



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

## Valutazione delle prestazioni di cool materials esposti all'ambiente urbano: sporcamento e invecchiamento accelerato

*R. Paolini, T. Poli, M. Fiori, A.G. Mainini*



**POLITECNICO DI MILANO**

*Dipartimento di Scienza e Tecnologia dell'Ambiente Costruito  
Building Environment Science and Technology Dept.*

Report RdS/2012/114

## VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DI COOL MATERIALS ESPOSTI ALL'AMBIENTE URBANO: SPORCAMENTO E INVECCHIAMENTO ACCELERATO

R. Paolini, T. Poli, M. Fiori, A.G. Mainini (Politecnico di Milano, Dipartimento di Scienza e Tecnologia dell'Ambiente Costruito)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

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

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

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

RINGRAZIAMENTI. Gli Autori ringraziano M. Sleiman, H. Destailats, e R. Levinson (Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, US) per le prime prove di sporcamento accelerato e la collaborazione nello sviluppo di un protocollo di invecchiamento e sporcamento accelerato per i climi italiani. Si ringrazia inoltre Maria Vittoria Diamanti (Politecnico di Milano, dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica) per i prodotti per rivestimento per facciata utilizzati per le prove di invecchiamento e sporcamento accelerato, sui quali cui è in svolgimento una ricerca congiunta.

## Indice

<b>Sommario</b> .....	<b>4</b>
<i>Introduzione</i> .....	5
<i>Oggetto della ricerca</i> .....	5
<i>Descrizione delle attività</i> .....	5
<i>Obiettivi</i> .....	5
<b>Analisi della normativa tecnica e delle procedure di prova sperimentali</b> .....	<b>6</b>
<i>Metodi di prova di invecchiamento e sporcamento accelerato</i> .....	6
<b>Prove di invecchiamento e sporcamento accelerato</b> .....	<b>9</b>
<b>Conclusioni</b> .....	<b>15</b>
<i>Linee di sviluppo</i> .....	15
<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	<b>16</b>
<b>Riferimenti normativi</b> .....	<b>16</b>
<b>Abbreviazioni ed acronimi</b> .....	<b>18</b>
<b>Allegato A - Curriculum scientifico del gruppo di lavoro</b> .....	<b>19</b>

## Sommario

L'utilizzo di materiali avanzati ad elevate prestazioni ottico-energetiche per le superfici degli edifici può contribuire al risparmio energetico, migliorare il microclima urbano e la qualità dell'aria. Tuttavia, le superfici degli edifici sono soggette a sporco, e processi di invecchiamento dei materiali, con una conseguente alterazione della riflettanza.

Il programma proposto prevede l'esposizione in esterno, a Roma e a Milano, di materiali per coperture, sia standard sia ad alta riflettanza solare, sia con proprietà fotocatalitiche. Fra i materiali inclusi nel programma vi sono membrane sintetiche, membrane bitume polimero rivestite in opera con un coating elastomerico oppure granigliate, e tegole in laterizio. I risultati dell'esposizione naturale saranno poi confrontati con quelli ottenuti con una procedura di sporco e invecchiamento accelerato sviluppata dal Lawrence Berkeley National Laboratory.

E' stato condotto un primo confronto fra la riflettanza di campioni di rivestimenti per facciata fibrorinforzati precedentemente esposti in ambiente esterno e analoghi campioni invecchiati e sporcati in maniera accelerata. I primi risultati evidenziano un buon raccordo fra gli effetti dell'esposizione naturale e gli effetti della procedura accelerata, con qualche differenza nella distribuzione spettrale. I test di invecchiamento e sporco accelerato sui campioni di prodotti per coperture sono attualmente in fase di svolgimento.

Un protocollo di valutazione dello sporco e invecchiamento accelerato consentirebbe di accorciare i tempi dello sviluppo di prodotti di materiali ad alta riflettanza, e di trattamenti superficiali che consentano di mantenere nel tempo le prestazioni, riducendo quindi i costi energetici e di manutenzione di un edificio. Inoltre, una procedura di laboratorio ha il vantaggio di essere ripetibile, a differenza dell'esposizione naturale.

## Introduzione

### *Oggetto della ricerca*

La ricerca prevede lo studio di una procedura combinata per lo sporco e l'invecchiamento accelerati (in laboratorio), messa a punto grazie ai risultati dell'esposizione in esterno e rappresentativa per le condizioni ambientali riscontrabili nelle principali aree urbane italiane.

### *Descrizione delle attività*

La procedura di valutazione dell'andamento nel tempo della riflettanza di cool materials sarà messa a punto sulla base dei risultati ottenuti con l'esposizione in esterno di campioni di diversi materiali (per coperture, per facciate, e per schermature solari). Le attività prevedono:

- Prove preliminari di invecchiamento e sporco accelerato per valutare la propensione al mantenimento nel tempo della riflettanza solare dei materiali per l'involucro edilizio esposti in climi italiani (specialmente per microclimi urbani di città italiane), su base del protocollo sviluppato al Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, California, USA);
- Confronto dei risultati ottenuti (sulla prima parte della curva d'invecchiamento) con i cicli di invecchiamento e sporco accelerati e i primi mesi di esposizione in esterno;
- Indicazioni per lo sviluppo di una procedura di sporco e invecchiamento accelerato.

### *Obiettivi*

Gli obiettivi di questo studio includono:

- Lo studio una procedura di invecchiamento e sporco accelerato per climi italiani per la valutazione della propensione al mantenimento nel tempo delle prestazioni ottico-radiative dei materiali per l'involucro edilizio (sulla base del protocollo sviluppato al LBNL);
- Il confronto dei dati di riflettanza di prodotti esposti in ambiente esterno e soggetti a invecchiamento e sporco accelerato.

