*Bando di gara per progetti di ricerca di cui all'art. 10, comma 2, lettera b) del decreto 26 gennaio 2000*
*Decreto direttoriale 30 giugno 2014 - Ministero dello sviluppo economico*

# *RELAZIONE FINALE del PROGETTO COOL-IT*

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Codice Proposta** | **CCSEB_00114** | | |
| **Titolo completo** | Riduzione dei consumi elettrici per la climatizzazione estiva di edifici mediante sviluppo di Cool Materials cementizi ad elevata riflettanza solare | | |
| **Tema di ricerca** | C.1 - Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi | | |
| **Capofila** | **ITC - Italcementi Fabbriche Riunite Cemento S.p.A. Bergamo** | | |
| Proponente 2 | ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile | | |
| Data inizio progetto | 01/12/2017 | Data fine progetto | 20/02/2022 |

## *COSTI E CONTRIBUTI*

| | | | |
|---|---|---|---|
| COSTO FINALE DEL PROGETTO APPROVATO | | | 1.098.035,06 € |
| *di cui: Ricerca Industriale* | *619.719,45 €* | *Sviluppo sperimentale* | *478.315,62 €* |
| CONTRIBUTO AMMESSO SENZA MAGGIORAZIONI | | | 529.924,41 € |
| **CONTRIBUTO AMMESSO COMPLESSIVO (incluse maggiorazioni)** | | | **613.662,44 €** |

## SINTESI DEL PROGETTO

ITALIANO

Il fenomeno di aumento della temperatura dei centri urbani o, comunque, di aree dense di attività umane chiamato "Urban Heat Island" (UHI) dipende dal microclima locale (irraggiamento solare, popolazione, densità degli edifici, attività industriali, traffico, emissioni, fonti di calore, ecc.) e si traduce in un aumento del consumo di elettricità per il raffreddamento degli ambienti interni e anche nel ridotto comfort esterno, soprattutto nei periodi estivi e/o nelle zone temperate o tropicali. Considerata la continua crescita della popolazione urbana mondiale, è urgente trovare soluzioni tecniche per rendere gli edifici più eco-efficienti e ridurre l'impatto delle città su cambiamenti climatici e riscaldamento globale. In questo quadro, l'uso di calcestruzzi freddi (cool concrete, CC) può mitigare l'UHI e contribuire al risparmio energetico degli edifici nonché al comfort all'aperto, grazie alla loro funzionalizzazione con i cosiddetti cool material* (CM). I CM sono materiali in grado di limitare il surriscaldamento delle superfici investite dalla radiazione solare. Da un lato, CC per tetti/facciate possono fornire soluzioni di raffreddamento per gli involucri degli edifici efficaci nel

ridurre la domanda di energia elettrica per i sistemi di condizionamento estivo; dall'altro, CC sotto forma di masselli per pavimentazione e pavimentazioni drenanti possono migliorare il comfort urbano ed il benessere del cittadino all'aperto. Il progetto COOL IT valuta e dimostra le migliorate prestazioni di riflessione solare di tre soluzioni cementizie fredde - con superfici sia bianche che colorate - rispetto alle medesime matrici tradizionali, ovvero con colore confrontabile e prive di CM, senza ricorso a post- trattamenti o fasi di lavorazione successive alla posa, come rivestimento superficiale o affini. I CC realizzati nel progetto, grazie alla spiccata capacità riflettente nel vicino infrarosso (NIR), a parità di microclima, restano più freddi rispetto alle soluzioni tradizionali con colore comparabile, come verificato sperimentalmente, e conservano questo vantaggio nel tempo. I test di invecchiamento accelerato e naturale, infatti, hanno permesso di verificare la risposta dei CC in termini di durabilità ottica, rispettivamente secondo le norme ASTM di riferimento e per esposizione diretta in campo. Infine, l'opportunità tecnica offerta in risposta alle diverse esigenze architettoniche (e/o paesaggistiche) e il potenziale di sostenibilità dei CC nel contributo al risparmio energetico degli edifici e alla mitigazione dell'UHI sono state dimostrate attraverso la loro applicazione su scala reale (porzioni di edifici e pavimentazioni urbane).

INGLESE

Cities' temperature increase called "Urban Heat Island" (UHI) depends on local microclimate (solar irradiation, population, buildings density buildings, industrial activities, traffic, emissions, heat sources, etc.) and results in increased electricity consumption for indoor cooling and in decreased outdoor comfort as well, especially in summer periods or in warm climate zones. As the world's urban population continues to grow, there is the urgency of finding technical solutions to make buildings more eco-efficient and reduce cities' impact on climate change and global warming. In this framework, the use of cool concretes (CC) can mitigate the UHI and improve buildings energy saving and outdoor comfort, thanks to the functionalization with the so-called cool materials (CM), able to limit the overheating of the surfaces hit by solar radiation. On one hand, concrete roofs and façade cement-based tiles can provide cooling solutions for building envelops to decrease the electrical energy demand for air conditioning systems. On the other hand, outdoor concrete paving blocks and pervious pavements can improve urban comfort for outdoor wellbeing.

The COOL IT project evaluates and demonstrates the improved solar reflective performance of three cool cementitious solutions, with both white and colored surfaces, compared to traditional ones, with no additional post-treatments or after placing steps, such as surface coating. The designed Near-InfraRed (NIR) reflective concretes stay cooler than the traditional solutions with comparable color, as verified at laboratory level, over time. Indeed, accelerated, and natural ageing tests have allowed optical durability to be verified in compliance with respectively ASTM standards and in a field test. Finally, the technical opportunity offered in response to different architectural (and/or landscape) needs and the sustainability potential of CC in contributing to building energy saving and UHI mitigation have been demonstrated through their real-scale application (portions of buildings and urban pavements).

## 1. INQUADRAMENTO DEL PROGETTO E OBIETTIVI

L'architettura vernacolare, tuttora visibile, in molti paesi del Mediterraneo era caratterizzata dall'uso del bianco per limitare gli apporti solari e garantire il benessere all'interno ed all'esterno delle strutture. La combinazione di materiali e tecnologie moderne che si innesta su soluzioni esperienziali della tradizione e le travalica è alla base dell'attenzione che in questo progetto è rivolta ai CM (cool material) attraverso i CC (Cool Concrete) in ambito di efficienza energetica degli edifici e di mitigazione del fenomeno dell'UHI (Urban Heat Island/Isola di Calore Urbana).

I materiali bianchi hanno, per definizione, un'elevata riflettanza nello spettro visibile ma non necessariamente in tutto lo spettro solare e/o nella specifica regione del vicino infrarosso (NIR- Near InfraRed), dove è emesso almeno il 50% della radiazione solare. Il limite di impiego del bianco in tutte le applicazioni rende urgente lo sviluppo di soluzioni di CC colorati, caratterizzati da riflettanza minore nel campo del visibile (proprio perché colorati) ma molto più elevata nello spettro del vicino infrarosso, in grado di ottemperare ad una ampia gamma di esigenze paesaggistiche e/o architettoniche. Il comportamento selettivo della superficie colorata NIR- riflettente nei confronti della radiazione solare incidente consentirebbe ad un prodotto cool colorato di avere una riflettanza solare più elevata di un prodotto di pari colore tradizionale (ovvero privo di CM). I CC - sia bianchi che colorati - con le caratteristiche di riflessione descritte finora, ovvero con risposta costante, fissata, di riflessione della radiazione solare incidente, si definiscono *cool material statici*.

