



Ricerca di Sistema elettrico

Invecchiamento e sporcamento di cool materials: esposizione naturale e accelerata

R. Paolini, T. Poli, M. Zinzi, A.G. Mainini, A. Speroni, A. Zani

INVECCHIAMENTO E SPORCAMENTO DI COOL MATERIALS: ESPOSIZIONE NATURALE E ACCELERATA

R. Paolini, T. Poli, A.G. Mainini, A. Speroni, A. Zani (Politecnico di Milano)

M. Zinzi (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

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

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

Obiettivo: Tecnologie per involucri ad elevate prestazioni

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Invecchiamento e sporcamiento di cool materials"

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico Politecnico di Milano, Dipartimento ABC: Tiziana Poli

Gli autori ringraziano inoltre il Dr. Giancarlo Terraneo Dipartimento di chimica, materiali e ingegneria chimica "Giulio Natta" - Politecnico di Milano per il supporto per le prove di sporcamiento accelerato. Si ringraziano sentitamente Hugo Destailats, Mohamad Sleiman e Ronnen Levinson - Heat Island Group, Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, CA, USA) per il supporto offerto per la procedura di sporcamiento accelerato. Si ringrazia il Dr. Emiliano Carnielo - UniRomaTre per il supporto nell'attività di misura dei campioni esposti naturalmente.

Indice

1	INTRODUZIONE	5
1.1	INVECCHIAMENTO NATURALE IN AMBIENTE ESTERNO DELLE SUPERFICI EDILIZIE E LORO PRESTAZIONE OTTICO-ENERGETICA.....	5
1.2	INVECCHIAMENTO ACCELERATO E PROBLEMI RELATIVI ALLA RIPRODUZIONE IN LABORATORIO DELLE CONDIZIONI DI SOLLECITAZIONE IN AMBIENTE ESTERNO.....	6
1.3	OGGETTO DELLA RICERCA.....	7
1.4	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E OBIETTIVI DELLA RICERCA.....	8
2	APPROCCIO SPERIMENTALE.....	8
2.1	MATERIALI SELEZIONATI.....	8
2.2	METODO DI CARATTERIZZAZIONE DELLA RIFLETTANZA SOLARE SPETTRALE	10
2.3	METODO DI CARATTERIZZAZIONE DELL'EMISSIVITÀ TERMICA.....	11
2.4	RILIEVO FOTOGRAFICO	11
2.5	PROCEDURA DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE NATURALE	11
2.6	PROCEDURA DI ESPOSIZIONE ATMOSFERICA E SPORCAMENTO ACCELERATO	13
2.6.1	<i>Scopo e campo di applicazione</i>	13
2.6.2	<i>Descrizione della procedura accelerata</i>	13
2.6.2.1	Esposizione atmosferica accelerata.....	14
2.6.2.2	Sporcamento accelerato.....	15
3	RISULTATI E DISCUSSIONE.....	16
3.1	RISULTATI DELL'ESPOSIZIONE NATURALE.....	16
3.2	VARIABILITÀ DEI RISULTATI OTTENIBILI CON UN PROGRAMMA D'ESPOSIZIONE NATURALE.....	26
3.3	RISULTATI DELL'ESPOSIZIONE ACCELERATA E CONFRONTO CON L'ESPOSIZIONE NATURALE	28
3.4	LIMITI DI VALIDITÀ DELLA PROCEDURA ACCELERATA	35
3.5	RIPETIBILITÀ E RIPRODUCIBILITÀ DEL METODO	36
3.6	RACCOMANDAZIONI TECNICHE AI FINI DELL'IMPLEMENTAZIONE DI UN PROGRAMMA DI ESPOSIZIONE NATURALE E DI UN'ESPOSIZIONE ACCELERATA	36
4	CONCLUSIONI.....	37
4.1	RACCOMANDAZIONI PER ULTERIORI SVILUPPI DELLA RICERCA.....	38
4.2	RACCOMANDAZIONI PER EVENTUALI APPLICAZIONI IN AMBITO DI NORMATIVA TECNICA	39
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	41

Sommario

L'utilizzo di materiali ad alta riflettanza solare ed emissività termica – noti come cool materials – per le coperture degli edifici può contribuire al risparmio energetico, migliorare il microclima urbano e la qualità dell'aria. Tuttavia, le superfici degli edifici sono soggette a invecchiamento, cioè il complesso di degrado fisico e sporcamento. Ciò altera la riflettanza solare e l'emissività termica, riducendo i risparmi per la climatizzazione estiva e la mitigazione del microclima ottenibili con i cool materials.

Nei precedenti anni di attività sono stati selezionate 14 membrane impermeabilizzanti e 2 tegole di tipo olandese, con diversa rugosità superficiale e riflettanza solare al tempo zero (fra 0.24 e 0.87). I campioni sono stati caratterizzati nell'intervallo spettrale fra 300 e 2500 nm, con una risoluzione di 5 nm, tramite uno spettrometro UV-Vis-NIR a doppio raggio, ed è stata poi calcolata la riflettanza solare integrando i valori spettrali. L'emissività termica è stata invece caratterizzata con un emissometro portatile. A partire da metà aprile 2012, i materiali selezionati sono stati esposti sulle coperture di due edifici a Roma e Milano, e dopo 3, 6, 12, 18, 24, e 36 mesi di esposizione i campioni sono ritirati, misurati, e riesposti. I campioni sono stati esposti debolmente inclinati sia a Milano che a Roma, e a Milano anche inclinati di 45° rivolti a Sud.

In collaborazione con il Lawrence Berkeley National Laboratory, è stata sviluppata una procedura accelerata di esposizione atmosferica e sporcamento per i materiali per coperture. Questa prevede una fase di esposizione ai raggi UVA e caldo umido (a 40°C e 90% di umidità relativa), seguita da una fase di deposizione di una miscela a base acquosa di polveri minerali (16% in massa secca), nero di carbonio (8%), sali (7%), e acido umico (69%). A questa seconda fase segue una nuova fase di esposizione atmosferica accelerata.

Grazie all'esposizione ambientale si è osservato che la riflettanza solare delle membrane impermeabilizzanti risulta stabile dopo circa due anni. Con una regressione sui dati sperimentali, si è calcolato che per membrane con riflettanza solare iniziale pari a 0.80 la perdita è stata in media di 0.24 per i campioni esposti a Milano, e di 0.17 a Roma. Inoltre, se due materiali hanno la stessa riflettanza solare iniziale, quello fra i due che ha maggiore riflettanza nel vicino infrarosso soffre un minore decremento di riflettanza solare rispetto all'altro materiale con maggiore riflettanza nel campo del visibile. Questo accade perché il black carbon è l'inquinante che maggiormente contribuisce all'assorbimento di radiazione solare, e la sua assorbanza per unità di spessore di deposito è decrescente con la lunghezza d'onda. Inoltre, la maggior parte delle perdite di riflettanza dovute al degrado fotochimico, all'azione dell'acqua e alle deposizioni di materiale organico e inorganico, si manifesta principalmente fra 420 e 600 nm. A tre anni di esposizione si sono registrate fluttuazioni che non alterano il quadro generale, a seguito dell'anomalia climatica dell'estate del 2014, eccezionalmente piovosa. Le variazioni dell'emissività termica sono invece modeste. Dopo tre anni, la riflettanza solare delle tegole in laterizio, invece, appare ancora in decremento: quella delle tegole rosse varia da 0.47 a 0.35, mentre per quelle rivestite con una pittura bianca varia da 0.73 a 0.53 (in media fra Milano e Roma).

La procedura di esposizione atmosferica e sporcamento accelerato sviluppata è stata ulteriormente affinata, fornendo un miglior raccordo con i dati sperimentali. Questa è ora in grado di riprodurre in meno di una settimana gli effetti sulla riflettanza solare spettrale, a tutte le lunghezze d'onda, dell'invecchiamento di materiali per coperture esposti in contesti urbani italiani per oltre tre anni, che si valuta essere il tempo minimo per ottenere un valore stabile nel tempo.

1 Introduzione

Dalla diversi decenni, la ricerca nel settore delle costruzioni e degli impianti termici si è concentrata sul risparmio energetico [1]. Gli edifici urbani, inoltre, hanno un fabbisogno energetico maggiore per il raffrescamento e minore per il riscaldamento di edifici posti in un'adiacente area non urbana, nelle medesime condizioni climatiche e di utilizzo [2–5]. Complessivamente in media il fabbisogno energetico degli edifici urbani rispetto a quelli extraurbani è del 13% in più per il raffrescamento, e mediamente del 20% in più, sempre per la climatizzazione estiva, per ogni grado in più della temperatura in area urbana rispetto a quella extraurbana [6]. Nel contesto italiano, considerando edifici a destinazione terziaria, il fabbisogno energetico per il riscaldamento è calcolato pari al 15-70% (a seconda dell'involucro e delle scelte progettuali) maggiore in area urbana che in area non urbana, mentre per il riscaldamento è ridotto dal 30% al 60% [7,8].

Al crescere della necessità di edifici effettivamente a energia zero (ZEB) e delle aspettative dell'utenza finale, i materiali e i componenti d'involucro edilizio devono offrire prestazioni potenziate durante tutto l'arco della loro vita utile. Tuttavia, nella maggior parte dei casi, se non sempre, le simulazioni energetiche degli edifici, così come le scelte progettuali, sono effettuate considerando la sola prestazione iniziale dei componenti edilizi e impiantistici. In particolare, le proprietà ottico-radiative dell'involucro edilizio sono dei dati d'ingresso essenziali per le simulazioni energetiche, come per le analisi termo-meccaniche (sforzi-deformazioni accoppiati a scambio termico) di supporto allo sviluppo e alla progettazione di nuovi prodotti e tecnologie d'involucro. Nonostante l'importanza di queste informazioni, sono attualmente disponibili pochi dati relativi al comportamento ottico-radiativo a lungo termine dell'involucro degli edifici nei contesti europei, specie urbani.

Per mitigare i microclimi urbani, diverse soluzioni sono state studiate e proposte in letteratura, come lo sfruttamento dell'ombreggiamento offerto dalle alberature [9], l'utilizzo di pavimentazioni ad alta albedo [10], l'ottimizzazione degli ombreggiamenti nei percorsi pedonali [11,12], e il controllo delle emissioni di calore generato da attività umane, come le unità esterne degli impianti di climatizzazione [13–16].

Fra le opzioni utili alla mitigazione del microclima urbano più studiate, utili anche alla diretta riduzione del fabbisogno energetico degli edifici per il raffrescamento, vi sono diversi componenti di involucro edilizio, fra cui coperture a verde [17–19], pareti a verde [20,21], materiali retroriflettenti (cioè che riflettono la radiazione diretta nella direzione da cui essa proviene) [22,23]. Soprattutto, fra le più studiate tecniche che ricorrono all'involucro degli edifici vi è l'utilizzo di materiali ad alta riflettanza solare (ρ_s) ed alta emissività termica (ε), comunemente noti come "cool materials" [24–26]. E' stato estensivamente dimostrato in letteratura che coperture ad alta ρ_s e alta ε (cool roofs) contribuiscono a ridurre il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva degli edifici su cui sono installati [27–29], oltre alla mitigazione delle isole di calore urbane [30,31], e alla compensazione delle emissioni di CO₂ [32–34].

1.1 *Invecchiamento naturale in ambiente esterno delle superfici edilizie e loro prestazione ottico-energetica*

I benefici che possono essere ottenuti con l'utilizzo dei cool materials, tuttavia, possono essere compromessi dall'invecchiamento [35], cioè il complesso di degrado fisico, e sporcamento (e in alcuni casi di proliferazione biologica), che altera ρ_s e ε delle superfici [36–38]. In particolar modo

per materiali per coperture piane con riflettanza solare iniziale (ρ_{s0}) maggiore di 0.80, sporcamento e agenti atmosferici possono causare un decremento pari a 0.16, dopo tre anni di invecchiamento naturale in ambienti non urbani poco o mediamente inquinati [39].

Molti dati sono disponibili nei database dell'U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) e dall'U.S. Cool Roofing Council (CRRC), in cui sono presenti i valori di ρ_s e ε al tempo zero e dopo tre anni di esposizione naturale di 2605 prodotti (dati relativi ad Agosto 2015 [40]). Il CRRC gestisce l'esposizione di prodotti per coperture in 3 siti negli Stati Uniti (i valori di ρ_s e ε sono la media dopo tre anni di campionatura presso i tre siti): uno sub-urbano temperato e inquinato (Ohio), uno caldo-umido extra-urbano (Arizona), e uno caldo-umido extra-urbano (Florida). Presso questi siti di esposizione, escludendo i materiali con ρ_{s0} inferiore a 0.20, tutti i prodotti presentano un decremento di ρ_s , e i prodotti con ρ_{s0} maggiore di 0.80 presentano, dopo tre anni, un decremento pari a 0.20 ($\pm 15\%$ in relazione al contesto di esposizione) [39].

Legati alle esigenze dell'industria dell'automobile, vi sono molti campi di esposizione in ambienti estremi come deserti e aree calde e umide [39], presso cui anche l'industria dei materiali da costruzione testa i propri prodotti. Tuttavia, un'esposizione ambientale in un deserto non è forse molto utile dato che la maggior parte delle persone vive in aree urbane. Nei Paesi economicamente sviluppati già il 70% della popolazione è urbana, e ci si attende che la stessa proporzione sia raggiunta globalmente entro il 2050 [41].

Un'esposizione in un ambiente remoto potrebbe non essere rappresentativa in termini di sporcamento, invecchiamento atmosferico, e proliferazione biologica. Infatti, siti urbani e industriali sono significativamente molto più inquinati delle aree rurali, e ciò comporta uno sporcamento più accentuato delle superfici per maggiore deposizione di particolato [42]. I siti urbani, normalmente, sono caratterizzati da temperature dell'aria, specie durante la notte, maggiori che in aree non urbane adiacenti [13,43], e minore umidità [44]. In combinazione con la minore umidità relative ambientale, anche la minore presenza di vegetazione limita la concentrazione di spore, riducendo il rischio di proliferazione biologica.

1.2 Invecchiamento accelerato e problemi relativi alla riproduzione in laboratorio delle condizioni di sollecitazione in ambiente esterno

Per progettare una procedura di invecchiamento accelerato e determinare il fattore di accelerazione, è necessaria la valutazione dei degradi e dei modi di guasto osservati con esposizione in campo e in uso, e/o con l'ispezione di edifici reali o sperimentali [45]. Pertanto, se una procedura di invecchiamento accelerato non deve essere un test tortura¹, il fattore di accelerazione e soprattutto la concezione della procedura stessa non devono derivare da esposizioni ambientali e ispezioni di edifici collocati in condizioni estreme e non rappresentative.

Nella norma ISO 15686-2, la definizione di una procedura accelerata è un processo iterativo, cioè la procedura accelerata deve essere adattata e rivista e ripetuta fino a convergenza con l'esposizione a lungo termine [45]. Di conseguenza, un pre-dimensionamento dei cicli di

¹ Per test tortura si intende una prova che *riproduce condizioni molto più severe delle condizioni di servizio del prodotto, e possono essere usati per evitare l'invecchiamento a lungo termine* [67], accelerando l'invecchiamento incrementando l'intensità degli agenti e dei fattori che producono l'invecchiamento. L'assunzione è che se un prodotto resiste a condizioni estreme, allora non dovrebbe avere problemi in tutti gli altri casi. Tuttavia, questa pratica può indurre meccanismi di degrado e modi di guasto non osservati in natura.

invecchiamento accelerato è da considerarsi essenziale; altrimenti i criteri di convergenza non possono essere soddisfatti.

Il requisito essenziale per utilizzare l'invecchiamento accelerato per la previsione di vita utile di un componente edilizio in condizioni d'uso [45] è che il fattore di accelerazione sia noto, premesso che la procedura di laboratorio riproduca gli stessi degradi e modi di guasto dell'invecchiamento accelerato.

Dato che esistono molte procedure normate, da quelle generali a quelle di prodotto, ma nessuna norma include nel proprio titolo "vita utile", il lettore può essere indotto a pensare che la previsione della vita utile non possa affidarsi all'invecchiamento accelerato. Un confronto internazionale di metodi di prova ha concluso che, con riferimento ai materiali, la maggior parte delle prove sono solo un passa/non-passa e solo uno o due agenti sono presi in considerazione. Con riferimento ai componenti edilizi, invece, molti dei test analizzati sono stati in effetti concepiti per la valutazione della vita utile, ma la correlazione fra agente sollecitante e dati climatici è spesso debole [46]. Molte procedure accelerate sono state in effetti validate con programmi di esposizione ambientale di breve durata (es.: 1-4 anni), mentre molti autori riportano che la stabilità per parametri chiave come la riflettanza solare è raggiunta dopo più di 3 anni [37,39]. La raccomandazione a evitare estrapolazioni di più di quattro unità di tempo è inoltre riportata in letteratura [47]. L'invecchiamento accelerato che non sia un test di tortura normalmente non permette di riprodurre decenni in poche settimane. I fattori di accelerazione – cioè il rapporto fra tempo di invecchiamento naturale e tempo di invecchiamento accelerato – tipicamente sono compresi fra 20 e 40 [48–50]. Altri autori riportano fattori di accelerazione di circa 10-12 [51].

Recentemente, una procedura di esposizione atmosferica e sporcamento è stata sviluppata da Sleiman et al. sulla base di un'esposizione ambientale di 25 prodotti per coperture in Ohio, Arizona, e Florida [52]. Questa procedura consente di riprodurre in laboratorio lo sporcamento e l'invecchiamento dovuto all'esposizione atmosferica dei materiali per coperture, e valutare in condizioni controllate l'impatto dell'esposizione ambientale sul ρ_s e ε . In seguito, la ripetibilità e la riproducibilità di questa procedura sono state valutate con successo grazie a un'attività di confronto interlaboratorio² [53], e la procedura è stata accettata come norma ASTM [54]. Attualmente questa procedura è accettata dal CRRC per fornire una certificazione provvisoria, per un prodotto che sia in attesa dei risultati da tre anni di esposizione naturale [40].

Un ulteriore rilevante fattore di degrado che è stato introdotto negli ultimi anni nella pratica dell'invecchiamento accelerato in laboratorio è la proliferazione biologica [55,56]. Per questa pratica, tuttavia, non esiste ancora una norma tecnica o una procedura riconosciuta.

1.3 Oggetto della ricerca

In questo contributo si presentano i risultati di una campagna di tre anni di esposizione naturale a Roma e Milano di 16 prodotti per coperture, fra cui membrane impermeabilizzanti e tegole in laterizio, la cui riflettanza solare spettrale è stata misurata quando nuovi, e dopo 3, 6, 12, 18, 24 e 36 mesi. Si presenta inoltre un'estensione dell'applicazione del metodo descritto nella ASTM D 7897 ai contesti urbani italiani, confrontando la riflettanza UV-Vis-NIR di campioni invecchiati naturalmente a Roma e Milano, e di provini invecchiati in laboratorio.

² Alla quale hanno partecipato il Politecnico di Milano e ENEA.

1.4 Descrizione delle attività e obiettivi della ricerca

L'attività sviluppata comprende:

- la misura della riflettanza solare spettrale e dell'emissività termica dopo tre anni di esposizione naturale a Roma e Milano di materiali per coperture continue e discontinue;
- l'affinamento della procedura di sporcamento accelerato sviluppata in precedenza, sulla base dei dati dell'esposizione naturale.

Gli obiettivi della ricerca sono pertanto:

- La valutazione dell'impatto di sporcamento e degrado fisico sulla riflettanza solare e emissività termica di cool materials per coperture, dopo tre anni di esposizione naturale.
- L'affinamento e descrizione di una procedura di sporcamento accelerata in grado di riprodurre in laboratorio l'impatto degli agenti fisici e della deposizione di particolato atmosferico sulle proprietà ottico-energetiche dei materiali per l'involucro edilizio esposti nei contesti urbani italiani.

2 Approccio sperimentale

2.1 Materiali selezionati

Nell'anno di attività 2011/2012 sono stati selezionati 16 prodotti per coperture, dei quali 14 membrane impermeabilizzanti (sia sintetiche che bituminose) e 2 tegole tipo olandese. Per ogni materiale è stato selezionato un prodotto avente proprietà "standard", ossia rappresentativo delle proprietà dei prodotti già presenti in commercio, e una o più alternative aventi prestazioni ottimizzate, un "cool material", cioè un prodotto con alta riflettanza ed ε o comunque con riflettanza nel vicino infrarosso più alta di un analogo prodotto avente lo stesso colore, oppure, se disponibile, con proprietà fotocatalitiche (Figura 1).

