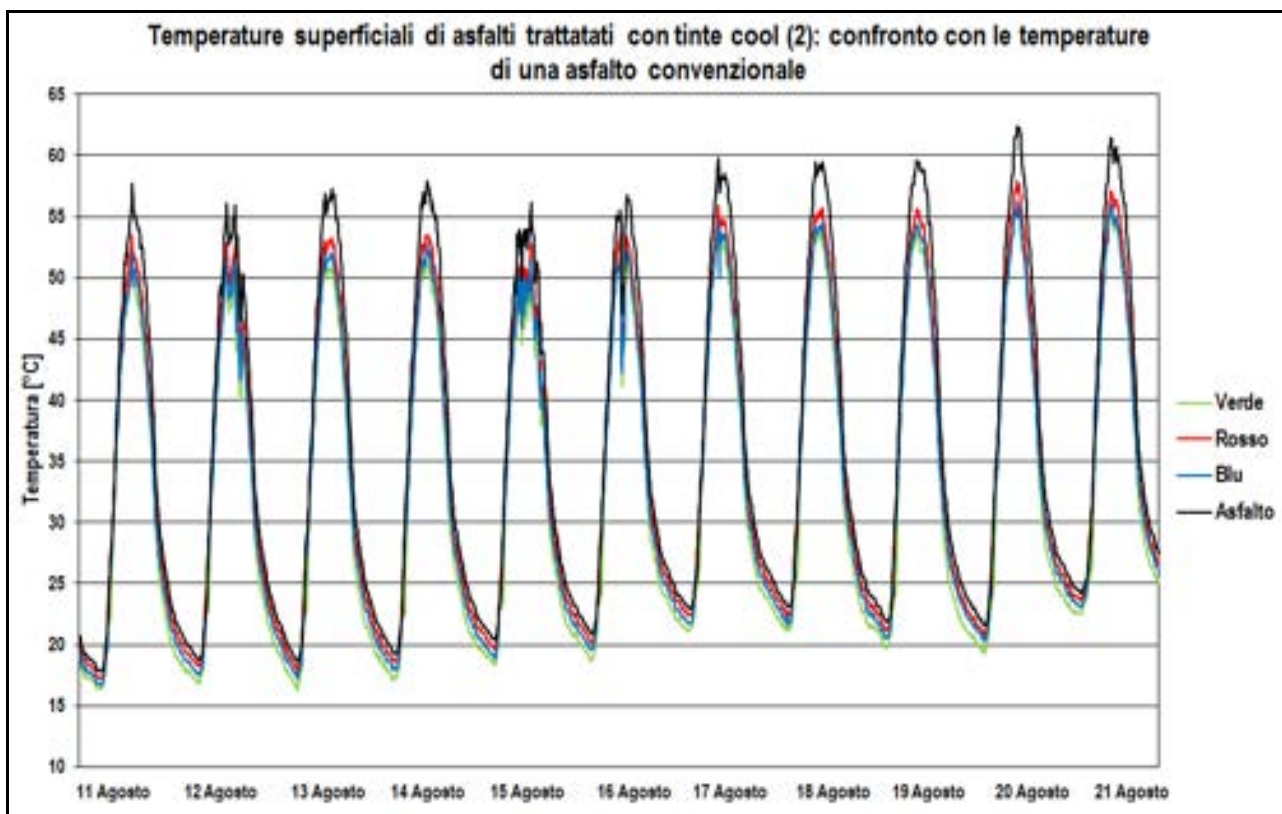


Fig. 8: Temperature superficiali monitorate, confronto asfalto convenzionale, verde, rosso e blu cool

Le figure 7 e 8 presentano i profili di temperatura di superficie delle aree monitorate durante undici giorni nel mese di agosto. L'asfalto convenzionale ha raggiunto una temperatura di 58 °C durante il periodo di picco di irraggiamento, mentre il rivestimento bianco sporco ha raggiunto un massimo di 39 ° C. I campioni colorati mostrano prestazioni intermedie, mantenendo la superficie dell'asfalto ad una temperatura di almeno 5 °C inferiore rispetto al caso convenzionale durante il periodo di picco. Le differenze di comportamento tra tutti i campioni si attenuano decisamente durante il periodo notturno. I massimi delle temperature superficiali e i rispettivi valori medi registrati durante il monitoraggio sono riportati nella tabella 4. Essa contiene anche il massimo scarto (ΔT Max) e lo scarto medio (ΔT Media) di temperatura tra la superficie dell'asfalto convenzionale e quella delle tinte colorate.

Tab. 4: Valori massimi e medi delle temperature superficiali e delle differenze di temperatura tra asfalto convenzionale e tinte colorate

Campioni Asfalti	T Max (°C)	T Media (°C)	ΔT Max (°C)	ΔT Media (°C)
Convenzionale	62,4	36,4	-	-
Verde	56,1	32,8	7,8	3,5
Blu	56,3	33,6	7,9	2,7
Rosso	57,9	34,5	6,2	1,8
Grigio	53,9	32,5	10,0	3,8
Bianco	43,9	28,1	19,3	8,2

I risultati evidenziano le elevate proprietà del rivestimento bianco sporco e dei rivestimenti colorati al fine di migliorare la risposta termica dell'asfalto, soprattutto durante le ore di punta, quando vengono raggiunti i valori massimi di temperatura.

Ulteriori dettagli sono stati ricavati attraverso la distribuzione cumulativa della differenza tra le temperature della superficie dell'asfalto convenzionale e delle tinte colorate fotocatalitiche. Questi dati sono riassunti in figura 9.

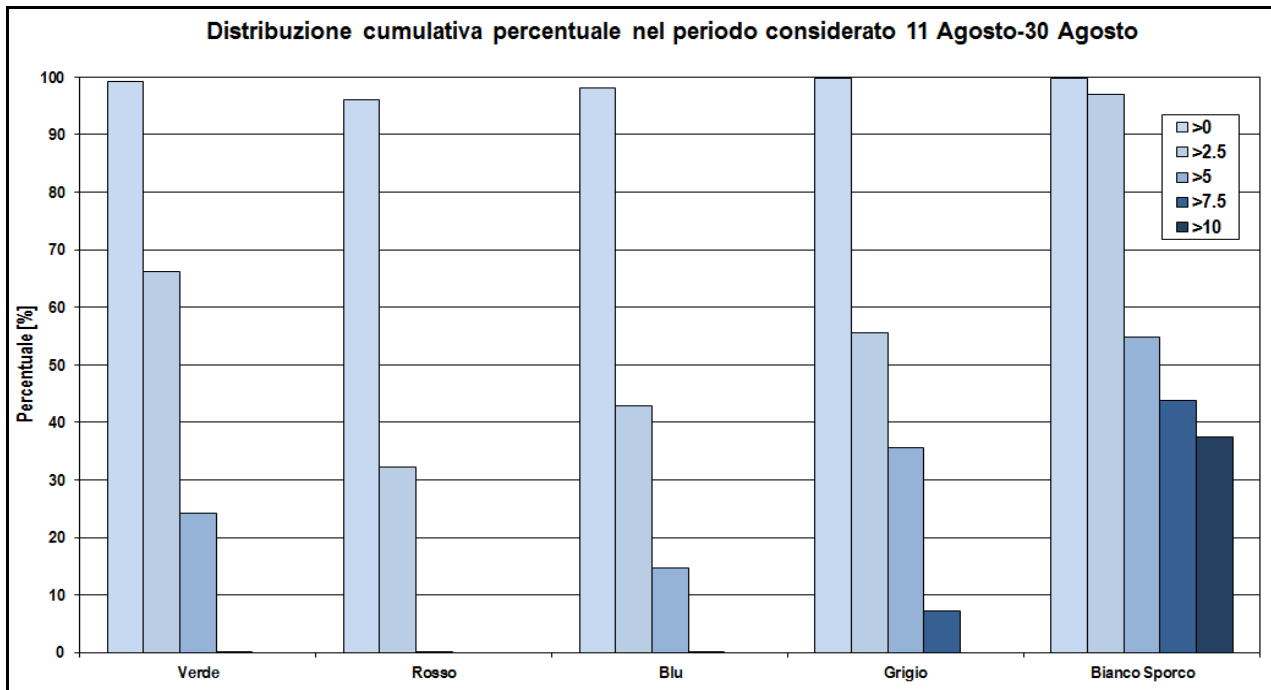


Fig. 9: Distribuzione cumulativa percentuale nel periodo 11-31 Agosto delle differenze di temperatura tra asfalto convenzionale e tinte colorate

