



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di materiali ad elevata riflessione solare per
l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici durante la
stagione estiva

A. Muscio, A. Libbra, C. Siligardi, P. Tartarini



*Dip.to di Ingegneria Meccanica e Civile
Laboratorio per l'Efficienza Energetica*

SVILUPPO DI MATERIALI AD ELEVATA RIFLESSIONE SOLARE PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI DURANTE LA STAGIONE ESTIVA

A. Muscio, A. Libbra, C. Siligardi, P. Tartarini (Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile – Università di Modena e Reggio Emilia)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

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

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

Responsabile Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

INTRODUZIONE ALL'AMBITO D'INDAGINE E ALLE ANALISI SVOLTE

Oggetto della ricerca

Gli apporti solari attraverso gli elementi opachi dell'involucro edilizio presentano un impatto progressivamente crescente sulle prestazioni energetiche degli edifici a causa della sempre maggiore diffusione degli impianti di condizionamento dell'aria. Tuttavia, il surriscaldamento estivo degli edifici e ciò che ne consegue in termini di fabbisogni energetici possono essere limitati utilizzando i cosiddetti cool roof, cioè materiali e soluzioni di finitura superficiale contraddistinti da valori elevati e certificati della riflettanza solare e dell'emissività termica.

La riflettanza solare è la frazione della radiazione solare incidente che viene riflessa da una superficie irradiata; essa va da 0, per una superficie totalmente assorbente, a 1 o 100%, per una superficie perfettamente riflettente. L'emissività termica è il rapporto tra la radiazione termica effettivamente emessa da una superficie e la massima emissione teorica alla stessa temperatura; anch'essa varia da 0 a 1. Una superficie di copertura con riflettanza solare elevata assorbe solo una piccola parte della radiazione solare incidente. Inoltre, la maggior parte dell'energia solare che è stata assorbita viene restituita all'ambiente esterno se la superficie di copertura presenta emissività termica parimenti elevata.

Un cool roof, in italiano "tetto freddo", è un rivestimento contraddistinto da un valore elevato di riflettanza solare, cioè della capacità di riflettere l'irradiazione solare incidente, combinato con un elevato valore dell'emissività nell'infrarosso, che consente al tetto di restituire all'atmosfera, mediante irraggiamento termico, la maggior parte della frazione assorbita dell'irradiazione solare. I cool roofs sono attualmente promossi con vigore negli USA, sia dalle pubbliche amministrazioni che da molte organizzazioni private dell'ambito edile. La disponibilità commerciale di prodotti tipo cool roof certificati, in generale di colorazione bianca brillante, è attualmente ampia in Nord America e comincia ad esserlo anche in Europa. Peraltro, estensive attività di ricerca sono tuttora in corso, finalizzate allo sviluppo di prodotti che mantengano le loro prestazioni anche dopo prolungata esposizione agli agenti atmosferici, ovvero, anche in Europa, di prodotti con colore e aspetto assimilabili a quelli di edifici dell'edilizia tradizionale e storica, ottenuti sacrificando in parte le proprietà antisolari.

Se può essere giudicato facile creare una superficie che sia perfettamente "bianca" quando essa è stata appena posta in opera, è più difficile crearne una che mantenga le sue proprietà antisolari anche dopo invecchiamento. Questo è il principale problema che affligge la maggior parte dei prodotti commerciali tipo cool roof, solitamente di natura organica, i quali soffrono spesso una perdita di prestazioni tale da richiedere di ripristinare o trattare le superfici dopo pochissimi anni di esposizione alle intemperie. Questo sovra-costò potrebbe essere evitato utilizzando prodotti che tendano a soffrire meno l'azione del tempo e degli agenti atmosferici quali i materiali inorganici sviluppati nell'ambito della ricerca qui esposta. Più in dettaglio, il progetto è stato finalizzato allo sviluppo di rivestimenti ceramici con elevata riflettanza solare, atti ad essere incorporati in piastrelle di colorazione bianca per coperture orizzontali.

Poiché i rivestimenti ceramici possono essere realizzati con minima porosità superficiale e, eventualmente, con proprietà idrofobiche, per questi prodotti si può ottenere una tendenza allo

sporcamento inferiore ai materiali organici. I medesimi rivestimenti, con modalità dettagliate più oltre, possono essere sfruttati per realizzare manufatti con colorazione simile a quella dei materiali tipici dell'edilizia sud-europea, ad esempio coppi o tegole color terracotta per tetti a falde.

Surriscaldamento estivo degli edifici e cool roofs

La grande quantità di energia apportata dal sole può costituire una grossa risorsa nel caso venga opportunamente sfruttata, ad esempio tramite pannelli fotovoltaici o pannelli solari termici, ma può anche rappresentare un grosso problema. Infatti, il surriscaldamento estivo dei fabbricati dovuto all'irradiazione solare pregiudica il comfort delle persone presenti all'interno degli stessi e contribuisce in modo sostanziale al consumo di elettricità per condizionamento dell'aria ed all'emissione di gas ad effetto serra. Inoltre, gli alti picchi diurni di temperatura ed i cicli termici giornalieri dovuti all'irraggiamento solare causano l'indebolimento ed accelerano l'invecchiamento dei materiali isolanti e delle membrane bituminose o di altri strati di rivestimento. La peggiore situazione si verifica nelle aree densamente urbanizzate, dove si presenta il fenomeno dell'isola di calore urbana: la superficie delle costruzioni e delle strade assorbe la maggior parte della radiazione solare ricevuta, ma, a differenza di quanto avviene nelle campagne, il calore assorbito non può essere smaltito attraverso il fenomeno dell'evotraspirazione delle piante. Ne consegue che, durante la stagione calda, la temperatura dell'aria nelle aree urbane può diventare 3-6°C superiore a quella delle zone rurali circostanti. Il surriscaldamento delle aree urbane intensifica anche lo smog fotochimico ed i picchi di carico sulla rete elettrica.

Questo problema è stato già affrontato negli Stati Uniti favorendo l'adozione dei "cool roofs" precedentemente citati, vale a dire coperture caratterizzate da alta riflettanza solare ed alta emissività termica. Un cool roof, in italiano "tetto freddo", è un rivestimento contraddistinto da un valore elevato di riflettanza solare, cioè della capacità di riflettere l'irradiazione solare incidente, combinato con un elevato valore dell'emissività nell'infrarosso, che consente al tetto di restituire all'atmosfera, mediante irraggiamento termico, la maggior parte della frazione assorbita dell'irradiazione solare. Nella pratica, un cool roof può essere ottenuto applicando alla superficie del tetto uno strato di ricoprimento superficiale esterno con colore molto chiaro, preferibilmente bianco, e con carattere non metallico. Un tipo di copertura con simili proprietà può fornire una soluzione sia al problema del surriscaldamento estivo degli edifici, sia al correlato problema dell'isola di calore urbana.

Negli U.S.A., la diffusione dei cool roofs è da tempo promossa da svariate amministrazioni ed organizzazioni pubbliche, specialmente negli stati del sud come California e Florida. In particolare, sulla scorta dei risultati largamente positivi di alcune sperimentazioni, effettuate da centri di ricerca governativi ed universitari, sono stati avviati programmi di attestazione delle prestazioni delle coperture e, in alcuni casi, di incentivazione normativa ed economica alla loro adozione. In California, una significativa accelerazione si è avuta in seguito ai black-out dell'estate 2000 innescati dall'azionamento simultaneo, nelle ore più calde della giornata, degli impianti di condizionamento e dal conseguente sovraccarico della rete elettrica.

Sul fronte della ricerca, si sono dimostrati particolarmente attivi centri come il Federal Solar Energy Center (FSEC) in Florida, o il Building Technology Center dell'Oak Ridge National Laboratory

(BTC-ORNL) ed il Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) in California. Questi centri, oltre ad effettuare analisi teoriche estensive, hanno strumentato e monitorato un numero consistente di edifici (capannoni industriali, centri commerciali, scuole, abitazioni, centraline per telecomunicazioni, ecc.) dotati di tipi differenti di copertura, o anche di coperture realizzate a settori con caratteristiche diversificate. Gli studi svolti hanno dimostrato che i cool roofs possono permettere riduzioni dei consumi per condizionamento e dei carichi elettrici di picco fino anche al 70%. Studi analoghi sono stati avviati anche in Europa, grazie anche all'azione dell'ENEA e dei suoi partner scientifici, tra questi il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile con il suo Laboratorio per l'Efficienza Energetica (EELab).

La principale iniziativa volta alla certificazione dei materiali per cool roofs è il Product Rating Program del Cool Roof Rating Council (CRRC). Con tale programma si sono introdotte procedure uniformi e rigorose di attestazione delle proprietà emissive dei materiali. Le procedure sono basate sull'utilizzo di standard di misura ben definiti, per la riflettanza solare gli ASTM E903, ASTM E1918 o ASTM C1549, per l'emissività l'ASTM C1371, ASTM E408. Le misure vanno effettuate su prodotti sia nuovi che invecchiati e si devono svolgere presso laboratori accreditati, cioè formalmente riconosciuti dal CRRC per aver dimostrato la loro competenza tecnica. I fabbricanti ed i rivenditori che sottopongono i propri prodotti al percorso di certificazione previsto dal CRRC possono ottenere l'autorizzazione all'utilizzo di un'etichetta depositata, che attesta i valori misurati delle proprietà emissive, quelle iniziali e (se disponibili) quelle dopo invecchiamento. In questa ricerca si sono presi a riferimento, per la caratterizzazione dei materiali sviluppati, i migliori o comunque i più adeguati tra gli standard sopra indicati, in particolare l'ASTM E903 per la riflettanza solare e l'ASTM C1371 per l'emissività termica.

Il CRRC non prescrive i valori delle proprietà emissive, ma solo le modalità per verificarli. Indicazioni precise sulle prestazioni minime che un cool roofs deve garantire sono state invece fornite fin dal 1998 dall'Environmental Protection Agency (EPA) e dal Department of Energy (DOE) degli U.S.A. attraverso l'Energy Star Roof Product Program, un programma federale finalizzato all'incentivazione su base volontaria dei cool roofs. Il programma prevede infatti che possano essere etichettate con il logo Energy Star soluzioni di copertura per tetti a bassa inclinazione che garantiscano riflettanza solare maggiore o uguale a 0.65 a prodotto nuovo, e maggiore o uguale a 0.50 dopo tre anni di invecchiamento. La verifica deve essere fatta per tre distinte installazioni, di cui almeno una collocata in una grande area metropolitana, secondo modalità analoghe a quelle previste dal CRRC. Le indicazioni sopra delineate sono state recepite e rese talora obbligatorie da alcune amministrazioni locali degli U.S.A. come, ad esempio, la città di Chicago. Nell'ambito dell'Energy Star Roof Product Program non si fornisce alcuna prescrizione circa l'emissività, che si è invece visto essere fondamentale dal punto di vista del surriscaldamento delle superfici irradiate. Pertanto, molte amministrazioni degli U.S.A. come, ad esempio quelle della California, della Georgia e della Florida, oltre a porre limiti più stringenti per la riflettanza solare, prescrivono valori minimi da conseguire anche per l'emissività termica. In generale, gli impulsi che le diverse amministrazioni hanno dato, e continuano a dare, all'adozione di cool roofs si attuano, oltre che in termini di esplicito obbligo all'installazione per edifici nuovi o sottoposti a ristrutturazione integrale, sotto forma di prescrizioni di isolamento termico più stringenti in caso di mancata installazione, o anche di contributi economici riconosciuti a chi converte in cool roof un tetto preesistente.

Negli U.S.A. si è sviluppato un fiorente giro di affari non solo sulle opere di installazione, ma anche sull’ottimizzazione dei materiali di ricoprimento e sulle attività di valutazione tecnico-economica e di attestazione delle proprietà emissive, a prodotto sia nuovo che invecchiato. Infatti, è riduttivo pensare che un cool roof si ottenga semplicemente verniciando con un colore chiaro la superficie di un tetto, poiché la relazione tra aspetto esteriore e valori delle proprietà emissive non è banale e, inoltre, vanno adeguatamente considerate una serie di problematiche quali la resistenza allo sporco e al degrado chimico-fisico, l’impatto visivo o la perdita degli apporti energetici gratuiti invernali. Dinamiche industriali e di mercato cominciano ad osservarsi anche in Italia e, più in generale, nell’Europa meridionale, ove un gran numero di produttori di materiali e prodotti per le coperture edili hanno recentemente preso contatto con i diversi partner di questo progetto. Le attività richieste si sono finora focalizzate sulla caratterizzazione e sull’ottimizzazione del portafoglio prodotti corrente, ma questa ricerca può gettare le basi per sviluppare nuovi prodotti, coerenti con l’edilizia tradizionale italiana e sud-europea e con prestazioni uguali o anche superiori a quelle dei prodotti sviluppati oltreoceano.

Termocinetica dei cool roofs

Per comprendere il funzionamento di cool roof e soluzioni assimilabili, è opportuno analizzare i processi di scambio termico che interessano il piano di copertura di un edificio soggetto ad irradiazione solare. Tali processi sono schematizzati in figura 1.

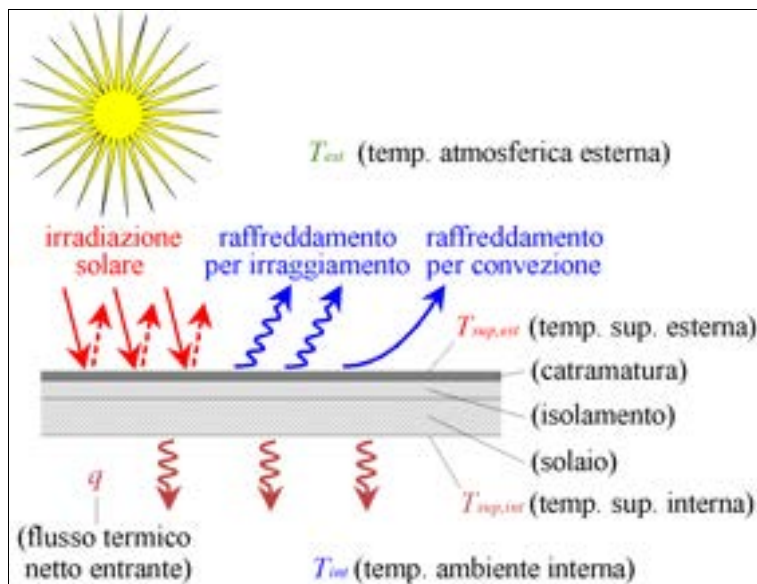


Figura 1. Processi di scambio termico di un tetto piano

L’energia termica irradiata dal sole ed incidente sulla superficie esterna del tetto è in parte riflessa, in parte assorbita. Per ogni lunghezza d’onda il rapporto tra frazione riflessa, $G_{r\lambda}$ [W/m²], e radiazione totale incidente, G_{λ} [W/m²], è espresso dalla riflettività spettrale, ρ_{λ} :

$$\rho_{\lambda} = G_{r\lambda} / G_{\lambda} \tag{1}$$

La riflettanza solare R è calcolata come la media integrale della riflettività spettrale ρ_λ , pesata sull'irradianza spettrale del sole alla superficie terrestre, I_λ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$], come tabulata dall'ASTM Standard G173 (Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances) o altri standard equivalenti.

$$R = \frac{\int \rho_\lambda I_\lambda d\lambda}{\int I_\lambda d\lambda} \quad (2)$$

Per effetto dell'assorbimento della radiazione solare incidente, il tetto si riscalda e restituisce energia termica all'atmosfera attraverso la sua superficie esterna. La cessione di calore avviene per convezione e per irraggiamento. Nel caso del primo meccanismo, il flusso termico netto scambiato, q_{conv} [W/m^2], può essere correlato linearmente alla differenza tra temperatura superficiale esterna del tetto, $T_{sup,est}$ [K], e temperatura dell'aria atmosferica, T_{est} [K], attraverso un coefficiente di scambio termico convettivo, h_{conv} [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]:

$$q_{conv} = h_{conv}(T_{sup,est} - T_{est}) \quad (3)$$

A q_{conv} va aggiunto il flusso termico netto scambiato per irraggiamento termico, q_{rad} [W/m^2], che è il bilancio netto tra flusso termico emesso dalla superficie del tetto verso il cielo o, più precisamente, verso la soprastante atmosfera, e flusso termico ceduto dall'atmosfera alla superficie del tetto. Questo meccanismo di scambio termico riguarda le bande spettrali dell'infrarosso medio e lontano (lunghezze d'onda $> 2.5 \mu\text{m}$), ben distinte quindi da quelle dell'irradiazione solare, poiché le temperature del tetto e dell'atmosfera sono molto minori di quelle della superficie solare (attorno a 300 K contro circa 5800 K).

Anche q_{rad} può essere correlato ad una differenza di temperatura, quella tra temperatura superficiale del tetto, $T_{sup,est}$ [K], e temperatura del cielo, T_{cielo} [K], attraverso un coefficiente di scambio termico radiativo, h_{rad} [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]. Siccome, in una giornata estiva calda ed umida, la temperatura del cielo è approssimabile alla temperatura che l'aria atmosferica assume in prossimità del suolo (cioè $T_{cielo} \cong T_{est}$), si può verificare che:

$$q_{rad} \cong h_{rad}(T_{sup,est} - T_{est}) \quad (4)$$

Il coefficiente di scambio termico radiativo può essere stimato attraverso la relazione:

$$h_{rad} = e\sigma_0(T_{sup,est}^2 + T_{est}^2)(T_{sup,est} + T_{est}) \quad (5)$$

In equazione (5) si è indicata con e l'emissività della superficie nell'infrarosso medio e lontano (diversa quindi dall'emissività totale, cioè quella relativa a tutto lo spettro della radiazione elettromagnetica termica). L'infrarosso medio e lontano sono le bande spettrali cui si concentra la

radiazione elettromagnetica termica emessa dal tetto e, più in generale, quella emessa da tutti i corpi solidi a temperatura prossima a quella ambiente. Il coefficiente σ_0 è la costante di Stefan-Boltzmann [$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$].

L'emissività costituisce il rapporto tra il flusso termico che la superficie in esame effettivamente emette verso l'esterno (cioè verso l'atmosfera) ed il massimo flusso termico che può essere teoricamente emesso alla temperatura della superficie. Ciò consente di definire un valore limite per il coefficiente di scambio termico radiativo, $h_{rad,max}$, dipendente solo indirettamente dalle caratteristiche della superficie. Al coefficiente $h_{rad,max}$ può essere poi correlato, attraverso l'emissività, il coefficiente di scambio termico radiativo riferito alla superficie in esame, h_{rad} :

$$h_{rad} = e h_{rad,max} \quad (6)$$

Combinando le equazioni (4) e (5), si ottiene che il flusso termico netto scambiato tra superficie del tetto ed atmosfera esterna all'edificio è valutabile come segue:

$$q_{conv} + q_{rad} = (h_{conv} + e h_{rad,max}) (T_{sup,est} - T_{est}) \quad (7)$$

Tramite le relazioni semi-empiriche comunemente reperibili in letteratura è agevole verificare che, per edifici di normali dimensioni ed in sostanziale assenza di vento (situazione usuale nelle afose giornate estive), h_{conv} assume valori inferiori a $2 \div 3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Di contro, $h_{rad,max}$ assume valori sempre maggiori di $6 \div 7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Ne consegue che, negli scambi termici tra tetto ed atmosfera esterna, l'irraggiamento è in generale dominante, specialmente se l'emissività superficiale del tetto è elevata.