Sono stati inclusi nella selezione prodotti aventi ρ_s iniziale compresa fra 0.24 e 0.87, con superficie liscia o rugosa (con diversi livelli di rugosità), e alcune membrane sono lucide (cioè con una componente di riflessione speculare non trascurabile), mentre altre sono opache e diffondenti. In sintesi, sono stati selezionati materiali con la più ampia gamma possibile di riflettanze spettrali e caratteristiche superficiali.

Per ogni condizione di esposizione (sito e inclinazione per l'invecchiamento naturale, o invecchiamento accelerato) sono state realizzate tre repliche dei materiali selezionati, ciascuna da 10 cm x 10 cm. Solo per le tegole sono stati realizzati campioni più piccoli, di circa 5 cm x 5 cm, perché non è stato possibile ricavare dalle tegole intere campioni planari di dimensioni maggiori. Sono infatti necessari campioni piani per poter misurare la riflettanza spettrale e ε .




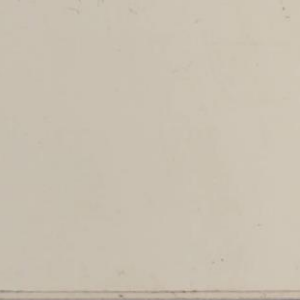



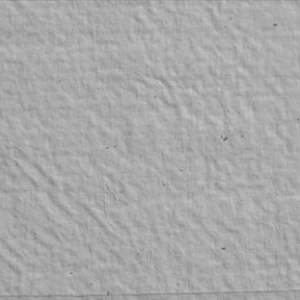
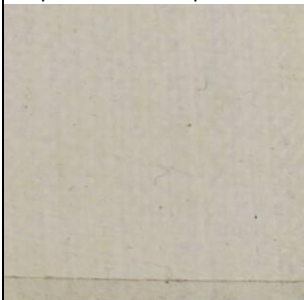
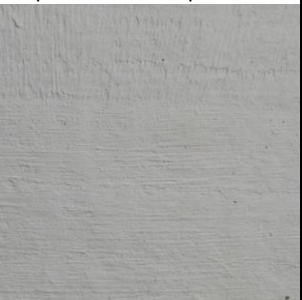


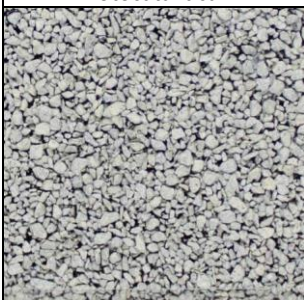



<p>m01 ($\rho_{s0} = 0.26$) Poliolfina flessibile grigia (antiscivolo)</p> 	<p>m02 ($\rho_{s0} = 0.85$) Rivestimento (lucido) bianco in fabbrica su poliolfina fless.</p> 	<p>m03 ($\rho_{s0} = 0.77$) Poliolfina flessibile bianca (antiscivolo)</p> 	<p>m04 ($\rho_{s0} = 0.84$) Poliolfina termoplastica bianca (lucida)</p> 
<p>m05 ($\rho_{s0} = 0.47$) PVC grigio (lucida)</p> 	<p>m06 ($\rho_{s0} = 0.87$) PVC bianca diffondente</p> 	<p>m07 ($\rho_{s0} = 0.61$) Poliolfina termoplastica beige nir riflettente (diffondente)</p> 	<p>m08 ($\rho_{s0} = 0.82$) Pittura bianca (diff.) appl. in opera su bitume polimero</p> 
<p>m09 ($\rho_{s0} = 0.74$) Pittura bianca (diff.) appl. in opera su bitume polimero</p> 	<p>m10 ($\rho_{s0} = 0.78$) Pittura fotocatalitica appl. in opera su bitume polimero</p> 	<p>m11 ($\rho_{s0} = 0.73$) Pittura bianca (lucida) appl. in opera su bitume polimero</p> 	<p>m12 ($\rho_{s0} = 0.40$) Pittura grigia (diff.) appl. in opera su bitume polimero</p> 
<p>m13 ($\rho_{s0} = 0.29$) Bitume polimero granigliata fotocatalitica</p> 	<p>m14 ($\rho_{s0} = 0.24$) Bitume polimero granigliata</p> 	<p>Tr ($\rho_{s0} = 0.48$) Tegola rossa tipo olandese</p> 	<p>Tb ($\rho_{s0} = 0.74$) Tegola tipo olandese rivestita con pittura bianca</p> 

Figura 1. Campioni selezionati (misure sotto le immagini in cm): descrizione sintetica e riflettanza solare iniziale.

2.2 Metodo di caratterizzazione della riflettanza solare spettrale

Tutte le misure della riflettanza spettrale (ρ_λ) sono state effettuate nel campo UV-Vis-NR con due spettrometri identici (Perkin Elmer Lambda 950 con sfera integratrice Labsphere di 150 mm di diametro rivestita internamente in Spectralon con sensori PMT/PbS) ogni 5 nanometri, da 300 a 2500 nanometri (porzione dello spettro in cui è concentrato più del 99% della radiazione solare globale sul piano orizzontale). Per effettuare la linea di base - cioè la misura di riferimento - è stato utilizzato un campione bianco diffondente in Spectralon (Labsphere SRS-99-020 Reflectance Standard) con curva di calibrazione certificata e riferito a un campione primario del National Institute for Standard and Technology (NIST).

Per ogni materiale sono state eseguite tre misure, una per campione nel suo punto centrale, sia al tempo zero che a seguito di invecchiamento naturale. È stata quindi calcolata la riflettanza spettrale media per ogni condizione di esposizione. Per la procedura accelerata sono state effettuate tre misure per tre campioni (con un tempo di risposta dei sensori PMT/PbS inferiore che per le misure al tempo zero). Sono state quindi scartate le misure di punti palesemente affetti da errori sperimentali e comunque le tre misure maggiormente distanti dalla riflettanza spettrale media, ed è stata quindi ricalcolata la riflettanza spettrale media.

Per la riflettanza spettrale media sono stati quindi calcolati i valori a banda larga di ρ_s (fra 300 e 2500 nm), ultravioletta ("u" nei grafici, fra 300 e 380 nm), visibile ("v" nei grafici, 380-780 nm), e per il vicino infrarosso ("n" nei grafici, 380-780 nm) facendo riferimento alla metrica descritta nella norma ISO 9050 [57]. La norma ISO 9050 utilizza come funzione di pesatura la distribuzione spettrale d'irradianza della radiazione solare globale sul piano orizzontale con massa d'aria pari a 1.5 (condizione che si riscontra con un angolo zenitale solare pari a circa 48°). Nel dettaglio la riflettanza solare (ρ_s), ad esempio, è calcolata come:

$$\rho_s = \frac{\int_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} \rho_\lambda G_\lambda d\lambda}{\int_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} G_\lambda d\lambda} \approx \frac{\sum_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} \rho_\lambda S_\lambda \Delta\lambda}{\sum_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_\lambda \Delta\lambda} \quad (1)$$

Dove:

- G_λ è la radiazione solare monocromatica
- S_λ è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare monocromatica, normalizzata all'irradianza solare di 1000 W m⁻²
- ρ_λ è la riflettanza monocromatica misurata

Nella norma ASTM E 903 [58] sono discussi i possibili errori di misura, e viene dichiarato (sulla base di un'attività di confronto interlaboratorio), che la variabilità complessiva, utilizzando diversi strumenti, e diversi campioni di calibrazione, è in condizioni ottimali dell'ordine di 0.01-0.02. Con strumenti di alta precisione la deviazione standard su dieci misure è inferiore a 0.0005, mentre un'influenza maggiore è data dal campione utilizzato per determinare la linea di base. In un confronto interlaboratorio per la caratterizzazione di cool materials sono stati misurati 15 prodotti (da almeno 6 laboratori), ed è stata calcolata una deviazione standard media pari a 0.014 e massima pari a 0.031 [59].

2.3 Metodo di caratterizzazione dell'emissività termica

L'emissività termica (ε) è stata caratterizzata per ogni campione, mediante un emissometro portatile (Devices & Services) secondo la procedura descritta nella norma ASTM C 1371 [60]. Lo strumento consente di caratterizzare un'area di circa 5 cm di diametro; pertanto è possibile caratterizzare solo l'area centrale del campione. La riproducibilità della misura è stata determinata tramite un confronto interlaboratorio in cui sono stati testati 14 prodotti da 4 laboratori, ed è stata calcolata una deviazione standard media pari a 0.01 unità di ε , e massima pari a 0.04 [59].

2.4 Rilievo fotografico

Per rilevare i degradi è stata utilizzata una macchina fotografica digitale posizionata 0.80 m sopra i campioni, e montata su uno stativo dotato di 4 lampade da 450 lumen con temperatura di colore 4000 K orientate verso il campione e inclinate di 45° (Figura 2), per ottenere un'illuminazione uniforme e priva di ombre secondo la procedura ASTM E 312 [61].

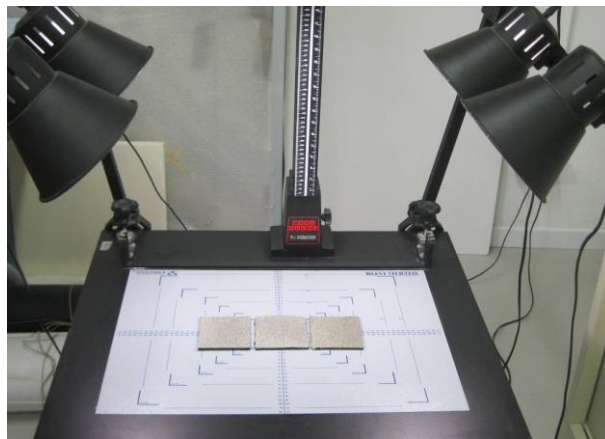


Figura 2. Stativo utilizzato per le foto e il rilievo dei degradi.

2.5 Procedura di esposizione ambientale naturale

I materiali selezionati sono stati esposti presso due siti urbani: a Roma sulla copertura della sede centrale dell'ENEA (41.93 °N; 12.47 °E; 35 m s.l.m.), e a Milano sulla copertura di un edificio presso il Campus Leonardo del Politecnico di Milano (Lat 45.48 °N; 9.23 °E; 123 m s.l.m.). I due siti selezionati, caratterizzati da differenti condizioni climatiche e livelli di inquinamento, si trovano in entrambi i casi circa a metà fra centro città e periferia (a circa 25 m dalla quota di calpestio a Roma, e a 35 m a Milano).

A metà aprile 2012, le membrane impermeabilizzanti sono state esposte debolmente inclinate, cioè con pendenza pari a 1.5% secondo i codici di pratica italiani [31] e norme svizzere [32], diversamente da quanto fatto negli U.S.A. presso i campi del CRRC dove viene adottata una pendenza di 5° secondo ASTM G 7 [62], che non si ritiene rappresentativa delle condizioni di invecchiamento per le coperture piane. Per praticità, nel seguito del report, l'esposizione debolmente inclinata sarà indicata come orizzontale.

A Milano, repliche degli stessi materiali sono state esposte anche inclinate di 45° rivolte verso Sud. Inoltre, a Milano, una seconda serie con una selezione di 8 membrane impermeabilizzanti (cioè m02, m03, m04, m05, m06, m07, m09, m11) è stata esposta orizzontalmente un anno dopo (inizio maggio 2013). Il proposito di questa seconda esposizione è di valutare la variabilità dei risultati fra esposizioni iniziate in anni diverse.

Per quanto concerne le tegole in laterizio per coperture discontinue, sono stati esposti sia a Milano che a Roma piccoli campioni (circa 5 cm x 5 cm) inclinati con pendenza del 30%, tre repliche rivolte a Nord, e altrettante a Sud. Sono state esposte anche tegole intere, sia rivolte a Nord che a Sud (Figura 3). Queste ultime saranno misurate solo al termine dell'esposizione, quando si sarà osservato un andamento stabile della riflettanza, poiché per poter essere caratterizzate con lo spettrometro devono essere distrutte, ricavando dei campioni piani.



Figura 3. Tegole esposte in copertura a Milano.

Nel caso dell'esposizione principale, iniziata nell'aprile 2012, i campioni sono stati ritirati, la loro riflettanza è stata misurata in laboratorio, e sono stati riesposti dopo 3, 6, 12, 18, 24, e 36 mesi, rimanendo non esposti per circa una settimana ogni volta. Nel caso della seconda esposizione, i campioni sono stati ritirati, misurati, e riesposti dopo 3, 6, 12, e 24 mesi di invecchiamento naturale.

I campioni delle membrane e i piccoli campioni delle porzioni piane di tegole sono stati vincolati a telai metallici (Figura 4), ad almeno 0.80 m dal piano della copertura degli edifici su cui ha luogo l'esposizione ambientale, conformemente alla norma ISO 2810 [33]. Inoltre, a Milano una stazione meteo è posizionata sulla stessa copertura dove sono esposti i campioni e una stazione ARPA per la caratterizzazione della qualità dell'aria è lontana meno di 300 metri.



Figura 4. Telai con i campioni esposti presso il Politecnico di Milano

2.6 Procedura di esposizione atmosferica e sporcamento accelerato

La procedura di invecchiamento atmosferico e sporcamento accelerato proposta in questo studio costituisce una variante della procedura inizialmente sviluppata da Sleiman et al. al Lawrence Berkeley National Laboratory [63], in seguito implementata nella norma ASTM D 7897 [54], le cui ripetibilità e riproducibilità sono state valutate in un'attività di confronto interlaboratorio [53]. Questa procedura è stata successivamente studiata da Paolini et al. [64,65] in due prime varianti per valutarne l'adattamento ai fini della riproduzione delle condizioni di sporcamento e esposizione atmosferica nei contesti italiani, sulla base del lavoro nei precedenti anni di attività dell'accordo di programma [66].

Prima dello sviluppo di questa procedura esistevano o metodi utilizzati dai singoli produttori per valutare internamente la resistenza allo sporcamento dei loro prodotti, oppure altre procedure non esattamente volte a riprodurre lo sporcamento [66].

2.6.1 Scopo e campo di applicazione

Lo scopo della procedura sviluppata è di riprodurre in pochi giorni (circa una settimana) e in modo economico gli effetti dell'esposizione ambientale su ρ_s dei materiali d'involucro edilizio esposti in contesti urbani italiani. Dato che per soddisfare i criteri di economicità e di rapidità della procedura vengono eseguiti solo pochi cicli di esposizione accelerata ai raggi UV e a alta umidità relativa, questa procedura non può essere considerata una procedura di valutazione della durabilità o della vita utile dei materiali o componenti edilizi. Per molti polimeri, ad esempio, i documenti guida EOTA e la pratica corrente raccomandano esposizioni accelerate ai raggi UV di 500, 1000 o anche 2000 ore [67].

Negli Stati Uniti la procedura ASTM D 7897 è stata adottata come procedura per fornire risultati provvisori per nuovi prodotti in attesa che siano ottenuti i dati da tre anni di esposizione naturale. La procedura sviluppata va intesa come utile a questo scopo, e non come completamente sostitutiva dell'esposizione naturale.

La procedura qui descritta è stata sviluppata sulla base dei dati relativi all'esposizione presso due siti italiani di 16 materiali per coperture, mentre la procedura descritta nella norma ASTM D 7897 è stata sviluppata sulla base dei dati relativi all'esposizione di 19 prodotti per coperture presso 3 siti negli Stati Uniti, e successivamente testata con i dati di ulteriori 25 prodotti. Ai fini di una validazione definitiva e dell'adozione come standard della procedura sviluppata per i contesti italiani occorrerebbero quindi:

- a) l'esposizione presso altri siti di altri prodotti, anche appartenenti a categorie merceologiche non incluse in questo studio;
- b) un'attività di confronto interlaboratorio.

2.6.2 Descrizione della procedura accelerata

La procedura è composta da tre fasi identiche di esposizione atmosferica accelerata e da due fasi identiche di sporcamento accelerato. La procedura va eseguita su almeno 3 campioni di dimensioni pari a 100 mm x 100 mm. Per campioni più piccoli o per campioni la cui riflettanza solare spettrale già presenti disomogeneità, si raccomanda di utilizzare un numero maggiore di campioni. Per completare la procedura, vanno eseguite le seguenti fasi:

- Fase 1: misura della riflettanza solare spettrale sui campioni nuovi con la stessa procedura indicata al punto 2.2, e foto dei campioni come indicato al punto 2.4.
- Fase 2: esposizione atmosferica accelerata
- Fase 3: sporcamento accelerato
- Fase 4: esposizione atmosferica accelerata
- Fase 5: sporcamento accelerato
- Fase 6: esposizione atmosferica accelerata
- Fase 7: misura della riflettanza solare spettrale e foto dei campioni.

2.6.2.1 Esposizione atmosferica accelerata

L'esposizione atmosferica accelerata ha una durata di 24 ore più i transitori fra i cicli (la cui durata può variare a seconda delle prestazioni della cella climatica ed è dell'ordine di grandezza di 1 h). E' composta da due sottofasi ripetute due volte in serie (simili al primo ciclo della norma ASTM G 154 [68] o ISO 11341 [69]):

- 8 ore di irraggiamento UVA, con temperatura dell'aria a bulbo secco pari a 40 ± 0.5 °C e umidità relativa del $15 \pm 2\%$; e
- 4 ore a 40 ± 0.5 °C e 90 ± 2 % di umidità relativa.

Per l'esposizione atmosferica accelerata è stata utilizzata una camera climatica commercialmente disponibile (Angelantoni CH 1200 SP, Figura 5). In un test preliminare è stata eseguita la procedura anche con un numero inferiore di campioni seguendo la procedura indicata nella ASTM G 154, esponendo i campioni, prima e dopo lo sporcamento, a due ripetizioni del primo ciclo descritto in ASTM G 154:

- 8 h di irraggiamento UVA (0.89 mW cm^{-2}) a 60 ± 3 °C (temperatura di un campione nero di riferimento posto nella cella climatica)
- 4 h di condensazione dell'acqua, con temperatura pari a 50 ± 3 °C (temperatura del campione nero).

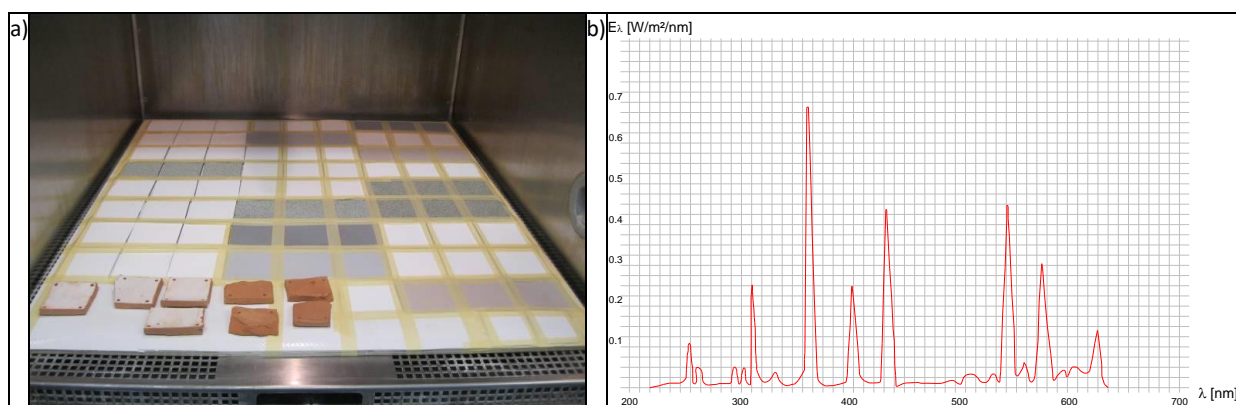


Figura 5. a) campioni nella camera climatica; b) spettro della lampada UV utilizzata.

In entrambi i casi è stata utilizzata acqua a bassa durezza (filtrata) o deionizzata (DI). Al termine di ogni fase di esposizione atmosferica accelerata i campioni sono lasciati asciugare a temperatura ambiente per almeno 2 ore, prima di procedere con le fasi successive.