## Analisi della normativa tecnica e delle procedure di prova sperimentali

In generale, i metodi di invecchiamento di materiali e prodotti, al fine della misura dell'evoluzione delle loro caratteristiche e/o prestazioni sotto una data azione o un ciclo di azioni, possono essere distinti in cinque grandi gruppi [4]:

- *Test diretti*. Il raggiungimento di un dato livello prestazionale è indicatore di una sufficiente durabilità (anche se sarebbe più opportuno in questo caso parlare di idoneità all'uso) del prodotto (es.: resistenza all'abrasione, all'impatto da corpo duro o corpo molle, fatica, etc.);
- *Test indiretti*. La misura di caratteristiche "proxy", che possono essere correlate all'effettiva prestazione, fornisce un'indicazione della durabilità di un prodotto (es.: la porosità per la resistenza al gelo-disgelo dei materiali porosi come il calcestruzzo);
- *Test di invecchiamento naturale*. Forniscono un'indicazione diretta della durabilità (ad esempio per valutare la resistenza alla corrosione) oppure consentono di eseguire prove di misura delle prestazioni dopo l'esposizione.
- *Test di invecchiamento accelerato*. Come per l'esposizione naturale, ma accelerando i normali processi di invecchiamento per ridurre la durata del test.
- *Test "tortura"*. Il prodotto è soggetto a condizioni molto più severe di quelle effettivamente riscontrate in uso.

I primi due insiemi racchiudono prove che in realtà non sono vere e proprie prove di durabilità, ma misure di indicatori di propensione alla durata. Meno ovvia è la distinzione fra le ultime tre categorie. Infatti, nella selezione dei siti per l'esposizione naturale, in passato spesso sono stati selezionati siti caratterizzati da condizioni ambientali estreme, *molto più severe di quelle effettivamente riscontrate in uso* nei reali contesti di utilizzo. Questa scelta è stata operata con il chiaro intento di valutare un prodotto nelle condizioni più estreme riscontrabili sulla terra, assumendo che abbia un comportamento nel tempo migliore in condizioni meno severe; tuttavia, anche la selezione del sito per l'esposizione naturale dovrebbe essere correlata allo scopo dello studio. Inoltre, esistono procedure di "invecchiamento naturale accelerato", come l'esposizione a Sud con angolo di inclinazione pari a 45° per pitture a componente organica, consolidate nella normativa internazionale.

Un'ultima grande distinzione fra i metodi di valutazione delle prestazioni nel tempo è fra metodi di valutazione della durabilità e metodi di valutazione della vita utile. La differenza fondamentale è che i primi non mirano a fornire un'asse temporale (in anni) assieme alle prestazioni misurate a diversi livelli di invecchiamento, ma solo un'indicazione inerente la propensione alla durata (in maniera certo più completa rispetto ai test diretti e indiretti). I metodi di valutazione della vita utile, invece, mirano a ricercare la correlazione fra una o più prestazioni e il tempo di esposizione (e di utilizzo) di un dato materiale, prodotto, o componente.

Attualmente esistono moltissimi metodi normati per la valutazione della durabilità, mentre non esistono invece metodi normati per la valutazione della vita utile, diversi metodi sono stati sviluppati e sono presenti in letteratura [3]. La caratteristica principale dei metodi di previsione della vita utile è la correlazione fra anni di invecchiamento in esterno e numero di cicli di invecchiamento accelerato in laboratorio, basata sul confronto dei degni e dei livelli prestazionali [17; 20; 21], mentre i metodi di valutazione della durabilità operano solamente un confronto fra esposizione naturale e accelerata (al fine di escludere degni o decadimenti prestazionali non riscontrabili nel reale contesto di utilizzo).

### Metodi di prova di invecchiamento e sporramento accelerato

Come detto precedentemente, nessun metodo di prova normato di invecchiamento accelerato fornisce una correlazione fra numero di anni e numero di cicli di invecchiamento accelerato, e la valutazione della durabilità è demandata alla misura delle prestazioni a seguito dei cicli di invecchiamento accelerato oppure al confronto con l'esposizione in esterno la determinazione del numero di cicli sufficiente a determinare il livello di degrado o decadimento prestazionale limite (o che si intende investigare).

Attualmente esiste solo un metodo di prova accelerato che accoppia sporramento e riproduzione degli agenti atmosferici, e riproduce la deposizione di sporco considerando un procedimento, simile alla

sabbiatura, durante il quale le polveri vengono accelerate con un ventilatore e fatte incidere contro i provini (JSTM J 7602, disponibile solo in giapponese [15]). Il metodo di prova prevede tre fasi:

- particolato "soffiato" contro i provini (a una velocità di  $2.5 \pm 5 \text{ m s}^{-1}$  per 0.5 h);
- pioggia ( $0.12 \text{ mg cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ );
- irraggiamento UV (temperatura dell'aria pari a  $60^\circ\text{C}$  e 30% di umidità relativa, per 60 h).

Esiste anche un metodo di prova in fase sperimentale, sviluppato al LBNL da Sleiman et al. [8] che combina il ciclo di invecchiamento della ASTM G 154 [10] con lo spruzzamento di una sospensione di particolato atmosferico sui campioni. Il metodo sviluppato al LBNL - e confrontato con i risultati di un anno e sei mesi di esposizione naturale presso i tre siti del CRRC - prevede:

- 2 Cicli climatici secondo ASTM G 154: 8 h di irraggiamento UVA ( $0.89 \text{ mW cm}^{-2}$ ) a  $60 \pm 3^\circ\text{C}$  (temperatura di un campione nero di riferimento posto nella cella climatica) e 8 h di condensazione dell'acqua, con temperatura pari a  $50 \pm 3^\circ\text{C}$  (temperatura del campione nero);
- sporcamento: nebulizzazione di un mix di particolato, acido umico, polvere e sali (rappresentativo della media delle condizioni di esposizione dei tre siti del CRRC in Arizona, Ohio, e Florida). La massa del residuo secco nebulizzato è di circa 1 grammo per campione. I campioni sono poi asciugati con una lampada IR; e
- 2 Cicli climatici secondo ASTM G 154: 8 h di irraggiamento UVA ( $0.89 \text{ mW cm}^{-2}$ ) a  $60 \pm 3^\circ\text{C}$  (temperatura di un campione nero di riferimento posto nella cella climatica) e 8 h di condensazione dell'acqua, con temperatura pari a  $50 \pm 3^\circ\text{C}$  (temperatura del campione nero).