In definitiva, il flusso termico conduttivo che attraversa la superficie del tetto, $q_{sup,est}$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$], è dato dal bilancio della radiazione solare non riflessa (assorbita) e degli scambi termici con l'atmosfera per convezione ed irraggiamento:

$$q_{sup,est} = q_{sole} - (q_{conv} + q_{rad}) = (1-r)G - (h_{conv} + e h_{rad,max}) (T_{sup,est} - T_{est}) \quad (8)$$

La frazione dell'irradiazione solare incidente che viene assorbita dal tetto diminuisce all'aumentare della riflettanza r . Inoltre, l'energia termica restituita dal tetto all'atmosfera per irraggiamento nell'infrarosso aumenta all'aumentare dell'emissività e . Pertanto, si dimostra matematicamente come un tetto la cui superficie esterna presenti valori elevati sia della riflettanza, sia dell'emissività in campo infrarosso, sia un tetto che si riscalda poco – cioè un cool roof.

Relazione tra proprietà ottiche superficiali e surriscaldamento degli edifici

L'impatto che le proprietà ottiche superficiali della copertura (riflettanza solare ed emissività termica) hanno sul riscaldamento di un edificio, in particolare sul flusso termico trasmesso al suo interno, può essere stimato agevolmente in condizioni termiche stazionarie. Si noti che l'assunzione di stazionarietà è plausibile solo in primissima approssimazione.

Il flusso termico che attraversa la superficie esterna di un tetto, valutabile tramite l'equazione (8), in condizioni stazionarie deve attraversare anche tutti gli strati sovrapposti di materiale che costituiscono il tetto suddetto (catramatura, isolamento termico, solai in cemento o laterizio, intonaco, eventuali intercapedini, ecc.), per essere infine trasmesso ai locali sottostanti. Da tali locali dovrà essere estratto mediante un impianto di condizionamento, pena un progressivo riscaldamento dell'aria interna e delle strutture edilizie. Assegnati la resistenza termica del tetto riferita all'unità di superficie, R [(m²·K)/W], il coefficiente di scambio termico adduttivo (convettivo e radiativo) alla superficie interna del tetto, h_{int} [W/(m²·K)], tipicamente poco variabile, e la temperatura interna dei locali sottostanti il tetto, T_{int} [K], la relazione seguente consente di calcolare il flusso termico q [W/m²] che attraversa il tetto:

$$q \equiv q_{sup_{est}} \equiv q_{int} = \frac{T_{est} + \frac{(1-r)G}{(h_{conv} + eh_{rad,max})} - T_{int}}{\frac{1}{(h_{conv} + eh_{rad,max})} + R + \frac{1}{h_{int}}} \quad (9)$$

Un aumento della riflettanza solare r comporta una proporzionale riduzione del secondo addendo a numeratore e, quindi, del flusso termico q . Analogo effetto si per con un aumento dell'emissività e , che comporta anche un incremento del primo termine a denominatore dell'equazione (9), ma si può verificare che questo incremento è percentualmente piccolo se si è in presenza di un isolamento termico anche blando (incluso nella resistenza termica R). Incrementando la resistenza termica data dall'isolamento, si riduce il flusso termico trasmesso, ma si ha anche un aumento della temperatura superficiale esterna del tetto, valutabile tramite la relazione:

$$T_{sup_{est}} = T_{int} + \left[1 - \frac{\frac{1}{(h_{conv} + eh_{rad,max})}}{\frac{1}{(h_{conv} + eh_{rad,max})} + R + \frac{1}{h_{int}}} \right] \cdot \left[T_{est} + \frac{(1-r)G}{(h_{conv} + eh_{rad,max})} - T_{int} \right] \quad (10)$$

Maggiori temperature degli strati più esterni del tetto comportano un più veloce degrado chimico-fisico dei materiali, nonché maggiori sollecitazioni a fatica delle strutture per le dilatazioni e contrazioni connesse ai cicli termici.

Nelle figure 2 e 3 si presentano i risultati ottenuti applicando l'equazione (9) e l'equazione (10) ad una soluzione di copertura come quelle usualmente utilizzate in capannoni industriali ed edifici per servizi collettivi, costituita da un solaio orizzontale in cemento armato rivestito superiormente da uno strato di isolante termico a bassa densità. Il rivestimento isolante è generalmente protetto contro gli agenti atmosferici da una guaina catramata. Le condizioni ambientali considerate sono quelle medie di una tipica giornata estiva emiliana: la temperatura ambiente esterna, T_{est} , è assunta pari a 30°C, l'irradiazione solare, G , a 500 W/m². Nell'ambiente di sottotetto viene mantenuta, ad esempio, una temperatura di 25°C.

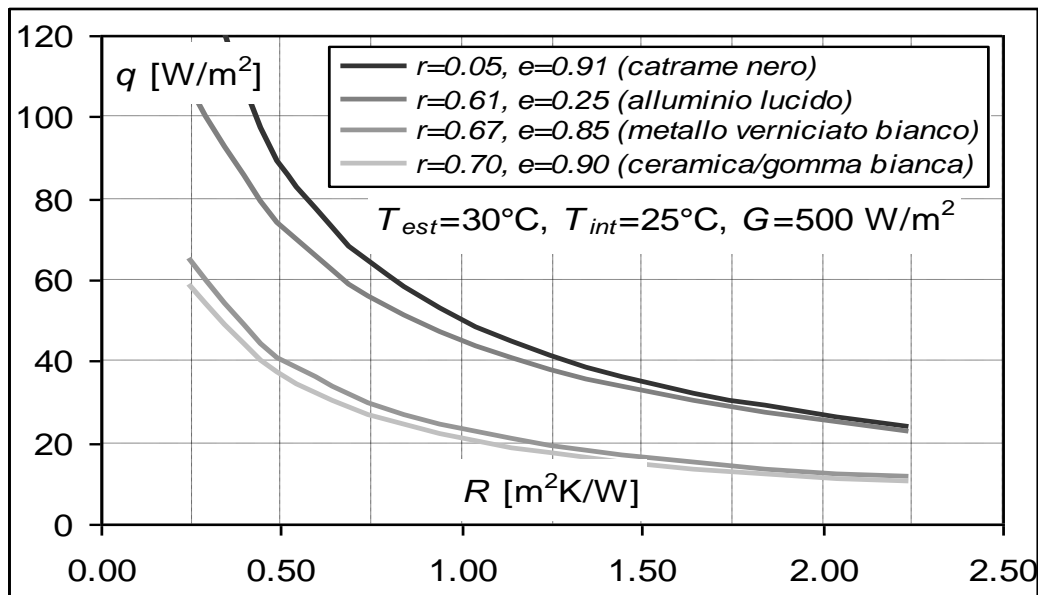


Figura 2. Flusso termico attraverso la copertura

Una guaina catramata, generalmente nera o comunque di colore molto scuro, può presentare una riflettanza solare estremamente ridotta, pari al valore di 0.05 considerato nei calcoli o persino inferiore. Ciò significa che il 95% ed oltre della radiazione solare incidente viene assorbita dal tetto, causandone il surriscaldamento (fig. 3) e la trasmissione di un consistente flusso termico q agli ambienti sottostanti (fig. 2).

Incrementando la resistenza dell'isolamento termico, R , si ha un minore flusso termico trasmesso, ma anche un aumento della temperatura superficiale esterna, $T_{sup,est}$, con ciò che questo comporta in termini di degrado della guaina catramata e del materiale isolante o di sollecitazione termomeccanica a fatica delle strutture del tetto. A poco vale il fatto che la guaina, come tutti i materiali non metallici, presenti un'emissività termica elevata, poiché il calore rilasciato all'atmosfera esterna per convezione e irraggiamento non basta a compensare quello assorbito per irradiazione solare.

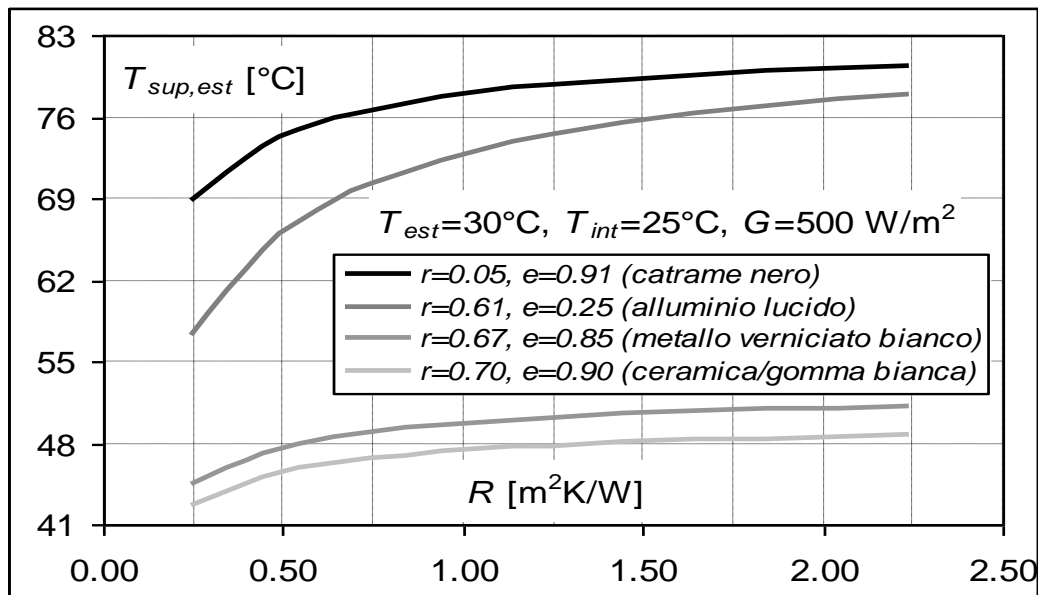


Figura 3. Temperatura superficiale esterna della copertura

Va peraltro rilevato che, affinché nell'edificio possa essere mantenuta la temperatura interna prefissata T_{int} (25°C), il flusso termico trasmesso deve essere estratto tramite un opportuno impianto di condizionamento. In caso contrario, la temperatura interna deriverebbe progressivamente verso l'alto, e con essa la temperatura del tetto, finché non venga raggiunta una condizione di equilibrio tale che il calore ceduto all'atmosfera per convezione ed irraggiamento eguagli l'irradiazione solare assorbita. In ogni caso, l'energia termica apportata al tetto dall'irradiazione solare assorbita e che viene quindi ceduta per convezione ed irraggiamento va a contribuire pressoché integralmente al riscaldamento dell'aria in prossimità del suolo, cosa che non si verifica per l'irradiazione solare riflessa. Ne consegue che una superficie di copertura poco riflettente può essere deleteria non solo dal punto di vista del benessere termo-climatico e dei consumi energetici locali, ma anche per ciò che concerne l'isola di calore urbana.

Problemi del tipo di quelli sopra presentati sono stati affrontati, nell'ambito della presente ricerca, anche tramite modelli matematici molto più sofisticati, in grado di tenere in considerazione le proprietà "dinamiche" della copertura e la risposta effettiva al ciclo solare attraverso la simulazione numerica in transitorio del comportamento termico dei solai di copertura attraverso il loro spessore. I risultati ottenuti, qui omessi per brevità, ma di prossima pubblicazione su rivista internazionale, rispecchiano perfettamente, in termini qualitativi, quelli presentati sopra e se ne discostano solo moderatamente anche in termini quantitativi, consentendo quindi di attribuire validità generale alle conclusioni che se ne sono tratte.

Prodotti per cool roofing: organici (vernici, guaine) e inorganici (rivestimenti ceramici)

Il mercato dei prodotti per cool roofing è oggi dominato da vernici (soprattutto acriliche) a base di biossido di titanio. Alcune di esse vengono applicate come semplici rivestimenti, altre sono integrate in vere e proprie membrane impermeabilizzanti. Talune offrono prestazioni notevoli, arrivando a valori di riflettanza solare a nuovo intorno al 88%.

Il principale svantaggio derivante dall'uso di vernici organiche o membrane è rappresentato dal degrado, talvolta molto rapido, a cui i valori di riflettanza solare sono soggetti a causa dell'azione combinata dell'invecchiamento dei materiali, dell'azione degli agenti atmosferici e dell'inquinamento dell'aria. Un'analisi ad ampio spettro dei prodotti sul mercato è stata svolta nell'ambito di questa ricerca, attingendo ad un archivio dati nelle disponibilità dell'EELab ed analizzato campioni reperibili in commercio. Alcuni risultati significativi vengono illustrati nel seguito.

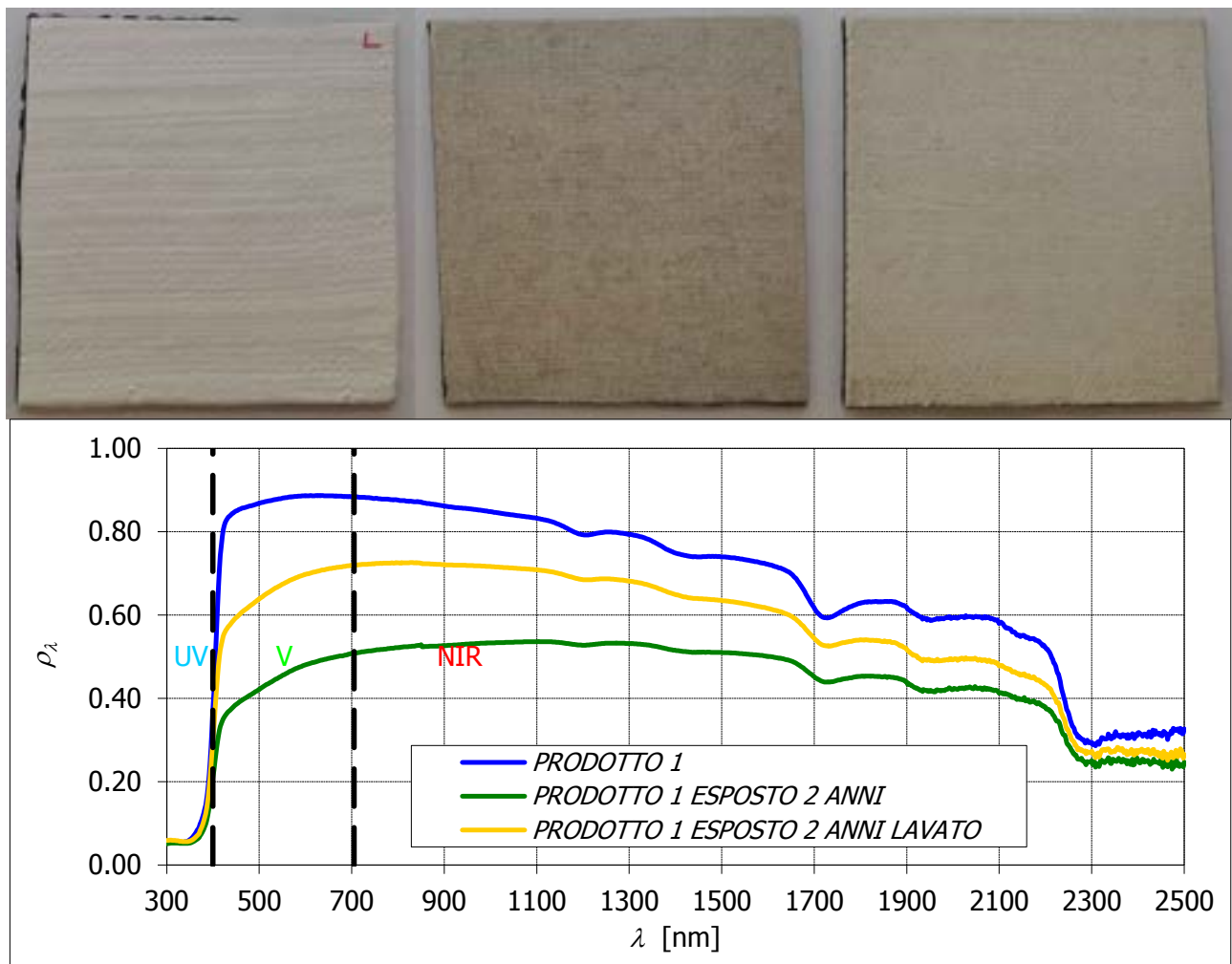


Figura 4. Vernice commerciale 1 per cool roof acrilica a nuovo (R=80%), esposta 2 anni (R=46%) ed esposta 2 anni e lavata con acqua (R=64%)

In figura 4 sono riportate le fotografie e le riflettività spettrali di tre campioni di guaina bituminosa trattati con la stessa vernice acrilica. Il primo campione è ricoperto da vernice nuova, il secondo campione ed il terzo campione sono stati esposti per due anni all'atmosfera, il terzo è stato lavato con acqua prima delle misure. Il primo campione presenta una riflettanza solare del 80%, il secondo del 46% il terzo del 64%. La perdita di prestazione in termini di riflettanza solare è drastica, tanto che una copertura trattata con la vernice in questione necessita di un trattamento di rinnovo, ripristino o lavaggio, dopo meno di due anni dall'installazione per poter essere ancora considerata un cool roof.

La figura 5 riporta un secondo esempio di confronto tra vernice nuova (R=86%) e vernice invecchiata (R=66%), in questo caso su un periodo di tre anni.