2.6.2.2 Sporciamento accelerato

Per lo sporciamento è stata preparata una miscela a base acquosa di polveri minerali (16% in massa secca), black carbon (8%), sali (7%), e acido umico (69%). La miscela viene quindi agitata e quindi messa in un serbatoio pressurizzato (97 - 103 kPa), e nebulizzata con un ugello, circa 40 cm sopra i campioni. Nel dettaglio gli agenti sporcanti sono descritti di seguito.

Black carbon (fuliggine / nero di carbonio). Si utilizza una soluzione di black carbon autodisperdente e idrofilico disponibile commercialmente (carbon black Aqua-Black 001, Tokai Carbon Co., LTD.), diluita in acqua deionizzata (2% m/m). Per preparare 1 litro sospensione, si diluiscono 12.5 ml di soluzione che in un litro di acqua deionizzata e scuotere il mix per un minuto. Il risultato è una sospensione che avrà una concentrazione di black carbon di 1.25 g/l. Il black carbon selezionato è elettrostaticamente stabile come una sospensione acquosa senza l'impiego di additivi disperdenti.

Polveri minerali. Viene utilizzata una miscela di 0.3 ± 0.02 g di ossido di ferro (Fe_2O_3) in polvere (CAS: 1309-37-1, $< 5 \mu\text{m}$) con 1 ± 0.05 g di Montmorillonite K10 (CAS: 1318-93-0) e 1 ± 0.05 g di bentonite idrofila (CAS: 1302-78-9). Il miscuglio viene aggiunto a 1 L di acqua deionizzata e mescolato per circa 1-2 minuti, ottenendo una sospensione stabile di 2.3 g/L. Per prevenire la sedimentazione la sospensione viene mescolata ancora prima dell'uso se trascorsa più di 1 h dalla prima mescolatura.

Sali. Si prepara 1 L di soluzione di 0.30 ± 0.02 g di cloruro di sodio (NaCl, CAS: 7647-14-5), 0.30 ± 0.02 g di nitrato di sodio (NaNO_3 , CAS: 7632-18-9) e 0.40 ± 0.02 g di solfato calcico di-idrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CAS: 7778-18-9) in acqua deionizzata. La concentrazione totale di Sali è di 1 g/L.

Particolato di Materia Organica (POM). Si prepara una soluzione di 1.4 g di acido umico disponibile commercialmente (CAS: 1415-93-6) in 1 L di acqua deionizzata per ottenere una soluzione di 1.4 g/L. La struttura chimica dell'acido umico è comparabile ai prodotti e residui della decomposizione di agenti microbiologici quali alghe, batteri e funghi.

Preparazione della miscela. In un contenitore di vetro, si miscelano le 4 soluzioni di agenti sporcanti come descritto di seguito: 250 ml di polvere + 250 ml di sali + 250 ml di acido umico + 250 ml di fuliggine. La miscela deve essere agitata per almeno 2-5 minuti immediatamente prima di applicarla sui campioni.

Procedura di irrorazione della miscela. Una volta preparata la mistura, per la deposizione si segue la seguente procedura:

1. Si introduce la mistura in un serbatoio a pressione (in acciaio inox o alluminio, con capacità raccomandata di almeno 2 L), del tipo per l'applicazione di vernici, dotato di manometro. Il serbatoio è mantenuto in pressione a 100 ± 3 kPa (14-15 psi), collegato all'aria di rete (Figura 6). Un tubo in uscita dal serbatoio è collegato a un ugello di tipo cavo-conico in grado di produrre gocce di dimensioni pari a 100-200 μm con pressioni pari a 96.5-124 kPa (14-18 psi). In questo lavoro è stato utilizzato un ugello unijet SF-2 (1/4 TT-SS + SS-CO-SF2 + 6051-SS-50, Spraying Systems Co.). L'ugello è posizionato perpendicolarmente circa 40-60 cm sopra il piano su cui avviene la deposizione dei campioni. E' necessario realizzare una struttura di alloggiamento per l'ugello (ad esempio come una scatola aperta sul lato frontale), con alla base una vasca di raccolta.
2. Viene aperta la valvola del serbatoio, dando inizio alla nebulizzazione della mistura. Occorre attendere circa 1 minuto prima che l'irrorazione sia uniforme e stabile, e non va chiusa la valvola

quando l'irrorazione sui campioni è in corso. Non deve avere luogo gocciolamento, e le gocce nebulizzate devono essere piccole e uniformi (100-200 μm).

3. Prima di eseguire la deposizione, si pesa un campione di riferimento pulito (ad esempio una membrana di 100 mm x 100 mm). Si esegue la deposizione sul campione di riferimento fino a raggiungere una quantità di circa 1 g (in 5-10 s), cioè 10 mg cm^{-2} . E' pertanto necessaria una bilancia con divisione di lettura di almeno 0.01 g. Il campione deve essere sporcato in modo omogeneo, con grappoli di punti sporcati di diametro fra 1.5 e 3.0 mm. La procedura di calibrazione va eseguita all'inizio e ogni 5 campioni, controllando che la medesima quantità di mistura sia deposta su tutti i campioni. Per ridurre gli errori sperimentali, è consigliabile realizzare un apparato in modo tale da ottenere tempi di deposizione il più lunghi possibili (dell'ordine di grandezza di 10 s, per ridurre l'impatto del tempo di reazione dell'operatore. Il campione di riferimento deve essere pulibile per poter ripetere più volte l'operazione di calibrazione.

4. La deposizione viene eseguita sui campioni da sottoporre a prova. A seguito della deposizione i campioni vengono asciugati in stufa a 40°C. Occorre prestare attenzione a non causare movimenti della massa umida depositata spostando i campioni da sotto l'ugello alla stufa³. Occorre attendere che i campioni siano completamente asciutti prima di poter procedere con le misure.

Una volta terminata la procedura, il serbatoio, i tubi, e l'ugello devono essere puliti, ad esempio nebulizzando acqua deionizzata. In caso di intasamento dell'ugello, si può risolvere il problema immergendolo in acetone, e sottoponendolo a sonicazione.



Figura 6. a) Serbatoio utilizzato al Politecnico di Milano per la nebulizzazione; b) dettaglio del serbatoio utilizzato e valvole. Il serbatoio deve essere dotato di valvole di sicurezza e di un manometro.

3 Risultati e discussione

3.1 Risultati dell'esposizione naturale

Si presentano qui i risultati relativi alla misura di riflettanza solare spettrale di tutte le membrane esposte durante il primo anno di attività⁴ (Figura 8, Figura 9, Figura 10, e Figura 11). Per la maggior

³ Il metodo ASTM D 7897 propone l'utilizzo di una lampada a infrarossi per asciugare i campioni. Si è tuttavia notato che questo può causare un rammollimento anomalo di alcune membrane, e si è scelto di utilizzare un metodo alternativo che evitasse il rischio di surriscaldamento che membrane bianche, ad esempio, non subirebbero in opera.

⁴ I risultati ottenuti al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione erano già stati presentati durante il primo anno di attività, e le misure a 6 e 12 mesi erano state eseguite durante il secondo anno di attività.

parte delle membrane si è osservato che la stabilità è raggiunta dopo 18-24 mesi di esposizione (in alcuni casi già a 12 mesi di esposizione). In alcuni casi, le membrane più lisce presentano variazioni fra un intervallo di misura e l'altro.

Sia a Milano che a Roma, già dopo 3 mesi di esposizione (da metà aprile a metà luglio 2012), le tre membrane con ρ_{s0} maggiore di 0.80 perdono in media 0.13. A 6 mesi di esposizione, non sono state osservate variazioni rilevanti, mentre le maggiori perdite in ρ_s , subito dopo il decremento iniziale, sono state osservate durante il primo inverno, quando gli impianti di riscaldamento degli edifici sono in funzione. Durante il secondo inverno, non sono stati invece osservati decrementi della stessa entità. Anche le membrane con ρ_{s0} intermedia (0.30-0.60) presentano delle perdite rilevanti, anche se meno pronunciate che per le membrane ad alta riflettanza iniziale. Le membrane con bassa ρ_{s0} (0.20-0.30) presentano variazioni modeste durante tutto il periodo dell'esposizione, comprese fra 0.03 e 0.06. Considerando invece le sole membrane con ρ_{s0} maggiore di 0.65, la perdita massima (il massimo fra le differenze fra ρ_{s0} e i valori a T12, T18, T24, o T36) è in media pari a 0.24 a Milano, e 0.17 a Roma. Inoltre, solo prodotti con ρ_{s0} maggiore di 0.85 presentano ρ_s sempre maggiore di 0.60 presso entrambi i siti, mentre tutti i prodotti con ρ_{s0} maggiore di 0.75 hanno ρ_s sempre strettamente maggiore di 0.50 presso entrambi i siti. Sempre considerando il gruppo di membrane con $\rho_{s0} > 0.65$, la differenza fra la perdita massima di ρ_s a Roma e quella a Milano è pari a 0.07 (e compresa fra 0.03 e 0.11). Queste differenze sono probabilmente dovute ai maggiori livelli di inquinamento⁵ a Milano rispetto a Roma (il 95° percentile della concentrazione di PM10 su un periodo di un anno è pari a 98.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ a Milano, e pari a 49 a Roma $\mu\text{g m}^{-3}$). Ciò è dovuto a una minore velocità del vento a Milano rispetto a Roma (dove, rispettivamente, il valore medio annuale è pari a 1.5 e a 3.3 m s^{-1}), e a un maggiore utilizzo degli impianti di riscaldamento degli edifici (2404 gradi giorno a Milano, e 1415 a Roma).

Facendo una regressione sui dati sperimentali a 24 mesi è stato calcolato che una membrana con ρ_{s0} pari a 0.80, dopo due anni di esposizione, ha una riflettanza pari a 0.56 a Milano, e pari a 0.64 a Roma [70]. Ricalcolando le regressioni considerando i valori minimi raggiunti si ottiene che una membrana bianca con ρ_{s0} pari a 0.80 ha ρ_s pari a 0.55 a Milano e pari a 0.63 a Roma, mentre considerando la regressione sulla media dei minimi per i due siti si ottiene 0.59; quindi il quadro generale non cambia rispetto a quanto osservato negli anni precedenti. Invertendo la formula si potrebbe calcolare che per mantenere dopo tre anni ρ_s superiore ai limiti di legge per i cool roofs, 0.65, una membrana dovrebbe avere $\rho_{s0} > 0.89$, considerando la media dei due siti. Considerando invece le condizioni di Milano, questa dovrebbe avere $\rho_{s0} > 0.95$. Quest'ultimo, in particolare, non è chiaramente un valore plausibile per prodotti diversi da campioni di riferimento utilizzati in laboratorio ai fini di misure ottiche. Pertanto, se si desidera che un materiale per coperture resti un cool roof, anche a lungo termine, ai sensi delle recenti disposizioni di legge, sovradimensionare la riflettanza iniziale non può essere l'unica strategia. Negli U.S.A. il limite perché una copertura sia considerata un cool roof dopo invecchiamento è posto pari a 0.50. Con questo valore, sarebbe comunque necessario, considerando la regressione per Milano, optare per un prodotto con $\rho_{s0} > 0.72$.

⁵ I valori sono stati determinati considerando i dati rilevati dalla stazione di Città Studi Pascal, vicina al sito di esposizione a Milano (www.arpalombardia.it) e la media delle stazioni di Villa Ada e Cipro a Roma (www.arpalazio.it). In tutti i casi le stazioni di rilevamento sono poste all'interno di parchi urbani, e forniscono la linea di base delle concentrazioni di inquinanti.

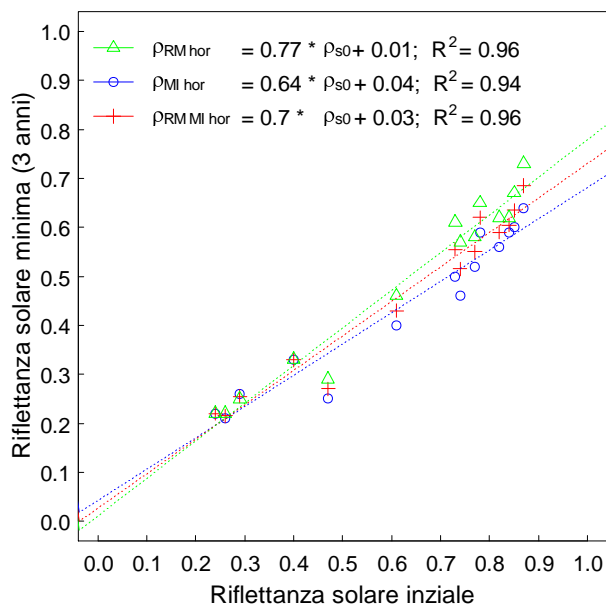


Figura 7. Regressione sui dati sperimentali relativi alle membrane esposte debolmente inclinate a Roma, Milano, e media dei due siti. La regressione è calcolata considerando il valore minimo raggiunto.

Dopo 3 anni solo una membrana in PVC grigia (m05) presenta ancora decrementi rilevanti sia a Milano che a Roma. In questo caso si nota l'evidente fotodegradazione dei campioni e la variazione della pendenza dello spettro anche oltre i 600 nm fino a 36 mesi. Per tutti gli altri prodotti si notano oscillazioni attorno al valore raggiunto a 18-24 mesi, oppure dei lievi decrementi. A Milano si è visivamente osservato, solo a 3 anni di esposizione, l'inizio di una proliferazione biologica per le membrane m07 (una poliolefina beige), m08 e m09 (due pitture bianche su membrana in bitume polimero). Per diverse membrane, invece, si osserva un recupero di riflettanza a 36 mesi di esposizione, rispetto a quanto osservato a 24 mesi. Questo è probabilmente dovuto all'anomalia climatica dell'estate del 2014, estremamente piovosa, con 600 mm di precipitazioni a Milano (misurate presso la stazione meteo del Politecnico) fra metà aprile e metà ottobre, mentre, usualmente, si hanno a Milano 800-900 mm di precipitazioni annue. Un altro fattore che ha probabilmente contribuito a un apparente recupero di riflettanza per alcune pitture su membrana in bitume polimero è il distacco di porzioni micrometriche di pittura (o sfarinamento). Questo è stato osservato in letteratura anche per altri materiali porosi, a matrice cementizia [71].

Eccettuato il caso di una membrana in bitume polimero (m11) con applicazione non uniforme del rivestimento, per tutte le membrane, la deviazione standard per le membrane esposte debolmente inclinate è inferiore a 0.035 a Milano e inferiore a 0.017 a Roma, mentre per le membrane nuove la deviazione standard è pari a 0.017.

Le membrane esposte inclinate di 45° a Milano presentano valori intermedi fra quelli misurati a Roma e quelli per Milano per l'esposizione orizzontale, tranne che per una membrana molto liscia (m09), che se inclinata mantiene la propria riflettanza iniziale. La seconda campagna di esposizione a Milano ha presentato risultati simili a quelli della prima, con differenze assolute fra una campagna di esposizione e l'altra inferiori a 0.04.

Le membrane con una finitura liscia e poco porosa (es.: m02, m04, and m06) subiscono perdite in riflettanza molto minori rispetto alle membrane rugose (es: m03, con finitura anti scivolo) o di alcune pitture su membrana in bitume polimero (es.: m08 e m09) dato che queste presentano

maggiore micro-porosità aperta superficiale. La membrana con pittura fotocatalitica bianca (m10) esposta orizzontalmente presenta effettivamente minori perdite rispetto a membrane non fotoattive simili (come m08 e m09) considerando il diverso valore di riflettanza iniziale (mentre per l'esposizione inclinata prevale l'effetto della pendenza), e presenta maggiori oscillazioni nel tempo. Nel dettaglio, considerando la media fra le perdite assolute massime di ρ_s osservate presso i due siti di esposizioni, le due membrane con pittura bianca non fotocatalitica (m08 con $\rho_{s0} = 0.82$, e m09 con $\rho_{s0} = 0.74$) perdono 0.23, mentre lo stessa membrana con pittura fotocatalitica (m10 con $\rho_{s0} = 0.78$) perde al massimo 0.16.

Concentrandosi sui dati spettrali si possono comprendere più nel dettaglio gli effetti di sporco e invecchiamento dovuto agli agenti atmosferici. Per le membrane bianche (es.: m03, m04, m08), la perdita in riflettanza è evidente soprattutto nel campo del visibile, e nella prima parte del vicino infrarosso. La forma degli spettri è alterata principalmente fra 420 e 600 nm, in ragione dell'irraggiamento UV, dell'azione dell'acqua, e del degrado fisico (Figura 8, Figura 9, e Figura 10). Le membrane granigliate, invece, non presentano forti variazioni rispetto al valore iniziale, già basso per i prodotti selezionati (Figura 11). L'invecchiamento, inoltre, causa un aumento dei pori aperti in superficie [72], che possono pertanto alloggiare una maggiore quantità di particolato, consentire un migliore ancoraggio della crosta formata dai depositi, riducendo ρ_s . Inoltre, anche senza l'adesione dello sporco, l'aumento della porosità può causare un decremento di ρ_s , poiché ρ_s decresce all'aumentare della rugosità, quanto più un materiale ha riflettanza intermedia [73].

Per le pitture bianche applicate in opera su membrana in bitume polimero (m08-m11), già dopo pochi mesi, è stato osservato un ingiallimento. Dopo 600-800 nm, dopo i primi 6-12 mesi di esposizione, nella maggior parte dei casi analizzati, la forma dello spettro è preservata, e questo è solo traslato verso il basso (Figura 8d-l). Fra 300 nm e 400 nm, così come fra 2200 e 2500 nm, invece, non si apprezzano variazioni rilevanti. Le membrane con alta riflettanza nel campo del vicino infrarosso (es.: m12, una pittura cool su bitume polimero, oppure la m07, una poliolefina beige) presentano perdite in media inferiori rispetto ad altri materiali con paragonabile ρ_s e maggiore riflettanza nel visibile. Questo accade poiché il coefficiente di assorbimento del black carbon decresce con la lunghezza d'onda [19, 38].

Infine, anche se i valori assoluti della riflettanza dopo esposizione ambientale sono diversi a Roma e a Milano, la forma degli spettri è la medesima. Ciò suggerisce che nelle aree metropolitane solo la quantità di deposizioni è differente, mentre gli ingredienti di base principali dei depositi, almeno di quelli inorganici, sono gli stessi (cioè i residui della combustione), come suggerito anche da Favez et al. [42]. C'è invece una differenza fra la forma dello spettro dei campioni esposti inclinati a 45° rispetto a quelli debolmente inclinati. Ciò è probabilmente dovuto al diverso impatto della radiazione UV, dello sporco, e dell'acqua. Per i campioni inclinati, il decremento fra 420 nm e 600 nm è infatti leggermente meno pronunciato che per i campioni debolmente inclinati.