Le attività di progetto sono state concentrate sullo sviluppo di soluzioni cementizie a base di CC statici.

Gli obiettivi del progetto hanno riguardato tre livelli crescenti di sfida tecnica:

- sviluppo di CC caratterizzati da incrementi di indice di riflessione solare (SRI) di almeno il 5% rispetto al reference realizzato con pigmenti tradizionali;
- verifica delle proprietà di durabilità ottica, mediante test di invecchiamento accelerato e naturale in un campo prove appositamente allestito ed equipaggiato ($|\Delta SRI| \leq 50\%$);
- validazione dei CC su scala reale, grazie all'applicazione su porzioni di edificio di riferimento e di pavimentazione urbana (almeno 30 mq per applicazione), con verifica dell'effetto di riduzione del consumo di energia elettrica per raffrescamento dell'edificio di riferimento di almeno 5%.

I CC sono stati declinati secondo tre applicazioni principali:

- pavimentazione in calcestruzzo drenante, anche indicata di seguito come pervious concrete;
- pavimentazione in masselli autobloccanti;

o lastre di rivestimento per edificio (tetto/facciata), anche indicate di seguito come CT/concrete tiles realizzate con una matrice in malta ad elevata fluidità, che, nel test su scala reale, sono state prodotte su scala semi-industriale con il supporto di Archiform s.r.l. nella geometria 40cmx40 cmx2cm.

Nota. Esperienze non particolarmente diffuse e robuste sembrerebbero aprire la strada ad un'altra categoria, ancor più innovativa, di prodotti noti come *cool material dinamici*, tra i quali si distinguono i materiali termocromici, caratterizzati da una riflessione solare variabile in funzione della temperatura superficiale. In linea di principio, i CM termocromici, esposti alla radiazione solare, grazie alla capacità di "virare" da colori/tonalità scure a colori/tonalità chiare superata una temperatura caratteristica, sarebbero tra i migliori materiali smart con cui realizzare calcestruzzi cool adattivi, in grado di assorbire energia solare al di sotto di una certa temperatura di soglia e rifletterla al di sopra di essa. Soprattutto per applicazione su edifici, questa capacità - se reversibile e in grado di esplicarsi ciclicamente per un arco temporale idoneo per scopi edilizi (dell'ordine di qualche anno prima di ripristino/sostituzione) - offrirebbe il massimo vantaggio rispetto alle esigenze di ottimizzazione di riscaldamento invernale e climatizzazione estiva, con un contributo alla riduzione della spesa energetica netta su base annua.

Fin dai primi passi mossi nel progetto, sono emerse criticità oggettive in merito all'utilizzo dei CM termocromici per le applicazioni nel campo dell'edilizia, prevalentemente a causa della loro natura organica e la controversa durabilità delle prestazioni termocromiche in esercizio. I pigmenti termocromici reperibili in commercio sono di natura prettamente organica.

Di tali pigmenti sono state valutate la compatibilità e la stabilità con l'ambiente cementizio, fortemente alcalino. Le prove di stoccaggio al buio, effettuate sui pigmenti termocromici commerciali, hanno mostrato la loro stabilità chimica nella matrice cementizia per periodi superiori a sei mesi.

L'invecchiamento sotto irraggiamento UV-VIS ha escluso che ossigeno e umidità ambientale siano particolarmente rilevanti nel processo foto-degradativo dei pigmenti quanto invece l'effetto di esposizione alla componente UV ma anche a quella Vis della luce solare, che riescono ad alterare in maniera significativa i pigmenti termocromici, facendone degenerare la funzionalità in tempi non compatibili con le applicazioni in campo edilizio.

Su questa base, la campagna sperimentale è stata orientata alla selezione di specifici pigmenti termocromici in grado di assicurare, in determinati intervalli, caratteristiche di durabilità compatibili con applicazioni su scala reale, mediante caratterizzazioni accelerate in laboratorio. In parte, è stato possibile migliorare la durabilità dei campioni cementizi termocromici grazie all'utilizzo di filtri UV e VIS; ciononostante, in nessuna delle condizioni sperimentali valutate, è stato possibile mantenere un valore di riduzione percentuale di riflettanza solare (ΔSR) maggiore di 5% per un periodo superiore a 2 mesi. Si è, peraltro, cercato di superare le problematiche legate alla scarsa durabilità dei pigmenti termocromici organici commerciali, sintetizzando ossidi termocromici inorganici, visto che non è stato possibile reperirli sul mercato. La sintesi di un ossido inorganico, termocromicamente attivo, si è conclusa con successo in collaborazione con l'Università degli Studi di Padova (rif: Molecules. 26. 4513. 10.3390/molecules26154513.). In matrice cementizia, ad oggi non è stata rilevata attività termocromica di rilievo.

## 2. RISULTATI RAGGIUNTI

*Validazione di cool concrete su scala di laboratorio*

È stato condotto a termine lo sviluppo di CC, bianchi e colorati, attraverso la funzionalizzazione di matrici cementizie tipiche per applicazioni orizzontali e verticali outdoor, ovvero lastre per rivestimento di tetti e facciata di edifici, pavimentazioni in calcestruzzo drenante e in masselli autobloccanti, tutte basate sull'uso di CM statici con aumentata capacità di riflessione della radiazione solare. Oltre che sulla base delle effettive disponibilità di fornitura, sono stati selezionati alcuni tra i più efficaci CM reperibili in commercio, La cui capacità di riflessione è risultata legata o ad un elevato contributo del contributo VIS e/o ad un elevato contributo nell'intervallo NIR dello spettro totale di riflettanza nell'intervallo UV-Vis-NIR.

In particolare, le matrici cementizie bianche state funzionalizzate con CM bianchi a base di biossido di titanio e solfuro di zinco prevalentemente. Le matrici colorate sono state ingegnerizzate con CM statici colorati NIR-riflettenti, con riflessione della radiazione solare spiccata nel campo del NIR e più o meno ridotta in funzione della tonalità più o meno scura del colore della sua superficie nel campo Vis.

Tutte le preparazioni dei CC su scala di laboratorio sono state realizzate nei laboratori di Italcementi, a meno della produzione dei masselli sperimentali autobloccanti cool a durabilità ottica progettati da Italcementi e realizzata per via semi-industriale con la collaborazione di Senini S.r.l./Brescia.

Sono state realizzate caratterizzazioni di due macrocategorie: fisico-meccanica ed ottica.

La caratterizzazione fisico-meccanica ha avuto lo scopo di verificare che le matrici cementizie cool conservassero le proprietà delle matrici prive dell'aggiunta di CM, nel rispetto imprescindibile dei requisiti di norma del settore applicativo.

I risultati hanno dimostrato che i campioni cementizi "cool", bianchi e colorati, realizzati con le composizioni sviluppate per le diverse soluzioni orizzontali e verticali considerate, sono in linea con quelli dei relativi reference, ovvero le caratteristiche allo stato fresco ed indurito dei prodotti cool formulati rispondono ai requisiti di norma per le relative applicazioni di progetto.