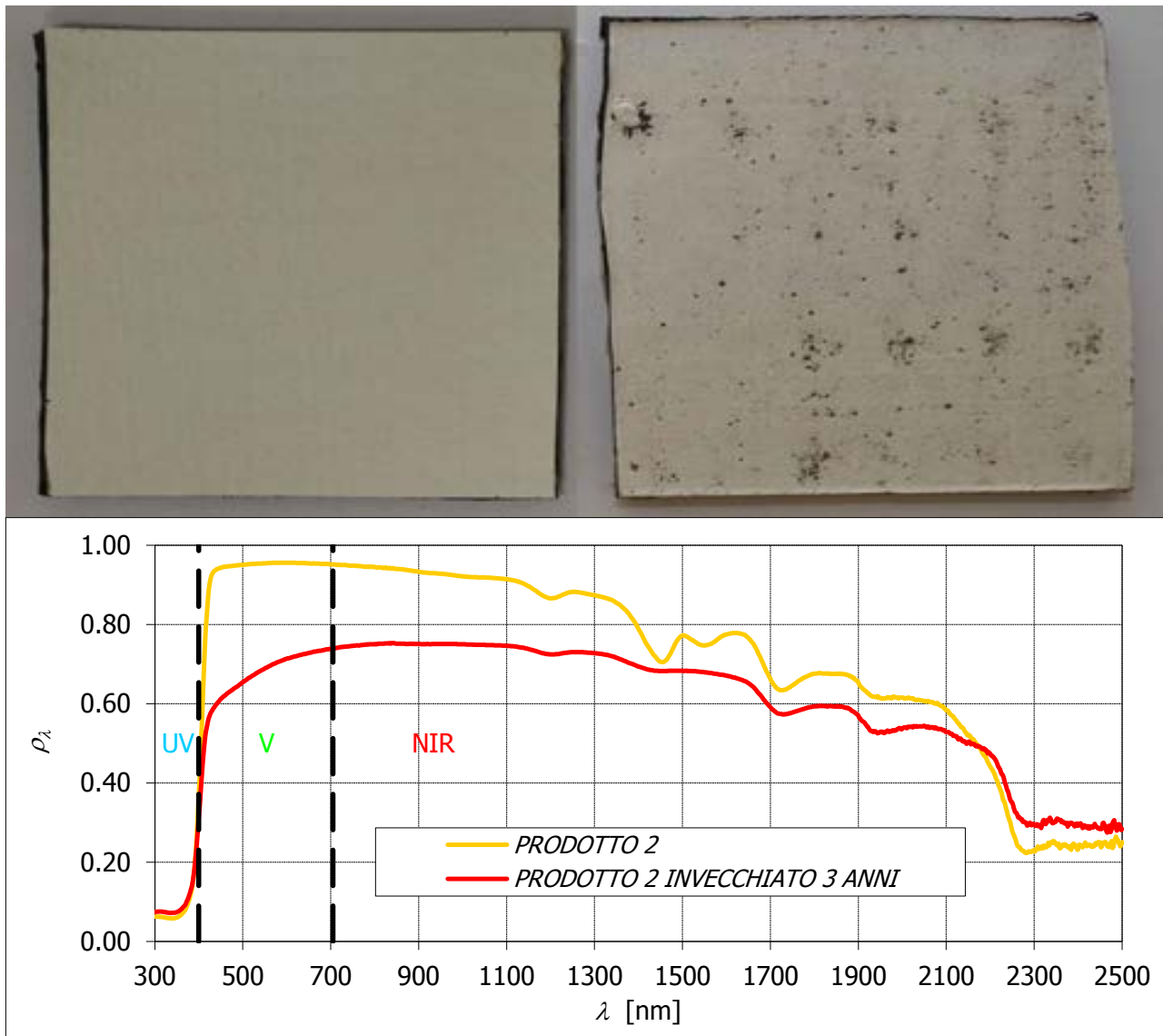


Figura 5. Vernice commerciale 2 per cool roof acrilica a nuovo (R=86%), esposta 3 anni (R=66%)

I costi per il ripristino o la pulizia da tenersi ogni due o tre anni su un cool roof non sono trascurabili, ma vanno ad incidere fortemente sul costo complessivo dell'installazione di un cool roof e devono quindi essere considerati nella fase di scelta del materiale per cool roof da utilizzarsi per ogni applicazione. Mentre il solo costo del trattamento di tipo cool roof eseguito con vernici a base organica è molto basso, se paragonato all'utilizzo di materiali alternativi e più resistenti al degrado, considerando nella spesa complessiva anche gli interventi necessari per i ripristini periodici ed i maggiori esborsi per la climatizzazione derivanti dalle perdite di prestazione in termini di riflettanza solare, l'utilizzo di materiali a più alto costo iniziale, come ad esempio piastrelle ceramiche per rivestimento, diventa competitivo con quello delle vernici a base organica. Sulla base di queste considerazioni, lo studio qui documentato è stato indirizzato allo sviluppo di rivestimenti ceramici per soluzioni di tipo cool roof. Le peculiarità conferibili a tali rivestimenti sono illustrate nel seguito.

Un cool roof ceramico, per essere competitivo sul mercato oggi in mano alle vernici a base organica, deve possedere le seguenti caratteristiche:

- elevata riflettanza solare (comparabile o superiore a quella delle vernici a base organica)
- elevata resistenza alla deposizione dello sporco (per mantenere elevata nel tempo la riflettanza solare)
- elevata emissività termica
- basso peso al metro quadro (per non appesantire le strutture edili)

Il presente studio è stato volto a soddisfare i primi due requisiti elencati ed in particolare alla realizzazione di un ingobbio ceramico ad elevata riflettanza solare in grado di ricoprire completamente sia supporti ceramici di colore chiaro che di colore scuro e allo studio della idrofobicità delle superfici realizzate attraverso la misurazione degli angoli di contatto di gocce di acqua deposte sulle superfici al fine di valutarne le capacità di resistenza allo sporco. L'emissività termica di prodotti a finitura non metallica lucida è in genere compresa tra 0.89 e 0.91 perciò nello svolgimento di questo studio si sono omesse azioni specifiche sul controllo di tale paramento. Il raggiungimento del quarto requisito è garantito dalle tecnologie attualmente disponibili in ambito ceramico (piastrelle sottili).

Oltre i cool roof: i cool colors

La presenza di un tetto colorato di bianco non è causa di problemi estetici per tutti quegli edifici dotati di coperture a bassa pendenza come, ad esempio, capannoni industriali oppure edifici residenziali e commerciali a copertura piana orizzontale, specialmente se le coperture sono completamente fuori vista. Una finitura superficiale bianca delle coperture è peraltro abbastanza comune in alcune zone residenziali del Nord Africa, Grecia e Sud Italia. D'altro canto, la maggior parte degli edifici tipici dei centri storici italiani presentano tetti a falde inclinate coperti da tegole di terracotta rossa (Figura 6).

Le comuni tegole di argilla hanno una riflettanza solare relativamente bassa, minore di 0.30-0.40. Poiché i locali posti immediatamente sotto i tetti sono spesso abitati, la combinazione di rivestimento in tegole o coppi di terracotta, caratterizzato da limitata capacità di riflettere l'irradiazione solare, e strutture lignee dei tetti, contraddistinte da ridotta inerzia termica, fa del surriscaldamento estivo di attici e ambienti mansardati un problema di non poco conto. L'utilizzo dell'aria condizionata non fornisce una soluzione del tutto soddisfacente e costituisce una fonte di spesa aggiuntiva. Il problema può essere invece affrontato con approcci alternativi, quali l'implementazione di tetti ventilati a ventilazione naturale o forzata, oppure l'incremento dell'inerzia termica tramite l'aggiunta di strati di materiale isolante con elevata capacità termica e/o l'incremento della massa delle strutture portanti del tetto. Tali approcci, tuttavia, sono spesso difficili da attuare, e non necessariamente risolvono del tutto il problema.



Figura 6. Aspetto tipico delle coperture dei centri storici italiani

Un approccio alternativo o complementare a quelli sopra citati è dato dall'utilizzo tegole trattate superficialmente con finiture tipo "cool colors", cioè con rivestimenti aventi la stessa risposta spettrale delle tegole di terracotta nel visibile (lunghezza d'onda compresa tra 400 nm e 700 nm), dove cade circa il 43% della radiazione solare, ma in grado di riflettere molta più energia nella banda spettrale dell'infrarosso vicino (tra circa 700 nm e 2500 nm), che comprende più del 52% della radiazione solare. La Figura 7 mostra lo spettro della radiazione solare a livello del mare normalizzato rispetto al valore massimo. Le aree sotto la curva rappresentano le diverse frazioni dell'irradianza totale che rientrano nella gamma spettrale in evidenza (ultravioletto, visibile e infrarosso vicino). La curva tratteggiata rappresenta la sensibilità dell'occhio umano in condizioni di piena luce.

Poiché è solo la parte di radiazione che rientra nello spettro del visibile ad influenzare la risposta cromatica di una superficie, i cool colors possono avere lo stesso aspetto per l'occhio umano dei materiali tradizionali, in particolare lo stesso colore, ma offrire una riflettanza solare molto più elevata rispetto ai materiali comuni.

Un cool color si può ottenere trattando una superficie con composti in grado di differenziare la loro risposta spettrale offrendo una riflettività spettrale nel range della luce visibile tipico di un colore diverso dal bianco, affiancata ad una riflettività spettrale elevata nella zona dell'infrarosso solare.

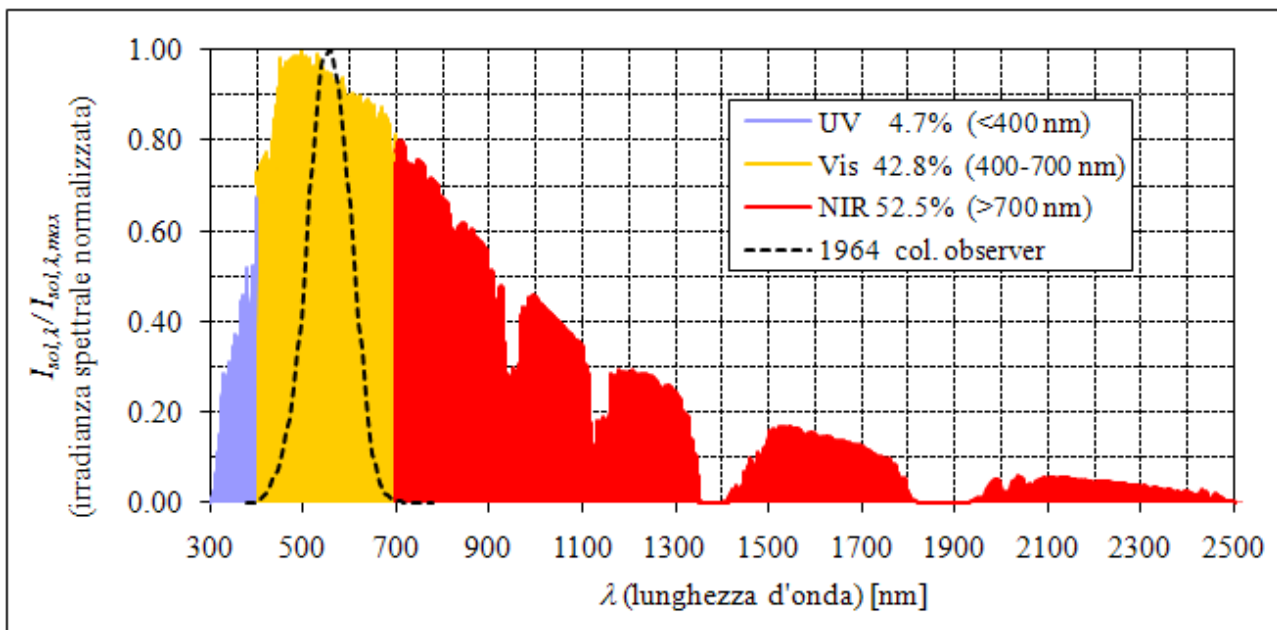


Figura 7. Spettro normalizzato della radiazione solare sulla superficie terrestre

Alternativamente, un cool color può essere ottenuto applicando un rivestimento pigmentato trasparente nell'infrarosso sopra su un substrato altamente riflettente in tutto lo spettro della radiazione solare. Il substrato va preventivamente depositato sulla superficie solida che si vuole rivestire (Figura 8). Il rivestimento è costituito da un materiale trasparente alla radiazione solare, a cui viene aggiunto un pigmento scelto in modo appropriato. Il pigmento produce lo spettro desiderato di assorbimento/riflessione della radiazione visibile, ma consente alla parte di radiazione situata nel vicino infrarosso di passare attraverso il rivestimento, di essere riflessa dal substrato e di attraversare nuovamente il rivestimento.

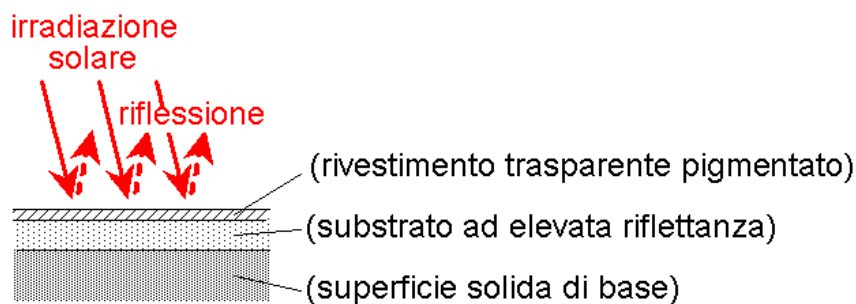


Figura 8. Schema stratigrafico di un rivestimento tipo cool color

Sulla base delle esigenze proprie del territorio italiano e della peculiarità delle coperture nei suoi centri storici, la seconda parte di questo studio è stata volta alla realizzazione di cool colors ceramici, realizzati utilizzando come substrato i rivestimenti bianchi per cool roof realizzati durante la prima fase dello studio.

METODOLOGIE E RISULTATI DELLA RICERCA

Sviluppo di ingobbi ceramici bianchi ad elevata riflettanza solare

Con il termine ingobbio si intende una miscela argillosa liquida, composta da materie prime naturali ed utilizzata come substrato di smalti (opachi o trasparenti) per la copertura di supporti ceramici. Questa capacità consente l'impiego di supporti scuri, provenienti da argille meno pregiate, senza perdite di funzionalità ottica del prodotto finale. Nel presente lavoro, al fine di valutare le capacità coprenti degli ingobbi, le misure di riflettanza solare sono state condotte, per ogni formulazione di ingobbio creata, su campioni con supporti in gres porcellanato scuri e chiari.

La stesura dell'ingobbio, che avviene su grès ancora crudo, consente di ottenere una superficie smaltata più uniforme, con difetti ridotti ed un migliore effetto estetico.

Indipendentemente dal tipo di processo di produzione e dal corpo ceramico utilizzato, tutti gli ingobbi presentano due peculiari caratteristiche: l'elevato contenuto di materie prime naturali plastiche (argille, caolino, ecc.) e l'elevato potere coprente dovuto all'alto contenuto di materiali cristallini opacizzanti.

Si riportano nelle tabelle seguenti le caratteristiche delle materie prime utilizzate nella preparazione dei vari composti studiati.

Tra gli elementi base dell'ingobbio, sono stati inoltre inseriti due componenti che per motivi di riservatezza dovuta alla brevettabilità potenziale di alcuni risultati, sono stati indicati nel seguito come "Componente A" e "Componente B". Ciascun componente è stato inserito all'interno di una formulazione base assieme alle materie prime di cui si sono riportate le schede tecniche. La scelta dei due componenti è stata suggerita da misure condotte presso il Dipartimento di Ingegneria dei Materiali dell'Università di Modena e Reggio Emilia, durante le quali ci si è resi conto che la presenza del Componente A all'interno di un ingobbio ceramico garantisce valori elevati di riflettanza al prodotto finito. Il Componente B è stato scelto sulla base di alcuni studi di letteratura, anche se il campo di applicazione scelto e la natura inorganica dell'ingobbio ottenuto rappresentano una variante rispetto a detti studi.

Tabella 1. Proprietà delle materie prime utilizzate nella preparazione degli ingobbi

Argilla Bianca Plastica AS 963			
<i>Analisi chimica</i>		<i>Analisi mineralogica indicativa</i>	
Ossidi	Peso %	Minerali	Peso %
SiO ₂	52,20	Quarzo	4
Al ₂ O ₃	31,70	Caolinite	90
Fe ₂ O ₃	1,00	Illite/miche	2
TiO ₂	1,05	Strati misti	-
CaO	0,40	Feldspati	1
MgO	0,20	Anatasio	1
Na ₂ O	0,25		
K ₂ O	0,35		
P.F.	11,65		
C. org.	0,13		
S.tot.	0,01		

Superficie Specifica	63 m ² /g
Umidità	18%

Reologia su argilla sciolta, densità 1,3 kg/l, temp. 25°C	
Limite di scorrimento (τ_0)	8,61 Pa
Viscosità (η)	0,0320 Pa s

Cottura in forno a rulli da laboratorio su dischetti pressati a 350 kg/cm²	
Temperatura	1180°C
Spinta	45'
Ritiro	5,15%
Assorbimento acqua	5,90%

Indici colorimetrici su dischetto cotto	
L*	88,45
a*	1,98
b*	9,19
C*	9,4

Distribuzione granulometrica indicativa con laser su argilla sciolta in acqua distillata		Cottura a gradienti su dischetti pressati a 350 kg/ cm ² ciclo 45'		
		° C	Ritiro %	Ass. %
> 63 µm	0%	1150	4,36	6,59
> 45 µm	0%	1160	4,67	6,31
> 10 µm	35,96%	1170	4,98	6
> 1 µm	88,16%	1180	5,17	5,87
< 1 µm	11,84%	1190	5,39	5,63
D 50	6,07 µm	1200	5,59	5,37
D 90	24,26 µm	1210	5,84	5,18
		1220	6,12	4,86

Feldspato 1715			
Analisi chimica		Caratteristiche fisiche	
Ossidi	Peso %	Granulometria	
SiO ₂	68,90	> 600 µm	0,50%
Al ₂ O ₃	19,30	< 75 µm	12,50%
Fe ₂ O ₃	0,02	Umidità	< 9 %
TiO ₂	0,02		
CaO	1,10	Indici colorimetrici su dischetto cotto	
MgO	0,10	L	95,00
Na ₂ O	10,10	a	-0,14
K ₂ O	0,18	b	4,04

Allumina			
Analisi chimica		Caratteristiche fisiche	
Ossidi	%	Granulometria (Malvern)	
Al ₂ O ₃	99,40	D 50	80 µm
Na ₂ O	0,26	< 15 µm	3%
CaO	0,01	< 125 µm	80%
SiO ₂	0,01		
Fe ₂ O ₃	0,01	Area superficie scelta	8 m ² /g

Quarzo VR4			
<i>Analisi chimica</i>		<i>Caratteristiche fisiche</i>	
Ossidi	%	<i>Granulometria</i>	
SiO ₂	96,20	Trattenuto cum. su setaccio a 71 µm	1,50
Al ₂ O ₃	2,40		
Fe ₂ O ₃	0,12		
TiO ₂	0,05		
Na ₂ O	-	Umidità	10 %
K ₂ O	0,90		
CaO	0,06		
P.F.	0,25		

Caolino B			
<i>Analisi chimica</i>		<i>Caratteristiche fisiche</i>	
Ossidi	%	<i>Granulometria</i>	
SiO ₂	49,60	> 10 µm	5,0 %
Al ₂ O ₃	36,40		
Na ₂ O	0,05		
K ₂ O	0,60		
CaO	0,06		
MgO	0,10		
TiO ₂	0,05		
Fe ₂ O ₃	0,12		
P.F.	0,25		

Vetro borico da fusione pin 327			
<i>Analisi chimica</i>		<i>Caratteristiche fisiche</i>	
Ossidi	%	<i>Granulometria</i>	
SiO ₂	73,40	<160 µm	98%
Al ₂ O ₃	6,30	<120 µm	96%
K ₂ O	0,87	<100 µm	94%
Na ₂ O	6,62	<75 µm	87%
CaO	1,10	<63 µm	82%
B ₂ O ₃	10,40	<45 µm	71%
BaO	1,01	<20 µm	39%
		<10 µm	26%

Data la scarsa riflettanza delle piastrelle ceramiche usate come supporto (R=30%-40%), è stato necessario ricoprire le superfici trattate con un adeguato spessore di ingobbio. Lo strato coprente ha reso la superficie ruvida e opaca. L'opacizzazione è l'effetto che si è cercato agendo sulle materie prime disperse nella miscela. Le nozioni teoriche valide per i vetri, rivelano che i meccanismi dell'interazione radiazione-materia dipendono principalmente dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente e dalla dimensione (diametro) delle particelle costituenti l'ingobbio. Lo spettro delle lunghezze d'onda (λ) di interesse per la ricerca svolta è quello tipico della radiazione solare, 0.3-2.5 μm , mentre le dimensioni delle particelle (d_p) sono ricavabili dalle granulometrie riportate nelle schede tecniche precedentemente mostrate. Nei composti creati si ha prevalentemente $d_p > \lambda$, si può quindi ragionevolmente pensare che i meccanismi attivi siano:

- opacizzazione per riflessione ($d_p > \lambda$)
- opacizzazione per diffusione ($d_p \approx \lambda$); questa è dovuta soprattutto alla presenza dei componenti A e B, relativamente ai quali la frazione di particelle di dimensione attorno a 0.7 μm (estremo superiore della radiazione visibile) è rispettivamente del 21.7% e del 13.9% (valori interpolati dai dati delle granulometrie).