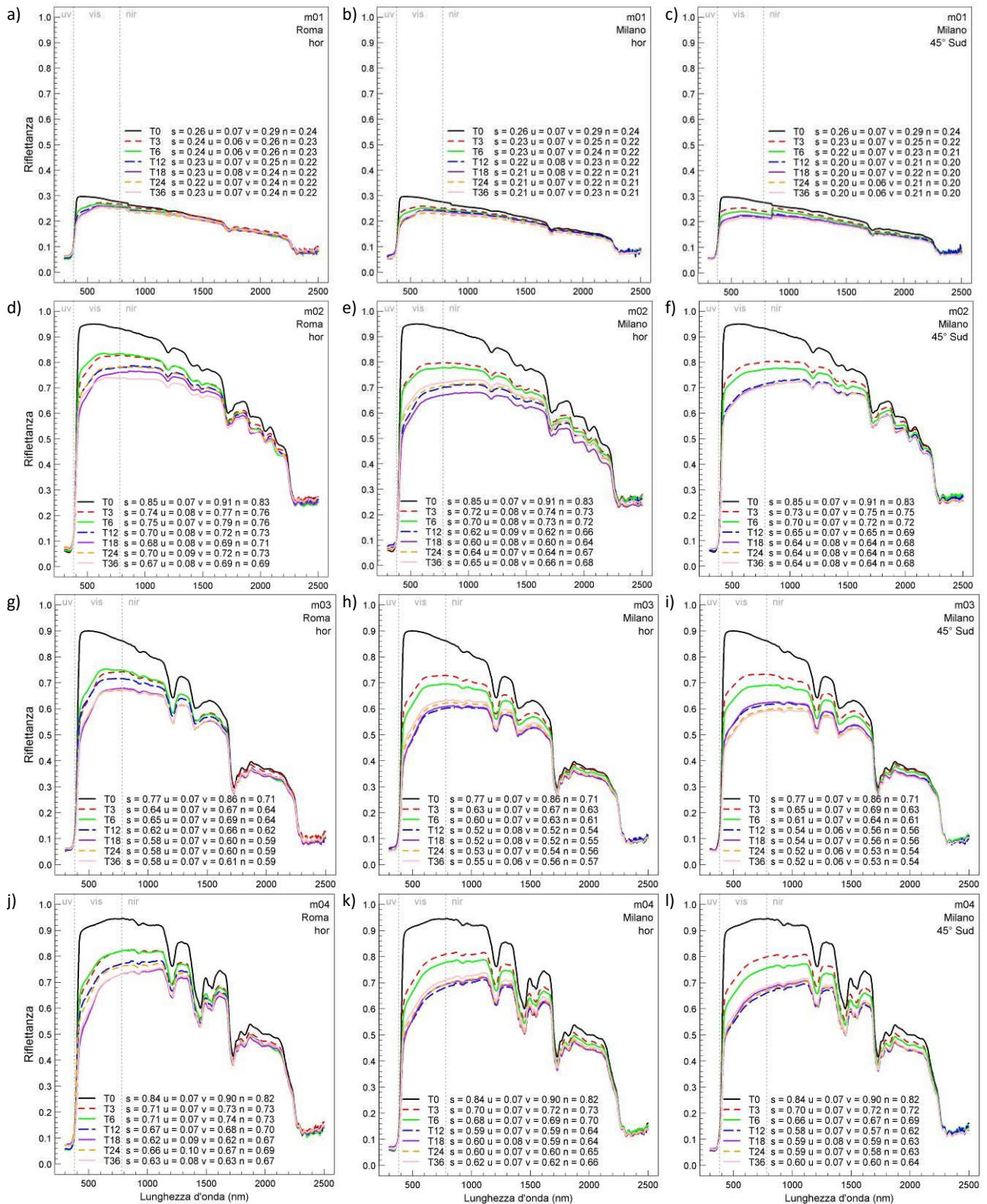


Figura 8. Riflettanza spettrale e valori a banda larga di riflettanza solare (s), ultravioletta (u), visibile (v), e nel nir (n) al tempo zero e dopo 3, 6, 12, 18, 24, e 36 mesi di esposizione orizzontale a Roma e Milano, e con inclinazione di 45° a Milano per una membrana grigia in poliolefine (m01), un rivestimento bianco applicato in stabilimento su poliolefina (m02), una membrana bianca antiscivolo in poliolefina (m03), e una membrana bianca liscia in poliolefina (m04).

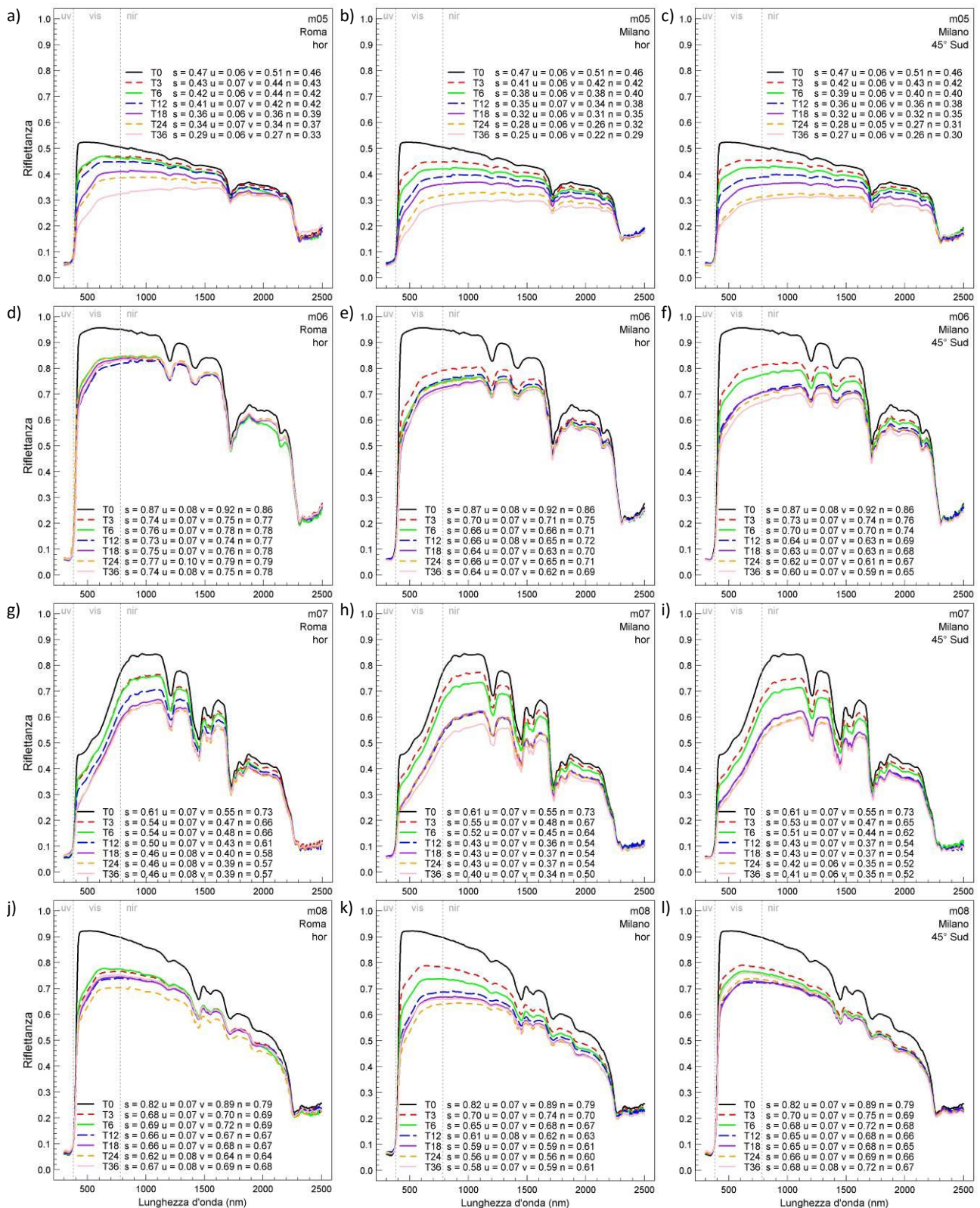


Figura 9. Riflettanza spettrale e valori a banda larga di riflettanza solare (s), ultravioletta (u), visibile (v), e nel nir (n) al tempo zero e dopo 3, 6, 12, 18, 24, e 36 mesi di esposizione orizzontale a Roma e Milano, e con inclinazione di 45° a Milano per una membrana grigia PVC (m05), una membrana bianca in PVC (m06), una membrana beige in poliolefina (m07), e una pittura bianca su una membrana in bitume-polimero (m08).

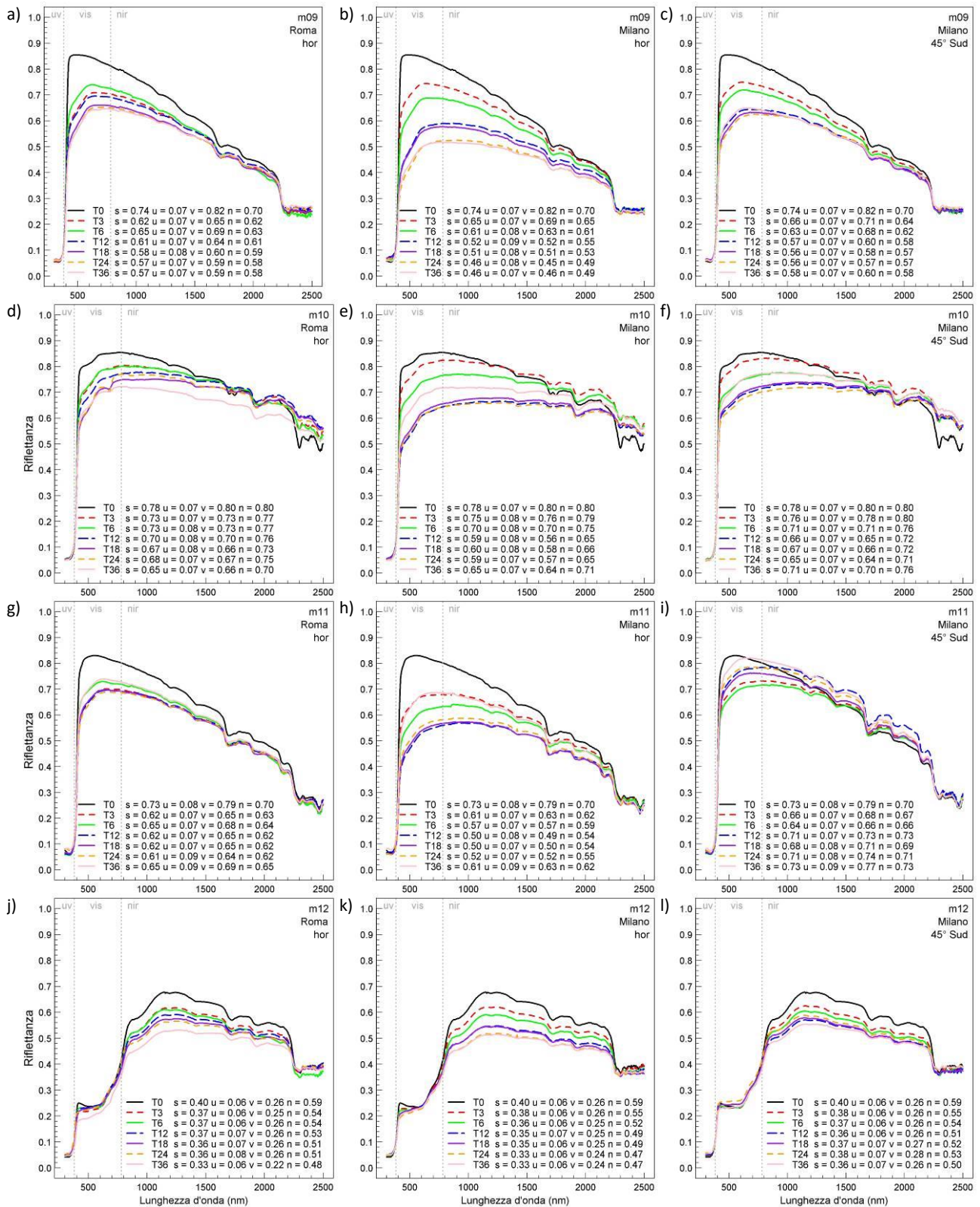


Figura 10. Riflettanza spettrale e valori a banda larga di riflettanza solare (s), ultravioletto (u), visibile (v), e nel nir (n) al tempo zero e dopo 3, 6, 12, 18, 24, e 36 mesi di esposizione orizzontale a Roma e Milano, e con inclinazione di 45° a Milano per una pittura bianca su una membrana in bitume-polimero (m09), una pittura bianca fotocatalitica su una membrana in bitume-polimero (m10), una pittura bianca liscia su una membrana in bitume-polimero (m11), e una pittura grigia "cool" su una membrana in bitume-polimero (m12).

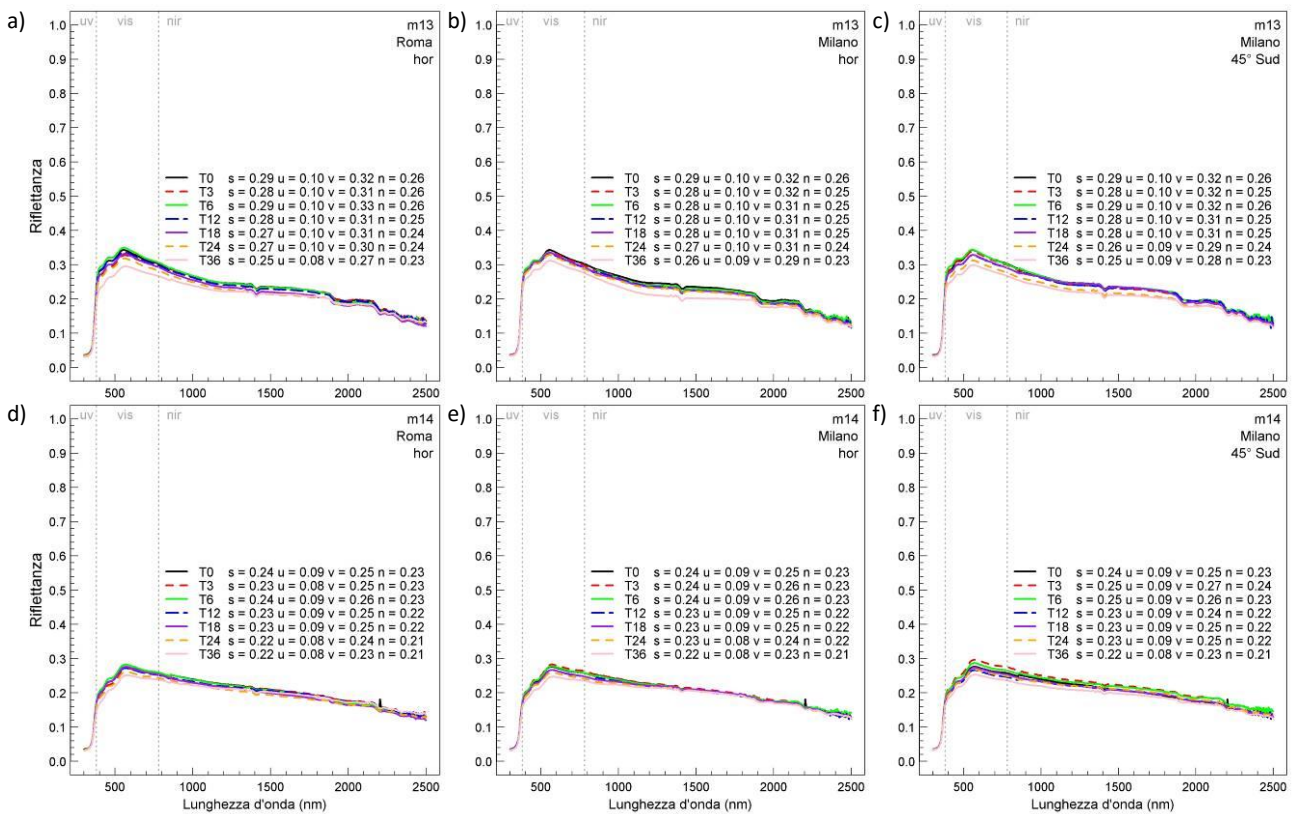


Figura 11. Riflettanza spettrale e valori a banda larga di riflettanza solare (s), ultravioletta (u), visibile (v), e nel nir (n) al tempo zero e dopo 3, 6, 12, 18, 24, e 36 mesi di esposizione orizzontale a Roma e Milano, e con inclinazione di 45° a Milano per una membrana granigliata fotocatalitica (m13), e una membrana granigliata standard (m14).

Per quanto concerne le tegole, dopo pochi mesi di esposizione si ha una perdita di ρ_s pari a 0.02-0.03, che è fuori dall'incertezza di misura, ma i decrementi maggiori si hanno dopo 18 mesi di invecchiamento naturale. Anche a Milano si osservano i medesimi andamenti (Figura 12). Alcune misure effettuate sui campioni esposti a Roma, a 24 mesi di invecchiamento, sono probabilmente affette da un eccessivo contenuto d'acqua delle tegole rimosse dai telai. I campioni sono infatti ritirati per le misure dopo una serie di eventi piovosi, e non erano probabilmente asciutti come in occasione delle altre misure. Ciò è supportato dai picchi di assorbimento a 1400 e 1800-1900 nm. Le tegole in terracotta rossa presentano una perdita nella prima parte dello spettro visibile, fino a circa 550 nm, mentre si ha una perdita consistente in riflettanza nella seconda metà del visibile, fra 550 e 780 nm. Le tegole in terracotta rivestite da una pittura bianca, invece, subiscono perdite rilevanti su tutto lo spettro visibile. Tanto per le tegole rosse quanto per le tegole bianche, la riflettanza non appare ancora stabile dopo tre anni di esposizione, ma ha pressoché lo stesso valore sia a Roma che a Milano. Berdahl et al. [37] riportano di valori stabili di riflettanza per scandole in legno per coperture dopo sei anni di esposizione. E' quindi probabile che siano necessari più anni di esposizione prima che sia raggiunto un valore rappresentativo del comportamento a lungo termine.

A 36 mesi di invecchiamento naturale le tegole rosse hanno subito una perdita in ρ_s pari a 0.12, mentre le tegole rivestite di bianco hanno perso in 0.20 ρ_s , o 0.17 se si esclude la misura delle tegole bianche rivolte a Nord, a Roma. E' interessante notare come, sia a Roma che a Milano, sia per le tegole rosse che per quelle bianche, la perdita nel vicino infrarosso sia dell'ordine di 0.15-0.16.

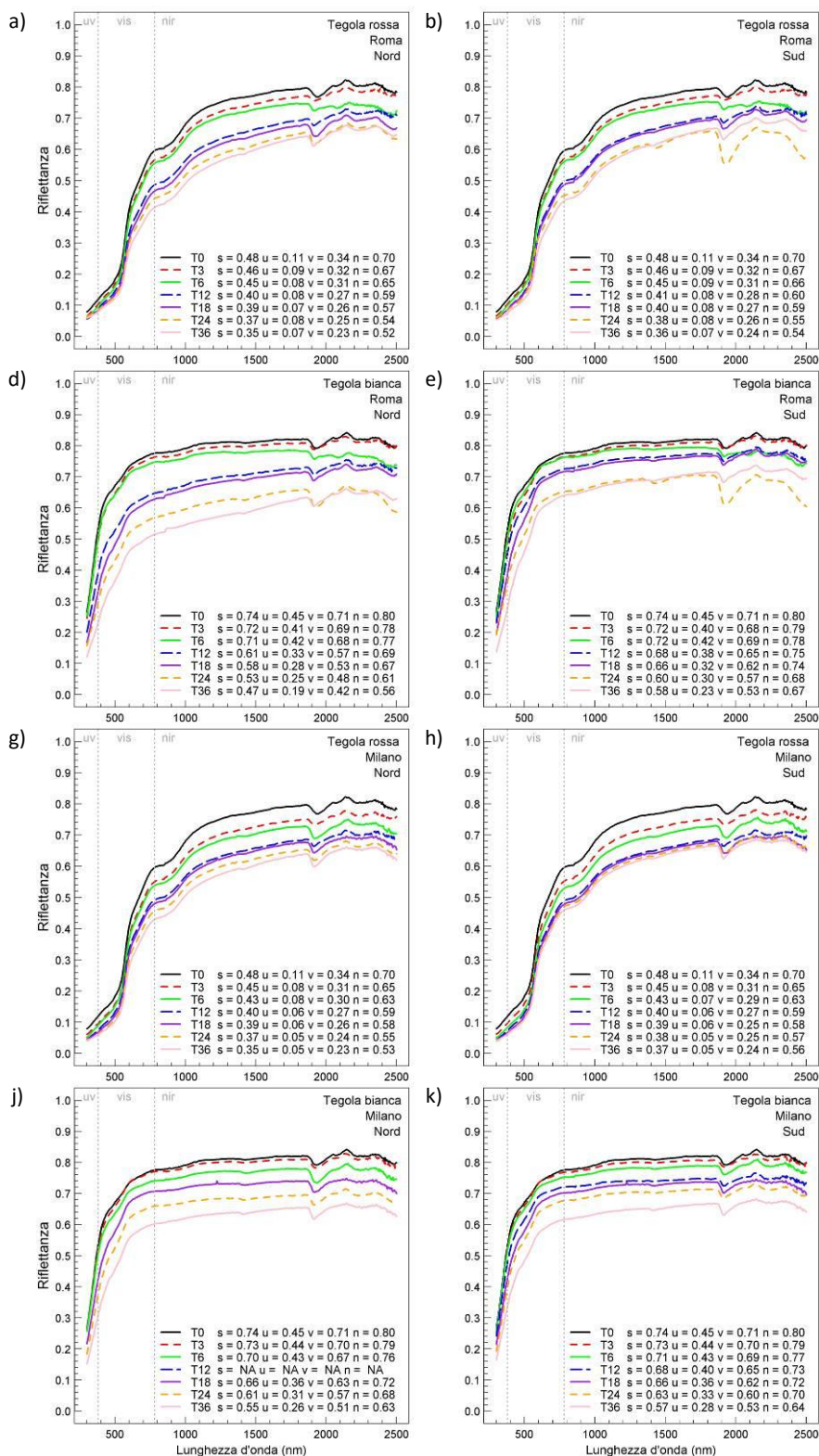


Figura 12. Riflettanza spettrale e valori a banda larga di riflettanza solare (s), ultravioletta (u), visibile (v), e nel nir (n) al tempo zero e dopo 3, 6, 12, 18, 24, e 36 mesi di esposizione a Roma di tegole in terracotta (a, b) e tegole in terracotta rivestite con una pittura bianca (c,d) e a Milano di tegole in terracotta (g,h) e delle stesse tegole rivestite con una pittura bianca (j,l).