La caratterizzazione ottica ha avuto lo scopo di testare il "cooling effect" dei materiali cementizi freddi sperimentali rispetto ai reference privi di CM attraverso misure di tipo spettrofotometrico per determinare la riflettanza solare (indicata con R o SR di seguito) e misure di emissività termica, necessarie al calcolo dell'indice di riflessione solare (SRI), nonché con caratterizzazioni colorimetriche CIEL*a*b*.

I risultati di caratterizzazione ottica hanno confermato il beneficio atteso, ovvero l'aumento della riflettanza solare e dell'indice di riflettanza solare (SRI) dei CC.

Per le superfici bianche, l'aumento di riflettanza solare dei cool material cementizi sviluppati e caratterizzati rispetto ai relativi reference bianchi è solo talvolta ascrivibile a contributi nella regione del NIR, da cui dipendono invece gli straordinari contributi delle superfici cool colorate. L'incremento di SRI registrato (di qualche unità percentuale) per i CC bianchi (indicata con "CMB1", "CMB2", "CMB3" e "CMB4" in Figura1) appare modesto in termini assoluti; d'altro canto, bisogna considerare che si è scelto come riferimento una

matrice cementizia (indicata con “Ref” in Figura 1), priva di CM e realizzata con cemento proprietario, di per sé già particolarmente bianca e, quindi, con un intrinseco elevato potere riflettente.

Figura 1. Riflettanza solare di cool concrete bianco per rivestimento edificio (CT/concrete tile) vs. riferimento (Ref)

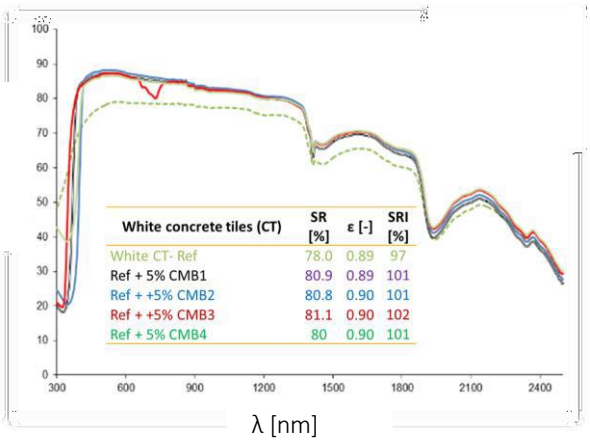



Figura 2. Riflettanza solare di cool concrete grigio per pavimentazione drenante (pervious concrete) vs. riferimento (Ref)

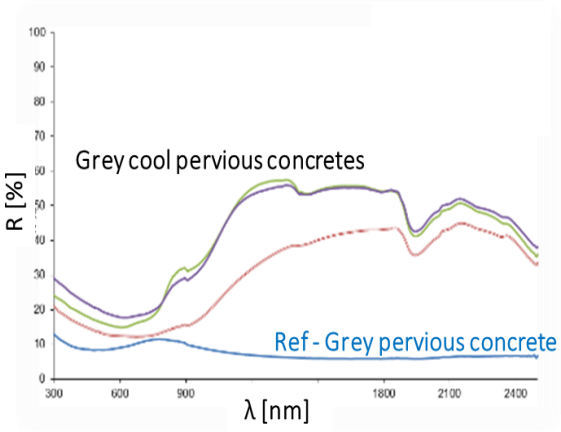
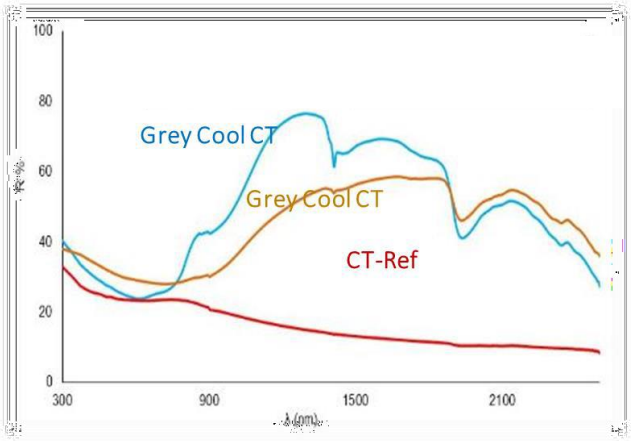


Figura 3. Riflettanza solare di cool concrete grigio per rivestimento edificio (CT/concrete tile) vs. riferimento (Ref)




Le superfici cool colorate realizzate con CM a selettività spettrale hanno mostrato incrementi di SR e SRI almeno superiori al 5%. Il maggiore guadagno di SRI è stato riscontrato per superfici grigie, sia di pavimentazione urbana che di elementi di rivestimento di edifici. A titolo esemplificativo, si riportano gli spettri di riflettanza di calcestruzzo drenante grigio (Figura 2) e lastra per edificio (Figura 3), funzionalizzate con pigmenti neri NIR-riflettenti rispetto al pigmento nero tradizionale privo di CM. Si può notare che, tra 400 e 780 nm, tutti gli spettri sono ravvicinati mentre quelli dei CC sono traslati verso l'alto - rispetto al riferimenti - nell'intervallo del vicino infrarosso NIR tra 780 e 2500 nm.

- Figura 2/ Per le pavimentazioni, la riflettanza dei campioni cool è almeno doppia (R=19%-curva rossa) rispetto a quella della superficie grigia tradizionale/Ref (R=9%- curva blu) o tripla (R=29%-curva viola e R=28%-curva verde).

- Figura 3/Per le lastre di rivestimento per edificio, si osserva che la riflettanza dei campioni cool è almeno doppia (R=35%-curva senape e R=39%-curva azzurra) rispetto a quella della superficie grigia tradizionale/Ref (curva rossa).

Il raggiungimento degli obiettivi di incremento delle proprietà ottiche dei CC colorati apre la strada dell'architettura sostenibile ad elementi orizzontali e verticali anche scuri, che, nella pigmentazione tradizionale, comporterebbero surriscaldamenti superficiali di tetti (e facciate) incompatibili con obiettivi di efficientamento energetico degli edifici e/o di mitigazione dell'isola di calore urbana. Proprio con l'intento di verificarne le reali potenzialità, i CC sono stati selezionati su scala urbana per l'applicazione su edificio e per pavimentazione di un'area di parcheggio. Prima, però, le caratteristiche di riflessione della radiazione solare dei CC, validate su scala di laboratorio, sono state verificate in termini di durabilità ottica attraverso test accelerati e di invecchiamento naturale.

*Durabilità ottica - Test di invecchiamento accelerato*

I test di invecchiamento accelerato sono stati realizzati, seguendo le indicazioni della norma ASTM D7897-18, con il supporto e la competenza dell'Energy Efficiency Laboratory (EELab) dell'Università degli studi di Modena e Reggio Emilia (UNIMORE).

Le misure di riflettanza solare e di emissività termica sono state utilizzate per il calcolo dell'indice di riflettanza solare, SRI, dei campioni realizzati, sia prima che dopo i cicli di invecchiamento accelerato. Alla luce dei risultati ottenuti, si può concludere che:

- tutti i campioni cementizi realizzati con pigmenti cool hanno mostrato, prima dei cicli, valori di SRI maggiori dei rispettivi campioni di riferimento realizzati con pigmenti tradizionali.