L'opacizzazione per diffusione è il meccanismo dominante perché la luce, interagendo con particelle aventi dimensioni simili alla sua lunghezza d'onda, viene diffusa in tutte le direzioni in maniera molto efficace. Ciascuna particella si comporta come se fosse una vera e propria sorgente luminosa.

Dall'analisi della legge di Rayleigh, valida per particelle puntiformi di diametro molto più piccole della lunghezza d'onda della radiazione incidente ($d_p \ll \lambda$), si evince che i parametri su cui risulta più facile intervenire sperimentalmente sono il diametro delle particelle (d) ed il numero di particelle per unità di volume (N):

$$\frac{I_s}{I_0} = \left(\frac{9\pi n^2 V^2}{2d^2 \lambda^4} \right) \left[\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right]^2 [1 + \cos^2 \theta] \quad (11)$$

Nella formula compaiono:

N = particelle per unità di volume

λ = lunghezza d'onda della radiazione

V = volume della particella

n = indice di rifrazione della particelle nel mezzo

d = distanza della particella dal punto di misura

θ = angolo di diffusione

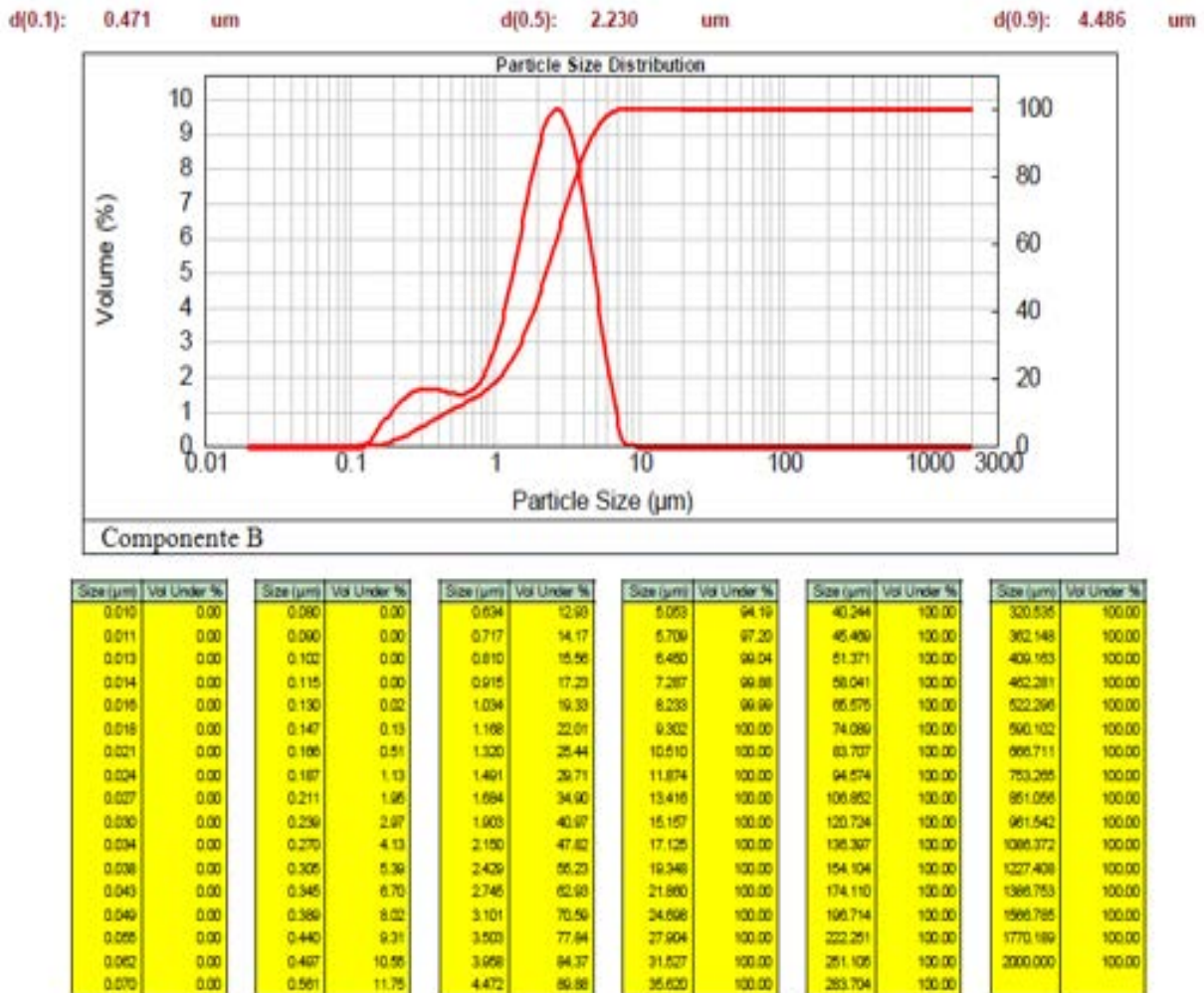


Figura 10. Risultati delle misure granulometriche sul Componente B

Applicando al Componente B e all'allumina le considerazioni riassunte nelle figure 11 e 12, riguardo gli effetti che diversi tipi di pigmenti e diverse granulometrie hanno sulla riflettanza solare, si può dedurre che per il primo componente, che è caratterizzato da $d(0.5)$ pari a $1.7\mu\text{m}$, il comportamento avrà un andamento intermedio tra quelli rappresentati dalle curve (d) ed (e). Per l'allumina è altresì interessante notare come essa riesca a respingere la porzione più penetrante della radiazione solare se utilizzata in particelle di piccole dimensioni ($d_p = 0.52\text{-}0.88\mu\text{m}$).

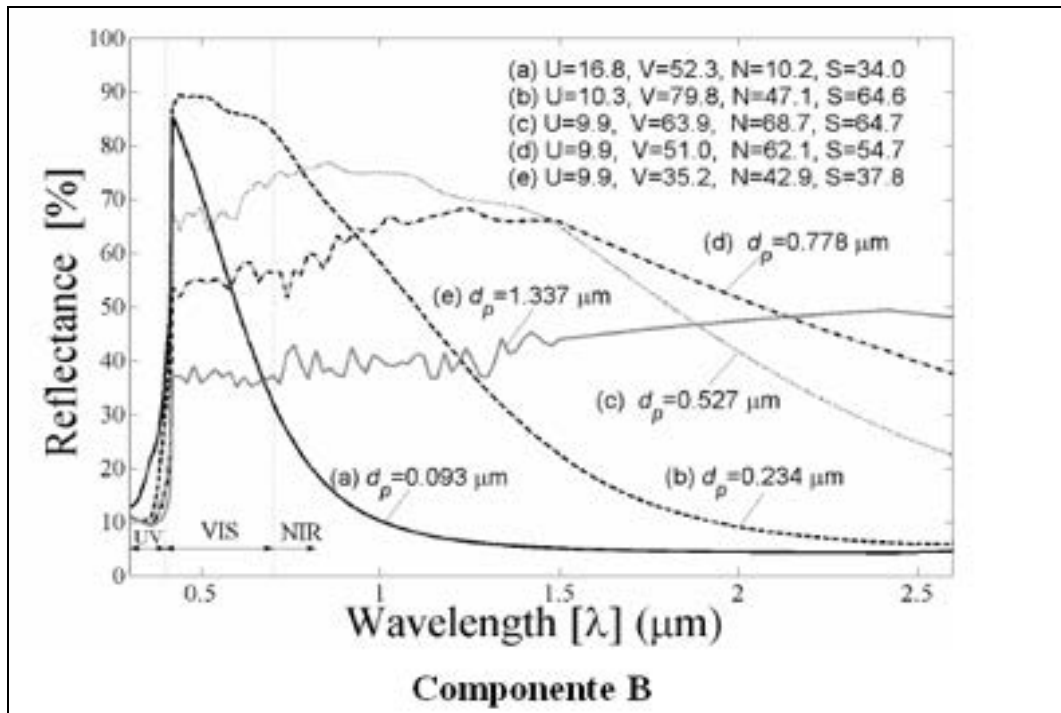


Figura 11.

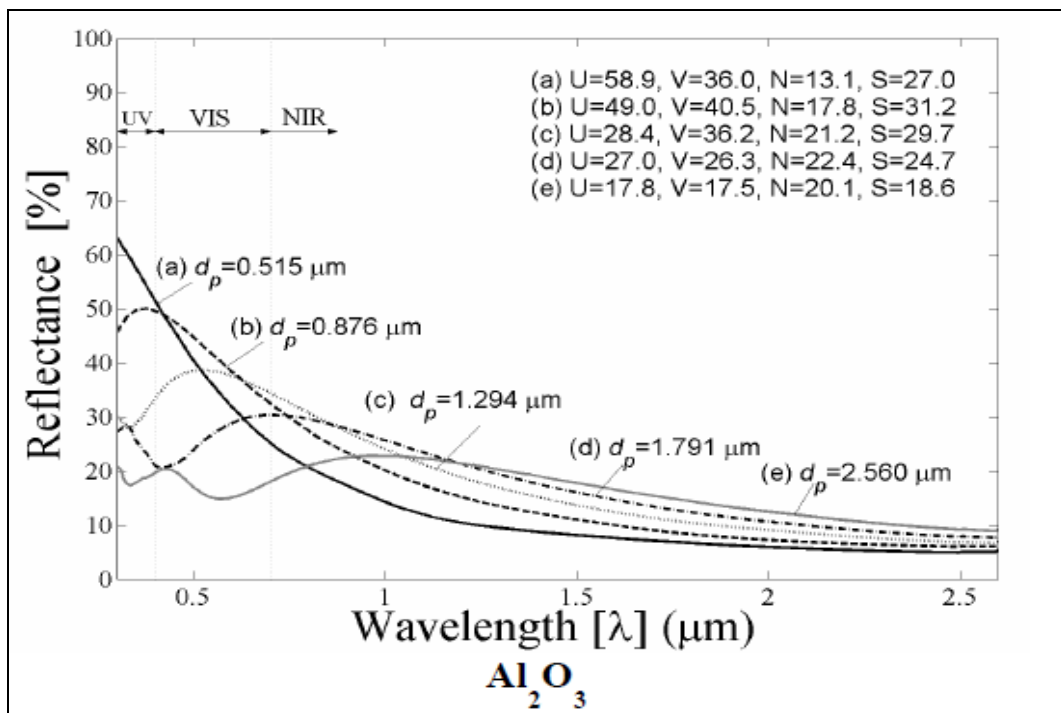


Figura 12.

Preparazione dei campioni

Per ottenere un ingobbio ad elevata riflettanza solare si sono preparate varie serie di campioni, differenziati tra loro per il contenuto percentuale dei vari componenti. Per il calcolo dei pesi percentuali dei componenti si è considerata la preparazione di 0.5 kg di ingobbio.

Per ogni serie di campioni, il procedimento attuato ha comportato il completamento delle seguenti operazioni:

- Pesatura delle materie prime
- Idratazione al 40%
- Macinazione in giara con sfere di allumina
- Misura e correzione della densità
- Applicazione al supporto chiaro e scuro tramite aerografo a pistola
- Misura del peso applicato per ogni passata
- Cottura

La risposta spettrale dei campioni preparati è stata successivamente misurata mediante uno spettrofotometro UV-Vis-NIR Jasco V-670 con sfera integratrice da 150 mm, in conformità con ASTM E903 Standard Test Method. In conformità a quanto precedentemente segnalato, la riflettanza solare R è stata calcolata integrando sull'intervallo da 300 a 2500 nm la riflettività spettrale misurata ρ_λ pesata per l'irradianza spettrale standard del sole alla superficie terrestre, $I_{sol,\lambda}$ [W/(m²×nm)]:

$$R = \frac{\int_{300}^{2500} \rho_\lambda(\lambda) \times I_{sol,\lambda}(\lambda) \times d\lambda}{\int_{300}^{2500} I_{sol,\lambda}(\lambda) \times d\lambda} \quad (12)$$

L'emissività termica e delle superfici è stata misurata mediante un emissometro termico AE/RD1 conforme al metodo di prova di cui allo Standard ASTM C1371. In particolare, lo strumento utilizzato misura l'emissività emisferica totale del campione sfruttando la seguente relazione:

$$\Delta V = k \times \frac{\sigma_0 \times (T_d^4 - T_s^4)}{\frac{1}{e} + \frac{1}{e_d} - 1} \quad (13)$$

Nella formula, il segnale in tensione ΔV [V] è proporzionale per una costante di calibrazione k al flusso termico radiativo scambiato dalla superficie misurata del campione con la superficie inferiore della testa di misura dell'emissometro. La costante di calibrazione k va a moltiplicare il flusso termico scambiato per irraggiamento termico nell'infrarosso tra le due superfici, che si assumono piane, parallele, virtualmente infinite ed affacciate una sull'altra, nonché grigie e diffuse.

L'emissometro è stato calibrato prima di ogni test mediante due campioni di riferimento con emissività termica nota, rispettivamente pari a 0.06 e 0.87. I campioni di riferimento sono stati forniti dal produttore dell'emissometro, che garantisce la linearità dello strumento e incertezza

± 0.01 nell'intervallo $0.03 \leq e \leq 0.93$. Tutti i valori di emissività termica relativi ai campioni ceramici realizzati si collocano all'interno dell'intervallo compreso tra 0.89 e 0.91, valori tipici per materiali non metallici a finitura lucida e in generale molto elevati. In considerazione di ciò, non sono state intraprese ulteriori azioni sul controllo dell'emissività termica ed i dettagli sui risultati delle specifiche misure sono stati omessi per brevità dalla presente trattazione.

La prima serie di campioni realizzati ha permesso di verificare quali fossero le procedure più adeguate alla creazione di ciascuna formulazione, perfezionando la miscela risultante, ed alla stesura dei composti sui supporti ceramici attraverso l'uso di un aerografo.

La seconda serie di campioni realizzati (Serie 2) si è caratterizzata per la presenza del Componente A, contenuto al 10% in peso. Si è scelto di preparare 5 diverse combinazioni, come riportato in tabella 2. I campioni A2 e B2 presentano gli stessi componenti di base, ma in percentuali differenti; lo stesso avviene per C2 e D2. I primi 2 campioni citati si compongono di sole materie prime, mentre nelle composizioni degli ingobbi C2 e D2 è stata inserita una fritta proveniente da un vetro di scarto dell'industria ceramica (vetro borico da fusione). Si è testato l'utilizzo di questa materia prima perché, in caso di buone prestazioni ottiche, permetterebbe di abbattere notevolmente i costi del prodotto finito rendendolo più competitivo sul mercato.

In generale l'aggiunta di fritta negli ingobbi può sortire i seguenti effetti:

- Possibile riduzione della riflettanza causata dall'incremento di trasparenza dell'ingobbio, che lascia trapelare maggiormente il colore del supporto.
- Aumento della fusibilità dell'ingobbio, che garantisce un ancoraggio più efficace dello stesso al supporto ceramico.
- Minor assorbimento acqueo dell'ingobbio. In caso di taglio del materiale (per ottenere diversi formati) si può diminuire l'assorbimento di umidità che avviene sulla sezione di materiale interessata dal taglio, ove lo strato di ingobbio va a diretto contatto con l'ambiente. Questo fenomeno in genere non è ostacolato dalla presenza di uno smalto impermeabile superficiale e può portare alla formazione di aloni ed a più gravi problemi in caso di gelo.



Figura 13. Campioni Serie 2 (A2, B2, C2, D2, N2)

Tabella 2.

Serie 2	A2 [wt%]	B2 [wt%]	C2 [wt%]	D2 [wt%]	N2 [wt%]
Feldspato Sodico	45	30	-	-	30
Fritta (vetro recupero)	-	-	30	45	-
Nefelina	-	-	-	-	15
Allumina	10	25	25	10	10
Quarzo	10	15	15	10	10
Caolino	10	10	10	10	10
Componente A	10	10	10	10	10
Argilla Bianca	15	10	10	15	15
Tripoli	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CMC	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Macinazione	45min	45min	45min	50min	45min
Densità [g/ml]	1,537	1,531	1,537	1,528	1,527
Peso applicato in 2 passate [g]:					
Supp. Chiaro	20+16	19+16	21+14	21+15	18+16
Supp. Scuro	35+29	35+32	44+24	38+23	38+25
Cottura					
Temp. Max	1195 °C				
Tempo a Tmax	6 minuti				
Tempo di ciclo	47 minuti				