Secondo i risultati, tutti i campioni hanno fatto registrare una temperatura inferiore rispetto a quella dell'asfalto durante l'intero periodo, escludendo rare eccezioni durante la notte. I risultati più interessanti riguardano ancora una volta il bianco sporco, che è rimasto più freddo di almeno 5 °C per il 55 % del periodo e di 10 °C per il 37 %. La tinta grigia è stata più fredda dell'asfalto convenzionale di 2,5 °C per metà del periodo e di 7,5 °C durante il 7 % del tempo. Il verde e il blu hanno fatto registrare temperature superficiali inferiori di 5 °C, rispettivamente per il 24 e il per il 15 % del periodo. I risultati peggiori sono stati quelli del campione rosso che non ha mai raggiunto differenze di temperatura superiori a 5 °C.

Descrizione dei campioni di calcestruzzo per pavimentazione stradale

La seconda tipologia di materiali analizzati in questo report è un prodotto composto da calcestruzzo usato come rivestimento per strade e aree pedonali. Sono stati testati campioni di diverso colore e diversa dimensione dei granuli (che a seconda della dimensione fanno variare la percentuale di vuoti) al fine di valutare il potere di riflessione di questi materiali.

Misure in laboratorio dei campioni di calcestruzzo per pavimentazione stradale

Anche in questo caso le misure in laboratorio sono state condotte con la stessa tipologia di spettrofotometro usato in precedenza e con le stesse modalità. Data l'elevatissima rugosità di questi materiali si è proceduto, come nel caso precedente, a diverse misure per ogni campione modificando lo spot di indagine di incidenza del fascio sorgente dello strumento. Le curve spettrali ottenute sono molto distanti tra loro, sia come valori che come forma, sebbene si tratti dello stesso materiale. Ciò denota l'inefficienza dell'utilizzo di questo strumento di misura per campioni altamente irregolari, dove la dimensione delle irregolarità è direttamente confrontabile con quella del fascio incidente generato dalla

macchina. Per misure più accurate è necessario l'uso di strumenti più adatti, equipaggiati da sfere integratrici di grandi dimensioni e generanti fasci incidenti dalla forma più regolare e più estesa (6-7 centimetri di diametro), in modo da indagare una porzione maggiore del campione. Gli spettri ottenuti nei quattro punti di indagine differiscono in ogni regione della banda solare. Questo fenomeno è giustificato dal fatto che l'esigua dimensione del fascio dello spettrofotometro, variando il punto di incidenza, ha colpito sia zone di pieno che zone di vuoto tra i granuli. La riflettanza solare calcolata assume valori che vanno da 61,8 a 48 %; la riflettanza nell'infrarosso vicino varia in maniera analoga tra 61,2 a 49 % e la riflettanza luminosa tra 64,7 e 49,4 %.

Sono stati selezionati tre campioni per la misura:

- Calcestruzzo bianco – dimensione media dei granuli 6 mm;
- Calcestruzzo bianco – dimensione media dei granuli 12 mm;
- Calcestruzzo grigio – dimensione media dei granuli 12 mm.

I risultati spettrali e integrati delle misure sono riportati rispettivamente nella figura 10 e nella tabella 5.

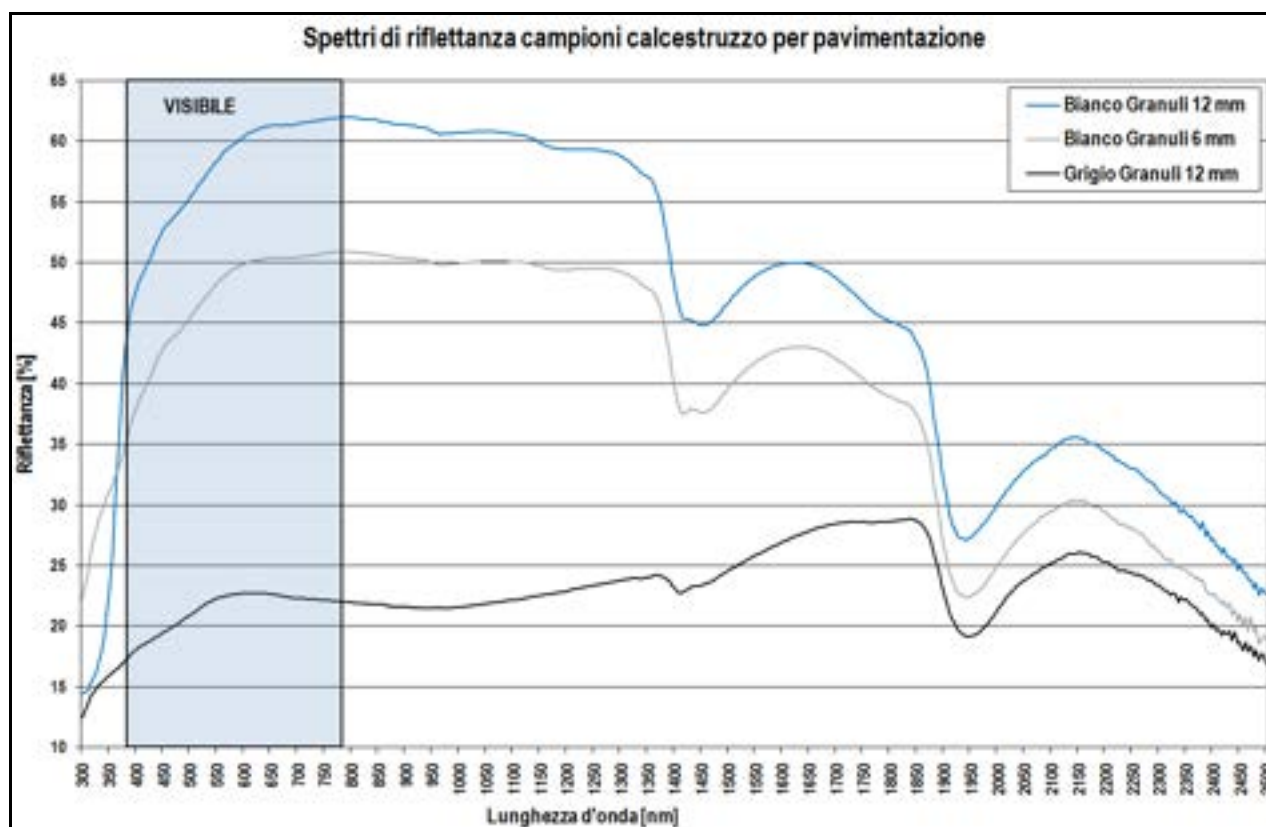


Fig. 10: Riflettanza spettrale - campioni di calcestruzzo

Tab. 5: Valori integrati di riflettanza del calcestruzzo secondo la norma ISO 9050 2003

Calcestruzzi per pavimentazione stradale	ρ_e (%)	ρ_{NIR} (%)	ρ_v (%)
Bianco Granuli 6 mm	45,3	46,3	46,1
Bianco Granuli 12 mm	55,5	56,1	57,3
Grigio Granuli 6 mm	22,2	23,1	22,5

Le curve in figura 10 sono state ottenute facendo una media delle quattro misure effettuate per ogni campione (a diversi spot di incidenza) e i valori integrati sono stati calcolati su questa media.