- i test di invecchiamento accelerato hanno consentito di valutare la risposta positiva dei campioni cementizi cool, risultati soggetti a effetti di sporcamento non più marcati di quelli tradizionali nel tempo, con una riduzione delle proprietà riflettenti comparabile dopo 2 cicli di invecchiamento.

Si è definita la variazione percentuale di riflettanza solare ΔSRI%, calcolata dopo i cicli di invecchiamento accelerato come indicatore della durabilità delle prestazioni ottiche dei manufatti cementizi realizzati, secondo la formula seguente:

$$\Delta SRI_{\%} = \frac{SRI_{fin} - SRI_i}{SRI_i} * 100 \qquad SRI_0 = SRI\ del\ campione\ non\ invecchiato$$

$$SRI_i = SRI\ del\ campione\ non\ invecchiato \qquad i = 1{,}2\ (numero\ di\ cicli)$$

Dalle attività di sviluppo sperimentale è risultato che le prestazioni ottiche diminuiscono dopo il primo ciclo così come dopo il secondo, ma $\Delta SRI_{\%}$ risulta contenuta rispettivamente nei range 2%-15% dopo il primo ciclo e al 14%-30% dopo il secondo ciclo rispetto ai valori iniziali.

Inoltre, i manufatti cool, sottoposti a ben due cicli di invecchiamento, grazie alle proprie caratteristiche di selettività spettrale, restano caratterizzati da indice di riflessione solare, comunque, superiore rispetto a quello dei prodotti tradizionali di riferimento non ancora invecchiati.

A supporto, nelle figure seguenti sono mostrati i risultati per tipologia di applicazione.

Figura 4. Invecchiamento accelerato: SRI di campioni cementizi per il rivestimento di tetti/facciate rispetto ai riferimenti privi di CM (indicati con Trad.)

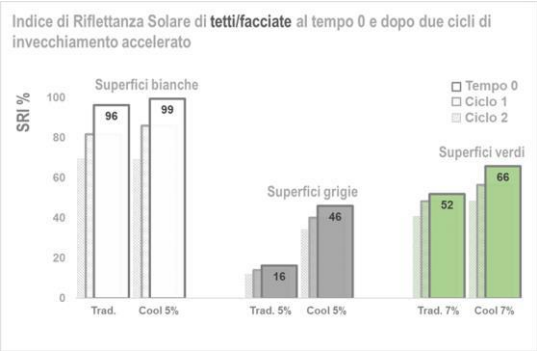



Figura 5. Invecchiamento accelerato: SRI di campioni per pavimentazioni drenanti cool rispetto ai riferimenti privi di CM (indicati con Trad.)

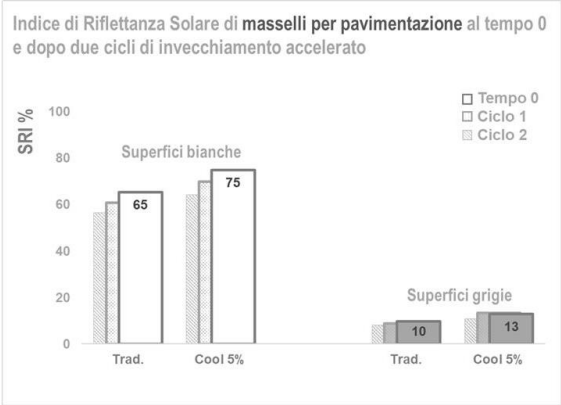
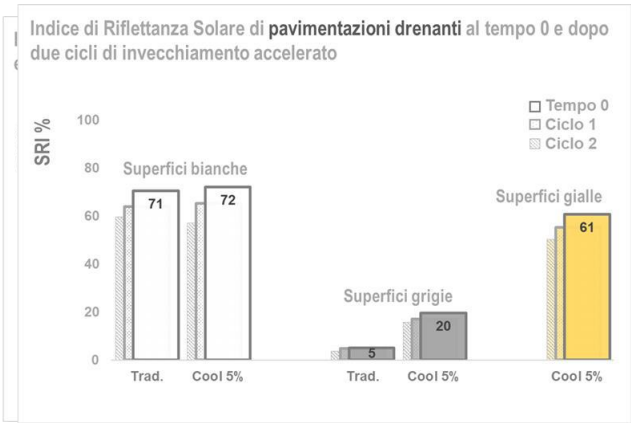



Figura 6. Invecchiamento accelerato: SRI di campioni per pavimentazioni autobloccanti cool rispetto ai riferimenti privi di CM (indicati con Trad.)

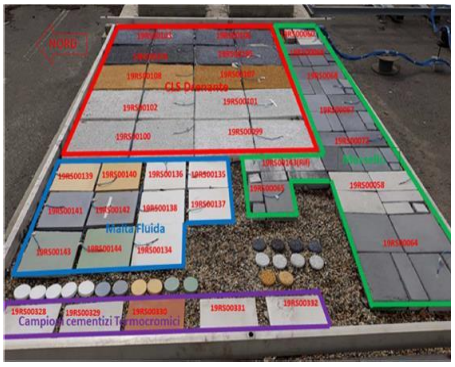


*Durabilità ottica - Invecchiamento naturale in campo prove*

Campioni di materiali cementizi cool per applicazioni verticali (facciate) ed orizzontali (tetto) su edificio e per pavimentazione urbana, sia drenante che sotto forma di masselli, sono stati esposti in un campo prova (Figura 7) presso Italcementi (Calusco D'Adda) per indagini integrative sull'invecchiamento naturale.

Sono state analizzate le proprietà ottiche dei CC - ovvero riflettanza solare, emissività termica e SRI (indice di riflettanza solare) - in confronto a quelle dei reference con pigmenti tradizionali privi di CM e di colore confrontabile.

Figura 7. Campo prove per monitoraggio degli effetti di invecchiamento naturale sulle proprietà ottiche dei CC rispetto ai relativi riferimenti.

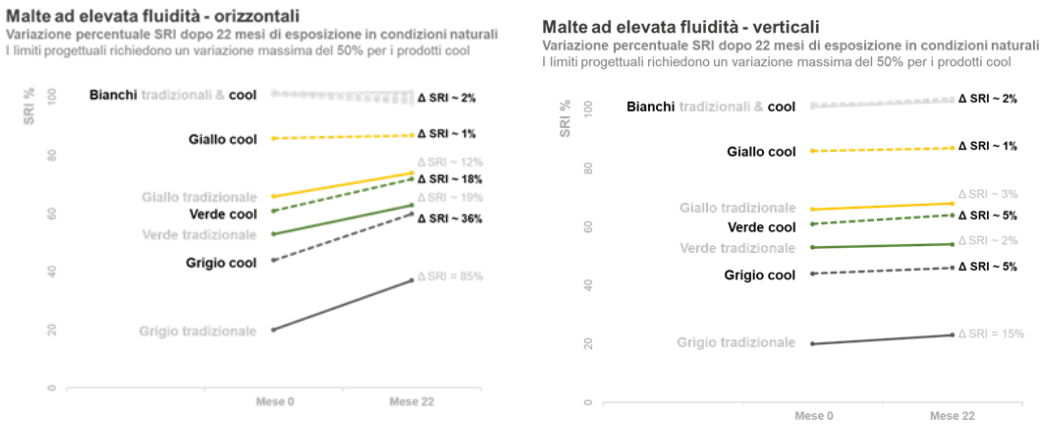



È stata definita la variazione percentuale di riflettanza solare ΔSRI, calcolata prima (SRI iniziale) e dopo l'invecchiamento naturale in campo come indicatore della durabilità delle prestazioni ottiche dei manufatti cementizi realizzati, secondo la formula seguente:

$$\Delta SRI = ((SRI_{fine\ ciclo} - SRI_{iniziale})/SRI_{iniziale})*100$$

La Figura 8 mostra SRI e ΔSRI per lastre orizzontali (a sx.) e verticali (a dx.).