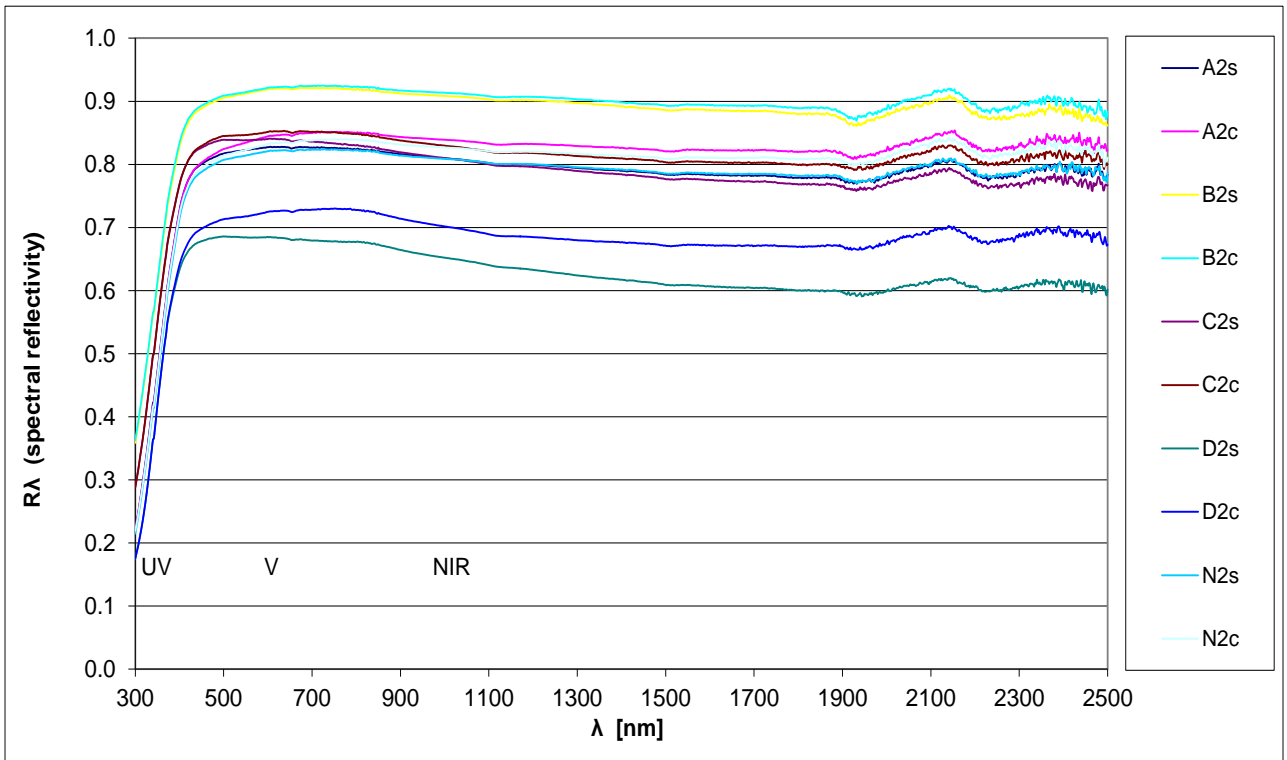


Figura 14. Riflettività spettrale campioni Serie 2

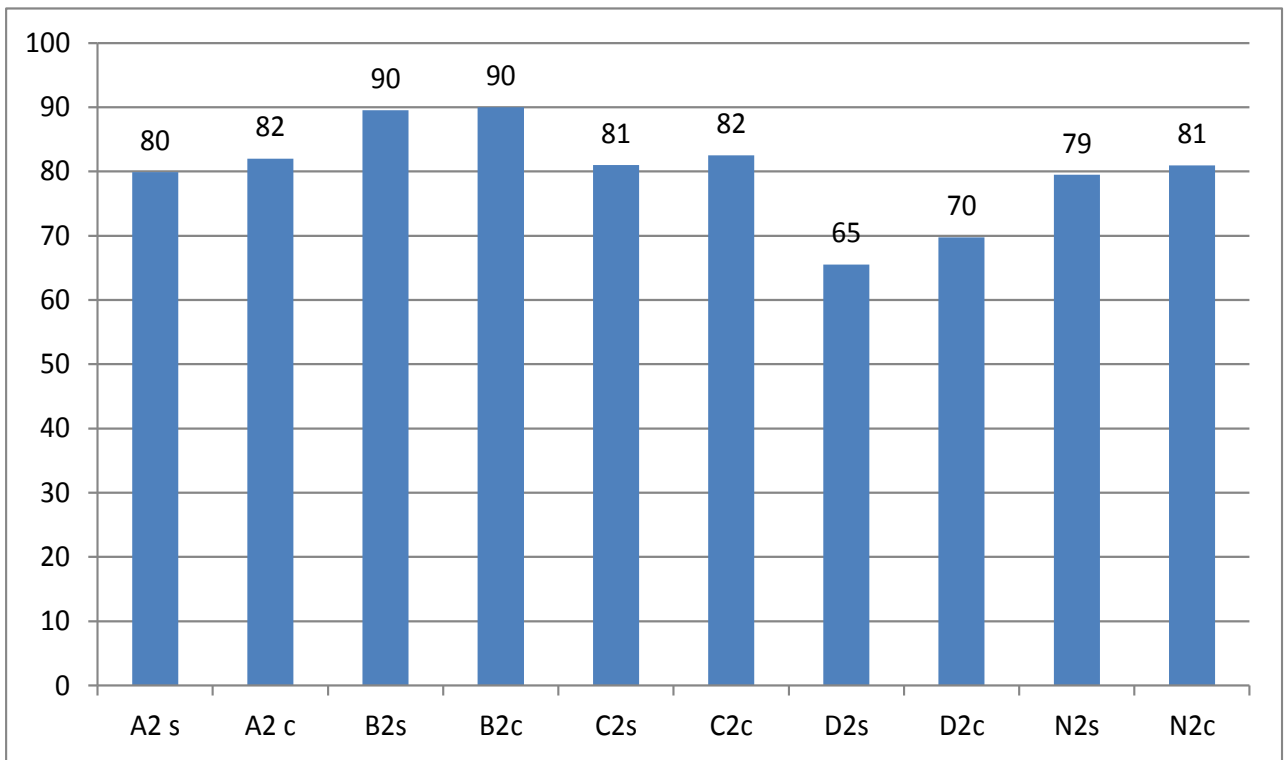


Figura 15. Riflettanza solare campioni Serie 3

L'osservazione che nefelina e feldspato generano eutettici con formazione di fasi vetrose, potenzialmente molto riflettenti, ha suggerito la formulazione dell'ingobbio N2. I componenti "Tripoli" e "CMC"(Carbossi Metil Cellulosa) sono stati aggiunti al composto per migliorarne la reologia.

I test di riflettanza solare, riassunti nelle figure 14 e 15, hanno mostrato che tutti i composti sono stati in grado di ricoprire adeguatamente il supporto tranne il composto D. Per questo si nota infatti una marcata variazione nel dato di riflettanza solare tra il campione a supporto chiaro e quello a supporto scuro, con una differenza di 5 punti percentuali. Il composto D è anche quello che assicura le minori performances in termini di riflettanza, offrendo la migliore prestazione su supporto chiaro con un 70%. Le migliori prestazioni sono state ottenute dal composto B, che arriva ad una riflettanza del 90%, quindi superiore comuni vernici organiche per cool roof. Il composto C, contenente la fritta di recupero, ha avuto prestazioni in linea coi composti A ed N, intorno al 80%.

Nella terza serie di campioni realizzati (Serie 3), al Componente A è stato sostituito il Componente B. L'operazione non è stata una semplice sostituzione, ma i pesi di tutte le materie prime sono stati ricalcolati sulla base del numero di moli. In questo modo si è garantito un confronto coerente tra prestazioni dei due componenti, generando nel sistema le medesime condizioni iniziali, ovvero lo stesso rapporto molare dei costituenti. Della Serie 3 sono state preparate 4 composizioni come riassunto in tabella 3.

Alcune composizioni, come A3 o B3, sono state realizzate e testate nonostante difficilmente potranno mai avere una reale applicazione. Infatti, essendo ingobbi refrattari (chiamati anche "secchi"), la loro scarsa fusibilità sul supporto in grès conferisce loro una spiccata tendenza all'assorbimento di umidità e li espone al rapido sfaldamento. Questi campioni sono stati comunque realizzati perché si riteneva che i loro componenti potessero portare ad elevate riflettanze solari.

I risultati dei test, riassunti nelle figure 16 e 17, hanno smentito le aspettative sui composti A3 e B3 che mostrano riflettanze solari massime del 72% e del 81% rispettivamente. In generale la terza serie di campioni si è caratterizzata per riflettanze solari circa il 10% inferiori rispetto alla Serie 2.

Si così è concluso che il Componente B offre prestazioni peggiori del componente A in termini di riflettanza solare.

Tabella 3.

Serie 3	A3 [wt%]	B3 [wt%]	C3 [wt%]	D3 [wt%]
Feldspato Sodico	45	32	-	-
Fritta (vetro recupero)	-	-	30	43
Allumina	9	25	23	10
Quarzo	11,5	16	14	10
Caolino	10	10	10	10
Componente B	4,4	4,8	4,3	4,1
Argilla Bianca	15	15	10	15
Tripoli	0,2	0,2	0,2	0,2
CMC	0,2	0,2	0,2	0,2
Macinazione	55min	45min	55min	55min
Densità [g/ml]	1,528	1,52	1,534	1,53
Peso applicato in 2 passate [g]:				
Supp. Chiaro	22+16	20+16	21+18	21+16
Supp. Scuro	42+23	36+30	45+23	36+28
Cottura				
Temp. Max	1195 °C			
Tempo a Tmax	6 minuti			
Tempo di ciclo	47 minuti			

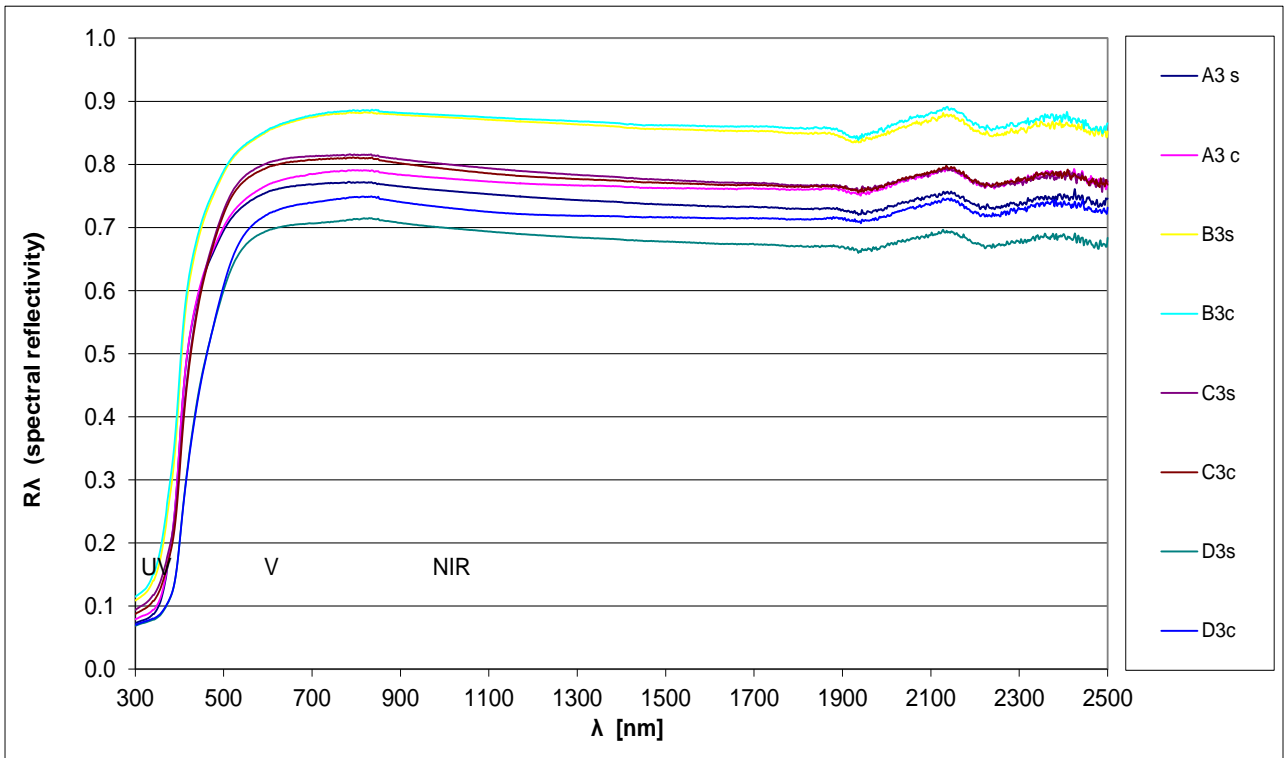


Figura 16. Riflettività spettrale campioni Serie 3

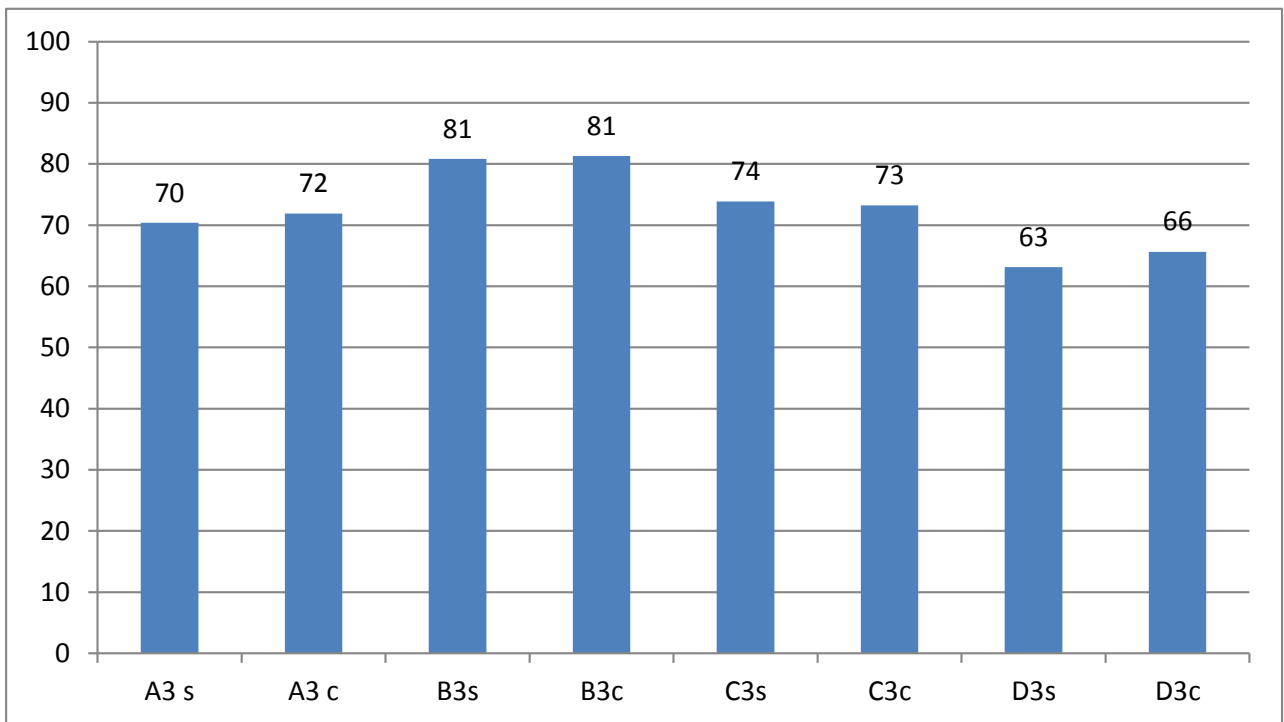


Figura 17. Riflettanza solare campioni Serie 3

Con la quarta serie di campioni realizzati (Serie 4) si è tentato di affinare alcuni composti utilizzando, invece della fritta di recupero precedentemente utilizzata, due fritte appositamente scelte e wollastonite (silicato di calcio). Partendo dalla composizione C3, si sono sostituite alla fritta di recupero: una fritta bianca, una fritta al calcio e wollastonite (tabella 4). Si sono inoltre realizzati due campioni del tipo B2 ricoperti con 3 e 4 strati di pigmento, rispettivamente, invece dei 2 precedentemente utilizzati, al fine di valutare l'influenza dello spessore del rivestimento sulla riflettanza solare.

Tabella 4.

Nome composizione	C3 b	C3 W	C3 Ca
Componente sostituito alla fritta	Fritta bianca da ingobbio	Wollastonite	Fritta al calcio da ingobbio
[wt %] su 500g di ingobbio	25% (125 g)	20% (100g)	20% (100g)
Densità [g/ml]	1,530	1,526	1,514
Cottura	Temp. Max		1195°C
	Tempo a Tmax		6 minuti
	Tempo di ciclo		47 minuti
Macinazione	50 min.	50 min.	50 min.
Peso applicato in 2passate [g]			
Supp. Chiaro	17+12	16+14	17+14
Supp. Scuro	30+25	31+24	22+25

Si prevedeva che la presenza di ioni alcalini, apportati in primis dal feldspato, avrebbero causato un aumento del coefficiente di dilatazione termica dell'ingobbio che poteva essere controbilanciato da una successiva applicazione di smalto. In effetti, dopo cottura si è riscontrato che alcuni campioni presentavano una curvatura molto marcata, particolarmente evidente nei provini contenenti wollastonite, tanto che essi non hanno potuto essere testati allo spettrofotometro.

Le figure 18 e 19 mostrano i risultati dei test eseguiti sulla quarta serie di campioni. Le misure mostrano che lo spessore del coating B2, nel passare da 2, a 3 e 4 strati, non sembra incidere sulla riflettanza solare del composto. Si nota inoltre che l'aggiunta della fritta al calcio porta il composto C3 (contenente il Componente B) ai livelli di riflettanza solare del componente C2 (contenente il Componente A). Infine, l'aggiunta al composto C3 della fritta bianca non migliora le sue prestazioni.