Il campione bianco con i granuli di dimensione media di 12 mm ha fatto registrare i valori di riflettanza più alti. Come ricordato in precedenza, essendo le curve frutto di una media di quattro punti di indagine casuali, la possibilità che il fascio abbia colpito zone di pieno di dimensioni maggiori rispetto al campione costituito da granuli di dimensione media di 6 mm, è elevata.

In attesa di un seguente studio di caratterizzazione ottica più approfondito e condotto con strumentazione più adeguata, si può notare in maniera inequivocabile, sia dalla figura che dalla tabella, l'assenza di selettività di questi materiali, ovvero i valori integrati nel solare, visibile e N.I.R. variano tra loro al massimo meno del 2 %.

Un cool material in genere presenta un andamento spettrale nel visibile tipico della sua colorazione, denotando invece, a differenza di un materiale convenzionale, un alto potere di riflessione nel N.I.R.. Sebbene questo fenomeno si noti in maniera minore in cool material dalle colorazioni chiare, dove i valori integrati di riflettanza nel visibile e nel N.I.R. sono in genere entrambi elevati e simili, esso risulta molto marcato nei cool material dalla colorazione scura, dove si nota un'attitudine più selettiva.

I calcestruzzi misurati necessiterebbero, a tal proposito, di uno step tecnologico mirato ad incrementare la riflettanza nella banda dell'infrarosso vicino, aumentandone le proprietà selettive. D'altra parte essi presentano comunque valori di riflettanza superiori all'asfalto convenzionale.

Calcolo delle temperature dell'ambiente urbano

Descrizione del software di calcolo: ENVI-met

L'impatto che i rivestimenti di asfalto ad elevata riflettanza solare possono avere sulla temperatura esterna in una zona urbana è stato studiato con ENVI-met, un software che utilizza un metodo di calcolo deterministico chiamato SVAT (Soil, Vegetation and Atmosphere Transfer). Questo strumento opera su micro-scala ed è in grado di simulare l'evoluzione temporale di diversi parametri termo-fluido-dinamici all'interno di una griglia tridimensionale. Mediante questa griglia è possibile ricreare la porzione di un'area urbana con edifici e strade, oltre a modificare le proprietà termiche e ottiche di elementi quali la temperatura all'interno di edifici, la trasmittanza termica e la riflettanza delle superfici. All'interno del tessuto urbano possono essere implementate anche la distribuzione e le caratteristiche della vegetazione. Le variabili climatiche da impostare in input sono: temperatura potenziale dell'aria e umidità specifica a 2500 metri dal suolo, umidità relativa a 2 metri dal suolo, velocità e direzione del vento a 10 metri dal suolo. Dopo l'inizializzazione, viene creato un profilo verticale da 0 a 2500 metri di queste variabili e viene utilizzato come condizione al contorno mono-dimensionale applicata al margine del modello tridimensionale.

Modello ENVI-met di un quartiere, caso studio: Roma Prati

Il quartiere scelto è una porzione del quartiere Prati, una zona densamente urbanizzata di circa 580.000 m² nel centro di Roma. Questa zona è stata immessa all'interno dello strumento ENVI-met allo scopo di ricreare la distribuzione tridimensionale di strutture, pavimentazione stradale e vegetazione. Le dimensioni della griglia di calcolo sono state impostate a 755 (x) × 770 (y) × 58,5 (z) metri suddividendo ogni asse in un numero di celle rispettivamente pari a 151 × 154 × 20.

I parametri impostati per gli edifici sono: temperatura dell'aria interna costante a 26 °C, trasmittanza parete 1 W/m²K, albedo parete 0,35, trasmittanza del tetto 1,2 W/m²K, albedo del tetto 0,25. Questi valori sono stati scelti in modo da simulare le caratteristiche medie del parco edifici dell'area.

I valori iniziali delle variabili alle ore 0:00 sono: 7 g_{H₂O}/kg_{aria} di umidità specifica e una temperatura potenziale di 30 °C a 2500 metri, 60% di umidità relativa a 2 metri, direzione del vento SW con una velocità di 2,5 metri al secondo.

Per contenere i problemi di transitorio su strutture e aree poste in prossimità della periferia del dominio, a causa dei valori delle condizioni al contorno mono-dimensionali, sono state aggiunte due ulteriori griglie annidate intorno alla griglia principale. Il metodo scelto per il calcolo della variazione delle condizioni al contorno laterali di temperatura e umidità è il cosiddetto metodo "open". Ciò significa che i valori dei punti interni della maglia sono stati ricopiati sul bordo di ingresso laterale. Ciò consente di limitare al minimo l'effetto di bordo del modello sulle parti interne dello stesso. La variazione delle condizioni al contorno laterali di energia cinetica delle masse d'aria in ingresso è stata invece calcolata con il metodo "ciclico" in cui i valori in uscita dal modello vengono copiati sul contorno di ingresso: la griglia è progettata all'interno di una grande area urbana e per questa ragione, confinando con analoghe strutture edilizie, il profilo dell'aria in ingresso è per ipotesi simile al profilo in uscita [30].