Figura 8. Invecchiamento naturale di lastre cool disposte orizzontalmente (grafico a sx.) e verticalmente (grafico a dx.) rispetto a quelle realizzate con le formulazioni di riferimento (prive di CM)

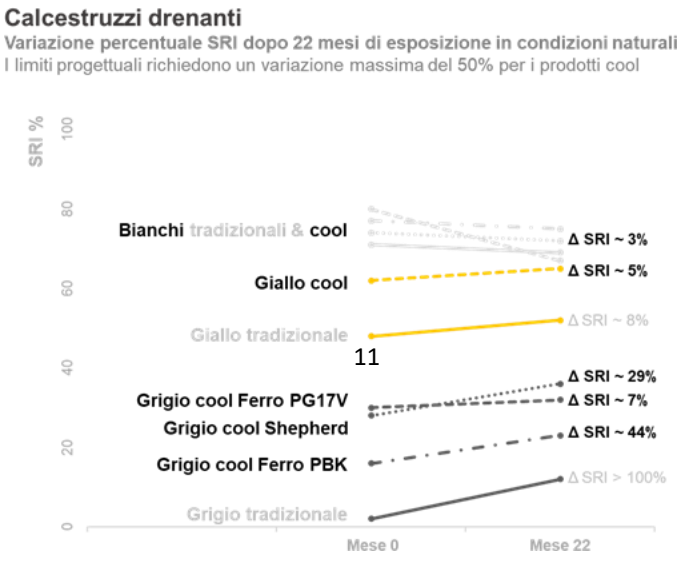



In relazione alle lastre cementizie cool di rivestimento tetto (disposte in campo orizzontalmente) e facciata (disposte in campo verticalmente) di Figura 8,

- per quelle con superficie bianca, non si è registrata sostanziale differenza nel tempo tra le lastre cool e i reference, indipendentemente dalla disposizione orizzontale o verticale. La formulazione cementizia selezionata come riferimento è già, infatti, frutto di un mix-design attento alla ricerca di un bianco spiccato e si dimostra di per sé performante in relazione alla capacità di respingere la radiazione solare e mantenere più fredda la superficie delle lastre.

- per le lastre colorate, si apprezza un aumento di SRI delle lastre funzionalizzate con CM tanto più marcato quanto più scura è la superficie di partenza e tanto più accentuato per le lastre orizzontali rispetto a quelle verticali. Tale effetto di invecchiamento è coerente sia con il maggiore irraggiamento, cui sono, in genere, esposte le lastre orizzontali, sia con la loro più elevata "predisposizione" ad accumulare polveri/sporco rispetto alle lastre verticali, meno soggette a depositi di pulviscolo.

Figura 9. Invecchiamento naturale di calcestruzzo drenante cool rispetto al riferimento (privo di CM)

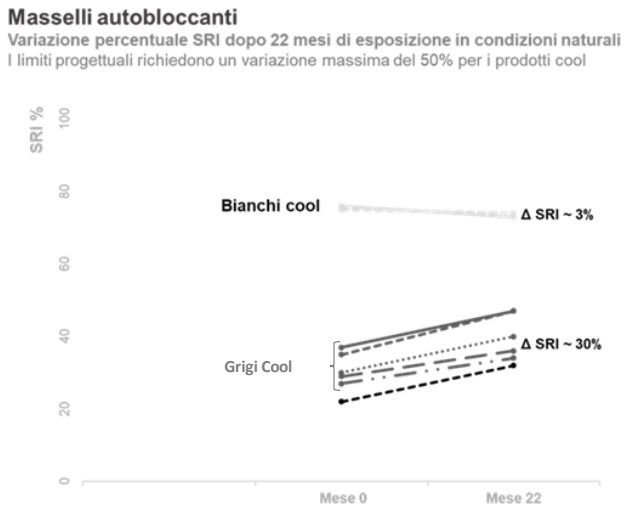


Per i campioni di calcestruzzo drenante (Figura 9), come nel caso di lastre per copertura edifici, i campioni di colore bianco hanno un valore di SRI simile al campione di riferimento (più o meno elevato in base al tipo di pigmento cool utilizzato). Il tempo di esposizione sul campo di prova sembrerebbe non influenzare in maniera rilevante questo aspetto;

i campioni drenanti cool grigi e gialli mostrano, invece, un valore di SRI leggermente variato ma sempre superiore al relativo campione di riferimento.

Considerazione analoghe valgono per la durabilità ottica dei masselli autobloccanti, i cui risultati sono mostrati in Figura 10. In media, la variazione assoluta ΔSRI dell'indice di riflessione solare dei CC non è comparabile con quella delle superfici tradizionali con colore comparabile e, complessivamente, non supera il 30% (per i colori più scuri).

Figura 10. Invecchiamento naturale di masselli cool per pavimentazione rispetto al riferimento (privo di CM)



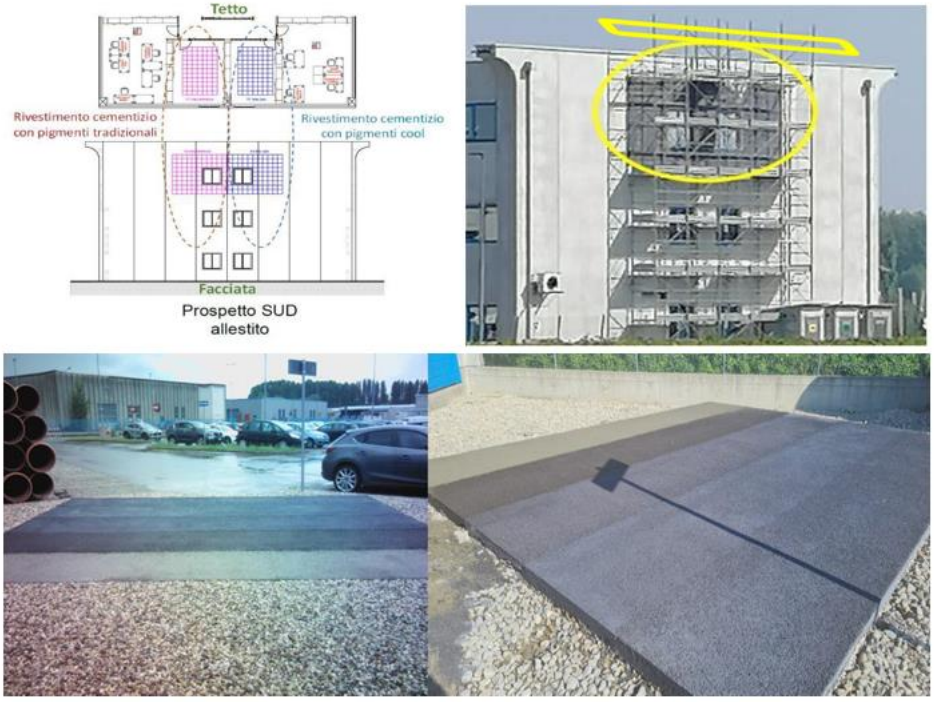

Dopo 22 mesi di esposizione in condizioni di irraggiamento solare naturale, la stabilità della prestazione ottica nel tempo dei CC si traduce in variazioni assolute di indice di riflessione solare ΔSRI non superiori a 50% (e mai superiori a quelli dei reference).