La maggior parte dei metodi di prova per l'invecchiamento accelerato prevedono la combinazione dell'irraggiamento UV in sequenza con pioggia o condensazione [10; 13; 14; 18; 19], oppure della radiazione solare (con lampada allo Xenon) e pioggia [11], mentre non vi sono metodi di prova normati che includano nei cicli di gelo-disgelo (ad eccezione dei test previsti da ETAG 016 [9]). Uno dei motivi principali è il limite tecnologico, poiché le lampade UV o allo Xenon si danneggiano alle basse temperature, e quindi, normalmente, se si vogliono introdurre fasi di gelo, vengono utilizzate camere o celle frigorifere a parte. Esistono metodi di prova non normati per coperture ed esperienze di ricerca [1; 2; 6; 7] che includono fasi a basse temperature nel ciclo di invecchiamento accelerato e osservano un effetto delle basse temperature sulla variazione del colore. Infatti, soprattutto per materiali porosi come tegole, coppi e elementi per coperture in materiali cementizi, cicli di gelo-disgelo sono sicuramente non trascurabili per l'integrità degli strati superficiali e quindi per la loro riflettanza solare. Inoltre, per prodotti composti da più strati (ad esempio membrane impermeabilizzanti con un rivestimento elastomerico o con graniglia, o pannelli sandwich o pannelli ed elementi metallici rivestiti con un ciclo di verniciatura) le dilatazioni differenziali all'interfaccia fra il substrato e il rivestimento possono essere causa di distacchi del rivestimento stesso.

In aggiunta, secondo tutti i metodi normati che prevedono cicli di invecchiamento accelerato, ad eccezione dell'ETAG 016 [9], prodotti diversi sono esposti ad alte temperature (Tabella 1), indipendentemente dalle proprietà ottico-radiative del prodotto considerato. Questo, per i metodi di prova che sollecitano ad alte temperature durante l'irraggiamento UV, comporta condizioni termiche molto simili per materiali aventi riflettanza solare molto diverse.

Tabella 1. Cicli di invecchiamento accelerato (metodi di prova ordinati per numero di norma o guida tecnica). La guida tecnica ETAG 016 indica procedure di prova per il rilascio del Benestare Tecnico Europeo e non costituisce una norma (e i metodi di prova indicati hanno valenza di initial type testing; nella stessa ETAG 016 si rimanda alla ISO 15686 [20] e a procedure di prova normate per l'invecchiamento accelerato).

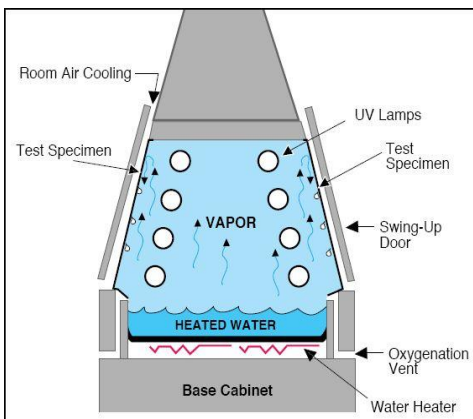
Metodo di prova	Fase di irraggiamento e alta temperatura	Fase di pioggia
ETAG 016 *	Annex C7 - Cicli climatici: 5 giorni a $+70 \pm 2$ °C e umidità relativa del 90%; 1 giorno a $-20 \pm 2$ °C; 1 giorno a $+90 \pm 2$ °C. Annex C8 - Test di stress termico $+55$ °C per colori chiari; $+65$ °C per colori medi; $+85$ °C per colori scuri. Irraggiamento UV	Annex C9 - Pioggia inclusa nei cicli di shock termico: Acqua a $10-15$ °C spruzzata a seguire di riscaldamento (stesse condizioni di temperatura, per tre ore, dei cicli di stress termico)
ASTM G 154	Irraggiamento UV. $60 \pm 3$ °C (black standard temperature) per 8h (valore obiettivo dell'umidità relativa non definito).	$50 \pm 3$ °C (black standard temperature) condensazione per 4h; o 0.25 h di acqua nebulizzata (a temperatura non controllata) e 3.75 h di condensazione a $50 \pm 3$ °C
ASTM G 155	Irraggiamento con lampada spettro completo (Xenon Arc), $77$ °C (black standard temperature), e umidità relativa del 70% per 1.5 h	Pioggia e irraggiamento con lampada spettro completo (Xenon Arc), e temperatura dell'aria non controllata (per 0.5 h)
UNI EN 1297	Irraggiamento UV. Temperatura $60 \pm 3$ °C (black standard temperature), e umidità relativa pari a $10 \pm 5$ % per 5h	Pioggia per 1 h ( $10 \pm 3$ l $\text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$ , con acqua alla temperatura, all'inizio del ciclo, di $25 \pm 3$ °C
JTSM J 7602	Irraggiamento UV. 60 h a $60$ °C e umidità relativa del 70%	Pioggia per 0.5 h (con intensità pari a $0.31 \text{ mm h}^{-1}$ )
ISO 11341	Irraggiamento UV per 102 min. Temperatura $65 \pm 2$ °C (black standard temperature), temperatura dell'aria nella cella climatica pari a $38 \pm 3$ °C, e umidità relativa compresa fra il 40 e 60%	Pioggia per 18 min
UNI EN 14509	Per pannelli sandwich con EPS o XPS Temperature da $65$ °C a $90$ °C (black standard temperature) a seconda del colore e umidità relativa inferiore al 15% (da 1 a 24 settimane); Per nuovi materiali: 5 giorni a $70$ °C e umidità relativa del 90%; 1 giorno a basse temperature ( $0$ °C, $-10$ °C: $-20$ °C o $-30$ °C a seconda del contesto, definito nell'allegato nazionale). Per pannelli in vetro cellulare sono previste prove di shock termico.	



## Prove di invecchiamento e sporcamento accelerato

È stata condotta una prima campagna esplorativa di prove di invecchiamento e sporcamento accelerato presso il Lawrence Berkeley National Laboratory. La procedura di prova [8] prevede una prima fase di condizionamento di otto ore di irraggiamento UV e otto ore di condensazione, seguita da una fase di sporcamento accelerato durante il quale un mix di polvere, sali, sostanze organiche e particolato atmosferico viene nebulizzato sui campioni, poi asciugati con una lampada all'infrarosso, e un'ultima fase, uguale alla prima, di invecchiamento climatico (Figura 1). Il mix che viene nebulizzato sui campioni riproduce una media dei depositi atmosferici che vengono osservati presso i tre campi di esposizione del CRRC (Arizona, Ohio, e Florida). Prima e dopo l'esposizione accelerata i campioni vengono caratterizzati, misurandone la riflettanza spettrale con uno spettroflettometro UV-VIS-NIR Perkin Elmer 900 con sfera integratrice da 150 mm.