L'impatto dell'invecchiamento delle membrane impermeabilizzanti sul fabbisogno energetico degli edifici è stato valutato per un centro commerciale di riferimento, mediante simulazioni numeriche

[70]. Questo edificio tipo è stato simulato nel contesto di Roma e di Milano, con una membrana bianca nuova ($\rho_s = 0.80$) oppure bianca invecchiata ($\rho_s = 0.64$ a Roma, e $\rho_s = 0.56$ a Milano). Per edifici iperisolati (es.: con 20 cm di isolante in copertura), la riduzione dei risparmi che si possono ottenere con un cool roof è ridotta di circa 1-2 kWh m⁻² per ogni 0.1 persi in riflettanza, mentre per edifici con coperture non isolate, ovviamente, la riduzione dei risparmi è maggiore, e pari a circa 16-20 kWh m⁻² a Milano, e di 19-23 a Roma kWh m⁻². Per tutti i casi considerati da Paolini et al. [70], l'invecchiamento produce in media una riduzione dell'ordine di grandezza del 15% dei risparmi ottenibili con un cool roof con riflettanza $\rho_{s0} = 0.80$. Inoltre, il decremento di riflettanza può produrre incrementi nel carico termico di picco per il raffrescamento anche di 2-3 kW. Oltre agli effetti sul fabbisogno energetico, l'invecchiamento di una membrana bianca per una copertura piana a Milano provocherebbe un aumento della temperatura superficiale esterna di picco anche di 16°C, rispetto alle temperature superficiali che si avrebbero per la membrana nuova. Ciò ha influenza sui cicli di dilatazione termica e quindi sullo stress termico della membrana impermeabilizzante, e quindi sulla sua vita utile attesa.

Per quanto concerne la variazione di ε , sono state eseguite le misure sui campioni esposti dopo per tre anni a Roma e Milano (Tabella 1). Per ciascuna delle tre repliche per condizione di esposizione è stata eseguita nel punto centrale. Sia a Roma che a Milano, sia per l'esposizione debolmente inclinata che per quella inclinata di 45° e rivolta a Sud si calcolano decrementi di ε per tutte le membrane incluse nello studio. In media il decremento è dell'ordine di 0.05 e comunque compreso fra 0.02 e 0.09.

Tabella 1. Emissività termica delle membrane impermeabilizzanti quando nuove (T0) e dopo tre anni di esposizione naturale: media dei valori per le membrane esposte debolmente inclinate a Roma e Milano (T36_{avg_MI-RO_{hor}}), a Roma (T36_{RO_{hor}}), a Milano (T36_{MI_{hor}}), e a Milano inclinate di 45° (T36_{MI₄₅}).

Prodotto	T0	T36 _{avg_MI-RO_{hor}}	T36 _{RO_{hor}}	T36 _{MI_{hor}}	T36 _{MI₄₅}
m01	0.89	0.80	0.79	0.81	0.79
m02	0.85	0.79	0.80	0.78	0.80
m03	0.90	0.83	0.81	0.84	0.82
m04	0.89	0.85	0.87	0.84	0.82
m05	0.84	0.81	0.81	0.82	0.83
m06	0.86	0.83	0.82	0.85	0.83
m07	0.90	0.84	0.81	0.86	0.83
m08	0.89	0.80	0.77	0.83	0.83
m09	0.90	0.82	0.81	0.82	0.83
m10	0.86	0.85	0.85	0.84	0.82
m11	0.87	0.78	0.75	0.82	0.82
m12	0.88	0.85	0.88	0.81	0.82
m13	0.90	0.86	0.86	0.87	0.85
m14	0.90	0.87	0.87	0.87	0.86

Per quanto concerne le tegole, non è stato possibile misurare l'emissività dei piccoli campioni esposti, che hanno area inferiore a quella di misura. I valori determinati al tempo zero sono sia per le tegole bianche che rosse pari a 0.86.

Va tenuto in considerazione che l'ordine di grandezza dell'errore per questo tipo di misure è dell'ordine di ± 0.02 [60], e che uno studio round robin in cui sono stati testati 14 prodotti da 4 laboratori, ha portato a una deviazione standard media pari a 0.01 unità di ε , e massima pari a 0.04 [59]. Si è pertanto ritenuto di non valutare le differenze di emissività termica fra procedura accelerata ed esposizione naturale, poiché ricadono all'interno dell'errore di misura, come nello studio di Sleiman et al. [63], in cui la differenza fra esposizione accelerata e naturale è in media pari a 0.02, con uno scarto quadratico medio pari a 0.027.

3.2 Variabilità dei risultati ottenibili con un programma d'esposizione naturale

Per valutare la ripetibilità dei risultati ottenibili con un programma di esposizione naturale, 3 repliche per 8 membrane impermeabilizzanti esposte durante il primo anno di attività (a metà aprile 2012) sono state esposte debolmente inclinate a Milano anche l'anno successivo (inizio maggio 2013), e la loro riflettanza è stata misurata dopo 3, 6, e 12 mesi. Per operare un confronto fra valori ottenuti da campagne di esposizione della stessa durata, sono stati calcolati i valori minimi di ρ_s in 24 mesi di esposizione a Roma, e a Milano per l'esposizione debolmente inclinata del 2012 e del 2013, e per l'esposizione con inclinazione di 45° rivolta a Sud. In seguito, per ciascun materiale e condizione di esposizione, si è calcolato lo spettro differenza fra lo spettro al tempo zero e lo spettro del materiale invecchiato avente minima ρ_s , e sono stati calcolati i valori a banda larga (solare, uv, visibile, e nir) per lo spettro differenza.

Le differenze più rilevanti fra diverse campagne di esposizione e diverse condizioni di esposizione di una stessa campagna sono concentrate nel range del visibile, e soprattutto fra 400 e 600 nm (Figura 13). Le differenze sono massime per materiali lisci e a bassa porosità superficiale (m06 in Figura 13g, e m11 in Figura 13k) e per materiali sulla cui superficie si ha un principio di proliferazione biologica (m09 in Figura 13j). Le differenze sono più contenute nel vicino infrarosso in ragione anche di un minore impatto dell'invecchiamento in questa regione spettrale che nel campo del visibile. Infatti, nel visibile, per tutte le membrane impermeabilizzanti considerate, il decremento massimo di riflettanza è oltre 0.30 per i prodotti ad alta ρ_{s0} , e pari a 0.37 in un caso. Nel vicino infrarosso, invece, il decremento massimo è pari a 0.22. Considerando i dati nel loro insieme si osserva come le differenze maggiori, per la maggior parte dei prodotti, siano fra un sito di esposizione e l'altro, mentre l'insieme dei prodotti esposti presso uno stesso sito presenta circa un range interquartile paragonabile di variazioni di ρ_s determinate con un'esposizione debolmente inclinata o inclinata di 45°, oppure iniziando l'esposizione in anni diversi (Figura 14). Assumendo come riferimento l'esposizione debolmente inclinata di Milano iniziata nel 2012, l'esposizione di Roma ha consentito di misurare valori da 0.03 a 0.12 più alti di ρ_s (con mediana 0.07), mentre l'esposizione inclinata di 45° ha messo in evidenza differenze consistenti solo per prodotti molto lisci. Infine, confrontando i risultati dell'esposizione orizzontale a Milano iniziata nel 2012 con quella iniziata nel 2013 si calcolano differenze da -0.037 a +0.07 per il 90% della popolazione, con una mediana pari a zero.

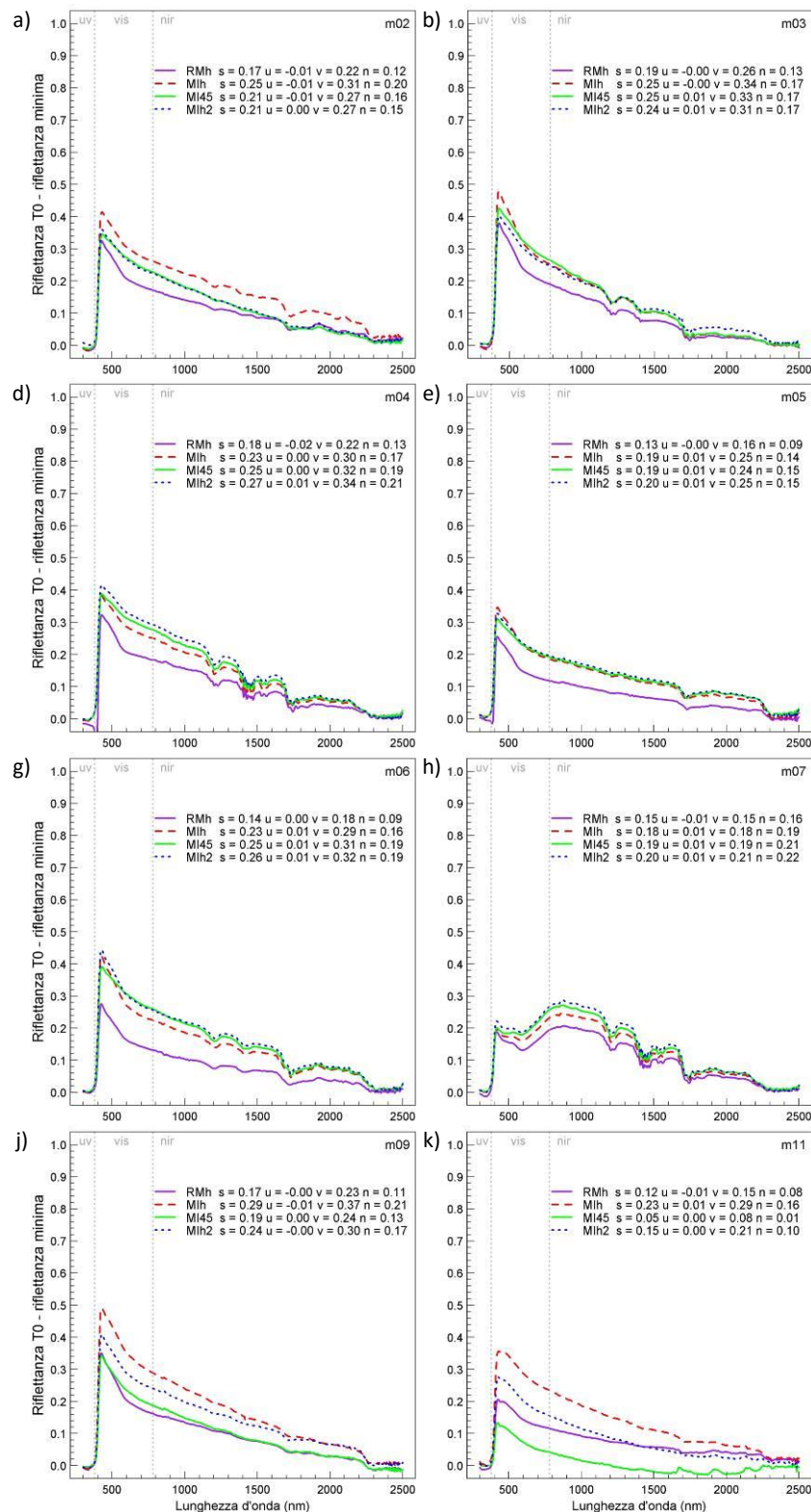


Figura 13. Differenza fra la riflettanza solare spettrale al tempo zero e la riflettanza solare spettrale minima per ogni condizione di esposizione: a Roma orizzontale (RMh), a Milano orizzontale (MIh), a Milano inclinata di 45° e rivolta a Sud (MI45), e a Milano orizzontale durante la seconda campagna (MI13). I valori di riflettanza solare (s), ultravioletta (u), visibile (v), e nel nir (n) sono calcolati per la curva differenza. Gli spettri sono relativi a un rivestimento applicato in stabilimento su FPO (m02), una membrana bianca in FPO antiscivolo (m03), una bianca in TPO (m04), una grigia in PVC (m05), una bianca in PVC (m06), una beige in TPO (m07), una pittura bianca diffondente (m09) e una liscia (m11) su membrana in bitume polimero.

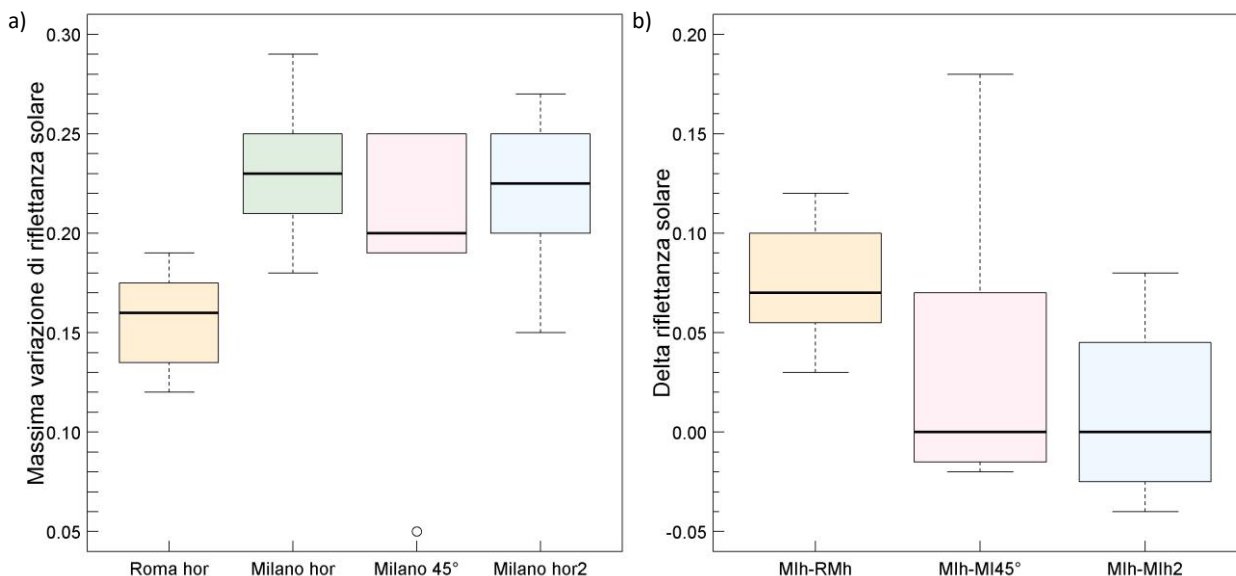


Figura 14. Differenza fra il valore di riflettanza solare misurato al tempo zero e il minimo di riflettanza solare ottenuto durante 2 anni di esposizione debolmente inclinata a Roma e Milano, di esposizione inclinata di 45° a Milano e durante una seconda campagna di esposizione debolmente inclinata a Milano. I dati fanno riferimento alle membrane m02-m07, m09 e m11, incluse in tutte le campagne di esposizione.

3.3 Risultati dell'esposizione accelerata e confronto con l'esposizione naturale

La procedura di esposizione accelerata è stata eseguita per entrambe le tegole in terracotta e per 12 delle 14 membrane che erano state incluse nel programma di esposizione naturale (Figura 15, Figura 16, e Figura 17). Non è stato possibile operare il confronto per tutti i prodotti perché una pittura colorata su membrana in bitume polimero (m12) non era disponibile al momento dell'esecuzione delle prove. Inoltre, le repliche realizzate per una seconda fornitura di una pittura bianca liscia su membrana in bitume polimero (m11) presentano spettri consistentemente diversi rispetto a quelli dei campioni al tempo zero utilizzati per l'esposizione naturale, ed è stata quindi scartata perché cambiava la rugosità superficiale, la pendenza dello spettro (oltre a ρ_{s0}), e di fatto si trattava di un altro prodotto, rendendo impossibile un confronto. Anche due delle pitture bianche su membrana in bitume polimero incluse nello studio (m09 e m10) presentano valori diversi rispetto ai campioni utilizzati per l'esposizione naturale, e misurati al tempo zero (come si nota in Figura 16c,e confrontando le curve T0 e T0a). Tuttavia queste differenze non indicano un comportamento radicalmente diverso del materiale, poiché la forma dello spettro è la medesima così come le caratteristiche superficiali, e si è deciso di non scartare i risultati relativi a questi campioni. Pertanto, in questi due casi in cui lo spettro al tempo zero dei campioni esposti nel 2012 e quello dei campioni prima dell'esposizione accelerata, la prestazione della procedura accelerata è stata valutata confrontando le differenze fra i campioni invecchiati e quelli al tempo zero (Figura 16d,f). Queste differenze sono dovute al fatto che la riflettanza spettrale solare di questo genere di rivestimenti può variare a seconda del lotto di produzione dei campioni (nella realtà verrebbero applicate in opera). Non è stato possibile eseguire l'esposizione accelerata sui campioni dello stesso lotto dell'esposizione naturale riservati tre anni prima allo scopo, come per le altre membrane, poiché anche in laboratorio questi materiali tendono a ingiallire e a degradarsi leggermente (si ritiene per effetto di ossigeno e ozono).

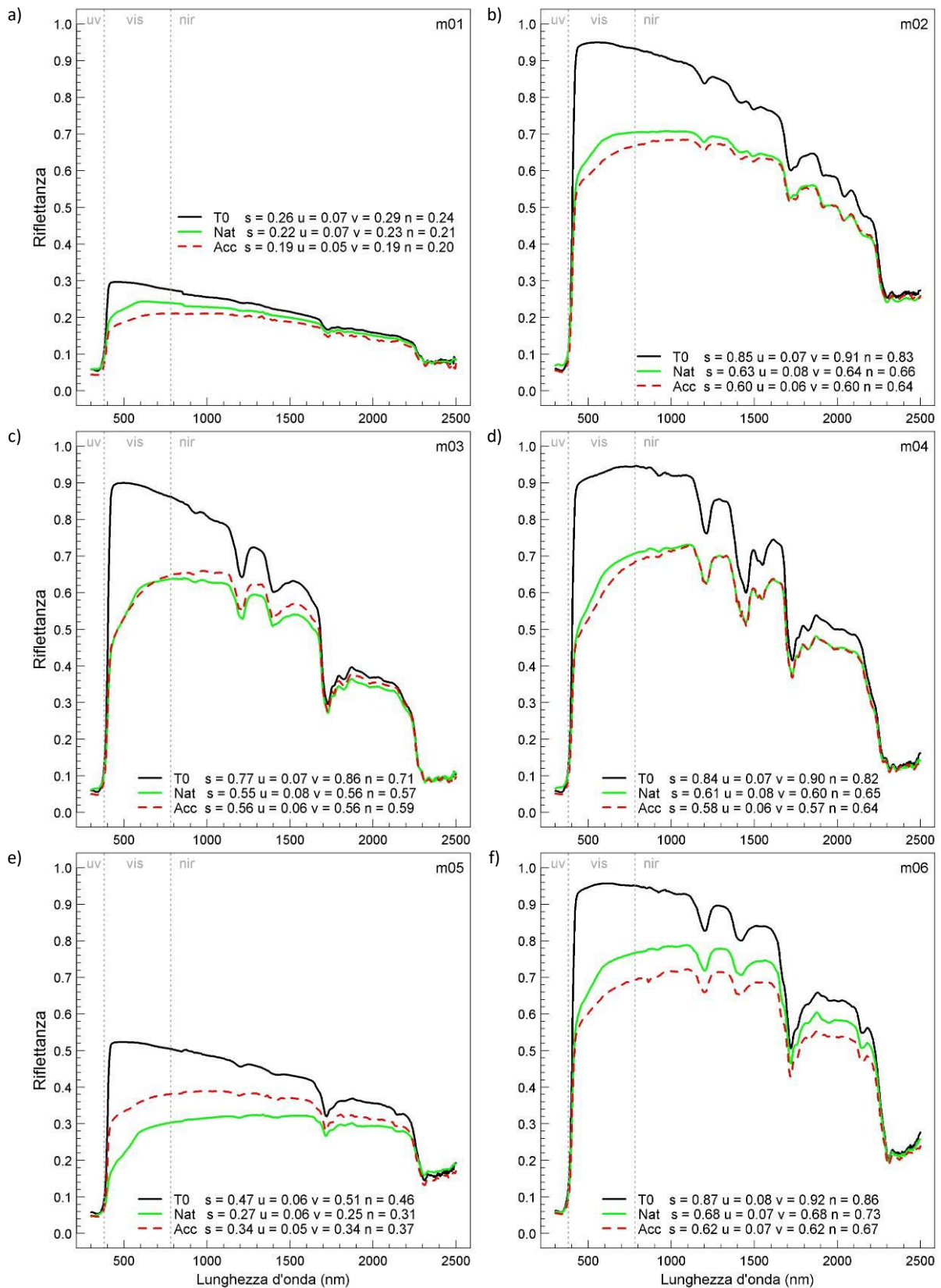


Figura 15. Riflettanza spettrale e valori a banda larga di riflettanza solare (s), ultravioletta (u), visibile (v), e nel nir (n) al tempo zero, e dopo esposizione naturale (media dei valori minimi misurati a Roma e Milano), e accelerata per una membrana grigia in FPO (a), un rivestimento bianco applicato in stabilimento su FPO (b), una membrana bianca in FPO antiscivolo (c), una membrana bianca liscia in TPO (d), una membrana grigia in PVC (e), e una bianca in PVC(f).