*Cool concrete - applicazione su scala urbana*

Tutti i risultati appena descritti hanno supportato la sfida tecnica su scala urbana, ovvero l'applicazione di lastre di rivestimento (tetto+facciata) e calcestruzzi drenanti colorati nella versione grigia su porzione di edifico messo a disposizione, per il test in scala, da CPL Concordia a Concordia sulla Secchia (Modena) e su

un'area di 30 mq di parcheggio adiacente Figura 11. L'applicazione dei materiali è avvenuta sotto il coordinamento dell'ing. Andrea. Regazzoni di Bergamo in qualità di CSP/CSE.

Figura 11. Applicazione sull'edificio di CPL Concordia (in alto) e area parcheggio adiacente (in basso)




La soluzione di calcestruzzo drenante cool è stata preferita nel test su scala urbana a quella dei masselli autobloccanti, in quanto accoppia alle migliorate proprietà ottiche la caratteristica struttura macro-porosa aperta, che offre maggiore superficie disponibile allo scambio termico.

Figura 12. Applicazione del rivestimento su tetto e facciata – dettagli

Con applicazione su 30 mq di tetto e 30 mq di facciata, è stato verificato, nella stagione estiva, che, per le applicazioni di CC su superfici orizzontali (tetto/pavimentazione), si sono registrati abbattimenti della temperatura, rispetto al reference di pari colore, come mostrato, a titolo esemplificativo, in Figura 13.

Figura 13. Temperature superficiali (in grigio) e differenza in termini di temperatura superficiale tra lastre cool e reference (in azzurro)

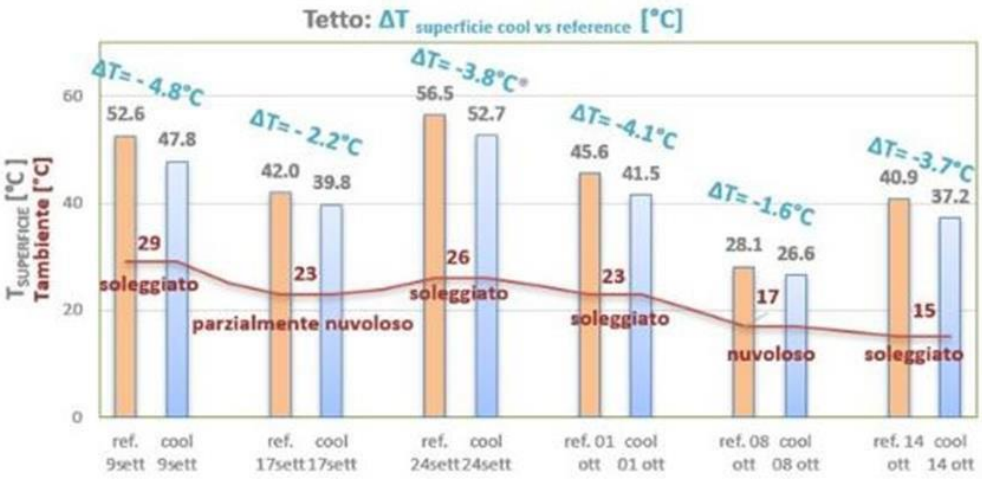
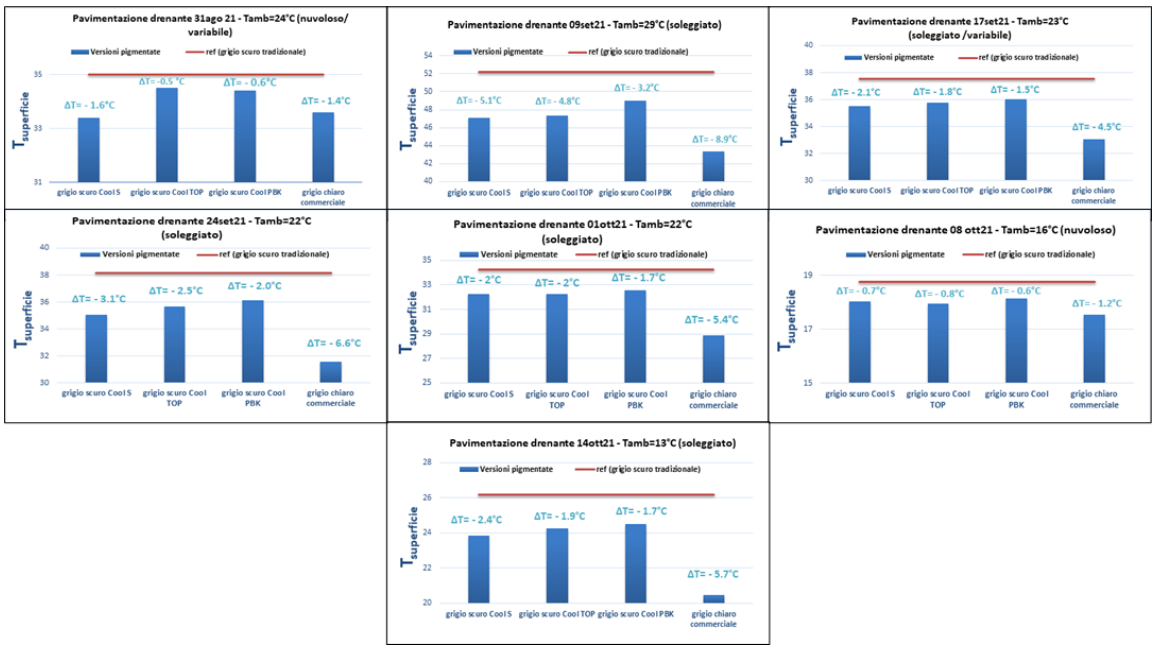



Figura 14. Esempi di misure di temperatura su pavimentazione durante il monitoraggio



La misurazione diretta dell'effetto dei rivestimenti riflettenti sul consumo energetico per il raffrescamento dell'edificio utilizzato non è stata possibile, in quanto questo avrebbe richiesto l'accesso diretto ai dati di consumo di specifiche parti del sistema, di fatto impossibile da effettuare all'interno di un edificio non pensato specificamente per la sperimentazione. A questo riguardo, basandosi sui dati ottenuti e mostrati nelle sezioni precedenti, è stata effettuata una valutazione indiretta dei benefici ottenibili in termini di risparmio energetico per il condizionamento dell'edificio: il risparmio energetico stimato si attesta tra 12% e 25%.