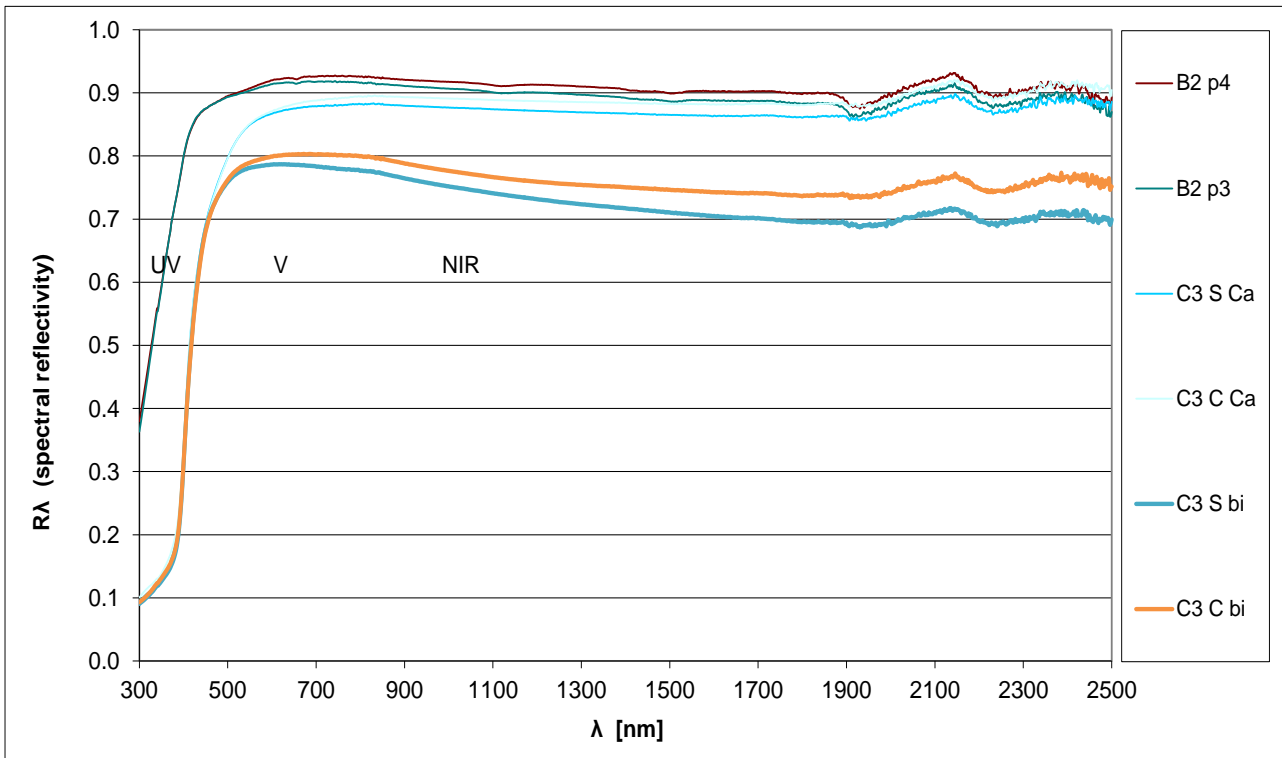


Figura 18. Riflettività spettrale campioni Serie 4

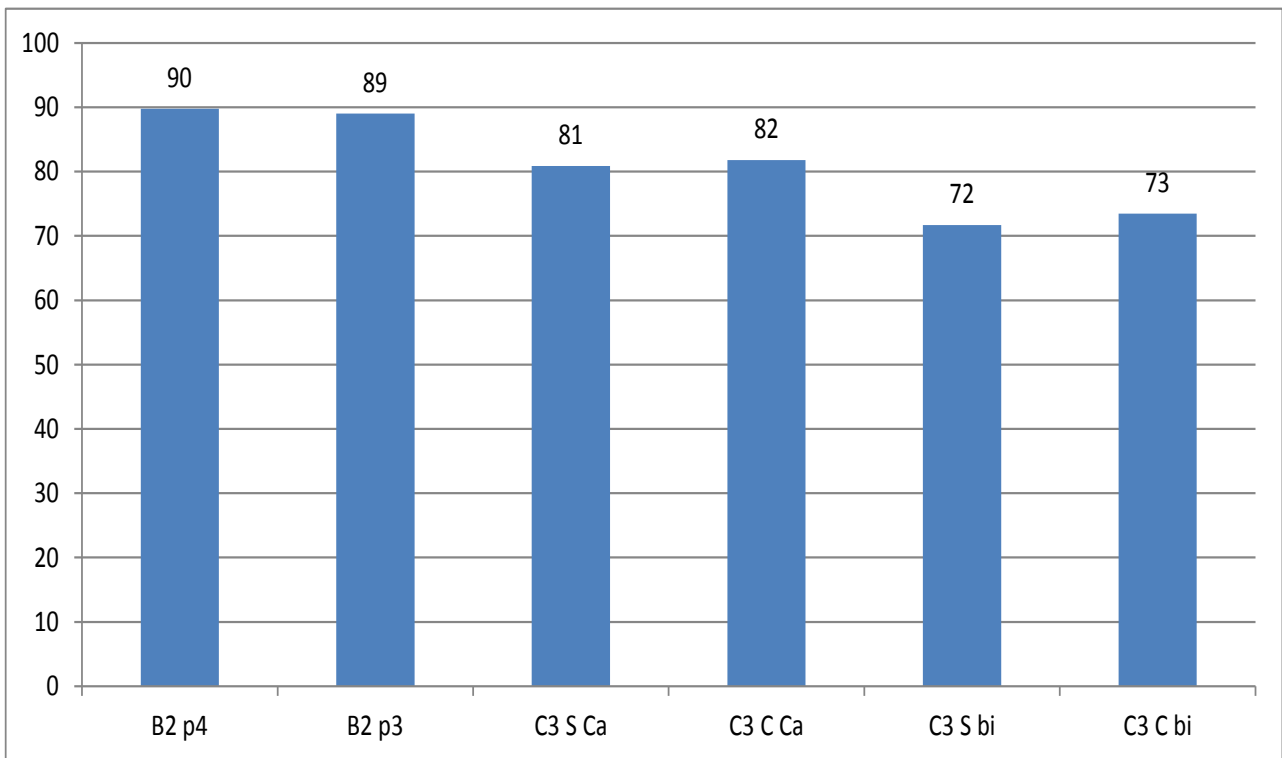


Figura 19. Riflettanza solare campioni Serie 4

In generale, i test svolti sulle prime quattro serie di campioni realizzati hanno portato ad individuare due ingobbi di maggiore interesse per la realizzazione di un cool roof ceramico: il B2, che offre ottime prestazioni in termini di riflettanza solare (R=90%), ed il C2, che offre prestazioni inferiori (R=81%), ma può vantare un costo industriale decisamente minore, essendo composto in parte da

vetro di recupero. Un ulteriore vantaggio del composto C2 è che, contenendo una fritta, esso risulta più impermeabile del composto B2, vale a dire meno soggetto ad assorbire umidità e quindi più adatto ad un utilizzo per coperture edili.

Gli ingobbi non possono essere usati da soli per la realizzazione di una piastrella ceramica per utilizzo esterno. Essi devono essere ricoperti da uno strato di finitura che conferisca al prodotto finito resistenza all'abrasione, all'umidità, allo sporco ed all'azione degli agenti atmosferici. Pertanto, partendo da supporti rivestiti con gli ingobbi B2 e C2, si sono verificati i risultati dell'applicazione di tre diversi strati di finitura, costituiti da tre differenti tipi di smalti ceramici:

- fritta cristallina
- fritta bianca lucida
- smalto matt standard commerciale



Figura 20. Campioni smaltati. In alto: B2, B2+Cristallina, B2+Bianca, B2+Matt
In basso: C2, C2+Cristallina, C2+Bianca, C2+Matt

Ogni campione è stato preparato deponendo con un aerografo due strati di ingobbio ed uno di smalto. Ancora una volta i campioni sono stati realizzati su supporto chiaro e su supporto scuro, per valutare la capacità coprente dei rivestimenti. Ogni deposizione sui supporti ceramici è stata pesata secondo quanto riportato in tabella 5.

I risultati dei test di riflettanza solare relativi ai campioni smaltati sono mostrati nelle figure 21 e 22.

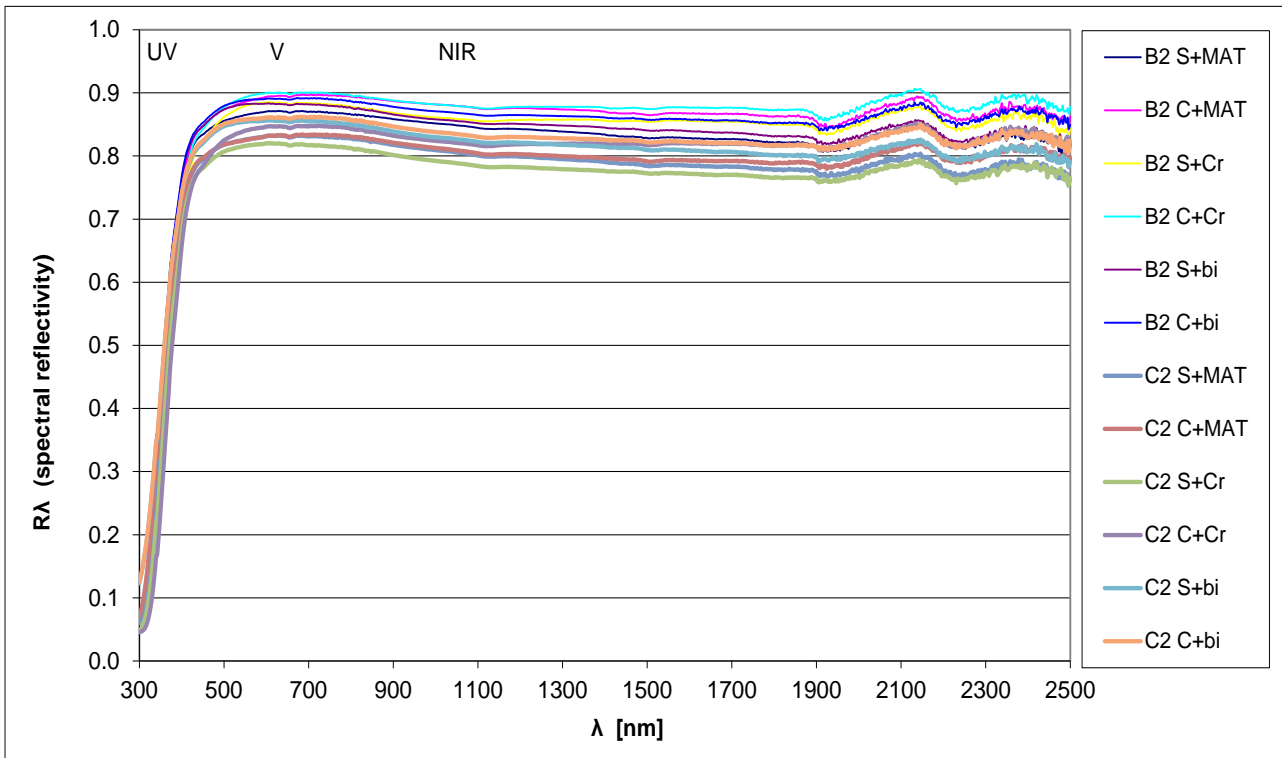


Figura 21. Riflettività spettrale campioni smaltati

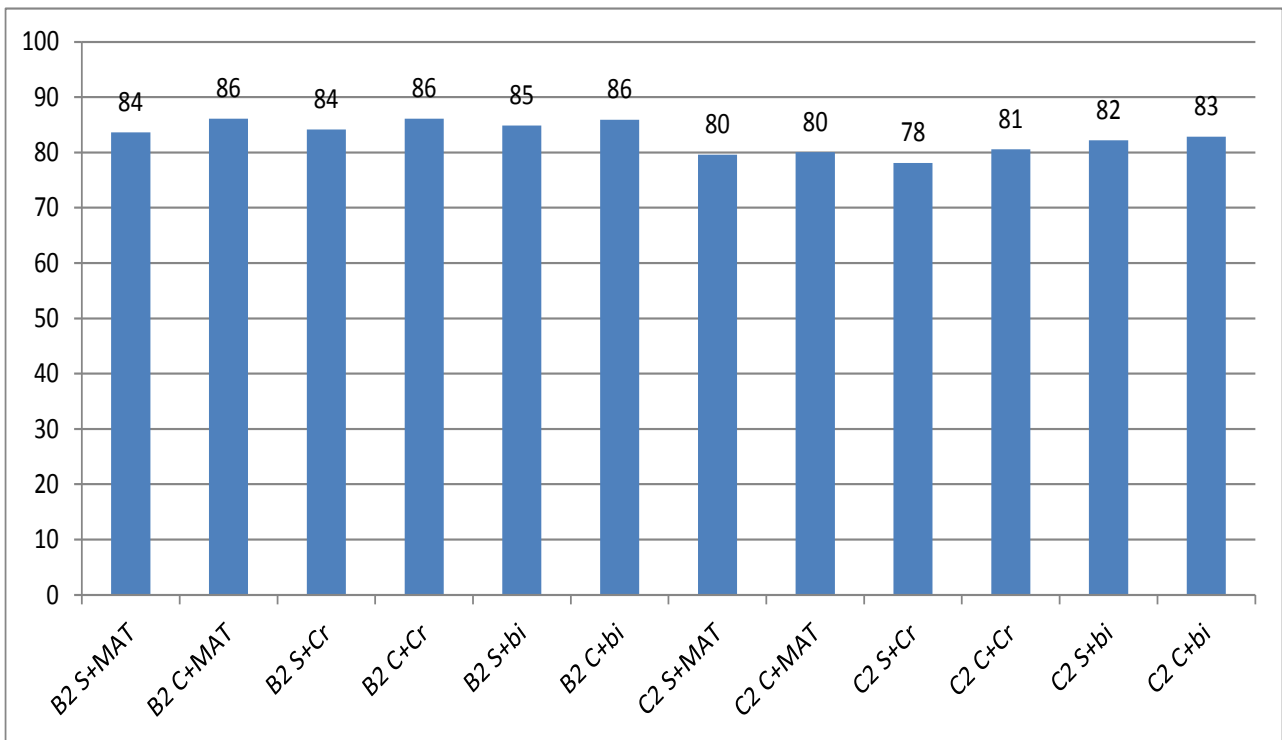


Figura 22. Riflettanza solari campioni smaltati

I campioni B2 risentono negativamente sia dell'applicazione delle fritte opache (bianca lucida e matt std), sia quella più trasparente (cristallina). Nonostante il calo di prestazioni, tuttavia, il miglior composto rimane il B2, che su supporto chiaro, in abbinamento a tutte e tre le fritte, permette di ottenere una riflettanza solare dell' 86%.

Tabella 5.

<u>Ingobbio</u>	<u>B2</u>			<u>C2</u>		
Densità [g/ml]	1.528			1.527		
<u>Smalto</u>	Cristallina	Bianco Lucido	Matt std	Cristallina	Bianco Lucido	Matt std
Densità [g/ml]	1.618	1.630	1.624	1.618	1.630	1.624
2 passate ingobbio 1 passata smalto su:						
Supp. Scuro [g]	35 + 27 +47	31 + 28 +40	38 + 32 +36	32 + 28 +37	34 + 27 +37	37 + 24 +40
Supp. Chiaro [g]	20 + 15,5 +21	17 + 15 +20	18 + 18 +21,5	17 + 16 +24	17 + 15 +18	18 + 14 +17

Anche i campioni realizzati su ingobbio C2 sono penalizzati dall'uso delle fritte, ma fanno eccezione quelli a cui è stata applicata la frittta bianca lucida, che vedono la loro riflettanza aumentare di qualche punto percentuale, in particolare fino all'83% su fondo chiaro. Il generale calo di riflettanza solare è spiegabile ricordando che i vetri sono assorbitori di radiazione su tutto lo spettro della radiazione ultravioletta. Confrontando i grafici di figura 14 con quelli di figura 21 è possibile notare come quelli relativi ai campioni smaltati mostrino riflettività spettrali minori nelle lunghezze d'onda tipiche della radiazione U.V. rispetto a quelli non smaltati. Di contro, i campioni realizzati con composto C2 ricoperto di frittta bianca lucida riescono ad aumentare la loro riflettanza solare perché la loro formulazione "povera", che già conteneva vetro, è stata arricchita dalla presenza dei pigmenti pregiati contenuti nella frittta bianca lucida.

Tabella 6.

Composizione Smalti (per 500g)	Cristallina	Componenti	wt[%]	Peso [g]
	Macinazione: 40'	FTM 0321	75	375
		CAO BO GLAZE	25	125
		STP	0.1	0.5
		CMC	0.2	1
	Bianco Lucido	Componenti	wt[%]	Peso [g]
	Macinazione: 40'	FBM 0556	75	375
		CAO BO GLAZE	25	125
		STP	0.1	0.5
		CMC	0.2	1
	Matt	Componenti	wt[%]	Peso [g]
Macinazione: 50'	è una miscela, vedi allegati			

ULTERIORI RISULTATI DELLA RICERCA

Analisi della resistenza allo sporcamento: verifiche angolo di contatto e rugosità

Un prodotto per cool roof non può essere valutato solamente sulla base delle prestazioni ottiche fornite a nuovo, ma deve essere valutato anche sulla base della capacità di mantenere tali prestazioni inalterate nel tempo. È, ad esempio, relativamente facile realizzare una vernice a base organica che offra una elevata riflettanza solare appena venga applicata sulla superficie di una copertura, ma molto meno facile è fare sì che le sue prestazioni rimangano costanti già dopo alcuni mesi di esposizione agli agenti atmosferici ed all'inquinamento.

Il problema dell'adesione dello sporco affligge particolarmente i materiali per cool roof, che sono generalmente utilizzati in coperture a bassa pendenza, non sempre in grado di garantire un facile scorrimento delle acque meteoriche. La scarsa velocità di deflusso, o addirittura il ristagno delle acque piovane, possono degradare molto velocemente le prestazioni ottiche di una copertura ad elevata riflettanza solare. In queste condizioni, un parametro fondamentale per la capacità di un cool roof di mantenersi pulito e conservare buone prestazioni ottiche, è che la sua superficie sia idrofobica, ovvero che una goccia d'acqua deposta sulla sua superficie formi un angolo di contatto superiore ai 90° . In ambito cool roof si auspicano prestazioni anche più estreme, ovvero superfici superidrofobiche, cioè angoli di contatto superiori ai 150° .

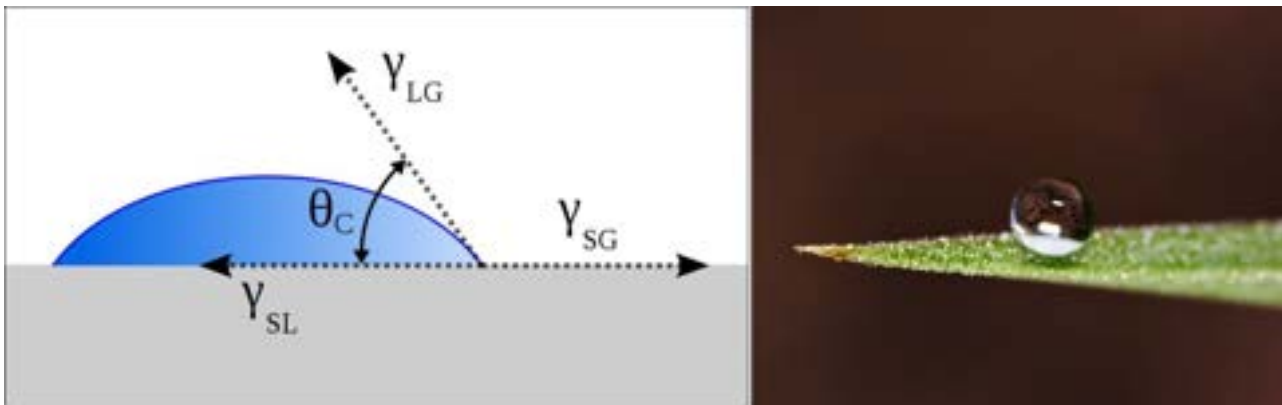


Figura 23. Angolo di contatto e superidrofobicità

Si riportano in tabella 7 i valori di angoli di contatto misurati su gocce deposte sui 6 campioni smaltati preparati sulla base degli ingobbi B2 e C2. Tutti i campioni testati, con variazioni massime minore di 10° , presentano angoli di contatto piuttosto bassi, compresi tra circa 31° e 39° , quindi relativamente lontani da condizioni di idrofobicità. Peraltro, sono in ciò accomunati a molti dei materiali per cool roof commercialmente disponibili, specialmente se non di fresca applicazione. Il problema va quindi risolto adottando condizioni di posa che inibiscano il ristagno di acqua piovana (pendenze superiori all'1-2%, assenza di avvallamenti, ecc.).

Tabella 7.

B2 + Fritta bianca Lucida	Misure					Media
Angolo di contatto destro	33.4	31.5	35.8	29	33.2	
Angolo di contatto sinistro	37.8	33.2	34.7	32.6	40.4	
Angolo di contatto medio	35.6	32.4	35.3	30.8	36.8	34.2

C2 + Fritta bianca Lucida	Misure					Media
Angolo di contatto destro	38.6	33.4	32.6	32.5	29.6	
Angolo di contatto sinistro	30.8	30.5	32.4	31.7	31.6	
Angolo di contatto medio	34.7	32	32.5	32.1	30.6	32.4

B2 + Fritta cristallina	Misure					Media
Angolo di contatto destro	38.9	35.3	40.4	43.4	34.2	
Angolo di contatto sinistro	44.4	40.7	39.1	39.1	40.8	
Angolo di contatto medio	41.6	38	39.7	41.2	37.5	39.6

C2 + Fritta cristallina	Misure					Media
Angolo di contatto destro	38.7	31.1	37.6	32.4	27.4	
Angolo di contatto sinistro	34	31.1	29.8	32.1	25.2	
Angolo di contatto medio	36.4	31.1	33.7	32.2	26.3	31.9

B2 + Smalto matt std	Misure					Media
Angolo di contatto destro	36.9	33.4	31.3	33.3	33.4	
Angolo di contatto sinistro	27.2	29.1	28.7	26.9	30.5	
Angolo di contatto medio	32.1	31.2	30	30.1	31.9	31.1

C2 + Smalto matt std	Misure					Media
Angolo di contatto destro	38.6	38.2	39.6	42	40.4	
Angolo di contatto sinistro	38.9	32.8	38	36	42.9	
Angolo di contatto medio	38.8	35.5	38.8	39	41.7	38.8

Una ulteriore proprietà delle superfici che influenza notevolmente la capacità delle superfici di resistere allo sporco è la rugosità superficiale. In generale, per i prodotti ceramici, vale la regola che meno una superficie è rugosa, meno essa trattiene su di se lo sporco.