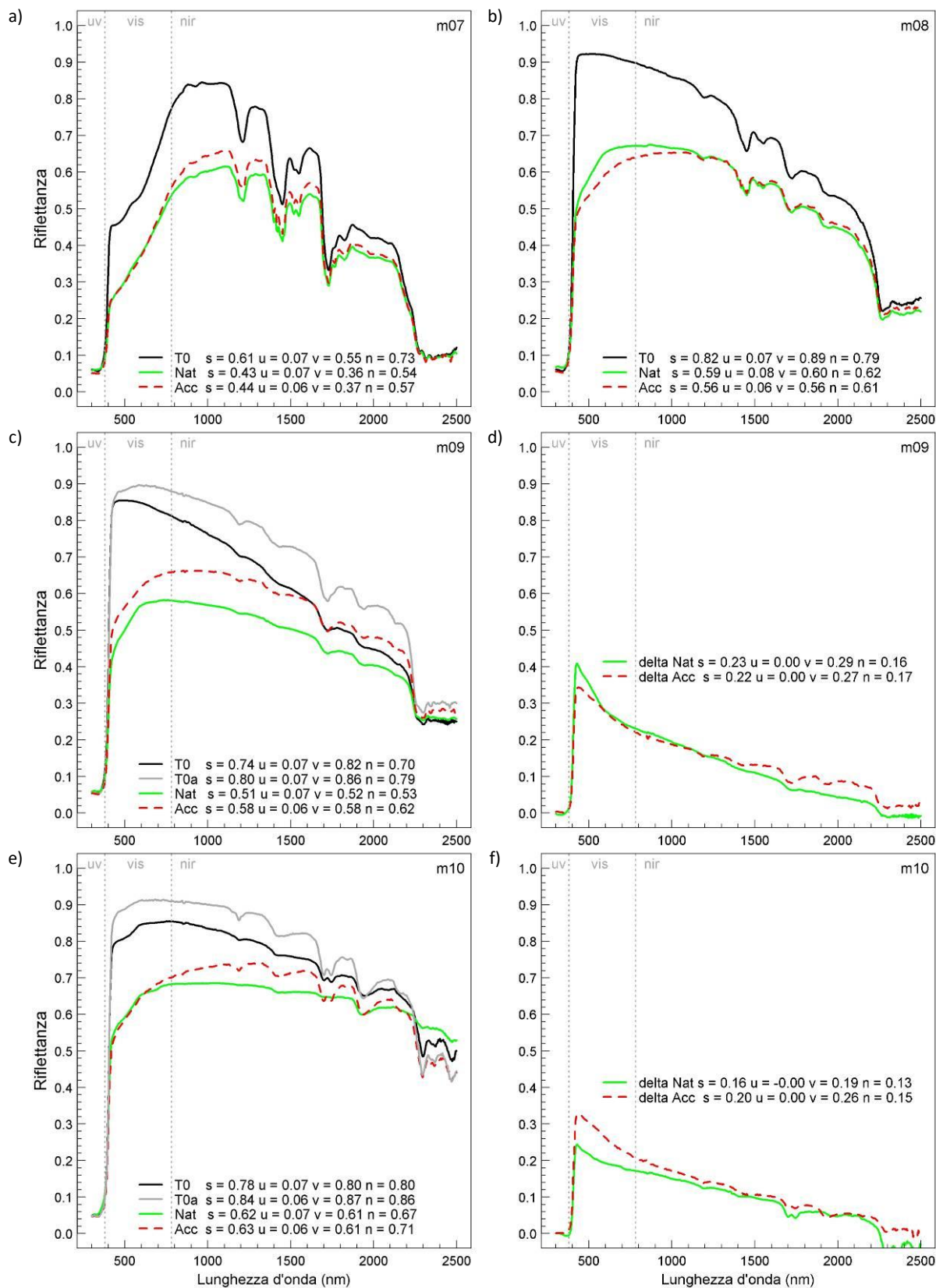


Figura 16. Riflettanza spettrale e valori a banda larga di riflettanza solare (s), ultravioletta (u), visibile (v), e nel nir (n) al tempo zero, e dopo esposizione naturale (media dei valori minimi misurati a Roma e Milano), e accelerata per una membrana beige in TPO (a), una pittura bianca su bitume-polimero (b), una seconda pittura bianca su bitume polimero (c) e perdita assoluta rispetto al tempo zero (d), una pittura bianca fotocatalitica su bitume polimero (e), e perdita assoluta rispetto al tempo zero (f). T0a sono i valori al tempo zero dei campioni per l'esposizione accelerata.

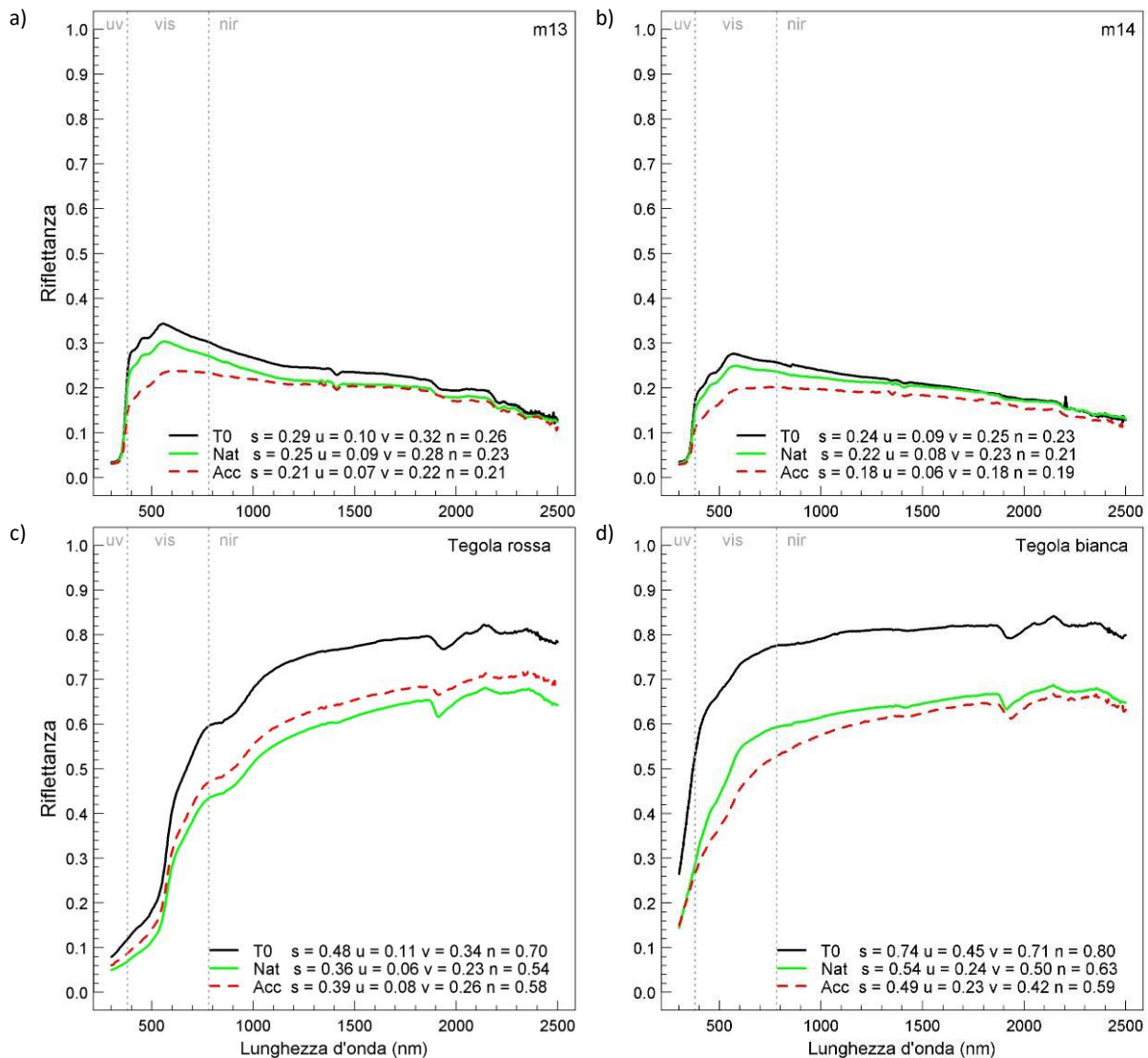


Figura 17. Riflettanza spettrale e valori a banda larga di riflettanza solare (s), ultravioletta (u), visibile (v), e nel nir (n) al tempo zero, e dopo esposizione naturale (media dei valori minimi misurati a Roma e Milano), e accelerata per una membrana granigliata fotocatalitica (a), una membrana granigliata standard (b), una tegola in terracotta rossa (c), e una tegola in terracotta rossa rivestita con una pittura bianca (d).

Il metodo accelerato offre buone prestazioni confrontato rispetto all'esposizione naturale di materiali per coperture ad alta ρ_{s0} (Figura 15b,c,d e Figura 16b,d,f), e riesce a riprodurre anche l'effetto dello sporco su materiali selettivi con spettri complessi, come nel caso della membrana beige in TPO (Figura 16a).

Solo per una membrana bianca in PVC (m06) si ha un forte scostamento, ma è probabile che in questo caso sia il dato dell'esposizione naturale a Roma a rappresentare un outlier (Figura 15f). Infatti, per tutte le altre membrane la differenza fra i valori ottenuti con l'esposizione di Roma e quella di Milano è dell'ordine di 0.05-0.06, mentre per la sola membrana m06 per i soli campioni della membrana m06 esposti a Roma sono stati ottenuti valori di ρ_s di circa 0.10 maggiori che per i campioni esposti a Milano.

Il metodo accelerato offre una buona prestazione in termini assoluti, ma meno buona in termini relativi per quanto concerne i campioni a bassa ρ_{s0} , dato che ne sovrastima la perdita in riflettanza, specie nel campo del visibile, come per una membrana grigia in FPO (Figura 15a) e le due membrane granigliate (Figura 17a,b). Anche se gli scostamenti fra naturale e accelerato in termini di ρ_s sono dell'ordine di 0.03-0.04, la sovrastima sistematica dello sporco da parte della procedura accelerata è importante in relazione al basso valore iniziale. Va comunque tenuto in considerazione che lo scopo principale della procedura è di valutare lo sporco di prodotti per coperture ad alta ρ_{s0} , poiché si è visto con l'esposizione naturale che i materiali con ρ_{s0} dell'ordine di 0.20-0.25 subiscono variazioni modeste, dell'ordine di 0.04, sia per prodotti lisci che per prodotti con finitura rugosa (m02 e m03 in Figura 18).

In un caso, quello della membrana grigia in PVC (m05) si è nettamente al di fuori del campo di applicazione della procedura accelerata. Infatti, per questo campione l'esposizione naturale evidenzia un consistente degrado fisico-chimico che prosegue e non ha raggiunto una stabilità anche dopo 3 anni di invecchiamento naturale (Figura 15e, e m05 in Figura 18). La procedura accelerata, invece, ha lo scopo di riprodurre gli effetti dello sporco e dell'esposizione agli agenti atmosferici di materiali che non subiscano rapidi e rilevanti processi di degradazione fisica. In particolare, pochi giorni di esposizione accelerata in camera climatica non possono riprodurre l'azione della radiazione ultravioletta e del gelo-disgelo (in particolare) durante anni di invecchiamento naturale. Per quanto concerne l'invecchiamento UV, ad esempio, l'EOTA indica come durate tipiche di un'esposizione accelerata 500, 1000, o 2000 ore [67]. Questa procedura accelerata è stata concepita per consentire l'esecuzione in meno di una settimana, al fine di fornire un valore provvisorio di ρ_s , in attesa o in assenza dei risultati di un'esposizione naturale.

Per altri materiali, come alcune delle pitture su membrane in bitume polimero, grazie all'esposizione naturale si è osservato che a causa dell'invecchiamento si ha delaminazione, sfarinamento e in generale si hanno distacchi del materiale a cui il particolato era vincolato, lasciando scoperta una porzione di materiale vergine al di sotto, e dando luogo quindi a un apparente recupero di riflettanza. Questo fenomeno è osservato in misura limitata per alcune delle pitture su membrane in bitume polimero incluse in questo studio, ma accade in misura consistente per altri materiali porosi analizzati in letteratura [71]. La delaminazione, o più in generale il degrado fisico, come meccanismo di autopulizia non è pertanto riproducibile con la procedura accelerata, e non è nemmeno desiderabile, poiché dà probabilmente luogo a un rilascio di nanopolveri in ambiente (la cui consistenza e eventuale pericolosità deve comunque essere valutata, ed è al di fuori degli obiettivi della presente ricerca). Per alcune delle pitture bianche su membrane in bitume polimero (m), si osserva una contenuta sovrastima della perdita di riflettanza, specie nel campo del visibile, da parte della procedura accelerata (Figura 16b,f). Anche se gli scostamenti fra risultati della procedura accelerata e dell'esposizione naturale sono in questo caso modesti, si ritiene utile questo risultato ai fini dell'individuazione dei limiti di applicazione della procedura. Per alcune di queste pitture su membrana in bitume polimero (m08 e m09) e per una membrana in poliolefina beige (m07) si è notato un principio di proliferazione biologica, manifestatosi solamente a Milano alla fine del terzo anno di esposizione (es.: m09 in Figura 18). Il metodo accelerato non consente di riprodurre lo sviluppo di alghe funghi e altre specie biologiche sulla superficie dei campioni, ma la presenza dell'acido umico nella misura consente probabilmente di simulare in modo attendibile la decomposizione del materiale di origine organico che si depone sulle coperture. Pertanto, per i contesti considerati e per la durata

dell'esposizione naturale assunta come termine di paragone, non sembra che l'assenza di una coltura biologica accelerata abbia causato errori significativi, visto il buon raccordo fra naturale e accelerato anche per i materiali su cui a Milano si è notato un principio di crescita biologica (Figura 16a,b,d).

Infine, considerando le tegole in terracotta, va precisato che per queste non è stato ancora raggiunto un valore stabile di ρ_s con l'esposizione naturale (Figura 12). Pertanto i risultati, comunque soddisfacenti, dell'applicazione del metodo a tegole in terracotta per coperture andranno ulteriormente confrontati con dati forniti da ulteriori misure da eseguirsi in futuro (Figura 17c,d).




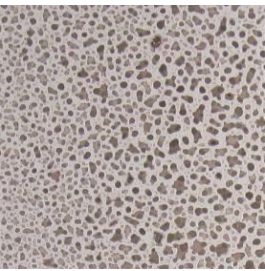







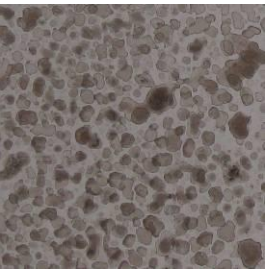




Materiale	T0	T24 hor Milano	T36 hor Milano	Accelerato
m02				
m03				
m05				
m09				

Figura 18. Confronto fra i campioni nuovi, invecchiati naturalmente a Milano dopo due e tre anni di esposizione (debolmente inclinata), e sottoposti alla procedura accelerata per una selezione dei campioni sottoposti a prove: un rivestimento bianco liscio applicato in stabilimento su TPO (m02).

Considerando i risultati nel loro insieme, ed escludendo la membrana m05 che presenta un consistente degrado fisico precoce, lo scostamento mediano fra esposizione accelerata e naturale

è pari a 0.030 e lo scarto quadratico medio è pari a 0.035 in ρ_s , con 5° percentile pari a 0.01 e 95° percentile pari a 0.055.

Il metodo originariamente sviluppato dal LBNL, costruito sulla base dei dati relativi a 19 prodotti per coperture, e testato con dati di 25 altri prodotti, presenta uno scarto quadratico medio rispetto alla media dei valori ottenuti presso i tre siti del CRRC pari a 0.028 [52], e per 20 dei 25 prodotti testati (alcuni presentavano degrado fisico non riscontrato con l'esposizione accelerata) lo scostamento rispetto all'esposizione naturale era inferiore o uguale a ± 0.03 .

La procedura descritta nel presente studio presenta scostamenti leggermente superiori rispetto all'esposizione naturale in confronto agli scostamenti della procedura ASTM D 7897 rispetto all'invecchiamento naturale negli USA. Ciò è verosimilmente dovuto al fatto che nel presente studio l'irradiazione viene eseguita due volte, e che la riduzione della riflettanza per i materiali ad alta albedo è maggiore nei siti di esposizione utilizzati come riferimento in questo studio.

Questi risultati sono comunque passibili di miglioramento, e una migliore valutazione della prestazione del metodo accelerato potrebbe essere ottenuta dal confronto dei risultati per un numero maggiore di materiali, da campagne di esposizione naturale future.

In un esperimento preliminare durante il quale è stata eseguita l'irradiazione di 200 g m^{-2} in due sessioni consecutive (asciugando il campione in stufa) senza sottoporre i campioni a cicli UV e di alta umidità fra un'irradiazione e l'altra, si è visto che il metodo sembra consentire di riprodurre i risultati in modo costante, indipendentemente anche dalla cella climatica utilizzata. Lo scarto quadratico medio calcolato fra le due campagne di invecchiamento accelerato è pari a 0.048, relativo però a soli 5 materiali (m02, m03, m05, m06, e m07). Si è scelto di separare l'irradiazione in due sessioni per introdurre un ulteriore ciclo in camera climatica che migliora leggermente la simulazione dell'invecchiamento dei polimeri e perché consente al deposito di aderire meglio e meglio distribuirsi sulla superficie del campione (Figura 19).