Attraverso l'uso di programmi di calcolo dinamici su scala urbana e di edificio sono stati inoltre simulati quattro scenari relativi alla zona limitrofa a piazza VIII Agosto a Bologna e tre scenari relativi alla zona limitrofa alle piazze Castelnuovo e Ruggiero Settimo a Palermo, con incrementi di albedo di 0.1 (nell'intervallo 0-1) delle superfici cool rispetto ai relativi reference. Il confronto fra i risultati ottenuti mostra che tale aumento sul materiale che costituisce le piazze oggetto di studio riduce maggiormente, se pur in modo non significativo, la temperatura dell'aria a Palermo che a Bologna.

o Sul piano delle simulazioni dinamiche, sono stati studiati un edificio residenziale ed uno commerciale:

- Su edificio residenziale, l'applicazione di materiali ad elevata riflettanza solare provoca

due effetti contrastanti sui consumi su base annua: riduzione del fabbisogno energetico per raffrescamento su base estiva ed incremento per il riscaldamento su base invernale.

Gli edifici meno performanti dal punto di vista energetico risentono in misura maggiore dell'effetto dell'aumento di RS; l'estensione della superficie trasparente d'involucro rispetto a quella opaca, il numero di piani, l'altezza degli edifici circostanti mostrano un impatto limitato. L'applicazione appare conveniente in termini di risparmio energetico nelle zone climatiche più calde (A e B, potenzialmente C) ed il beneficio ha dimensioni limitate. A Bologna, l'uso di materiali riflettenti porta ad un aumento dei consumi invernali annui di 0.00625 TEP/%*anno per ogni incremento percentuale di RS, e a un corrispettivo calo dei consumi estivi di 0.006 TEP/%*anno. A Palermo, il calo di consumi estivo annuo è analogo (0.0065 TEP/%*anno) ma l'aumento dei consumi invernali annui è inferiore (0.00375 TEP/%*anno). Per un aumento di 10% di RS del materiale, si stima per

- Bologna, +0.0625 TEP/anno (inverno), -0.06 TEP/anno (estate), con effetto netto +0.0025 TEP/anno;

- Palermo, +0.0375 TEP/anno (inverno), -0.065 TEP/anno (estate), con effetto netto -0.0275 TEP/anno.

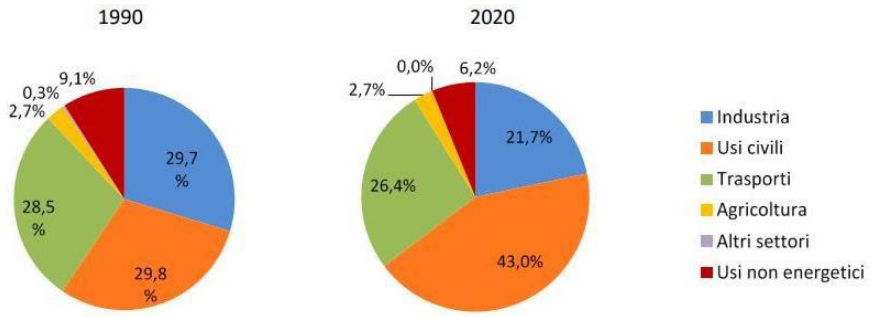
- Su edificio commerciale, a Bologna il risparmio energetico percentuale estivo ed annuo è limitato a poco più di 2%; a Palermo il beneficio estivo coincide con quello annuo ed è di 10%.

## 3. IMPATTO SUL SISTEMA ELETTRICO E BENEFICI ATTESI

Il settore civile è quello con i maggiori usi finali di energia; tuttavia, i consumi non seguono tendenze omogenee. Osservando l'andamento dei consumi finali in Italia nel periodo 1990-2020, si nota nel 2020 un livello dei consumi finali di energia inferiore al 1990, 109,9 Mtep contro 114,9 Mtep nel 1990. Con l'eccezione del settore usi civili, nel 2020 tutti i settori hanno avuto un consumo di energia inferiore al 1990; infatti, il settore degli usi civili è l'unico che nel periodo 1990-2020 ha mostrato un andamento crescente dei consumi di energia, nonostante alcuni anni di riduzione: +37,9% nel periodo 1990-2020 ad un tasso medio annuo di 1,1%, nonostante il calo di 4,3% nel 2020. (RAEE_2022, ENEA).

I dati Eurostat evidenziano un aumento del consumo energetico globale nel settore civile (residenziale più terziario); di fatto, il settore usi civili è diventato il primo settore di consumo, seguito dai trasporti e dall'industria (Fig.15).

Figura 15: consumi finali di energia in Italia. Dettaglio per settore, anni 1990 e 2020 (%) (Fonte: EUROSTAT)




Il consumo di energia nel settore residenziale nel periodo 1990-2020 è aumentato del 17,6% mentre quello del settore servizi è risultato in calo del 9,0% rispetto all'anno precedente.

Nel 2020 il consumo finale di energia elettrica è risultato in calo del 5,7% rispetto al 2019. In controtendenza il settore domestico, per cui si è osservata una crescita dell'1%.

Nel settore civile, inoltre, si afferma una crescita molto importante dei consumi elettrici pari al 71,4%, tra il 1990 e il 2017 (dati ISPRA ed ENEA); ciò principalmente dovuta ad una crescita del benessere che favorisce la diffusione di beni durevoli all'interno delle abitazioni, tra cui proprio i sistemi di climatizzazione estiva.

Da quanto affermato consegue un aumento relativo alla spesa energetica da sostenere per la climatizzazione interna degli edifici con influenza sul microclima urbano e il benessere del cittadino all'aperto.

Il progetto COOL IT pone in evidenza i seguenti aspetti nell'ottica dell'energy saving e/o della mitigazione del fenomeno UHI:

- Pavimentazioni urbane “cool” promuovono la diminuzione della temperatura superficiale delle superfici esterne dell’ambiente urbano e rappresentano una possibile strategia per combattere il fenomeno delle isole di calore urbane e, quindi, il surriscaldamento dei centri urbani rispetto alla campagna circostante.

- Una pavimentazione in calcestruzzo drenante, dal punto di vista funzionale, offre un sistema alternativo alla gestione delle acque meteoriche, favorendo il drenaggio naturale e l’invarianza idraulica. Dal punto di vista economico, comporta una riduzione dei costi di manutenzione, maggiore durabilità e una minore incidenza dei costi legati alla captazione e gestione delle acque meteoriche. A questi vantaggi, grazie ai CM, si possono aggiungere anche quelli della performance “cool”: i calcestruzzi drenanti cool raggiungono una riflettanza solare più alta e rimangono “più freddi” rispetto a quelli tradizionali sia per colorazioni bianche che colorate.