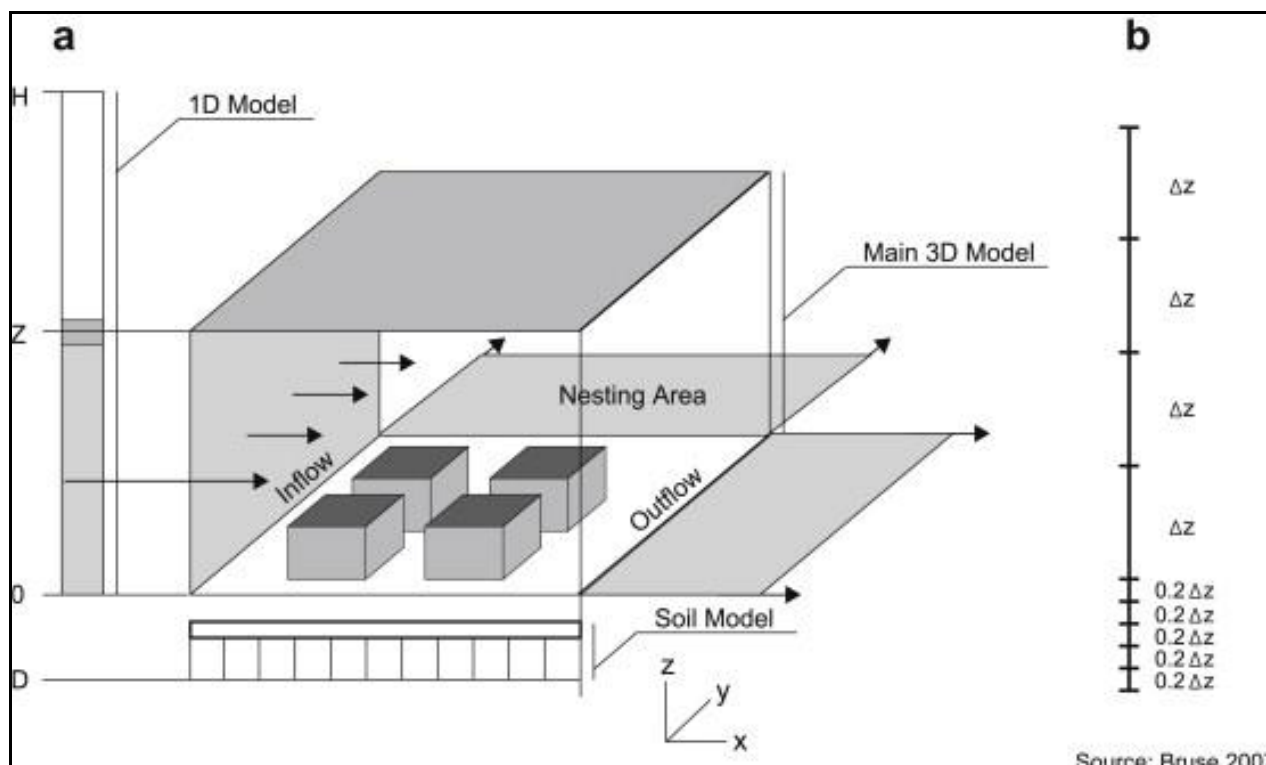


Fig. 11: Schema del modello di calcolo utilizzato in ENVI-met

L'intento dello studio è stato quello di verificare la possibile riduzione della temperatura esterna su scala locale dovuto all'utilizzo di un cool material applicato su un asfalto. A questo proposito, sono state eseguite tre simulazioni durante una giornata estiva, il 20 luglio, con tre diverse configurazioni di riflettanza solare per asfalti: 10% per simulare un asfalto convenzionale, 40% e 65% per simulare rispettivamente un asfalto grigio cool e bianco sporco cool.

All'interno della mappa sono stati posizionati cinque recettori mediante l'interfaccia ENVI-met, al fine di ottenere un controllo più preciso della temperatura dell'aria esterna a diverse altezze dal suolo, per le tre configurazioni. La posizione del recettore 1 è stata scelta vicino a una zona verde mentre gli altri recettori sono stati posizionati progressivamente più lontani dal primo in zone termicamente più critiche senza vegetazione.



Fig. 12: *Mapa del sito Roma Prati, posizionamento recettori (1-5) e ricostruzione tramite ENVI-met*

Risultati ENVI-met

Le figure 13, 14 e 15 presentano una panoramica ENVI-met relativa ad una distribuzione orizzontale delle temperature dell'aria esterna a 3 metri di altezza dal suolo, per la zona considerata e per le tre configurazioni di riflettanza degli asfalti, valutabili attraverso una scala cromatica. Gli edifici sono evidenziati in nero, la vegetazione in verde. Le figure rappresentano un' "istantanea" alle ore 15:00, corrispondente alla temperatura di picco del 20 luglio.

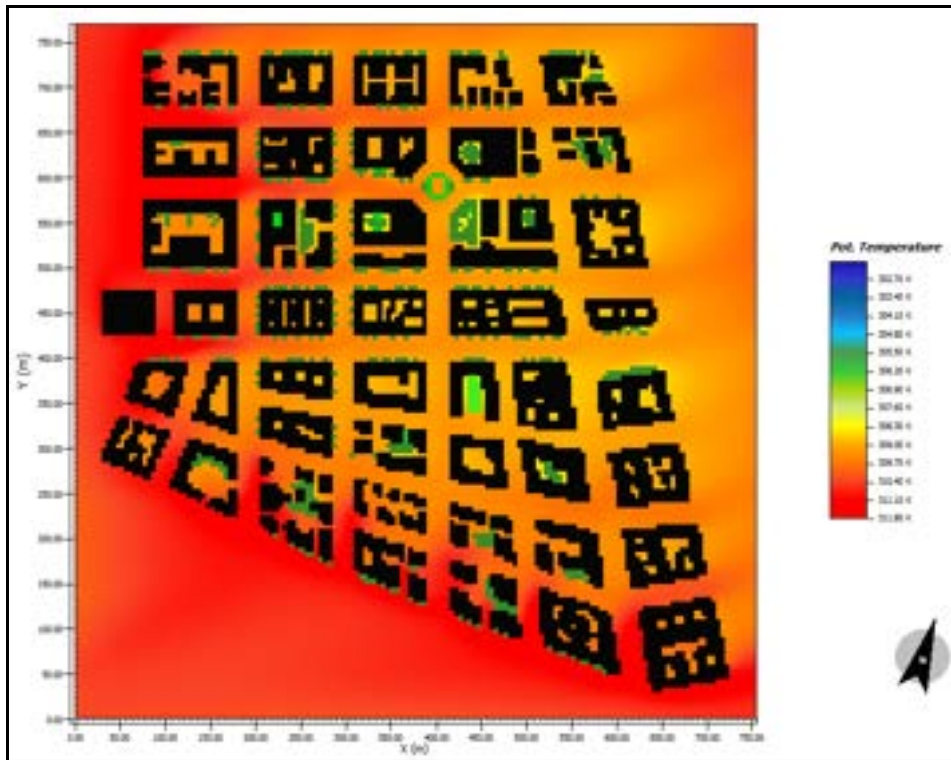


Fig. 13: Distribuzione orizzontale delle temperature – riflettanza asfalto 10% - 20 Luglio ore 15:00 – 3 metri di altezza dal suolo

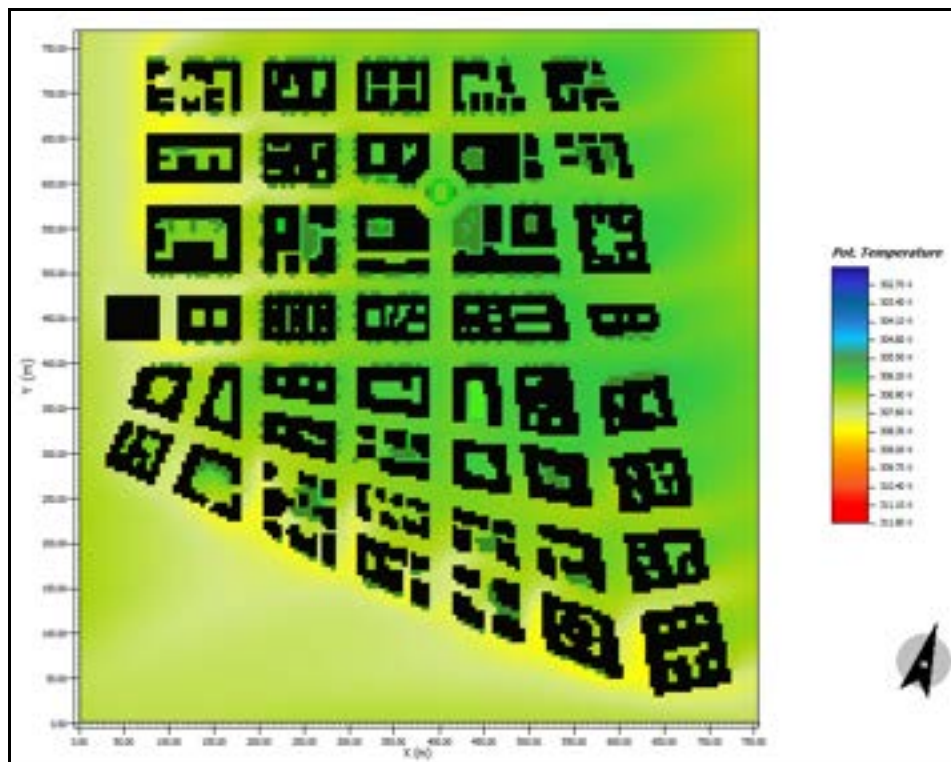


Fig. 14: Distribuzione orizzontale delle temperature – riflettanza asfalto 40% - 20 Luglio ore 15:00 – 3 metri di altezza dal suolo