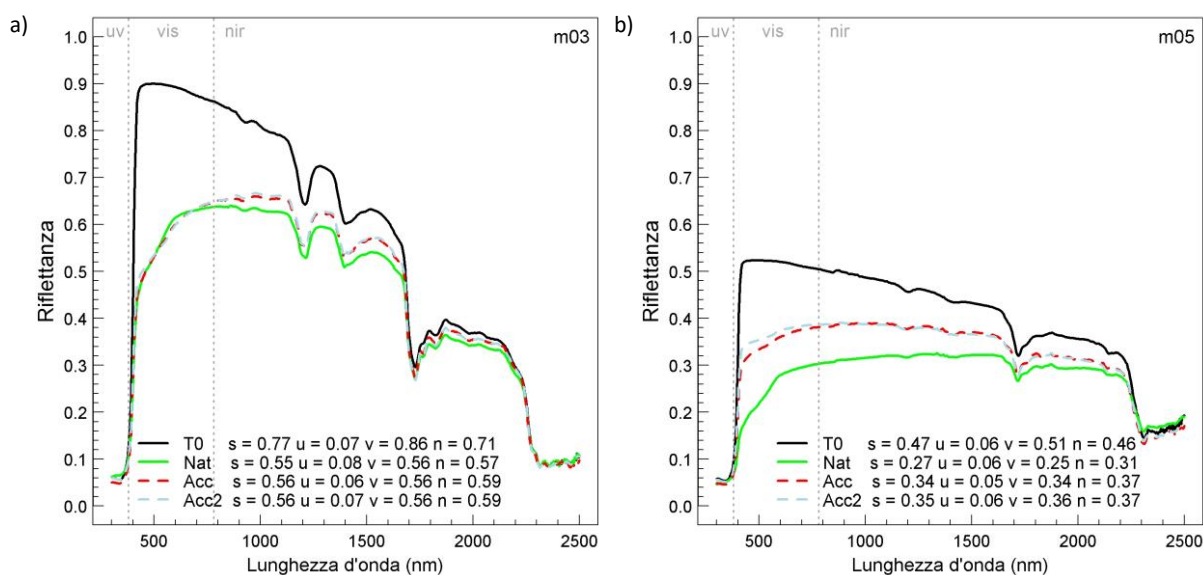


Figura 19. Riflettanza spettrale e valori a banda larga di riflettanza solare (s), ultravioletta (u), visibile (v), e nel nir (n) al tempo zero, e dopo esposizione naturale (media dei valori minimi misurati a Roma e Milano), e accelerata con $2 \times 100 \text{ g m}^{-2}$ (2 giorni totali in camera climatica) e accelerata con 200 g m^{-2} (3 giorni totali in camera climatica) per una membrana bianca antiscivolo in FPO (a), e una membrana grigia in PVC (b).

Questo ha poca influenza per materiali che non subiscono degradi rilevanti, mentre già produce qualche piccola variazione nel visibile per materiali soggetti a rilevante degrado chimico-fisico con un'esposizione prolungata. Infatti, con il ciclo utilizzato, 16 ore in più di irraggiamento UVA non cambiano il quadro generale.

Per valutare se questi scostamenti sono accettabili o meno, occorre anche considerare gli scostamenti fra i risultati ottenuti con diversi programmi di esposizione accelerata, diverse inclinazioni e diversi siti di esposizione, pertanto valutando la rappresentatività di un'esposizione naturale.

3.4 Limiti di validità della procedura accelerata

A seguito del confronto fra i risultati ottenuti con l'esposizione naturale con quelli ottenuti grazie all'esposizione accelerata, è possibile identificare i limiti di validità e applicazione della procedura accelerata sviluppata in questo studio. Pertanto la procedura sviluppata è valevole ai fini della valutazione dell'impatto di sporco e esposizione agli agenti atmosferici per:

- Prodotti per coperture delle categorie merceologiche considerate nel presente studio. Non sono state incluse piastrelle in ceramica, o ingobbi con rivestimento ceramico, o coperture in metallo. Queste ultime non sono state incluse nel programma di esposizione naturale perché, per lamiere grecate, ad esempio, lo sporco si concentra negli angoli e la misura della riflettanza di un punto sul dorso non sarebbe rappresentativa (oltre al fatto che non si può considerare l'albedo di una lastra come rappresentativa dell'albedo di una lamiera grecata).
- Contesti di impiego intermedi fra quelli considerati, cioè i contesti urbani di Roma e Milano. Nel presente studio non sono stati considerati contesti industriali altamente inquinati, alpini, o rurali.
- Materiali che subiscono un rilevante degrado chimico-fisico in tempi brevi sia in termini di invecchiamento UV, che di aumento della porosità per gelo-disgelo, o distacchi che possono dare luogo a un apparente recupero di riflettanza. La procedura, per essere rapida ed economica, non può consentire di valutare la durabilità e la vita utile dei materiali e componenti edilizi. Per questi scopi può invece essere incorporata in programmi di invecchiamento accelerato più lunghi.
- Non consente al momento di identificare in modo netto le differenze che invece emergono con l'esposizione naturale fra materiali standard e materiali funzionalizzati, come i materiali fotocatalitici, anche in questo caso in ragione della limitata esposizione UV, o superidrofobici se inclinati, poiché l'irrorazione della mistura per lo sporco accelerato avviene con il campione posizionato orizzontalmente.
- La procedura, nella sua versione attuale, non consente di riprodurre gli effetti di una rilevante proliferazione biologica. L'acido umico nella mistura che viene irrorata sui campioni consente di simulare gli effetti della decomposizione del materiale organico sulla superficie dei materiali per coperture (ad esempio foglie). Tuttavia il metodo non include una procedura di coltura biologica, che può essere rilevante tenere in considerazione, specie in contesti rurali o marini in climi caldo umidi.
- Tuttora, la procedura accelerata non consente di valutare come significativi scostamenti fra due prodotti differenti inferiori a circa 0.04. Risulta pertanto ancora irrinunciabile eseguire l'esposizione naturale, anche breve, per orientare uno sviluppo di prodotto, a meno di non incorporare la procedura qui descritta in un programma di invecchiamento accelerato di durata maggiore.

3.5 Ripetibilità e riproducibilità del metodo

Uno studio interlaboratorio (round robin) guidato dal Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, California, USA) a cui hanno partecipato 9 laboratori internazionali indipendenti ha valutato la ripetibilità e riproducibilità del metodo descritto nella ASTM D 7897 [53]. Lo studio round robin è stato condotto secondo la norma ASTM E 691 [74], che descrive le procedure per condurre uno studio interlaboratorio, e che richiede un minimo di 6 laboratori indipendenti.

La ripetibilità descrive la variabilità fra risultati ottenuti con prove eseguite indipendentemente con la stessa procedura, da parte dello stesso laboratorio, su campioni identici. La riproducibilità descrive invece la variabilità fra risultati ottenuti con prove eseguite indipendentemente con la stessa procedura, su campioni identici da parte di laboratori diversi.

Per 12 prodotti per coperture e 4 campioni per ciascun prodotto, è stata determinata una ripetibilità media pari a 0.036 (minimo 0.017 e massimo 0.059), e una riproducibilità media pari a 0.057 (minimo 0.030 e massimo 0.139). La deviazione standard delle misure relative alla riproducibilità è stata calcolata compresa fra 0.008 e 0.015, mentre per la ripetibilità compresa fra 0.022 e 0.036. Va tenuto in considerazione che nello studio round robin la procedura era applicata per la prima volta da 8 dei 9 laboratori, e che con la pratica sono attendibili miglioramenti da parte di un singolo laboratorio.

Questi dati sono comunque relativi alla procedura implementata nell'ASTM D 7897. La procedura descritta in nel presente studio costituisce una variante della procedura originaria, e ci si attendono valori comparabili di riproducibilità e ripetibilità. E' possibile che si ottengano deviazioni standard maggiori, dato l'irrorazione è eseguita due volte, per raggiungere i livelli di sporco riscontrati presso i contesti urbani italiani. Ciò andrebbe verificato con un confronto interlaboratorio relativo alla nuova procedura.

3.6 Raccomandazioni tecniche ai fini dell'implementazione di un programma di esposizione naturale e di un'esposizione accelerata

Tanto per l'invecchiamento naturale che per l'invecchiamento accelerato è necessario utilizzare almeno 3 campioni, misurandone la riflettanza solare spettrale in tre punti. Soprattutto per la procedura accelerata, è raccomandabile, se possibile, impiegare un numero di campioni superiore a 3, in modo tale da scartare campioni che durante l'irrorazione, e soprattutto la movimentazione, siano stati palesemente compromessi da errori sperimentali. Pertanto, è raccomandabile privilegiare un numero maggiore di misure per campione rispetto a misure molto precise (cioè con lunghi tempi di scansione) in un solo punto, come fatto per l'esposizione accelerata documentata in questo studio.

La pratica descritta nella ASTM D 7897 (e adottata dal CRRC) accetta per la misura di ρ_s anche l'utilizzo di un riflettometro solare, conformemente alla ASTM C 1549 [75]. L'accuratezza e rappresentatività di questo metodo di prova rispetto alle misure con uno spettrometro UV-Vis-NIR è stata valutata da Levinson et al. [76], che hanno dimostrato come gli scostamenti fra i valori ottenuti con un riflettometro e quelli ottenuti con uno spettrometro crescano al crescere della selettività del campione misurato, fino a -0.015 to $+0.025$, mentre nuove versioni dello stesso

strumento⁶ consentono di una riproducibilità della misura dell'ordine di ± 0.01 . Questo metodo consente di misurare rapidamente ρ_s (la misura è pressoché istantanea), ma fornisce unicamente un valore integrale, cioè non spettrale. Come si è visto durante la discussione dei risultati, l'analisi spettrale è uno strumento estremamente utile alla comprensione delle ragioni che determinano l'invecchiamento e lo sporcamento, e che orientano lo sviluppo di prodotto e consentono di valutare se la procedura accelerata è adeguata a riprodurre le condizioni presso altri contesti. Per questi motivi, si raccomandano le misure spettrali per la caratterizzazione della riflettanza dei materiali nuovi e invecchiati.

E' possibile implementare la procedura accelerata posizionando l'ugello per l'irrorazione ad un'altezza fra 40 cm e 60 cm sopra i campioni, ed è consigliabile un'altezza di circa 50 cm. L'aspetto più importante da curare è la regolarità della deposizione, e la ripetibilità della quantità deposta. Questa può essere controllata verificando la massa umida raccolta da campione di riferimento usato durante lo sporcamento accelerato (che può essere una membrana sintetica bianca di 10 cm x 10 cm, come nel presente studio). E' raccomandabile regolare altezza e pressione di erogazione in modo tale da ottenere la deposizione della massa umida desiderata (100 g m^{-2}) in un tempo il più lungo possibile; ad esempio di circa 10 secondi, o maggiore. In questo modo, l'errore umano dovuto al tempo di reazione nel rimuovere il campione quando è trascorso il tempo necessario alla deposizione ha meno influenza rispetto a un'irrorazione breve.

E' tuttavia importante evitare un gocciolamento anomalo della miscela (mentre si deve avere una nebulizzazione), cioè una percolazione in grosse gocce a termine dell'erogazione. E' raccomandabile lavorare sotto cappa per effettuare l'irrorazione, realizzando una camera di sporcamento che consenta manovre agevoli e con un piano di appoggio vicino per poter posizionare i campioni su cui è stata effettuata la deposizione. Infatti, il movimento della massa umida sui campioni causa un aumento della deviazione standard della riflettanza.

4 Conclusioni

Per valutare l'impatto dell'invecchiamento sulle proprietà ottico radiative dei cool materials sono state selezionate 14 membrane impermeabilizzanti e 2 tegole in terracotta di tipo olandese, con diversa rugosità superficiale e riflettanza solare al tempo zero (compresa fra 0.24 e 0.87).

A partire da metà aprile 2012, i materiali selezionati sono stati esposti debolmente inclinati sia a Milano che a Roma, e a Milano anche inclinati di 45° rivolti a Sud, e dopo 3, 6, 12, 18, 24, e 36 mesi di esposizione i campioni sono ritirati, ne è stata misurata la riflettanza solare spettrale, e sono stati riesposti. I campioni sono stati esposti. Al tempo zero e dopo tre anni di esposizione ambientale è stata misurata anche l'emissività termica.

In collaborazione con il Lawrence Berkeley National Laboratory, è stata sviluppata una procedura accelerata di esposizione atmosferica e sporcamento per i materiali per coperture, utile a valutare le condizioni di sollecitazione nei contesti urbani italiani. Questa prevede cicli di esposizione ai raggi UVA e caldo umido, e di sporcamento mediante l'irrorazione di una miscela a base acquosa di polveri minerali, nero di carbonio, sali, e acido umico.

⁶ Si fa riferimento a versioni che incorporano la SSRv6_AM1GH.

Lo scopo della procedura sviluppata è di riprodurre in pochi giorni e in modo economico e affidabile gli effetti dell'esposizione ambientale sulla riflettanza solare dei materiali d'involucro edilizio esposti in contesti urbani italiani. Dato che per soddisfare i criteri di economicità e di rapidità della procedura vengono eseguiti solo pochi cicli di esposizione accelerata ai raggi UV e a alta umidità relativa, questa procedura non può essere considerata una procedura di valutazione della durabilità o della vita utile dei materiali o componenti edilizi. E' utile come procedura per fornire risultati provvisori per nuovi prodotti in attesa che siano ottenuti i dati da tre anni di esposizione naturale, e non va quindi intesa come sostitutiva dell'esposizione naturale.

Per la maggior parte delle membrane si è osservato che la stabilità è raggiunta dopo 18-24 mesi di esposizione (in alcuni casi già a 12 mesi di esposizione). In alcuni casi, le membrane più lisce presentano variazioni consistenti fra un intervallo di misura e l'altro. Facendo una regressione sui dati sperimentali considerando i valori di riflettanza solare minimi raggiunti si ottiene che una membrana bianca con ρ_{s0} pari a 0.80 ha ρ_s pari a 0.55 a Milano e pari a 0.63 a Roma, mentre considerando la regressione sulla media dei minimi per i due siti si ottiene 0.59. Una seconda campagna di esposizione a Milano ha presentato risultati simili a quelli della prima, con differenze assolute fra una campagna di esposizione e l'altra inferiori a 0.04.

Per quanto concerne la variazione dell'emissività termica, sia a Roma che a Milano, si calcolano decrementi per tutte le membrane incluse nello studio in media pari a 0.05 e comunque fra 0.02 e 0.09, con un'emissività iniziale media pari a 0.88.

Il metodo accelerato offre buone prestazioni confrontato rispetto all'esposizione naturale di materiali per coperture ad alta riflettanza iniziale, e riesce a riprodurre anche l'effetto dello sporco su materiali selettivi con spettri complessi. Escludendo un solo materiale che ha mostrato evidenti segni di degrado chimico-fisico precoce, lo scostamento mediano fra esposizione accelerata e naturale è pari a 0.030 e lo scarto quadratico medio è pari a 0.035 in termini di ρ_s (e compreso fra 0.01 e 0.055). Il metodo è pertanto valido per:

- Prodotti per coperture delle categorie merceologiche considerate nel presente studio.
- Contesti di impiego intermedi fra quelli considerati, cioè i contesti urbani di Roma e Milano. Materiali che non subiscono un rilevante degrado chimico-fisico in tempi brevi sia in termini di invecchiamento UV, che di aumento della porosità per gelo-disgelo, o distacchi che possono dare luogo a un apparente recupero di riflettanza.
- Materiali non funzionalizzati (altamente idrofobici o ad alta efficienza fotocatalitica).

4.1 *Raccomandazioni per ulteriori sviluppi della ricerca*

Sulla base dell'attività sperimentale e della letteratura analizzata, sono di seguito identificate delle sfide chiave che devono essere affrontate per superare le documentate inconsistenze fra invecchiamento accelerato e naturale, cioè la mancanza di affidabilità delle pratiche di invecchiamento accelerato. Le principali sfide identificate sono:

- Le informazioni ottenute con programmi di esposizione naturale (o da edifici reali o sperimentali) presso località estreme o non rappresentative non dovrebbero essere usate per progettare, validare, o determinare il fattore di accelerazione di procedure accelerate;
- Dati da campagne di esposizione naturale a lungo termine presso più siti (non solo uno) sono necessari;

- Un approccio "big data", con la raccolta e l'analisi di informazione da edifici in uso può risultare utile, come proposto da [77]. Tuttavia, manca un'applicazione di questa pratica;
- La maggior parte delle pratiche di invecchiamento accelerato include solo uno o due agenti, mentre riprodurre le combinazioni di agenti è essenziale e la sovrapposizione degli effetti non è possibile nello studio del degrado;
- Shock igrotermici differenziati in funzione delle proprietà ottiche delle superfici dovrebbero essere la prassi;
- La dimensione dei campioni sottoposti a prova dovrebbe essere rappresentativa e utile per valutare le condizioni in uso, e non essere scelta solo in ragione del costo delle prove e dell'apparato sperimentale;
- Lo sporcamento delle superfici e la proliferazione biologica sono fattori di degrado importanti - tanto quanto l'irraggiamento UV e il gelo-disgelo - che devono essere introdotti nella pratica corrente dell'invecchiamento accelerato.

Nonostante il numero e la difficoltà nell'affrontare i punti menzionati possa apparire scoraggiante, si possono delineare alcune possibili soluzioni:

- Promuovere la collaborazione internazionale nella ricerca applicata che precede l'utilizzo delle pratiche di laboratorio;
- Rendere utili le prove sui prodotti, e evitare di richiedere molti e costosi test passa/non-passa. Per quel proposito misurare alcune indicatori (proxy della prestazione nel tempo) può essere sufficiente;
- Se l'invecchiamento accelerato di un prodotto è necessario, l'informazione raccolta dovrebbe essere resa disponibile per migliorare le procedure di prova, come fatto dal Cool Roofing Rating Council [40], o come è pratica in ambito medico.

4.2 Raccomandazioni per eventuali applicazioni in ambito di normativa tecnica

Il presente studio è stato sviluppato con l'intento di sviluppare una procedura - sia per l'esposizione naturale che per quella accelerata - che possa essere di supporto allo sviluppo di nuovi prodotti a prestazioni migliorate, per la selezione di prodotti, e per fornire dati di ingresso di riferimento in caso di assenza di dati per prodotti appartenenti alle categorie merceologiche considerate. Ad esempio, nel calcolo del fabbisogno energetico in sede di progetto non è ancora noto quale materiale e prodotto sarà impiegato, ma è utile conoscere un deprezzamento medio della riflettanza e dell'emissività termica per tenere conto dell'impatto dell'invecchiamento su questi parametri. Nei recenti dispositivi di legge si individuano dei limiti prestazionali per quanto concerne i cool materials, ma si fa riferimento a valori determinati in laboratorio, su materiali nuovi, quindi.

Considerato che, come dimostrato in questo studio, l'impatto dell'invecchiamento sulla riflettanza solare (soprattutto) e emissività termica delle superfici degli edifici è anche superiore al 30% del valore iniziale, questo deve essere contemplato nella normativa e nella progettazione degli edifici. Ciò sarebbe analogo a quanto già avviene, ad esempio, per l'influenza di umidità e temperatura sulla conduttività termica degli isolanti termici e degli altri materiali da costruzione.

Inoltre, a livello nazionale e europeo vi è attualmente l'assenza di una normativa tecnica di riferimento per quanto concerne la valutazione della variazione nel tempo delle proprietà ottico-radiative dei prodotti per l'involucro degli edifici. Negli Stati Uniti prima il programma EnergyStar e

poi il Cool Roofing Rating Council hanno iniziato a tenere in considerazione questi aspetti. Come discusso, negli U.S.A. sono stati individuati tre siti di riferimento per l'esposizione naturale e in alcuni stati vengono definiti dei livelli minimi di riflettanza dopo tre anni di invecchiamento (ad esempio 0.50) perché un dato prodotto possa essere utilizzato per edifici pubblici, o consentire a un progetto di ricevere crediti in protocolli di certificazione ambientale come il LEED. Questi valori a tre anni di invecchiamento vengono appunto definiti dalla media dei valori riscontrati presso i tre siti di riferimento, oppure, provvisoriamente, dai risultati del test secondo ASTM D 7897, cioè una procedura di esposizione atmosferica e sporcamento accelerata.

La procedura adottata negli Stati Uniti non può essere impiegata tal quale per i contesti europei, e specialmente per i contesti urbani italiani, con particolare riferimento alla Pianura Padana, dove i livelli di inquinamento e le condizioni climatiche determinano una riduzione molto maggiore della riflettanza solare che presso i tre siti di esposizione negli U.S.A., rispetto a cui la procedura accelerata ASTM è stata calibrata. Le differenze non sono peraltro dovute a differenze dei materiali testati, poiché alcuni dei prodotti sottoposti a prova nel presente studio sono anche stati esposti negli U.S.A., in quanto presenti sia sul mercato EU che U.S.A.

I risultati del presente studio potrebbero pertanto costituire una prima base (già in stadio avanzato) utile alla discussione per lo sviluppo di norme tecniche nazionali ed europee relative alla valutazione della variazione nel tempo delle proprietà ottico-radiative dei materiali per l'involucro edilizio, oltre che all'individuazione dei siti necessari all'esposizione naturale.