### Accelerated weathering ASTM G154 (UV, heat, moisture)



### Accelerated soiling Spraying apparatus (atmospheric deposit)

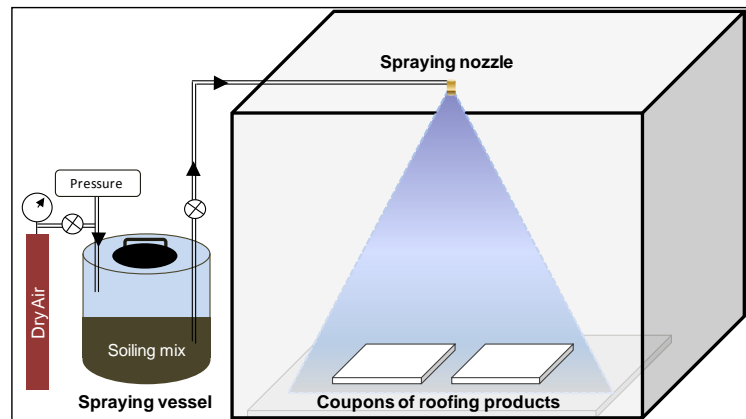


Figura 1. Apparato di prova per l'invecchiamento e lo sporcamento accelerato utilizzato presso LBNL.



Figura 2. Campioni di malte per pannelli per facciata ventilata esposti a Milano.

Le misure di riflettanza relative ai campioni invecchiati e sporcati con il protocollo accelerato del LBNL sono state effettuate secondo ASTM E 903 [12], considerando la distribuzione spettrale di irradianza solare globale sul piano orizzontale con massa d'aria pari a uno. Perciò nei grafici delle misure relative ai campioni esposti in ambiente esterno si riportano sia i valori calcolati secondo ISO 9050 [16], sia i valori secondo la procedura in uso al LBNL (identificati come AM1GH). Per questo motivo, e poiché le misure sono state eseguite con due strumenti diversi (al LBNL con un Perkin Elmer Lambda 900 e in Italia con un Perkin Elmer 950), e per tenere conto di possibili differenti procedure di calibrazione, i confronti fra esposizione naturale e accelerata sono effettuati valutando le differenze relative alla condizione iniziale misurata nei due casi. I primi campioni esposti all'invecchiamento e sporcamento accelerato sono stati delle malte fibrorinforzate a superficie rugosa, ottenuta mediante sabbiatura, di colore bianco (cicli di invecchiamento e sporcamento accelerato su campioni degli stessi prodotti per coperture testati nel programma di esposizione naturale oggetto di questo studio sono in fase di svolgimento). Campioni degli stessi prodotti sono stati esposti a Milano a partire dal 18 ottobre 2011 presso il medesimo campo di invecchiamento naturale descritto in precedenza (Figura 2).

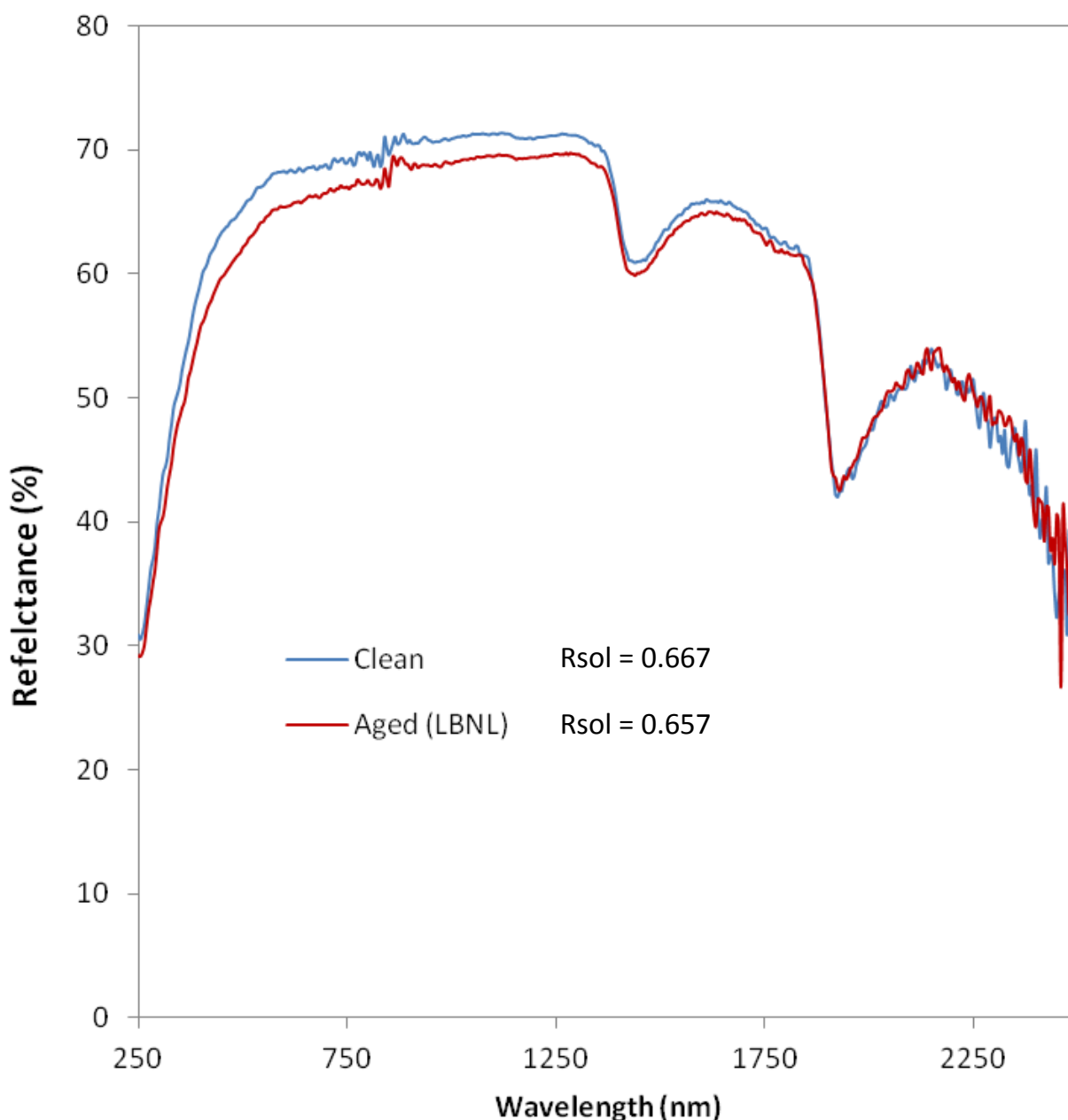


Figura 3. Riflettanza spettrale di un campione sabbiato di malta fibrorinforzata bianca prima (clean) e dopo un ciclo di invecchiamento e sporcamento accelerato.