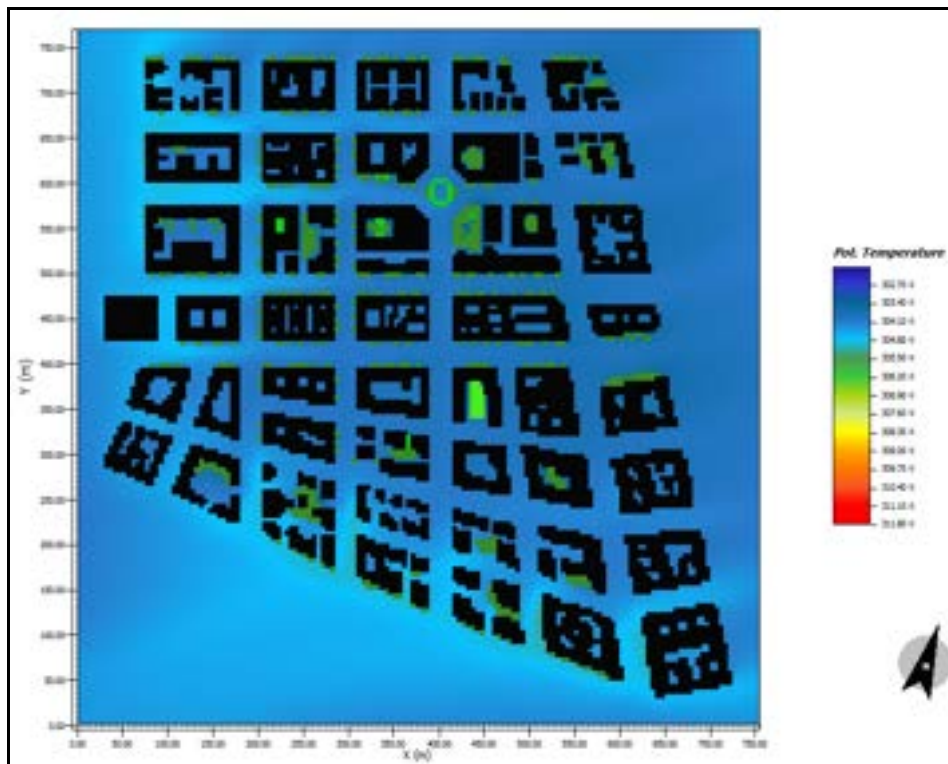


Fig. 15: Distribuzione orizzontale delle temperature – riflettanza asfalto 65% - 20 Luglio ore 15:00 – 3 metri di altezza dal suolo

Confrontando i risultati delle tre simulazioni, è evidente come la temperatura dell'aria diminuisca in media di circa 3 °C, passando da un tessuto urbano composto da asfalti convenzionali (Figura 13) a uno in cui l'area è stata simulata con un'applicazione di asfalto grigio cool (Figura 14). Considerando l'applicazione di un asfalto bianco sporco cool (Figura 15), la temperatura diminuisce ulteriormente, con una differenza media di 5,5 °C.

Ciò è dovuto al fatto che la superficie dell'asfalto cool, a causa della sua elevata riflettanza solare, rimane più fredda se sottoposta a radiazione solare rispetto a quella di un convenzionale asfalto scuro, come precedentemente verificato per via sperimentale. Una superficie più fredda determina un trasferimento di calore convettivo e radiativo inferiore all'aria dell'ambiente urbano e di conseguenza la temperatura di quest'ultima tende a raggiungere valori inferiori.

La figura 16 consente di osservare attraverso una distribuzione verticale della temperatura il fenomeno descritto precedentemente. Il piano di sezionamento è il piano y-z passante per la coordinata x = 440 delle figure 13, 14 e 15. Si nota come le temperature tendano a diminuire con la quota e in prossimità di zone caratterizzate da vegetazione.

La tabella 6 presenta le temperature rilevate dai recettori per i tre layout urbani caratterizzati da riflettanza diversa dell'asfalto a 4,5 metri di altezza dal suolo. Sono stati scelti tre orari: le ore 12:00, 15:00 e 18:00 per valutare l'evoluzione della temperatura nella parte centrale della giornata. I recettori selezionati sono: recettore 1, vicino alla vegetazione e recettore 2, nei pressi di un incrocio. I recettori 3, 4 e 5 hanno registrato i medesimi valori di temperatura del recettore 2, quindi non sono stati considerati.

Per il recettore 2 le differenze nei valori di temperatura dell'aria, a seguito del cambiamento del valore di riflettanza dell'asfalto, sono evidenti: 2,9 °C confrontando l'asfalto convenzionale con l'asfalto grigio cool e 5,4 °C confrontando l'asfalto convenzionale con l'asfalto bianco sporco cool. Il valore massimo viene raggiunto in corrispondenza della temperatura di picco alle ore 15:00 come mostrato in tabella 6: Δ (10% - 40%) R2 e Δ (10% - 65%) R2. Il recettore 1, collocato vicino alla vegetazione, ha fatto registrare una temperatura inferiore rispetto a quella del recettore 2 con una differenza massima di 1 °C per la

configurazione con asfalto convenzionale in corrispondenza della temperatura di picco. Questo effetto mette in evidenza l'importanza della vegetazione come tecnica aggiuntiva per mitigare le temperature in aree densamente urbanizzate. Tuttavia, l'influenza della vegetazione sulla temperatura diminuisce leggermente all'aumentare della riflettanza solare degli asfalti. Ciò è dovuto al livellamento della temperatura legato all'effetto di raffreddamento operato da questi materiali. Vedere nella tabella 6: $\Delta(R2-R1)$.

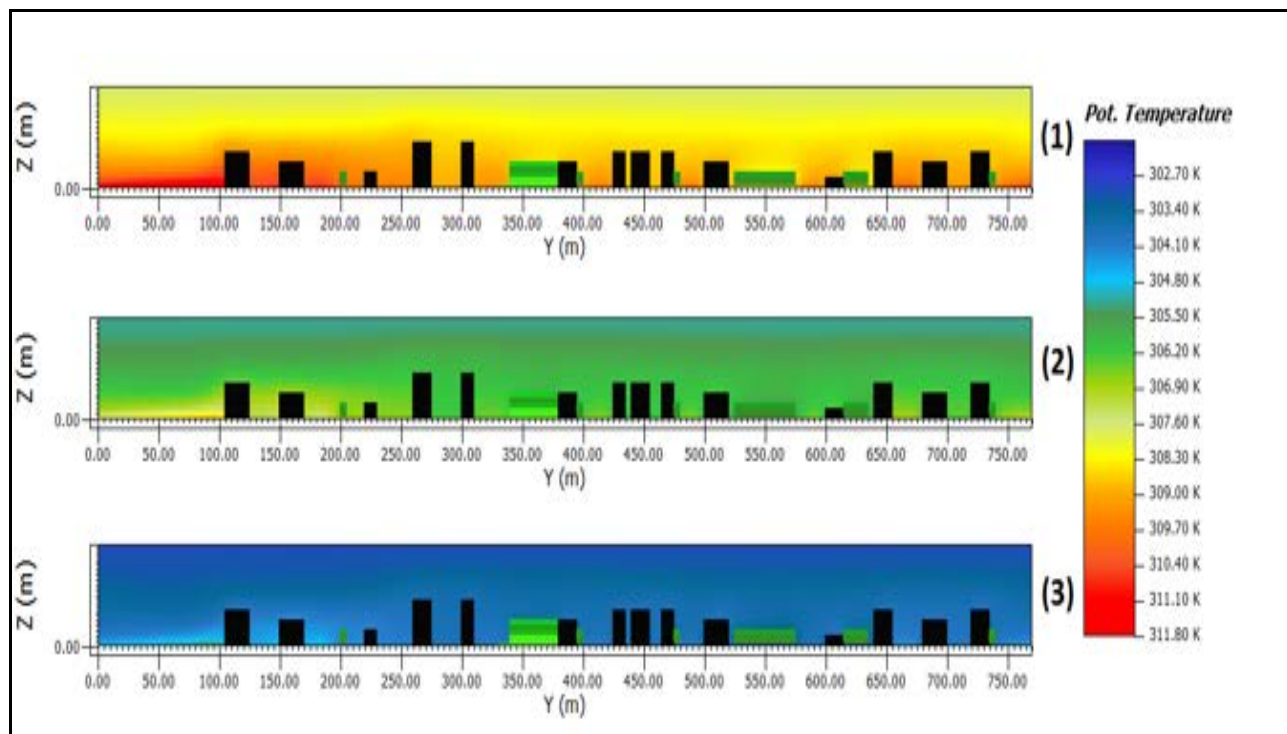


Fig. 16: Distribuzione verticale delle temperature per le tre configurazioni di riflettanza dell'asfalto: 10 % (1), 40 % (2), 65 % (3)