Riferimenti bibliografici

- [1] A.H. Rosenfeld, D. Hafemeister, *Energy-Efficient Buildings*, *Sci. Am.* 258 (1988) 78–85. doi:10.1038/scientificamerican0488-78.
- [2] S. Hassid, M. Santamouris, N. Papanikolaou, A. Linardi, N. Klitsikas, C. Georgakis, et al., *Effect of the Athens heat island on air conditioning load*, *Energy Build.* 32 (2000) 131–141. doi:10.1016/S0378-7788(99)00045-6.
- [3] M. Kolokotroni, I. Giannitsaris, R. Watkins, *The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies*, *Sol. Energy.* 80 (2006) 383–392. doi:10.1016/j.solener.2005.03.010.
- [4] R. Giridharan, M. Kolokotroni, *Urban heat island characteristics in London during winter*, *Sol. Energy.* 83 (2009) 1668–1682. doi:10.1016/j.solener.2009.06.007.
- [5] R. Watkins, J. Palmer, M. Kolokotroni, *Increased temperature and intensification of the urban heat island: Implications for human comfort and urban design*, *Built Environ.* 33 (2007) 85–96. doi:10.2148/benv.33.1.85.
- [6] M. Santamouris, *On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings*, *Energy Build.* 82 (2014) 100–113. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.022.
- [7] T. Poli, L. Pietro Gattoni, R. Paolini, G. Pansa, M. Favaron, S. Pilati, *THE INFLUENCE OF THE URBAN HEAT ISLAND OVER BUILDING ENERGY DEMAND : THE CASE OF MILAN*, in: *Seventh Int. Conf. Urban Clim., Yokohama, Japan, 2009*. http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/pdf/384633-1-090521000651-002.pdf.
- [8] T. Toppi, P. Zangheri, R. Paolini, *Simplified Method for Modification of Weather Data File for Energy Simulations within Urban Areas*, in: R. Paolini (Ed.), *8th Work. Meet. CIB W108 - Clim. Chang. Built Environ.*, Maggioli editore, Milan, Italy, 2009: pp. 65–70. <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB16454.pdf>.
- [9] H. Akbari, M. Pomerantz, H. Taha, *Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas*, *Sol. Energy.* 70 (2001) 295–310. doi:10.1016/S0038-092X(00)00089-X.
- [10] M. Santamouris, N. Gaitani, A. Spanou, M. Saliari, K. Giannopoulou, K. Vasilakopoulou, et al., *Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project*, *Build. Environ.* 53 (2012) 128–136. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.022.
- [11] F. Bourbia, H. Awbi, *Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate*, *Renew. Energy.* 29 (2004) 249–262. doi:10.1016/S0960-1481(03)00170-8.
- [12] R. Paolini, A.G. Mainini, T. Poli, L. Vercesi, *Assessment of Thermal Stress in a Street Canyon in Pedestrian Area with or without Canopy Shading*, *Energy Procedia.* 48 (2014) 1570–1575. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.177.
- [13] A.M. Rizwan, L.Y.C. Dennis, C. Liu, *A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island*, *J. Environ. Sci.* 20 (2008) 120–128. doi:10.1016/S1001-0742(08)60019-4.
- [14] M. Bruelisauer, F. Meggers, E. Saber, C. Li, H. Leibundgut, *Stuck in a stack—Temperature measurements of the microclimate around split type condensing units in a high rise building in Singapore*, *Energy Build.* 71 (2014) 28–37. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.056.

- [15] A. Krpo, F. Salamanca, A. Martilli, A. Clappier, On the Impact of Anthropogenic Heat Fluxes on the Urban Boundary Layer: A Two-Dimensional Numerical Study, *Boundary-Layer Meteorol.* 136 (2010) 105–127. doi:10.1007/s10546-010-9491-2.
- [16] F. Salamanca, M. Georgescu, A. Mahalov, M. Moustauoui, M. Wang, Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning, *J. Geophys. Res. Atmos.* 119 (2014) 5949–5965. doi:10.1002/2013JD021225.
- [17] A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, *Energy Build.* 33 (2001) 719–729. doi:10.1016/S0378-7788(01)00062-7.
- [18] R.M. Lazzarin, F. Castellotti, F. Busato, Experimental measurements and numerical modelling of a green roof, *Energy Build.* 37 (2005) 1260–1267. doi:10.1016/j.enbuild.2005.02.001.
- [19] E.E.P. Del Barrio, Analysis of the green roofs cooling potential in buildings, *Energy Build.* 27 (1998) 179–193. doi:10.1016/S0378-7788(97)00029-7.
- [20] E. Alexandri, P. Jones, Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates, *Build. Environ.* 43 (2008) 480–493. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.055.
- [21] R. Djedjig, E. Bozonnet, R. Belarbi, Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program, *Energy Build.* 86 (2015) 93–103. doi:10.1016/j.enbuild.2014.09.057.
- [22] F. Rossi, A.L. Pisello, A. Nicolini, M. Filipponi, M. Palombo, Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model, *Appl. Energy.* 114 (2014) 621–631. doi:10.1016/j.apenergy.2013.10.038.
- [23] F. Rossi, B. Castellani, A. Presciutti, E. Morini, M. Filipponi, A. Nicolini, et al., Retroreflective façades for urban heat island mitigation: Experimental investigation and energy evaluations, *Appl. Energy.* 145 (2015) 8–20. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.129.
- [24] A.H. Rosenfeld, H. Akbari, J.J. Romm, M. Pomerantz, Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction, *Energy Build.* 28 (1998) 51–62. doi:10.1016/S0378-7788(97)00063-7.
- [25] A. Synnefa, M. Santamouris, H. Akbari, Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions, *Energy Build.* 39 (2007) 1167–1174. doi:10.1016/j.enbuild.2007.01.004.
- [26] M. Zinzi, Cool materials and cool roofs: Potentialities in Mediterranean buildings, *Adv. Build. Energy Res.* 4 (2010) 201–266. doi:10.3763/aber.2009.0407.
- [27] H. Akbari, R. Levinson, L. Rainer, Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings, *Energy Build.* 37 (2005) 1007–1016. doi:10.1016/j.enbuild.2004.11.013.
- [28] R. Levinson, H. Akbari, Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants, *Energy Effic.* 3 (2010) 53–109. doi:10.1007/s12053-008-9038-2.
- [29] H. Akbari, S. Konopacki, M. Pomerantz, Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States, *Energy.* 24 (1999) 391–407. doi:10.1016/S0360-5442(98)00105-4.

- [30] H. Akbari, H. Damon Matthews, D. Seto, The long-term effect of increasing the albedo of urban areas, *Environ. Res. Lett.* 7 (2012) 024004. doi:10.1088/1748-9326/7/2/024004.
- [31] K.W. Oleson, G.B. Bonan, J. Feddema, Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model, *Geophys. Res. Lett.* 37 (2010) n/a–n/a. doi:10.1029/2009GL042194.
- [32] H. Akbari, S. Menon, A. Rosenfeld, Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂, *Clim. Change.* 94 (2008) 275–286. doi:10.1007/s10584-008-9515-9.
- [33] T. Susca, Enhancement of life cycle assessment (LCA) methodology to include the effect of surface albedo on climate change: Comparing black and white roofs., *Environ. Pollut.* 163 (2012) 48–54. doi:10.1016/j.envpol.2011.12.019.
- [34] F. Rossi, F. Cotana, M. Filippini, A. Nicolini, S. Menon, A. Rosenfeld, Cool roofs as a strategy to tackle global warming: economical and technical opportunities, *Adv. Build. Energy Res.* 7 (2013) 254–268. doi:10.1080/17512549.2013.865555.
- [35] S.E. Bretz, H. Akbari, Long-term performance of high-albedo roof coatings, *Energy Build.* 25 (1997) 159–167. doi:10.1016/S0378-7788(96)01005-5.
- [36] P. Berdahl, H. Akbari, L.S. Rose, Aging of reflective roofs: soot deposition., *Appl. Opt.* 41 (2002) 2355–60. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12003230>.
- [37] P. Berdahl, H. Akbari, R. Levinson, W. a. Miller, Weathering of roofing materials – An overview, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 423–433. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.10.015.
- [38] R. Levinson, P. Berdahl, a Asefawberhe, H. Akbari, Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane, *Atmos. Environ.* 39 (2005) 7807–7824. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.08.037.
- [39] M. Sleiman, G. Ban-Weiss, H.E. Gilbert, D. François, P. Berdahl, T.W. Kirchstetter, et al., Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance—Part I: Analysis of roofing product databases, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 95 (2011) 3385–3399. doi:10.1016/j.solmat.2011.08.002.
- [40] Cool Roof Rating Council, CRRC rated products directory, (2015). <http://coolroofs.org/products/results> (accessed July 09, 2015).
- [41] Department of economic and social affairs of the united nations population division (UNPD), World Urbanization Prospects: The 2011 Revision, 2012. http://esa.un.org/unpd/wpp/ppt/CSIS/WUP_2011_CSIS_4.pdf.
- [42] O. Favez, H. Cachier, a Chabas, P. Ausset, R. Lefevre, Crossed optical and chemical evaluations of modern glass soiling in various European urban environments, *Atmos. Environ.* 40 (2006) 7192–7204. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.06.022.
- [43] T.R. Oke, *Boundary Layer Climates*, Methuen and Co., New York, 1987.
- [44] W. Kuttler, S. Weber, J. Schonfeld, A. Hesselschwerdt, Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany, *Int. J. Climatol.* 27 (2007) 2005–2015. doi:10.1002/joc.1558.
- [45] ISO, ISO 15686-2 - Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 2: Service life prediction procedures, (2012).
- [46] B. Daniotti, F. Re Cecconi, CIB W080: WG3 Test Methods for Service Life Prediction. State of the Art report on accelerated laboratory test procedures and correlation between laboratory tests and service life data, CIB. INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION, Rotterdam, The Netherlands, 2010. http://site.cibworld.nl/dl/publications/w080_wg3_report.pdf (accessed July 24, 2015).

- [47] A.S. Maxwell, W.R. Broughton, G. Dean, G.D. Sims, Review of accelerated ageing methods, 2005. doi:ISSN 1744-0270.
- [48] E. Brandt, T.N. Nilsen, Experience With Equipment For Large Scale Accelerated Ageing Tests, in: S. Burn (Ed.), 9th Conf. Durab. Build. Mater. Components, Brisbane, Australia, 2002. <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB9905.pdf>.
- [49] B. Daniotti, R. Paolini, F.R. Cecconi, Durability of Building Materials and Components, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013. doi:10.1007/978-3-642-37475-3.
- [50] B. Daniotti, P. Iacono, Evaluating the service life of external walls: a comparison between long-term and short-term exposure, in: Proc. X Int. Conf. Durab. Build. Mater. Components, Lyon, France, 2005.
- [51] P.J. Hovde, Artificial weathering of wood materials, in: B. Daniotti, F. Re Cecconi (Eds.), Accel. Lab. Test Proced. Correl. Between Lab. Tests Serv. Life Data, CIB. INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION, Rotterdam, The Netherlands, 2010: pp. 9–11.
- [52] M. Sleiman, T.W. Kirchstetter, P. Berdahl, H.E. Gilbert, S. Quelen, L. Marlot, et al., Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance – Part II: Development of an accelerated aging method for roofing materials, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 122 (2014) 271–281. doi:10.1016/j.solmat.2013.11.028.
- [53] M. Sleiman, S. Chen, H.E. Gilbert, T.W. Kirchstetter, P. Berdahl, L.S. Bruckman, et al., Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance – Part III: Interlaboratory study of an accelerated aging method for roofing materials, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. accepted (2015).
- [54] ASTM, ASTM D 7897. Standard Practice for Laboratory Soiling and Weathering of Roofing Materials to Simulate Effects of Natural Exposure on Solar Reflectance and Thermal Emittance, (2015). doi:10.1520/G0154-12.
- [55] H. Barberousse, B. Ruot, C. Yéprémian, G. Boulon, An assessment of façade coatings against colonisation by aerial algae and cyanobacteria, Build. Environ. 42 (2007) 2555–2561. doi:10.1016/j.buildenv.2006.07.031.
- [56] H.M. Künzle, M. Krus, C. Fitz, W. Hofbauer, C. Scherer, K. Breuer, Accelerated Test Procedure to Assess the Microbial Growth Resistance of Exterior Finishes, in: 12th Int. Conf. Durab. Build. Mater. Components, Porto, Portugal, 2011. <http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Konferenzbeitraege/Englisch/Accelerated Test Procedure to Assess the Microbial Growth Resistance of Exterior Finishes.pdf>.
- [57] ISO, ISO 9050 - Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors, (2003).
- [58] ASTM, ASTM E 903-12. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres, (2012).
- [59] A. Synnefa, A. Pantazaras, M. Santamouris, E. Bozonnet, M. Doya, M. Zinzi, et al., Interlaboratory Comparison of Cool Roofing Material Measurement Methods, in: 34th AIVC Conf., Athens, Greece, 2013.
- [60] ASTM, ASTM C 1371-04. Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emitters, (2004).

- [61] ASTM, ASTM E 312-06. Standard Practice for Description and Selection of Conditions for Photographing Specimens Using Analog (Film) Cameras and Digital Still Cameras (DSC), (2006).
- [62] ASTM, ASTM G 7-05. Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials, (2005).
- [63] M. Sleiman, T.W. Kirchstetter, P. Berdahl, H.E. Gilbert, S. Quelen, L. Marlot, et al., Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance – Part II: Development of an accelerated aging method for roofing materials, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 122 (2014) 271–281. doi:10.1016/j.solmat.2013.11.028.
- [64] R. Paolini, T. Poli, G. Terraneo, M. Zinzi, E. Carnielo, A.G. Mainini, et al., “ La prestazione ottico-radiativa nel tempo dell’ involucro edilizio : esposizione naturale in ambiente urbano , e invecchiamento e sporcamento accelerato in laboratorio ” “ Building envelope ’ s optical-radiative performance over time : natural exposure,” (n.d.).
- [65] R. Paolini, M. Sleiman, G. Terraneo, T. Poli, M. Zinzi, R. Levinson, et al., Solar spectral reflectance of building envelope materials after natural exposure in Rome and Milano, and after accelerated aging, in: A. Muscio (Ed.), *Third Int. Conf. Countermeas. to Urban Heat Isl.*, Venice, Italy, 2014: pp. 498–509.
- [66] R. Paolini, T. Poli, M. Fiori, A. Mainini, *Valutazione delle prestazioni di cool materials esposti all’ambiente urbano: sporcamento e invecchiamento accelerato*, Roma, 2012. <http://openarchive.enea.it:8080/handle/10840/4591> (accessed September 17, 2014).
- [67] EOTA, *Assessment of working life of Products. Guidance document 003*, (1999).
- [68] ASTM, ASTM G154 - 12a Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials, (2012). doi:10.1520/G0154-12.
- [69] ISO, ISO 11341. *Paints and varnishes – Artificial weathering and exposure to artificial radiation - Exposure to filtered xenon-arc radiation*, (2004).
- [70] R. Paolini, M. Zinzi, T. Poli, E. Carnielo, A.G. Mainini, Effect of ageing on solar spectral reflectance of roofing membranes: natural exposure in Roma and Milano and the impact on the energy needs of commercial buildings, *Energy Build.* 84 (2014) 333–343. doi:10.1016/j.enbuild.2014.08.008.
- [71] M.V. Diamanti, R. Paolini, M. Rossini, A.B. Aslan, M. Zinzi, T. Poli, et al., Long term self-cleaning and photocatalytic performance of anatase added mortars exposed to the urban environment, *Constr. Build. Mater.* 96 (2015) 270–278. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.028.
- [72] S. Wang, J. Zhang, L. Liu, F. Yang, Y. Zhang, Evaluation of cooling property of high density polyethylene (HDPE)/titanium dioxide (TiO₂) composites after accelerated ultraviolet (UV) irradiation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 143 (2015) 120–127. doi:10.1016/j.solmat.2015.06.032.
- [73] P. Berdahl, H. Akbari, J. Jacobs, F. Klink, Surface roughness effects on the solar reflectance of cool asphalt shingles, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 92 (2008) 482–489. doi:10.1016/j.solmat.2007.10.011.
- [74] ASTM, ASTM E 691-09. Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method, (2009).
- [75] ASTM, ASTM C 1549. Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer, (2009).

- [76] R. Levinson, H. Akbari, P. Berdahl, Measuring solar reflectance—Part II: Review of practical methods, *Sol. Energy*. 84 (2010) 1745–1759. doi:10.1016/j.solener.2010.04.017.
- [77] B. Daniotti, J.L. Lupica Spagnolo, S. Chevalier, J. Hans, J. Chorier, An International Service Life Database: The Grid Definition for an Actual Implementation of Factor Methods and Service Life Prediction, in: *CIB 2010 World Congr.*, Manchester, UK, 2010. <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB18744.pdf>.

Allegato – Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Riccardo Paolini, nato a Milano nel 1980, è laureato in Ingegneria Edile e ha conseguito nel 2011 il dottorato di ricerca in Ingegneria dei Sistemi Edilizi (Politecnico di Milano). E' assegnista di ricerca post-doc; già docente per corsi di dottorato sulla mitigazione del microclima urbano e il trasporto di massa nei mezzi porosi. Dal 2009 è affiliato all'Heat Island Group, Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, CA, USA). Le sue attività di ricerca riguardano principalmente:

- La caratterizzazione delle proprietà ottico-radiative dei materiali per le costruzioni;
- La modellazione numerica del bilancio energetico urbano;
- Test igrotermici, di durabilità, e vita utile di materiali e componenti edilizi;
- La simulazione numerica del trasporto simultaneo di calore e umidità nei mezzi porosi.

Tiziana Poli, nata a Milano il 6 Maggio 1968, è laureata in Architettura, ha conseguito il dottorato in Ingegneria Ergotecnica Edile, ed è professore associato di Architettura Tecnica presso il Politecnico di Milano. Dal 2003 al 2010 è membro del comitato scientifico del laboratorio del dipartimento ABC presso il Politecnico di Milano. Principali attività didattiche e di ricerca:

- La tecnologie e le prestazioni dell' involucro edilizio per Zero Energy Buildings (membro di IEA-SHC Task 47 "Renovation of Non-Residential Buildings towards Sustainable Standards);
- Caratterizzazione ottico-energetica delle superfici per l'involucro edilizio;
- Innovazione di prodotti, sistemi e componenti in supporto all'industria delle costruzioni;
- Mitigazione del microclima urbano tramite l'involucro degli edifici.

Andrea Giovanni Mainini, nato a Gallarate (VA) nel 1980. Laureato in Ingegneria Edile nel 2006 ha conseguito nel 2011 il dottorato in Ingegneria dei Sistemi Edilizi presso il Politecnico di Milano. E' assegnista di ricerca post-doc e docente a contratto. Principali attività di ricerca:

- Efficienza energetica degli edifici, near zero energy buildings;
- Innovazione di prodotti, sistemi e componenti per l'edilizia;
- Caratterizzazione ottico-energetica delle superfici per l'involucro edilizio;
- Controllo, ottimizzazione ed eliminazione dei ponti termici in edilizia;
- Membro del Task IEA 51 – Solar Architecture in Urban Planning.

Alberto Speroni, nato a Milano nel 1988. Laureato in Ingegneria dei Sistemi Edilizi nel 2013 presso il Politecnico di Milano. Ha lavorato come stagista presso l'ufficio di Milano di Arup; dal 2013 è dottorando di ricerca e collaboratore del Dipartimento ABC del Politecnico di Milano. Vincitore nel 2015 del "Progetto Roberto Rocca", progetto di collaborazione tra MIT (Massachusetts Institute of Technology) e Politecnico di Milano. I principali ambiti di studio e ricerca sono:

- Ottimizzazione e sviluppo di tecnologie d'involucro edilizio con *smart materials*;
- Analisi energetiche con particolare attenzione per l'involucro edilizio;
- Analisi e ricerca di materiali innovativi per il controllo solare.

Andrea Zani, nato a Monza (MB) nel 1989. Laureato in Ingegneria dei Sistemi Edilizi nel 2014 presso il Politecnico di Milano. Ha lavorato per un anno presso Arup Italia nel team facciate e da Novembre 2014 è dottorando di ricerca nel Dipartimento ABC del Politecnico di Milano e collabora con il centro di Italcementi Spa per lo sviluppo di nuovi prodotti in calcestruzzo per l'involucro edilizio. I principali ambiti di studio e ricerca sono:

- Modellazione parametrica per l'ottimizzazione dei componenti di facciata;
- Analisi illuminotecniche ed energetiche per lo sviluppo e ottimizzazione di sistemi di schermatura e di facciata anche a geometria complessa.