I risultati relativi ai primi campioni testati con la procedura accelerata mostrano un decremento relativo della riflettanza solare pari a circa l'1.5% rispetto alla condizione iniziale (da 0.667 a 0.657) dopo un ciclo di invecchiamento e sporcamento di tre giorni (Figura 3). In particolare si osserva che con la procedura accelerata il decadimento della riflettanza è concentrato nel campo della radiazione visibile e nella porzione più prossima del NIR (fino a circa 1300 nm), mentre non si apprezzano alterazioni rilevanti oltre i 1500 nm. I campioni esposti in ambiente esterno sono stati rivolti a Sud e a Nord, e la riflettanza spettrale è stata misurata al tempo zero e dopo sei mesi di esposizione. Qui si presentano i risultati relativi all'esposizione in verticale e in verticale sottosquadro, schermati dalla pioggia (Figura 4), per i quali si osserva che il maggiore decremento è relativo all'esposizione a Nord non schermata.

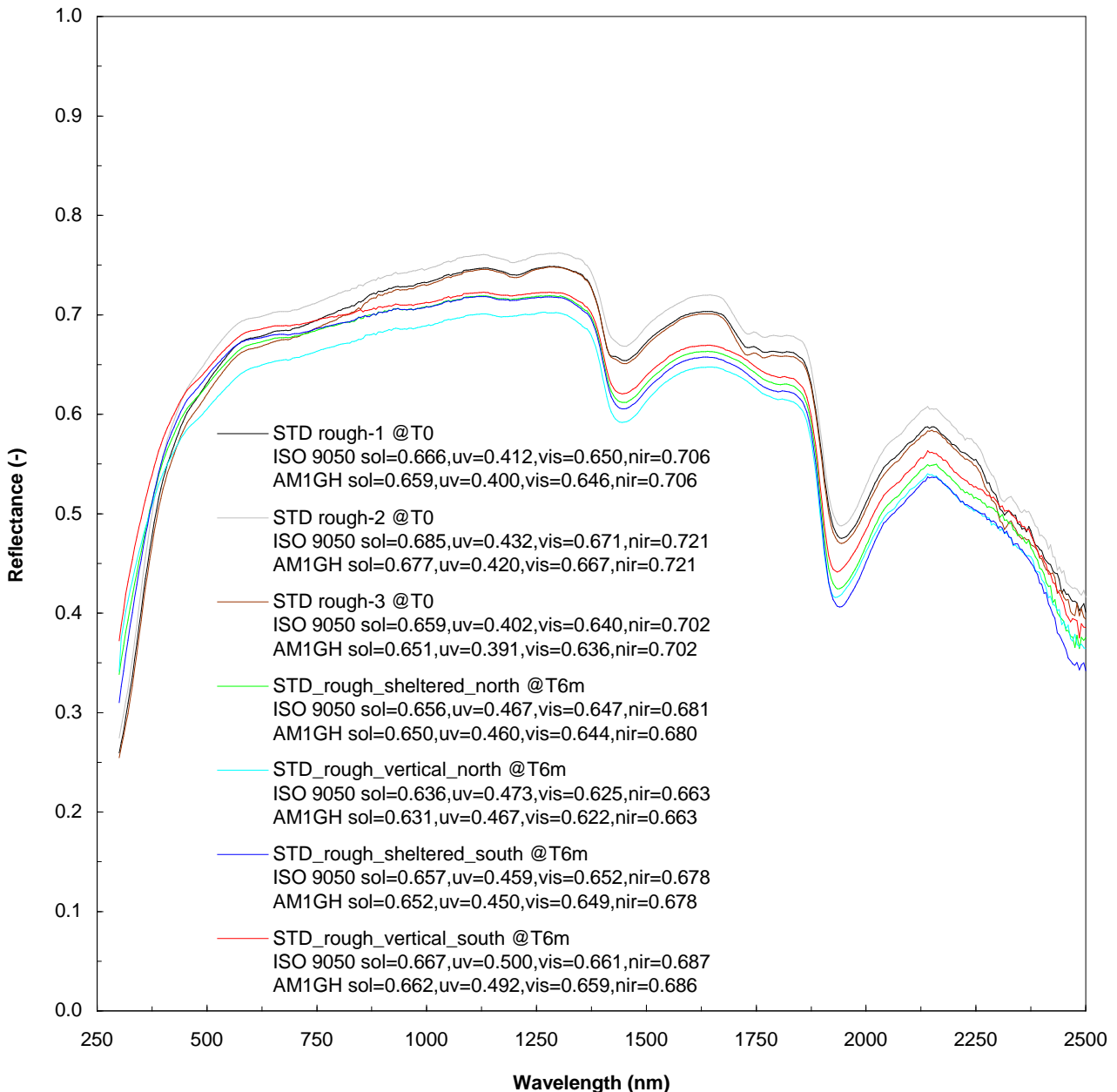


Figura 4. Riflettanza di campioni sabbiati di malta fibrorinforzata bianca prima non esposti (@T0) e dopo sei mesi di esposizione (@T6m) a Milano (esposizione iniziata il 18 ottobre 2011).