Tab. 6: Temperatura dell'aria registrata dai recettori 1 e 2 a 4.5 metri dal suolo per i tre livelli di riflettanza solare degli asfalti, 20 Luglio. La tabella riporta inoltre: la differenza di temperatura tra i recettori 1 e 2; la differenza di temperatura tra la configurazione caratterizzata da asfalto convenzionale e cool material per il recettore 2

ρ_e asfalto [%]		Orario [h]		
		12:00	15:00	18:00
10	R1	32,9	35,2	33,9
	R2	33,9	36,2	34,7
	$\Delta(R2-R1)$	0,9	1,0	0,7
40	R1	30,9	32,5	31,7
	R2	31,7	33,4	32,4
	$\Delta(R2-R1)$	0,8	0,8	0,7
65	R1	29,2	30,2	29,5
	R2	29,7	30,8	30,1
	$\Delta(R2-R1)$	0,6	0,7	0,6
	$\Delta(10\%-40\%)$ R2	2,2	2,9	2,3
	$\Delta(10\%-65\%)$ R2	4,1	5,4	4,6

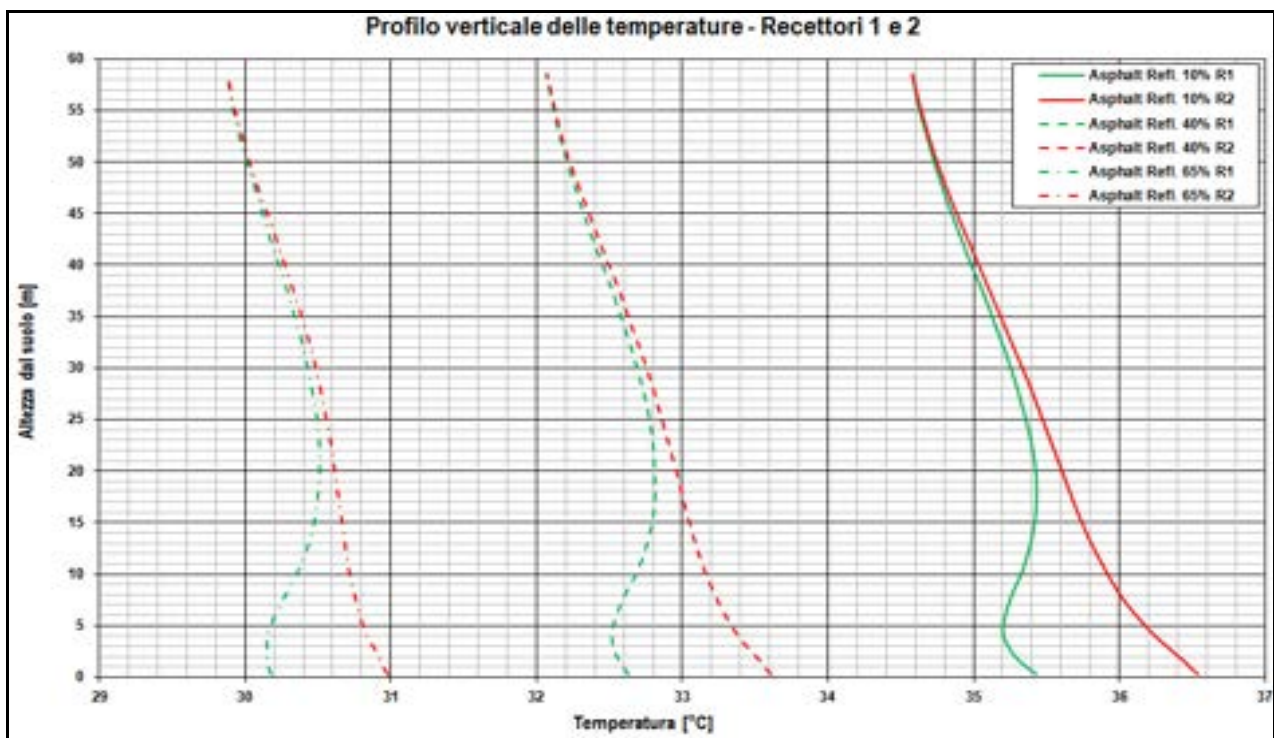


Fig. 17: *Profilo verticale della temperatura dell'aria per i recettori 1 e 2 – tre configurazioni di riflettanza degli asfalti*

La figura 17 mostra il profilo verticale della temperatura dell'aria durante lo stesso giorno, considerato precedentemente, alle ore 15:00. La temperatura è stata calcolata da un'altezza di 0 metri fino a 58,5 metri, valore rappresentativo limite superiore del dominio di calcolo del modello.

Gli andamenti della temperatura riferiti alle tre configurazioni sono molto simili e le differenze di temperatura sono rimaste pressoché costanti in relazione all'altezza. Questo risultato è un'ulteriore dimostrazione di quanto i cool material, applicati agli asfalti, possano influenzare in modo netto e radicale le condizioni termiche della zona considerata, migliorando il comfort anche ad altezze significative, ben oltre l'altezza media degli edifici.

Va notato il diverso comportamento dei due recettori tra 0 e 25 metri dovuto a piante e alberi ad alto fusto che modificano il profilo di temperatura del recettore 1 (verde). La differenza massima è stata di 1 °C a 4,5 m di altezza, corrispondente al valore già discusso nella tabella 6. Oltre il limite di 25 m le due tendenze di temperatura si sovrappongono perché il recettore 1 non è più influenzato dagli effetti della vegetazione.

Calcolo del picco di carico di raffrescamento

Descrizione del software di calcolo: TRNSYS

I profili della temperatura urbana ottenuti con le simulazioni precedenti sono stati utilizzati per calcolare il carico di raffrescamento di picco di un'abitazione tipica inserita nel contesto di riferimento. Lo scopo dello studio è stato la valutazione dell'influenza che un'applicazione di asfalti ad elevata riflettanza solare può avere sui carichi di raffrescamento di picco. Lo studio è stato condotto con il software TRNSYS (Transient System Simulation Tool) sviluppato dalla University of Wisconsin Madison. Questo software consente l'analisi dinamica di sistemi energetici transitori complessi attraverso funzioni di trasferimento. Mediante la sua struttura modulare questi possono essere scomposti in una serie di componenti, facilitando la modellazione del problema. I blocchi funzionali sono chiamati "types" e sono scritti in linguaggio Fortran. Sono costituiti da elementi matematici che modellano le prestazioni di una parte del sistema. Le "types"

possono essere collegate insieme per comporre la struttura principale del progetto. In definitiva TRNSYS è un insieme di modelli di componenti energetici raggruppati intorno a un motore di simulazione. Una sezione chiamata TRNBuild consente di progettare l'involucro edilizio e le sue proprietà termofisiche. Collegandolo alle "types" del database meteorologico, TRNSYS è in grado di calcolare i flussi termici che influenzano la struttura [31].

Modello TRNSYS dell'edificio

Come precedentemente anticipato, gli input di temperatura esterna e umidità relativa sono derivati dai risultati ottenuti con il software ENVI-met. Questi dati, rappresentativi di una giornata di luglio, sono stati utilizzati per modificare i valori di default del database climatico di Roma (Aeroporto di Fiumicino) già esistente in TRNSYS.