Le misure di rugosità eseguite sulle sei differenti tipologie di prodotti smaltati hanno fornito i risultati riassunti in tabella 8. Come prevedibile, lo smalto matt standard presenta la rugosità media maggiore e, quindi, tra i tre scelti è quello contraddistinto, potenzialmente, dai maggiori problemi di sporcabilità.

Tabella 8.

Salto utilizzato	Rugosità media [μm]
Smalto matt std	0.80
Fritta cristallina	0.40
Fritta bianca lucida	0.42

Cool Colors ceramici

Un cool color si può ottenere trattando una superficie con composti dotati di una risposta spettrale selettiva, in grado cioè di offrire nel range della luce visibile uno spettro di riflessione simile a quello di un colore predeterminato, diverso dal bianco, ma affiancato da una riflettività spettrale elevata nella zona dell'infrarosso solare.

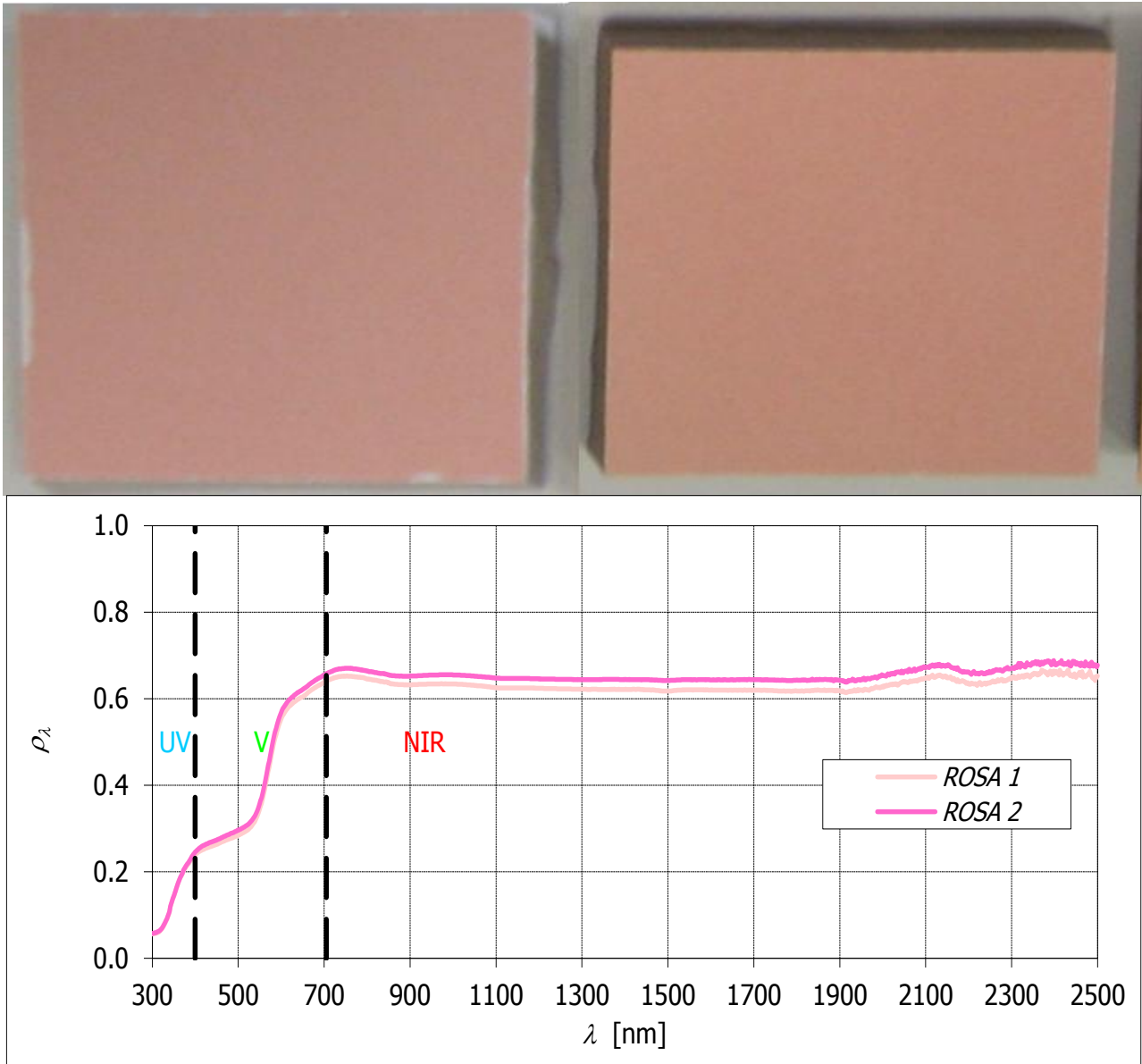


Figura 24. Fotografie e riflettività spettrali di cool color ceramici. Rosa 1 R=49%; rosa 2 R=51%

Seguendo la prima via, sulla base degli ingobbi per cool roof sviluppati in precedenza, si sono realizzati due tentativi di colorazione in massa dell'ingobbio. Si sono presi come riferimento due colorazioni non cool, una arancione ed una rosa, rappresentative dei manufatti commerciali, e si sono realizzati degli ingobbi pigmentati fino a trovare una buona corrispondenza cromatica con i campioni di riferimento. Le foto dei campioni e le riflettività spettrali ottenute sono mostrati nelle figure 24 e 25.

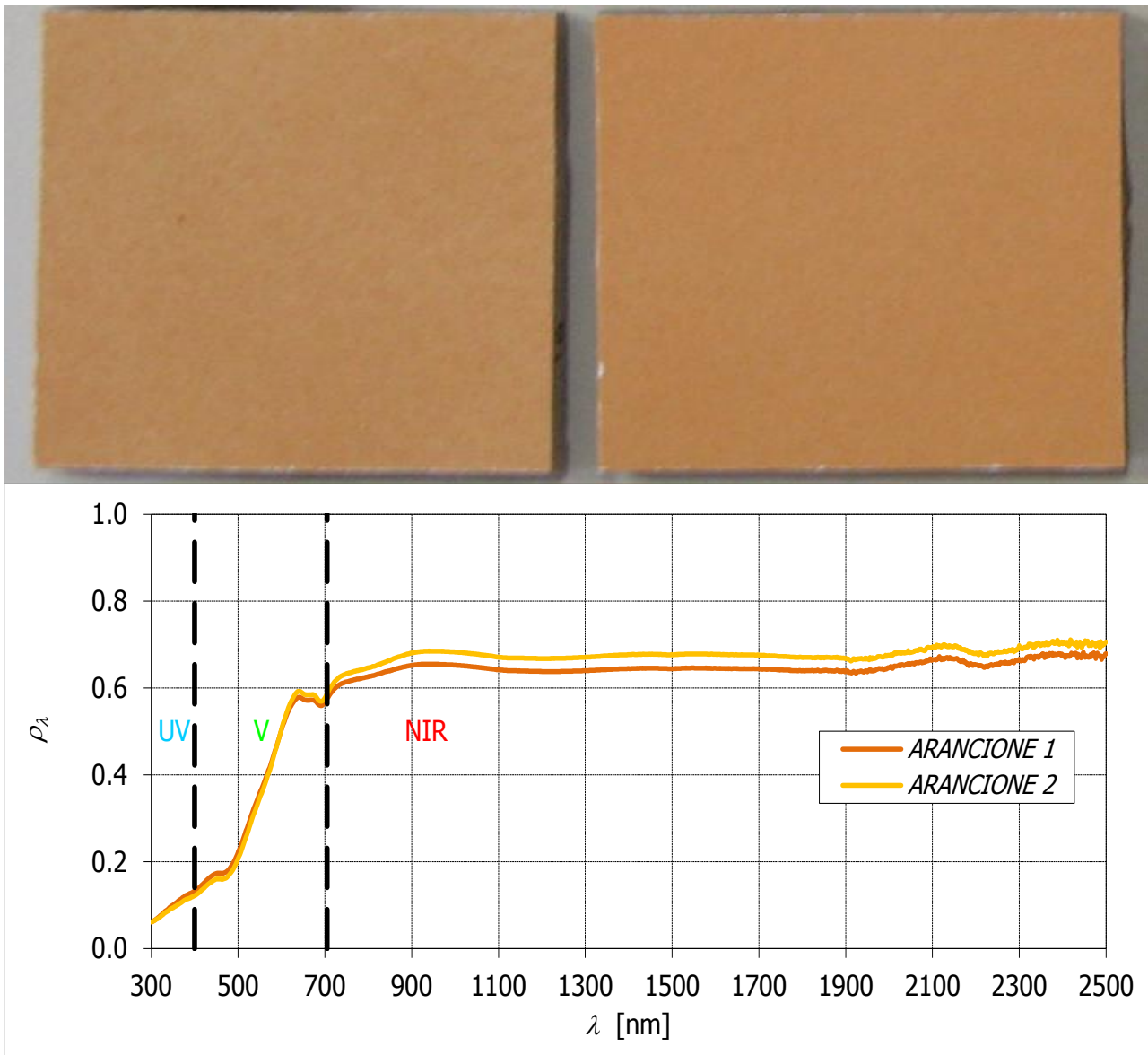


Figura 25. Fotografie e riflettività spettrali di cool color ceramici. Arancione 1 R=51%; Arancione 2 R=54%

Come mostrato nelle figure (in maniera più apprezzabile nei grafici delle riflettività spettrali che non nelle fotografie), le due coppie di campioni ceramici hanno delle risposte molto simili nel range della radiazione visibile, ma si differenziano, seppur leggermente, nelle lunghezze d'onda caratteristiche della radiazione infrarossa. In particolare, i campioni indicati col numero 2 (quelli realizzati con l'obiettivo di ottenere dei cool color) presentano una riflettività spettrale più elevata nell'infrarosso e, quindi, una superiore riflettanza solare (51% contro 49% per i due provini rosa 54% contro 51% per i due campioni arancioni). La maggiore riflettanza solare dei campioni di tipo cool color è quantificabile dal 2 al 3%.

Seguendo la seconda via possibile per la preparazione di un cool color ceramico, si è scelto di applicare uno strato di smalto trasparente sull'ingobbio di tipo cool roof ritenuto più adatto ad essere smaltato. La scelta è ricaduta sull'ingobbio C2, la cui composizione completa è riportata in tabella 9, e le prove sono state eseguite sul solo supporto scuro. Come ricoprimento trasparente è stata scelta la cristallina precedentemente utilizzata per la realizzazione dei coating

impermeabilizzanti. La cristallina è stata pigmentata utilizzando due composti, un giallo (al Zr, Si, Pr) ed un marrone (al Fe, Cr, Zn). Per ogni colore sono stati realizzati due provini caratterizzati da diverse concentrazioni di pigmento: 0,5% e 2% in peso. In tabella 10 è riportata la composizione della cristallina.

Tabella 9.

C2	ingobbio [g]	Componenti	[wt%]	[g]
Macinazione: 40'	500	Fritta Borica	30	150
		Allumina	25	125
Densità: 1,550 g/ml		Quarzo	15	75
		Caolino	10	50
		Componente A	10	50
Peso applicato: 82 g		Argilla Bianca Plastica	10	50
		Tripoli	0,1	0,5
		CMC	0,2	1

Tabella 10. Composizione della cristallina

Cristallina	Componenti	wt[%]		Peso [g]	
Macinazione: 10'	FTM 0321	75		375	
	CAO BO GLAZE	25		125	
	STP	0,1		0,5	
	CMC	0,2		1	
	Pigmento	0,5	2	2,5	10

Le figure 26 e 27 mostrano le riflettività spettrali del composto C2, del composto C2 abbinato alla cristallina e del composto C2 abbinato alla cristallina pigmentata allo 0.5% ed al 2%. La riflettanza solare del solo composto C2 su supporto scuro è del 80%. La riflettanza solare del composto C2 abbinato alla fritta cristallina è del 78%. I due campioni pigmentati di giallo hanno riflettanze del 74% e de 69% rispettivamente. I due campioni pigmentati di marrone hanno riflettanze del 64% e de 49% rispettivamente.

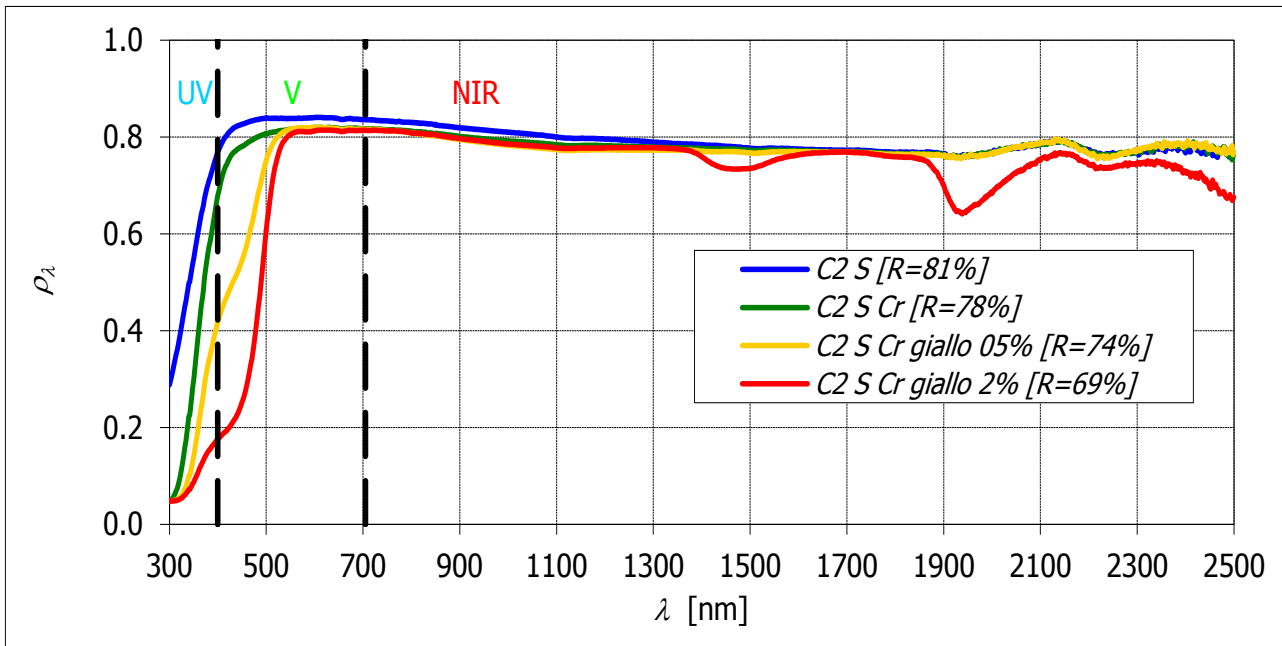


Figura 26. Riflettività spettrali e riflettanze solari dei cool colors gialli

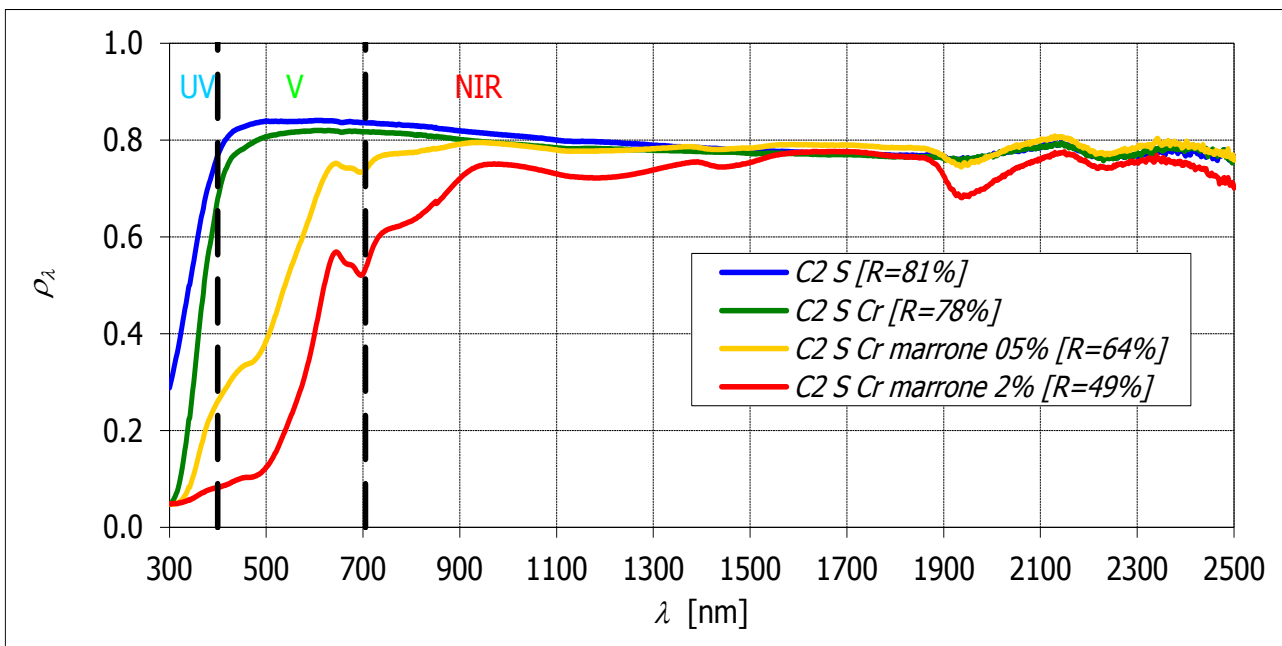


Figura 27. Riflettività spettrali e riflettanze solari dei cool colors marroni

La figura 29 mostra il confronto delle riflettività spettrali del campione cool color marrone con 2% di pigmento e di una piastrella cool color, realizzata con la prima metodologia esposta, con una resa cromatica molto simile (in realtà leggermente più riflettente nel visibile). Nell'infrarosso solare la piastrella cool color di secondo tipo si comporta come voluto, mantenendo una riflettività spettrale maggiore della piastrella cool color di primo tipo. In termini percentuali la riflettanza percentuale dei due campioni differisce per soli due punti percentuali, tuttavia il confronto non è del tutto attendibile in quanto alterato dal fatto che nel range della radiazione visibile, dove l'energia solare ha il suo picco, la riflettività del campione del cool color di primo tipo è superiore a quella del secondo tipo.