Confrontando i dati dell'esposizione naturale e dell'esposizione accelerata si osservano valori simili di decremento relativo di riflettanza solare (dell'1.5% con l'esposizione accelerata, e in media del 2% con l'esposizione naturale, anche se il decremento è di quasi il 5% per l'esposizione a Nord non schermata). Si

osservano, invece, differenze in merito alla forma degli spettri dei campioni invecchiati naturalmente e in maniera accelerata. I campioni esposti in ambiente esterno presentano un decremento su tutte le lunghezze d'onda, mentre per i campioni sottoposti ai cicli di invecchiamento e sporcamento accelerato non si osservano riduzioni rilevanti oltre i 1500 nm.

Un secondo confronto è stato operato su provini del medesimo materiale, ma con finitura liscia, anch'essi sia sporcati in maniera accelerata sia esposti in ambiente esterno a Milano (a partire dal 18 ottobre 2011). Anche nel caso dei campioni lisci (Figura 5) con lo sporcamento e invecchiamento accelerato si apprezzano decadimenti, rispetto alla condizione iniziale, concentrati nella porzione visibile dello spettro solare. In questo caso il deprezzamento della riflettanza solare rispetto alla condizione iniziale è maggiore, pari al 3.7% (da 0.731 a 0.704).

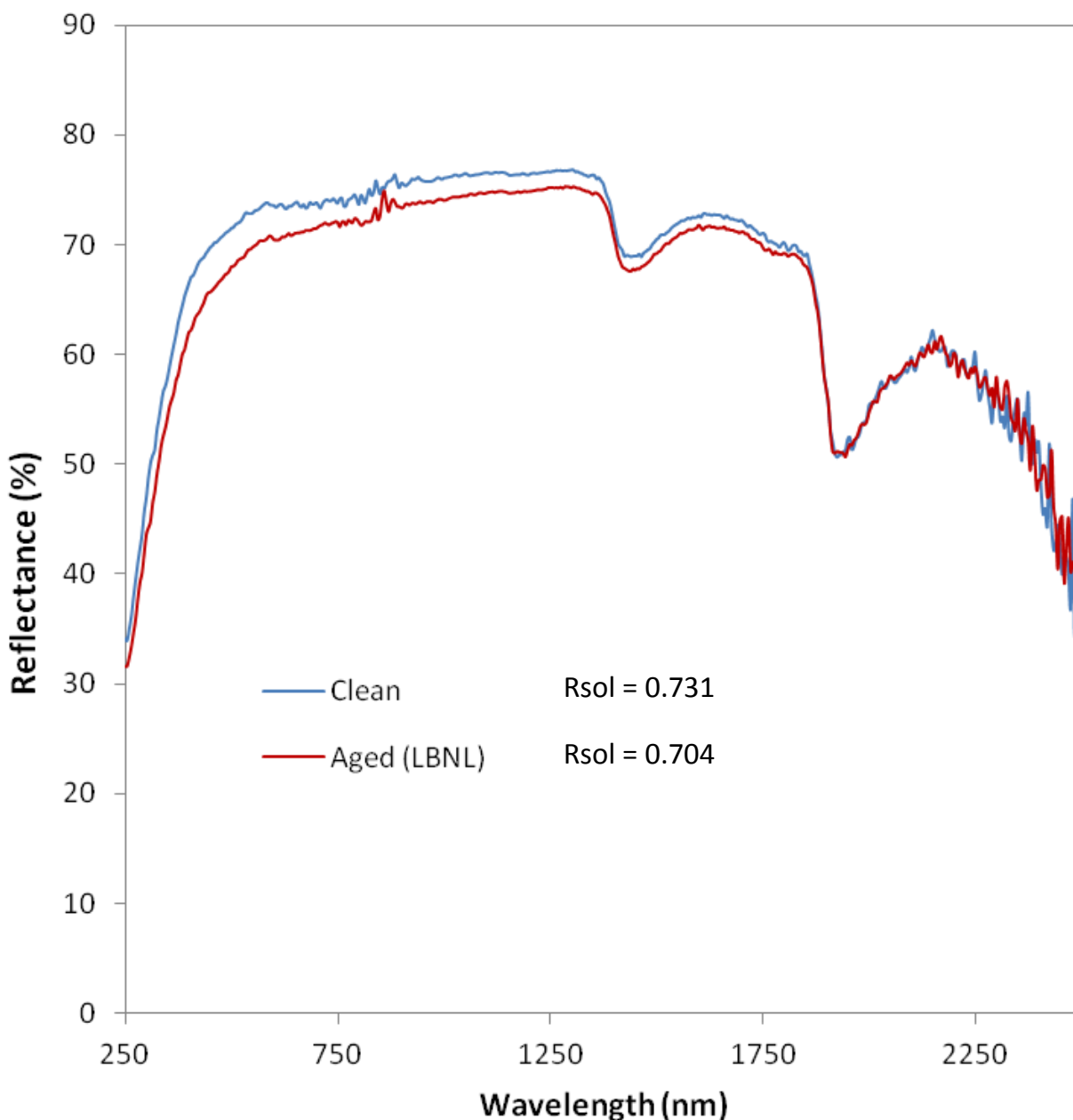


Figura 5. Riflettanza spettrale di un campione liscio di malta fibrorinforzata bianca prima (clean) e dopo un ciclo di invecchiamento e sporcamento accelerato.

Anche per i campioni lisci, il maggiore decremento rispetto alla condizione iniziale è relativo all'esposizione a Nord non schermata, mentre le riflettanze spettrali dei campioni esposti a Sud sono identiche (Figura 6).