La struttura in esame è un edificio residenziale con un tetto piano che si sviluppa su quattro livelli. Questa è una struttura tipica del parco degli edifici del centro di Roma. Ogni piano, composto da due appartamenti, ha una superficie complessiva di 200 metri quadrati, una superficie netta di 149,2 metri quadrati e un'altezza di 2,7 metri. I lati più lunghi sono esposti a nord e sud, con una superficie finestrata di rispettivamente 3,6 e 7,2 metri quadrati. I lati est e ovest hanno una superficie finestrata di 5,4 metri quadrati. La tabella 7 riporta i valori di spessore e trasmittanze termiche degli elementi che compongono l'involucro opaco e trasparente. Sono stati considerati due livelli di isolamento al fine di quantificare l'incidenza della temperatura esterna su strutture con differenti caratteristiche termiche per allargare il campo di studio a edifici nuovi ed esistenti.

La ventilazione è stata impostata su 0,3 volumi/ora in base alla norma italiana di riferimento [32] per utilizzi ad uso residenziale. L'accensione del sistema di raffreddamento avviene quando la temperatura interna supera i 26 °C.

Tab. 7: Caratteristiche degli elementi opachi e trasparenti dell'edificio scelto

NON ISOLATA			
	Spessore [m]	Trasmittanza [W/m ² K]	
Tetto	0,35	1,100	
Pavimento	0,30	1,211	
Solaio	0,30	1,211	
Muro Esterno	0,38	1,128	
Muro interno	0,15	1,726	
	Design [mm]	Trasmittanza [W/m ² K]	Fattore solare g [-]
Finestra	4	5,68	0,85
ISOLATA			
	Spessore [m]	Trasmittanza [W/m ² K]	
Tetto	0,35	0,385	
Pavimento	0,30	0,493	
Solaio	0,30	0,493	
Muro Esterno	0,38	0,433	
Muro interno	0,15	1,726	
	Design [mm]	Trasmittanza [W/m ² K]	Fattore solare g [-]
Finestra	4-16-4	2,83	0,76

Risultati di TRNSYS

È stato già precedentemente dimostrato come l'aumento della riflettanza degli asfalti abbia un effetto significativo sulla riduzione della temperatura esterna dell'area urbana. Questo fenomeno si riflette con la stessa intensità anche sulle condizioni termiche all'interno degli edifici, apportando benefici in termini di risparmio energetico durante la stagione estiva.

Tab. 8: Risultati TRNSYS – Picco massimo del carico di raffrescamento – due livelli di isolamento – tre configurazioni di riflettanza solare degli asfalti

NON ISOLATA		
ρ_e asfalto [%]	Picco del carico di raffrescamento [kW]	Riduzione percentuale [%]
10	21,2	-
40	19,0	10,2
65	17,2	18,9
ISOLATA		
ρ_e asfalto [%]	Picco del carico di raffrescamento [kW]	Riduzione percentuale [%]
10	16,9	-
40	15,6	7,8
65	14,4	14,6

La tabella 8 mostra i risultati ottenuti con TRNSYS riassumendo i valori dei picchi del carico di raffreddamento ottenuti con i tre asfalti: quello convenzionale e quelli ad elevata riflettanza. La tabella mostra anche i valori percentuali di riduzione del picco con riferimento al caso peggiore ottenuto con l'asfalto convenzionale.

Per l'edificio non isolato, il picco massimo del carico di raffrescamento è stato di 21,2 kW considerando il tessuto urbano equipaggiato con un asfalto tradizionale; esso è diminuito fino a 19,0 kW per l'asfalto grigio cool con una riduzione percentuale di 10,2%. L'asfalto bianco sporco cool ha fatto registrare un carico massimo di raffrescamento di 17,2 kW, con una riduzione percentuale del 18,9 %.

Per la costruzione isolata, i valori dei carichi di picco e la loro percentuale di riduzione sono diminuiti, evidenziando come la struttura subisca meno la variazione delle temperature esterne a causa di una trasmittanza termica dell'involucro inferiore. In questa configurazione, il picco di carico associato all'asfalto convenzionale è stato di 16,9 kW, mentre è stato di 15,6 kW per l'asfalto grigio cool con una riduzione percentuale del 7,8%. Infine, l'asfalto bianco sporco cool ha indotto un picco massimo di 14,4 kW, con una riduzione del 14,6%.

Conclusioni

L'effetto isola di calore urbana è un fenomeno che affligge ormai in maniera sempre più persistente i centri abitati. Questo studio ha dimostrato l'effettiva presenza del fenomeno a Roma. Infatti da un'analisi dei dati registrati durante la stagione estiva da alcune centraline meteo posizionate in diversi punti, urbani e non, della città, si è ottenuta una differenza massima di temperatura tra una zona densamente urbanizzata e una zona rurale che ha raggiunto i 7 °C. Questa differenza massima di temperatura nell'arco del periodo in esame, ovvero l'intensità dell'isola di calore (UHII), si è verificata durante la fase notturna.

Questo lavoro ha presentato uno studio sulle potenzialità di riflessione della radiazione solare di alcuni materiali utilizzati come tinte per asfalti e come rivestimenti per pavimentazioni stradali.

La caratterizzazione ottica ha evidenziato l'impatto positivo delle tinte per asfalto sull'aumento della riflettanza solare degli asfalti convenzionali. Le misurazioni spettrali hanno evidenziato anche i limiti dei prodotti testati; è dimostrato che, escluso il materiale bianco sporco, la riflettanza nell'infrarosso vicino di

tutti i campioni è risultata essere sempre inferiore a 46 %, valore di gran lunga inferiore rispetto a quelli dei cool material colorati per l'applicazione sul tetto degli edifici. Migliorare la riflettanza nell'infrarosso vicino è un requisito obbligatorio per sfruttare le potenzialità del prodotto dal momento che i valori più alti di riflettanza solare possono essere raggiunti senza aumentare la riflettanza visibile, migliorando anche l'integrazione architettonica e urbana.

Il monitoraggio esterno sulla temperatura superficiale ha fornito dati utili circa la capacità di queste tinte per asfalto di limitarne l'innalzamento se sottoposti alla radiazione solare. Le differenze massime di temperatura tra i campioni di colore verde, blu e grigio rispetto all'asfalto originale sono comprese tra 8 e 10 °C. I valori più bassi sono stati ottenuti con l'asfalto rosso, mentre la differenza massima, vicina a 20 °C, si è ottenuta con il campione di colore bianco sporco. I valori medi durante il monitoraggio hanno mostrato che le temperature delle superfici trattate sono rimaste alcuni gradi inferiori rispetto agli asfalti originali, ma per rendere queste applicazioni competitive sono necessari valori di riflettanza solare e nell'infrarosso vicino ancora superiori. Il monitoraggio ha anche mostrato la differenza significativa tra il risultato ottenuto in laboratorio rispetto all'applicazione su strada per il campione di colore blu, essendo risultato il primo più assorbente rispetto al secondo. Questo aspetto, che non è rilevante per studi sperimentali, è fondamentale per l'accettazione sul mercato della tecnologia e deve essere attentamente trattato dai produttori ed installatori per avere installazioni la cui risposta cromatica sia in linea con la scelta dei clienti, che generalmente avviene attraverso la gamma dei colori campione proposta dai produttori.