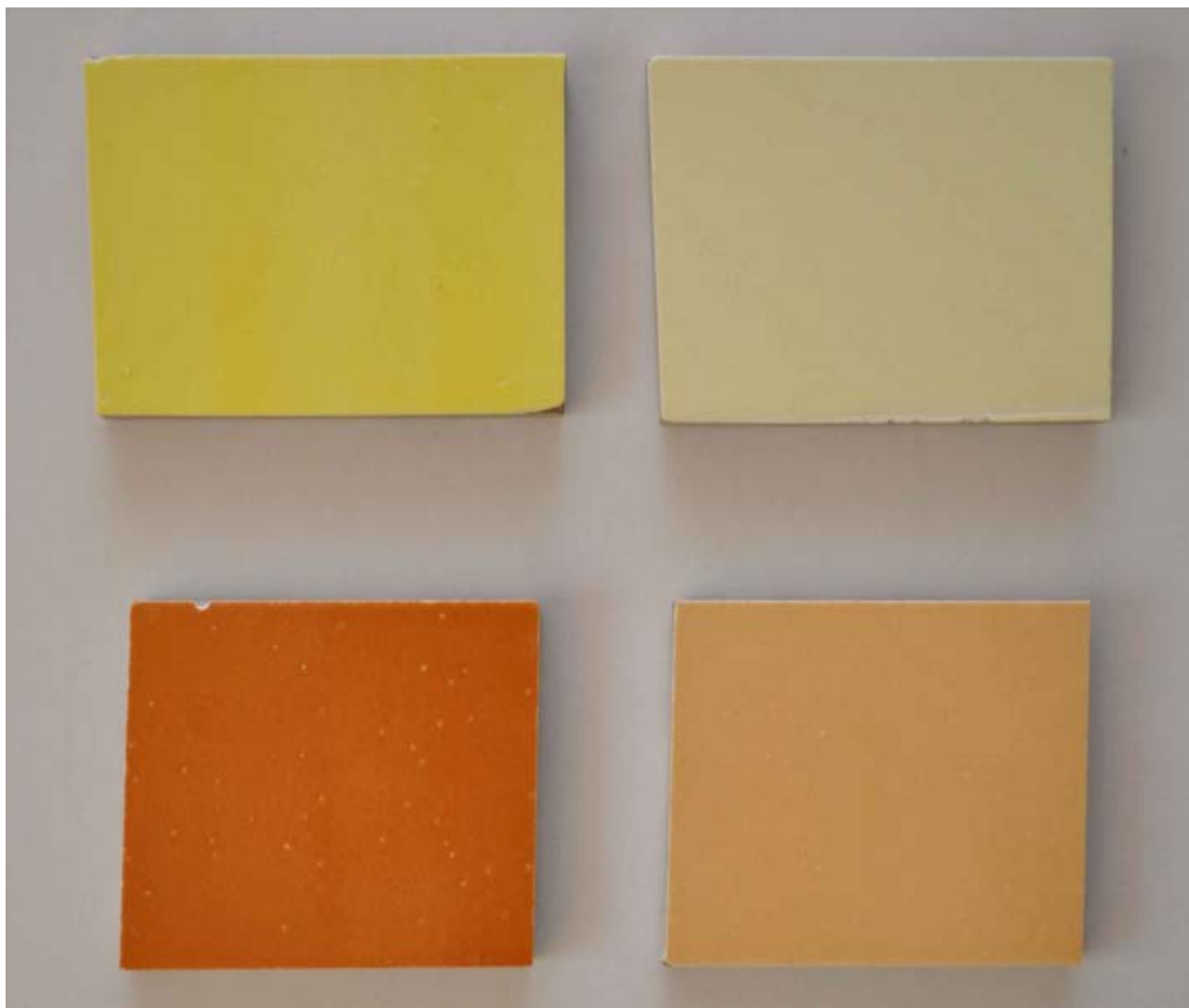


Figura 28. Campioni cool color

I risultati finora ottenuti sono in assoluto soddisfacenti, in quanto si è verificata la realizzabilità di rivestimenti colorati con riflettanza solare dell'ordine del 50% ed oltre, quindi ai vertici delle tipologie di prodotto di riferimento. In relazione ai risultati ottenuti sugli ingobbi sembrano tuttavia esistere significativi margini di miglioramento sulla riflettanza solare, dell'ordine anche di una decina di punti percentuali, conseguibili lavorando tanto sull'ingobbio di partenza quanto sulle proprietà selettive dei pigmenti e dei rivestimenti trasparenti pigmentati.

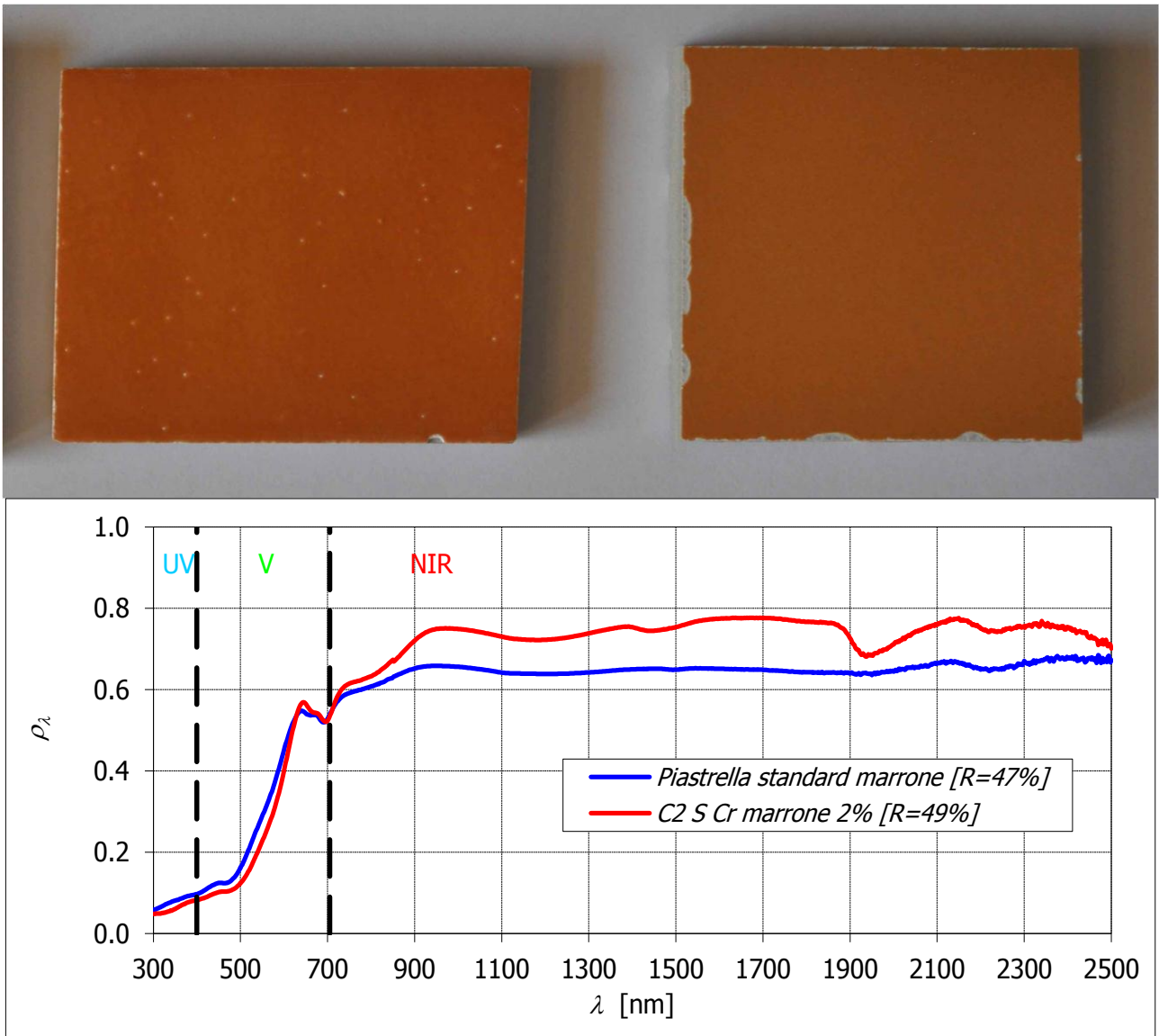


Figura 29. Confronto cool color marrone – piastrella standard (a destra nella foto).

Considerazioni conclusive

Gli apporti solari attraverso gli elementi opachi dell'involucro edilizio presentano un impatto progressivamente crescente sulle prestazioni energetiche degli edifici a causa della sempre maggiore diffusione degli impianti di condizionamento dell'aria. Il surriscaldamento estivo degli edifici e ciò che ne consegue in termini di fabbisogni energetici possono essere tuttavia evitati utilizzando i cosiddetti cool roof, cioè materiali e soluzioni di finitura superficiale contraddistinti da valori elevati e certificati della riflettanza solare e dell'emissività termica. Le vernici e le guaine a base organica sono i prodotti attualmente più diffusi e meno costosi per la creazione di cool roofs. Alcune di esse offrono una elevata riflettanza solare a nuovo (fino al 88%), ma tutte possono andare incontro ad un rapido degrado dovuto all'azione degli agenti atmosferici, all'inquinamento e all'invecchiamento dei materiali. La perdita di prestazione in termini di riflettanza solare può essere drastica, tanto da comportare la necessità di lavaggi su base annuale o di un trattamento di ripristino già dopo due/tre anni dall'installazione per poter mantenere prestazioni tali da poter ancora considerare la copertura un cool roof.

Il costo del trattamento di tipo cool roof eseguito con vernici a base organica o guaine è basso, se paragonato all'utilizzo di materiali alternativi e più resistenti al degrado, ma considerando nella spesa complessiva anche gli investimenti necessari per i ripristini periodici ed i maggiori esborsi per la climatizzazione, derivanti dalle perdite di prestazione in termini di riflettanza solare, l'utilizzo di materiali a più alto costo iniziale, ma più durevoli, diventa competitivo. Su queste basi, lo studio qui documentato ha avuto come obiettivo la creazione di prodotti per coperture antisolari basati su materiali ceramici, in grado di fornire prestazioni uguali o superiori a quelle offerte dai materiali organici in termini di riflettanza solare e molto superiori in termini di durabilità della performance dopo invecchiamento. La loro natura inorganica e la possibilità di controllare le proprietà meccaniche superficiali permette infatti ai materiali ceramici prestazioni di durata e resistenza agli agenti atmosferici molto maggiori rispetto ai materiali organici. Essi permettono inoltre l'utilizzo di pigmenti sbiancanti non utilizzabili in accoppiamento a materiali di altra natura chimica.

Nella prima parte dello studio, dopo analisi preventiva delle caratteristiche e delle prestazioni attese da parte di varie materie prime, si sono realizzati numerosi ingobbi ceramici bianchi e per alcuni di essi si sono ottenuti un elevato potere coprente del supporto ed un'elevata riflettanza solare (si veda in particolare l'ingobbio identificato con la sigla B2, caratterizzato da $R=90\%$). Parallelamente, si sono realizzati ingobbi contenenti materiale di recupero a basso costo, comunque contraddistinti da riflettanza elevata (si veda in particolare l'ingobbio identificato con la sigla C2, caratterizzato da $R=82\%$). I due ingobbi dalle migliori prestazioni sono stati successivamente ricoperti con smalti ceramici (una fritta cristallina, una fritta bianca lucida ed uno smalto bianco matt standard), al fine di conferire loro la massima resistenza agli agenti atmosferici. L'esito finale del lavoro ha portato a realizzare due tipologie di piastrelle ceramiche cool roof perfettamente finite, con riflettanza solare di 86% e 83% rispettivamente. In termini di riflettanza solare le prestazioni di questi due prodotti superano quelle della maggior parte delle vernici a base organica attualmente in commercio. In termini di resistenza all'invecchiamento i prodotti ceramici offrono proprietà di molto superiore alle vernici a base organica.

Successivamente si sono valutate le proprietà di resistenza allo sporco delle superfici smaltate. Ciò è stato fatto valutando la rugosità delle superfici e l'angolo di contatto caratteristico di

una goccia d'acqua deposta sulle superfici stesse. Minore è la rugosità di una superficie ceramica e maggiore è la sua tendenza a rimanere pulita, mentre maggiore è l'angolo di contatto di una goccia d'acqua sulla superficie, maggiore è la possibilità che la superficie stessa sia in grado di resistere all'adesione dello sporco. Ciò si verifica in virtù di proprietà autopulenti derivanti dalla formazione di gocce coese sulla superficie e dalla facilità di rotolamento delle stesse anche a fronte di minime pendenze. I test di rugosità hanno dimostrato che, come prevedibile, la superficie matt è più rugosa e quindi meno indicata per applicazioni di tipo cool roof. Le misure degli angoli di contatto hanno mostrato valori piuttosto bassi per tutte le superfici analizzate, ma comunque non dissimili da quelli caratteristici dei materiali organici per cool roof, specialmente se non di fresca applicazione.

In una seconda fase della ricerca si è concentrata l'attenzione sui materiali cool color, ancora una volta con l'obiettivo di sviluppare soluzioni a base ceramica. Se infatti l'applicazione di uno strato di copertura bianco può essere accettabile su capannoni industriali e, più in generale, su edifici a copertura piana fuori vista, per edifici residenziali e a copertura inclinata ciò non è in genere consentito dai regolamenti edilizi delle municipalità italiane, i quali impongono l'utilizzo di coperture cromaticamente compatibili con la tradizione del costruito. In questi casi, volendo conferire alle superfici di copertura un carattere antisolare, si deve ricorrere a materiali in grado di fornire una elevata riflettanza principalmente nella parte dello spettro solare contenente la radiazione del vicino infrarosso. Lo studio qui documentato ha visto la sperimentazione, a partire dagli ingobbi riflettenti precedentemente sviluppati, di due tipologie di cool colors, la prima ottenuta pigmentando in massa gli ingobbi bianchi, la seconda pigmentando in maniera selettiva lo smalto protettivo applicato sopra gli ingobbi stessi. Si è così verificata la realizzabilità di rivestimenti ceramici colorati con riflettanza solare dell'ordine del 50% ed oltre, quindi ai vertici delle tipologie di prodotto di riferimento; entrambe le metodologie realizzative sopra illustrate e la seconda in particolare hanno portato a risultati positivi in termini di incrementi della riflettanza solare.

Gli sviluppi futuri del lavoro svolto prevedono, sul lato cool roof, la sperimentazione di ulteriori pigmenti da inserire nella matrice dell'ingobbio, in aggiunta e/o in parziale sostituzione ai pigmenti già utilizzati, nonché la valutazione approfondita dell'effetto della granulometria delle materie prime sulla riflettanza solare. Sul fronte dei cool colors, si prevede di approfondire lo studio sui pigmenti selettivi da inserire negli smalti ceramici di ricoprimento dell'ingobbio, onde ridurre il più possibile l'assorbimento di energia da parte dei pigmenti stesso nel range di lunghezze d'onda caratteristiche della radiazione infrarossa vicina. Resta inoltre da esplorare la possibilità di ottenere finiture superficiali superidrofobiche ed autopulenti attraverso la modificazione diretta della superficie ceramica od attraverso l'applicazione di ulteriori strati di ricoprimento.

ALTRE INFORMAZIONI

Publicazioni

Parte dei risultati descritti in questo elaborato sono stati presentati alla 12th Conference of the European Ceramic Society (ECerS XII – Stockholm, Sweden – Giugno 2011) e inclusi negli Atti della Conferenza.

Un lavoro correlato è stato sottoposto per pubblicazione su rivista internazionale e il processo di revisione è attualmente in corso.

Riferimenti bibliografici

- [1] H. Taha, H. Akbari, A. Rosenfeld, J. Huang . Residential cooling loads and the urban heat island—the effects of albedo. *Building and Environment* 1998;23:271-283.
- [2] A. Rosenfeld, H. Akbari, S. Bretz, B.L. Fishman, D.M. Kurn, D. Sailor, H. Taha. Mitigation of urban heat islands: materials, utility, programs, updates. *Energy & Buildings* 1995;22:255-65.
- [3] A.H. Rosenfeld, H. Akbari, S. Bretz, B.L. Fishman, D.M. Kurn, D. Sailor and H. Taha, Mitigation of urban heat islands: materials, utility, programs, updates, *Energy and Buildings*, vol. 22, pp. 255-265, 1995.
- [4] H. Akbari, S. Bretz, D. Kurn and J. Hanford, Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs, *Energy and Buildings*, vol. 25, pp. 117-126, 1997.
- [5] J.R. Simpson and E.G. McPherson, The effect of roof albedo modification on cooling loads of scale residences in Tucson, Arizona, *Energy and Buildings*, vol. 25, pp. 127-137, 1997.
- [6] D. Parker, J. Sonne and J. Sherwin, Demonstration of cooling savings of light colored roof surfacing in Florida commercial buildings: retail strip mall, Florida Solar Energy Center Report FSEC-CR-964-97, Cape Canaveral, FL, 1997.
- [7] S. Konopacki, H. Akbari, M. Pomerantz, S. Gabersek and L. Gartland, Cooling energy savings potential of light-colored roofs for residential and commercial buildings in 11 US metropolitan areas, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-39433, Berkeley, CA, 1997.
- [8] S. Bretz, H. Akbari and A.H. Rosenfeld, Practical Issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands, *Atmospheric Environment*, vol. 32 (1), pp. 95-101, 1998.
- [9] S. Konopacki, H. Akbari, L. Gartland and L. Rainer, Demonstration of energy savings of cool roofs, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-40673, Berkeley, CA, 1998.
- [10] S. Konopacki and H. Akbari, Simulated impact of roof surface solar absorptance, attic, and duct insulation on cooling and heating energy use in single-family new residential buildings, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-41834, Berkeley, CA, 1998.
- [11] D. Parker, J. Huang, S. Konopacki, L. Gartland, J. Sherwin and L. Gu, Measured and simulated performance of reflective roofing systems in residential buildings, *ASHRAE Transactions*, vol. 104 (1), pp. 963-975, 1998.

-
- [12] H. Akbari, S. Konopacki, C. Eley, B. Wilcox, M. Van Geem and D. Parker, Calculations for reflective roofs in support of standard 90.1, ASHRAE Transactions, vol. 104 (1), pp. 984-995, 1998.
 - [13] S. Konopacki and H. Akbari, Energy savings calculations for heat island reduction strategies in Baton Rouge, Sacramento and Salt Lake City, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-42890, Berkeley, CA, 2000.
 - [14] S. Konopacki and H. Akbari, Measured energy savings and demand reduction from a reflective roof membrane on a large retail store in Austin, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-47149, Berkeley, CA, 2001.
 - [15] H. Akbari, Measured energy savings from the application of reflective roofs in two small non-residential buildings, Energy, vol. 28, pp. 953-967, 2003.
 - [16] Cool Roof Rating Council, Product Rating Program: CRRC-1 Program Manual, www.coolroofs.org/productratingprogram.html.
 - [17] American Society for Testing and Materials, ASTM Standards C1371, C1549, E408, E903, E1918, www.astm.org.
 - [18] Energy Star Roof Product Program, Requirements for Roof Products, www.energystar.gov.
 - [19] City of Chicago, IL – Department of Buildings, Conservation Code, www.cityofchicago.org/buildings. 2009.
 - [20] State of California – California Energy Commission, 2005 Building Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings, § 118, www.energy.ca.gov/title24/.
 - [21] State of Georgia – Department of Community Affairs, Georgia Energy Code: Georgia White Roof Amendment, www.dca.state.ga.us/planning.
 - [22] State of Florida – Department of Community Affairs, Florida Energy Code, www.floridabuilding.org. 2009.
 - [23] State of California – California Energy Commission, California Cool Roof Savings
 - [24] <http://www.acsiusa.com/>
 - [25] <http://elastek.com/products/topcoats/>
 - [26] <http://www.nationalcoatings.com/cr-overview.shtml>
 - [27] <http://energy-seal.com/UserDyn/ACS/pdfs/acu-shield.pdf>
 - [28] ASTM International. G173-03e1—Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 371 Tilted Surface 2003.
 - [29] Levinson R, Berdahl P, Akbari H, Miller W, Joedicke I, Reilly J, et al. Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2007 Feb;91(4):304–14.
 - [30] University of California. Lawrence Berkeley National Laboratory [Internet]. Available from: <http://eetd.lbl.gov/coolroof/tile.htm#tile>
 - [31] ASTM International (1996). E903-96 – Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres.
 - [32] ASTM International. C1371-04a Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometer, 2004.