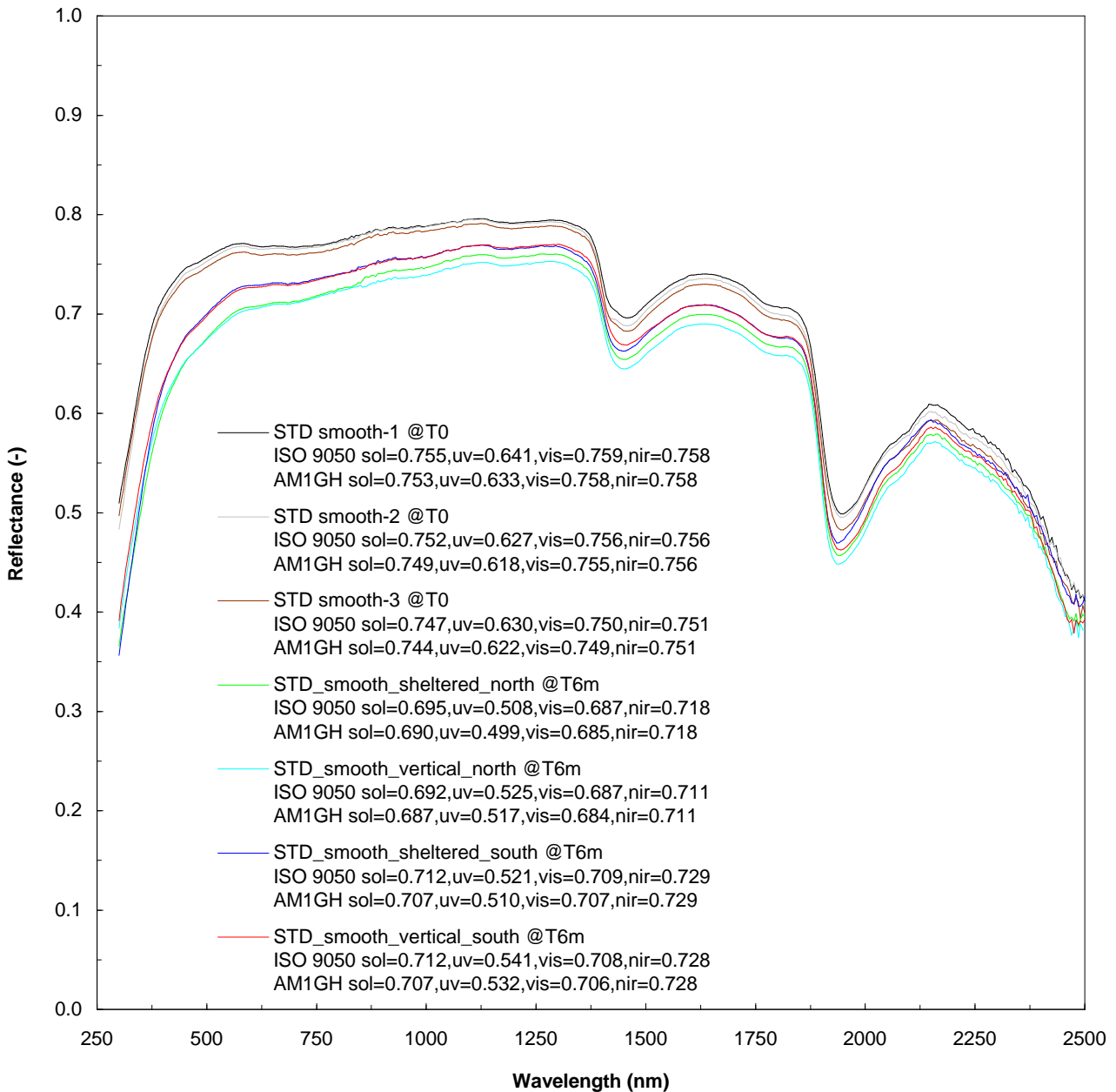


Figura 6. Riflettanza di campioni lisci di malta fibrorinforzata bianca prima non esposti (@T0) e dopo sei mesi di esposizione (@T6m) a Milano (esposizione iniziata il 18 ottobre 2011).

Confrontando, per i campioni con finitura liscia, i dati dell'esposizione naturale e dell'esposizione accelerata si osservano decrementi molto più marcati ottenuti con l'esposizione naturale (in media del 6.8%) rispetto all'esposizione accelerata (con la quale si è ottenuto un decremento del 3.69%). Questa differenza è probabilmente imputabile al fatto che con l'esposizione naturale la crosta liscia che costituisce la finitura è ammalorata già nei primi sei mesi di esposizione, aumentando inoltre la porosità aperta (cioè la porosità superficiale) e quindi la capacità di raccogliere e fare aderire il particolato atmosferico, mentre la procedura accelerata prevede un numero di cicli non sufficiente ad ottenere il medesimo effetto.

In questo caso si notano minori differenze nella forma degli spettri dei campioni invecchiati naturalmente e di quelli invecchiati in maniera accelerata. I campioni esposti in ambiente esterno presentano un decremento chiaramente apprezzabile fino a circa 1800 nm (poi le differenze sono sempre presenti, ma

meno marcate, dell'ordine di grandezza dell'1.5%); per i campioni sottoposti ai cicli di invecchiamento e sporcamento accelerato si notano decrementi dello stesso ordine di grandezza ottenuto con l'esposizione naturale sino a circa 1800 nm, mentre dai 1800 ai 2500 nm le curve sono sovrapposte.

In generale, il protocollo di invecchiamento e sporcamento accelerato coglie l'ordine di grandezza dei decrementi di riflettanza solare che possono essere ottenuti con l'esposizione naturale, anche se alcune specializzazioni della procedura e ulteriori test appaiono necessari (Tabella 2). Si puntualizza, comunque, che saranno eseguiti ulteriori test accelerati, ad esempio utilizzando il mix che riproduce le condizioni di sporcamento presso il sito dell'Ohio (che è un sito suburbano, e si avvicina maggiormente alle condizioni di inquinamento delle città italiane), prima di arrivare a una specializzazione del mix per lo sporcamento accelerato rappresentativa dei contesti urbani italiani.

Tabella 2. Confronto dei risultati ottenuti con esposizione naturale e protocollo accelerato (riflettanza solare misurata secondo ASTM E 903 e calcolata rispetto alla distribuzione spettrale di irradianza solare globale sul piano orizzontale per massa d'aria pari a 1).

Campioni	Esposizione	R <sub>SOL</sub>	Variazione	Variazione relativa (%)
Standard sabbiati	Tempo zero ITA	0.663	-	-
	Nord verticale	0.631	0.032	4.76%
	Nord verticale sottosquadro	0.650	0.013	1.90%
	Sud verticale	0.662	0.000	0.06%
	Sud verticale sottosquadro	0.652	0.011	1.63%
	Tempo zero LBNL	0.667	-	-
	Accelerato LBNL	0.657	0.010	1.50%
Standard lisci	Tempo zero ITA	0.749	-	-
	Nord verticale	0.687	0.061	8.20%
	Nord verticale sottosquadro	0.690	0.059	7.88%
	Sud verticale	0.707	0.042	5.58%
	Sud verticale sottosquadro	0.707	0.042	5.57%
	Tempo zero LBNL	0.731	-	-
	Accelerato LBNL	0.704	0.027	3.69%

## Conclusioni

L'utilizzo di materiali ad elevata riflettanza solare 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 sporco, e processi di invecchiamento dei materiali.