L'analisi ottica allo spettrofotometro condotta sui calcestruzzi utilizzati per la pavimentazione stradale non ha prodotto risultati significativi. Infatti i prodotti non hanno capacità selettive di riflessione nella banda solare e, sebbene presentino comunque valori di trasmittanza solare superiori a quelli degli asfalti convenzionali, necessitano anch'essi di ulteriori sviluppi per incrementare la riflettanza nell'infrarosso vicino. La metodologia di misura con lo spettrofotometro commerciale ha evidenziato i suoi limiti per i test su questi materiali. L'elevata rugosità di questi ultimi, dovuta alla conformazione superficiale costituita da granuli aggregati di diverse dimensioni, non ha permesso misure accurate. La dimensione delle zone di vuoto e di pieno è risultata essere direttamente confrontabile con la dimensione del fascio incidente sul campione generato dallo strumento. Il confronto delle misure di riflettanza ottenute su diversi spot di indagine per un campione ha messo in risalto questo problema: il valore integrato della riflettanza solare ha assunto per quest'ultimo valori compresi tra 61,8 e 48 % denotando come diversi punti dello stesso campione presentino poteri di riflessione diversi. Al fine di ottenere misure più accurate per materiali ad elevata rugosità e fortemente diffondenti sarà necessario l'utilizzo di strumentazioni più adeguate, equipaggiate con fasci sorgente dal diametro maggiore e grandi sfere integratrici.

Per indagare le potenzialità dell'applicazione di un asfalto ad elevate proprietà di riflessione in un tessuto urbano è stata condotta un'analisi numerica con ENVI-met, un software che utilizza un metodo di calcolo deterministico.

I risultati di questo studio mettono in evidenza come queste tinte colorate, utilizzate per strade e marciapiedi, potrebbero avere un impatto sensibile, grazie alle basse temperature di superficie, sulla diminuzione della temperatura media dell'aria dell'ambiente urbano, anche a notevoli altezze dal suolo. L'entità calcolata di tale diminuzione, in una giornata estiva, raggiunge un massimo di 5,5 °C sostituendo l'asfalto convenzionale con un asfalto bianco sporco cool e questa differenza si mantiene quasi costante anche al di sopra dell'altezza media degli edifici. Un'ulteriore analisi numerica condotta con TRNSYS ha avuto lo scopo di valutare l'effetto che la diminuzione della temperatura dell'aria nelle aree urbane, derivante dall'utilizzo di cool material per asfalti, ha sui picchi del carico di raffrescamento di un edificio residenziale tipico inserito in un quartiere densamente urbanizzato di Roma. Sono state registrate riduzioni sensibili della domanda di raffrescamento di picco dovute all'uso di questi rivestimenti stradali: 18,9 % per le configurazioni non isolate e 14,6 % per l'edificio isolato. Questi risultati assumono una connotazione più importante se estesi a tutta la stagione estiva.

In conclusione, l'utilizzo massiccio di questa tecnologia innovativa combinato con un aumento delle aree verdi porterebbe ad una sensibile riduzione dell'effetto isola di calore urbana e delle sue conseguenze con miglioramenti sui livelli di comfort e con una diminuzione degli usi energetici legati al raffrescamento negli edifici.

Riferimenti bibliografici

1. "World Energy Outlook 2008-2009", International Energy Agency Geneva; 2008-2009.
2. Y. Goldreich, "Ground and top of canopy layer urban heat island partitioning on an airborne image", *Remote Sensing of Environment*, Volume 104 (2006), pp. 247-255.
3. S. Hassid, M. Santamouris, N. Papanikolaou, A. Linardi, N. Klitsikas, "The effect of the heat island on air conditioning load", *Journal of Energy and Buildings*, Volume 32(2) (2000), pp. 131-141.
4. L. Huang, D. Li, J. Zhao, J. Zhu, "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* Volume 43 (2008), pp. 7-17.
5. M. Kolokotroni, Y. Zhang, R. Watkins, "The London heat island and building cooling design", *Solar Energy*, Volume 81(1) (2007), pp. 102-110.
6. C. Rosenzweig, W. Solecki, L. Parshall, M. Choppingc, G. Pope, R. Goldberg, "Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey", *Environmental Hazards*, Volume 6 (2005), pp. 51-62.
7. M. Santamouris, "Heat island research in Europe, the state of the art", *Advances Building Energy Research*, Volume 1 (2007), pp. 123-50.
8. H. Taha, S.C. Chang, H. Akbari, "Meteorological and air quality impacts of heat island mitigation measures in three U.S. Cities", Lawrence Berkeley National Laboratory Report, Berkeley, CA, 2000.
9. M. Kolokotroni, I. Giannitsaris, R. Watkins, "The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies", *Solar Energy*, Volume 80 (2006), pp. 383-392.
10. S. Hassid, M. Santamouris, N. Papanikolaou, A. Linardi, N. Klitsikas, C. Georgakis et al, "The effect of the Athens heat island on air conditioning load", *Energy and Buildings*, Volume 32 (2000), pp. 134-141.
11. J.A. Voogt, T.R. Oke, "Thermal remote sensing of urban climates", *Remote Sensing of Environment*, Volume 86 (2003), pp. 370-384.
12. JRC/IE. Electricity Consumption and Efficiency Trends in the European Union. Status Report. JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24005 EN. Joint Research Centre, Institute for Energy, Ispra, 2009.
13. L.S. Rose, H. Akbari, H. Taha, "Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Greater Houston, Texas", Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51448, Berkeley, CA, 2003.
14. H. Akbari, S. Bretz, D. Kurn, H. Hartford, "Peak power and cooling energy savings of high albedo roofs", *Energy and Buildings*, Volume 25 (1997), pp. 117 -126.
15. A. Christen, R. Vogt, "Energy and radiation balance of a central European city", *International Journal of Climatology* Volume 24 (2004), pp. 1395 -1421.
16. H. Suehrcke, E.L. Peterson, N. Selby, "Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate" *Energy and Buildings*, Volume 40 (2008), pp. 2224-2235.
17. D. Parker, J. Huang, S. Konopacki, L. Gartland, J. Sherwin, L. Gu, "Measured and simulated performance of reflective roofing systems in residential buildings", *ASHRAE Transactions*, Volume 104(1) (1998), pp. 963-975.
18. A. Synnefa, M. Santamouris, H. Akbari, "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions", *Energy and Buildings*, Volume 39(11) (2007), pp. 1167-1174.
19. H. Akbari, S. Konopacki, "Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies", *Energy Policy*, Volume 33 (2005), pp. 721-756.
20. M. Zinzi, "Cool materials and cool roofs: Potentialities in Mediterranean buildings", *Advances in Building Energy Research*, Volume 4 (2010), pp. 201-266.
21. A. Synnefa, M. Santamouris, I. Livada, "A study of the thermal performance and of reflective coatings for the urban environment", *Solar Energy*, Volume 80 (2006), pp. 968-981.

22. Cambridge Systematics, Inc. Cool pavements draft report, http://www.epa.gov/hiri/resources/pdf/CoolPavementReport_Former%20Guide_complete.pdf; 2005.
23. H. Akbari, M. Pomerantz, H. Taha, "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas", Solar Energy, Volume 70 (2001), pp. 295-310.
24. A.H. Rosenfeld, H. Akbari, J.J. Romm, M. Pomerantz, "Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction", Energy Build Volume 28 (1998), pp. 51-32.
25. H. Taha, "Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin", Atmospheric Environment Volume 31(11) (1997), pp. 1667-1676.
26. H. Taha, "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.
27. A. Synnefa, K. Karlessi, N. Gaitani, M. Santamouris, D.N. Assimakopoulos, C. Papakatsikas, "Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate", Building and Environment, Volume 46 (2011), pp. 38-44.
28. T. Kinouchi, T. Yoshinaka, N. Fukae, M. Kanda, "Development of cool pavement with dark colored high albedo coating", Fifth Conference for the Urban Environment, Vancouver, Canada, 2004.
29. ISO 9050. Glass in building-Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors, 2003.
30. ENVI-met Version 3.1, www.envi-met.com, 2010.
31. TRNSYS 16, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
32. UNI 10339. Impianti aeraulici a fini di benessere, 1995.