- I masselli autobloccanti in calcestruzzo sono ampiamente utilizzati per pavimentazioni esterne sia residenziali che commerciali in applicazioni come vialetti e percorsi pedonali, patii, cortili, giardino sentieri, paesaggi stradali, piazze e centri commerciali pedonali, etc. Dal punto di vista estetico è disponibile un'ampia gamma di “texture” superficiali, colori, finiture, forme e altre caratteristiche speciali che rendono i masselli la soluzione preferita per il loro aspetto unico, le facili tecniche di installazione e le loro caratteristiche di distribuzione del carico superiori.

Se a queste caratteristiche, si aggiunge anche la performance “cool”, si ottiene una soluzione che può offrire un valido contributo per mitigare il fenomeno dell'isola di calore urbano, grazie a temperature superficiali più basse che possono contribuire a ridurre il surriscaldamento tipico dei centri cittadini rispetto alle campagne circostanti, con effetti positivi sull'ambiente, sul risparmio energetico e sul benessere e comfort in generale.

- È generalmente accettato che i consumi elettrici degli edifici per la climatizzazione estiva possano essere ridotti attraverso soluzioni impiantistiche più efficienti e con l’installazione di schermature solari per la riduzione del fabbisogno. Il progetto COOL IT dimostra che, attraverso i CC, è possibile sviluppare involucri ad elevata efficienza, che consentano di ridurre i fabbisogni di energia elettrica per la climatizzazione estiva e di ridurre la potenza di picco, attraverso il ridimensionamento delle macchine frigorifere da installare negli edifici.

Dato di rilievo è che, agendo sugli strati più esterni dell’involucro edilizio, i CC possono essere utilizzati con proficuità sia nei nuovi edifici che nel caso di ristrutturazioni, leggere e pesanti. Esiste un potenziale di 1 milione di edifici da riqualificare in Italia, con un impatto di circa 22.6 mld€ fino al 2050, più il settore del terziario in continua espansione, su cui intervenire in modo efficace con soluzioni innovative, che superino i limiti dei materiali tradizionalmente impiegati. Rivestimenti di calcestruzzo cool possono offrire un contributo più efficace se applicati per la riqualificazione di edifici esistenti piuttosto che rispetto al loro impiego su nuove costruzioni, date le elevate caratteristiche di isolamento di queste ultime. Dal punto di vista della mitigazione globale del fenomeno UHI, il contributo offerto dei CC resta valido per entrambe le tipologie di intervento.

Le considerazioni seguenti si riferiscono ad applicazioni di rivestimento di tetto/facciata per riqualificazione di edifici già esistenti con CC.

1. Le aree con climi più caldi sono le più indicate per applicazioni di materiali cementizi "cool" per massimizzare il risparmio energetico. Le soluzioni cool portano ad un effettivo risparmio di energia elettrica se nell'area di applicazione i consumi energetici per il riscaldamento degli edifici possono esser considerati molto bassi. Assunte come rappresentative del clima del Nord, Centro e Sud Italia le città di Bologna, Roma e Palermo, dal punto di vista energetico, sul piano generale, l'applicazione al caso di Palermo sembra essere la più vantaggiosa.

A Palermo, i benefici durante la stagione estiva legati alla spesa di raffreddamento superano le eventuali perdite durante la stagione invernale dovuti alle spese di riscaldamento. Per meglio comprenderne il motivo, si consideri che, sia a Bologna che a Roma, la domanda di gas per il riscaldamento è molto superiore a quella di energia elettrica di raffrescamento in estate, mentre la differenza si riduce nel caso di Palermo. Di conseguenza, i risultati delle simulazioni effettuate sull'edificio di riferimento evidenziano che l'uso di prodotti ad alta riflettenza, come quelli sviluppati in questa ricerca, potrebbe essere implementato con maggior successo nelle zone climatiche più calde. In climi caldi, le soluzioni cool di colore sia grigio che bianco consentono di ottenere un maggiore risparmio energetico rispetto alle corrispondenti applicazioni in materiali cementizi tradizionali – anche se con colori scuri il vantaggio risulta più marcato.

Un maggiore margine di miglioramento in termini di risparmio energetico è possibile in caso di superficie dai colori scuri, intrinsecamente caratterizzati da bassa riflettanza solare ed emissività, e responsabili di temperature superficiali più alte, rispetto alle superfici dai colori bianchi o chiari.

2. Dal punto di vista della riduzione della spesa energetica per raffrescamento interno, l'effetto "cooling" (e, quindi, il risparmio energetico che ne consegue) risulta più efficace su edifici poco o non isolati termicamente.

3. Poiché la riflettanza solare e l'emissività e, quindi, l'indice di riflessione solare, sono proprietà superficiali, l'aumento dello spessore di rivestimento cool potrebbe contribuire alle caratteristiche di isolamento ma non migliorerebbe l'effetto di raffreddamento, sia per finiture chiare o bianche che per quelle grigie o scure per edifici con o senza isolamento termico e in ogni tipologia di clima.

4. L'ombreggiamento generato dagli edifici vicini è elemento condizionante del successo applicativo dei CC.

o Nel caso della città di Palermo, rappresentativa delle condizioni di clima più favorevole all'impiego di CM, le differenze legate all'ombreggiamento di edifici circostanti sono trascurabili se il prodotto "cool" viene utilizzato come copertura del tetto, mentre le ombre proiettate dagli edifici vicini riducono i benefici della parete altamente riflettente, rendendola quindi meno efficace.

o Inoltre, in caso di utilizzo del prodotto "cool" sull'involucro verticale, il fabbisogno energetico complessivo aumenta in presenza di edifici limitrofi. Potrebbero, pertanto, esaltarsi le criticità delle

superfici ad alta riflettanza durante il periodo invernale legate alla aumentata domanda di riscaldamento degli edifici rispetto ai benefici misurati durante la stagione di raffreddamento.

Proiezioni e simulazioni per il periodo 2018-2100 consentono di stimare un aumento della temperatura globale che varia da 1°C a 10°C (dallo scenario più ottimistico a quello più catastrofico del Riscaldamento Globale). Poiché tetti e facciate rappresentano fino al 20%-40% delle superfici dell'area urbana e, insieme con le pavimentazioni, circa il 60% di essa, la potenzialità di contributo delle superfici cementizi cool alla diminuzione della temperatura nei centri città crescerà al crescere dell'adozione di tale soluzione e la diffusione futura dipenderà sempre meno da motivazioni puramente economiche e sempre più da requisiti imprescindibili di eco-socio-sostenibilità, a sostegno e promozione dei quali si è svolta tutta l'attività del progetto COOL IT.

La potenzialità massima del contributo di cool material nella mitigazione dell'isola di calore e, in generale, del fenomeno di surriscaldamento resta ben descritta dal lavoro del prof. H. Akbari, tra i massimi esperti di cool materiala livello mondiale, il quale ha stimato che (rif.: stacks.iop.or g/ERL/7/024004), nelle regioni con latitudine comprese tra ±20° e ±45° di latitudine, l'incremento di albedo (o riflettanza solare) di +0.01 (nella scala di variabilità da 0 a 1) per metro quadrato di superficie si tradurrebbe in un una diminuzione di temperatura di 10-15 °C/m2. L'effetto di lungo termine di tale raffreddamento equivarrebbe alla compensazione del riscaldamento prodotto da circa 7 kg CO2 per ogni m2 di superficie cool con albedo incrementata di +0.01/m2.