Attualmente esiste solo un metodo di prova accelerato che accoppia sporco e cicli climatici [15], che riproduce la deposizione di sporco considerando un procedimento, simile alla sabbiatura, durante il quale le polveri vengono accelerate con un ventilatore e fatte incidere contro i provini. Un metodo di prova in fase sperimentale è stato sviluppato al LBNL da Sleiman et al. [8], combinando il ciclo di invecchiamento della ASTM G 154 [10] con lo spruzzamento di una sospensione di particolato atmosferico sui campioni, rappresentativo della media dei depositi atmosferici che vengono osservati presso i tre campi di esposizione del CRRC (Arizona, Ohio, e Florida). Il metodo sviluppato al LBNL - e confrontato con i risultati di un anno e sei mesi di esposizione naturale presso i tre siti del CRRC.

È stata condotta una prima campagna esplorativa di prove di invecchiamento e sporco accelerato presso il Lawrence Berkeley National Laboratory, su campioni malte fibrorinforzate a superficie rugosa, ottenuta mediante sabbiatura, e analoghi campioni a finitura liscia, tutti di colore bianco. Confrontando i dati relativi ai campioni sabbiati esposti in ambiente esterno (dopo sei mesi di invecchiamento naturale a Milano, con campioni esposti in verticale e verticale schermato, orientati a Nord e a Sud) e i dati dei campioni sottoposti all'esposizione accelerata si osservano valori simili di decremento relativo di riflettanza solare (dell'1.5% con l'esposizione accelerata, e in media del 2% con l'esposizione naturale. Si osservano, invece, differenze in merito alla forma degli spettri dei campioni invecchiati naturalmente e in maniera accelerata. Nel caso dei campioni a finitura liscia si osservano minori differenze in merito alla forma degli spettri, ma maggiori differenze relative ai decrementi rispetto al valore iniziale (variazioni in media del 6.8% con l'esposizione naturale, e del 3.69% con l'esposizione accelerata).

### *Linee di sviluppo*

Fra le attività future si individuano:

- La misura della riflettanza dei campioni esposti in ambiente esterno, per almeno 3 anni;
- Prove di invecchiamento e sporco accelerato sui prodotti per coperture oggetto di questo studio (queste prove sono in corso di svolgimento);
- Ulteriori test accelerati, utilizzando il mix che riproduce le condizioni di sporco presso il sito dell'Ohio (che è un sito suburbano, e si avvicina maggiormente alle condizioni di inquinamento delle città italiane); e
- La specializzazione del mix per lo sporco accelerato rappresentativa dei contesti urbani italiani.



## Riferimenti bibliografici

- [1] G. Alaimo (a cura di). 2006. Valutazione sperimentale della durabilità di coperture discontinue. Un'applicazione al pannello sandwich. ediTecnica editrice, Palermo.
- [2] G. Alaimo, F. Accurso. 2010. Test methods for the durability evaluation of pitched roof, pp. 59-71, in B. Daniotti, F. Re Cecconi, "CIB W080: 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 Publication 331, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Rotterdam, The Netherlands.
- [3] B. Daniotti, F. Re Cecconi, "CIB W080: 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". International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Pubb. 331. Rotterdam, NL. [http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/w080\\_wg3\\_report.pdf](http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/w080_wg3_report.pdf)
- [4] European Commission. 1999. Durability and the Construction Products Directive, Guidance Paper F, European Commission, DG III, Brussels, Belgium. <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/gpf.pdf>
- [5] R. Levinson, P. Berdahl, A.A. Berheb, H. Akbari. 2005. Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane. *Atmospheric Environment*. 39: 7807–7824
- [6] M. Nicoella (a cura di). 2006. La durabilità delle coperture continue. ediTecnica editrice, Palermo
- [7] M. Nicoella. 2010. Test methods for the durability evaluation of flat roof, pp. 73-84, in B. Daniotti, F. Re Cecconi, "CIB W080: 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 Publication 331, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Rotterdam, The Netherlands.
- [8] M. Sleiman, H. Destailats, T. Kirchstetter, H. Gilbert, P. Berdahl, H. Akbari, L. Marlot, S. Quelen, C. Preble, M. Spears, G. Ban-Weiss, R. Levinson. 2011a. Accelerated Aging Protocols for Roofing Materials: Version 1.0, in Proc. of International Workshop on Advances in Cool Roof Research, Berkeley, CA – July 28 & 29, 2011

## Riferimenti normativi

- [9] ETAG 016: 2003. Guideline for European Technical Approval of Self-Supporting Composite Lightweight Panels. Part 2: Specific aspects relating to Self-supporting Composite Lightweight Panels for use in roofs
- [10] ASTM G 154: Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials
- [11] ASTM G 155: 2005. Standard Practice for Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials
- [12] ASTM E 903: 1996. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres
- [13] EN 1297: Flexible sheets for waterproofing - Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing - Method of artificial ageing by long term exposure to the combination of UV radiation, elevated temperature and water
- [14] ASTM D 4799: 2008. Standard Practice for Accelerated Weathering Test Conditions and Procedures for Bituminous Materials (Fluorescent UV, Water Spray, and Condensation Method)
- [15] JSTM J 7602: 2003. Building exterior wall material contamination accelerated test method (disponibile solo in giapponese)



- [16] ISO 9050: 2003. Glass in building — Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors
- [17] UNI 11156: 2005. Valutazione della durabilità dei componenti edilizi
- [18] ISO 11341: 2004. Paints and varnishes – Artificial weathering and exposure to artificial radiation - Exposure to filtered xenon-arc radiation
- [19] UNI EN 14509: 2006. Self-supporting double skin metal faced insulating panels - Factory made products - Specifications
- [20] ISO 15686: 2000. Building and constructed assets. Service life planning. Part 1. General Principles
- [21] ISO 15686: 2001. Building and constructed assets. Service life planning. Part 2. Service life prediction principles

## Abbreviazioni ed acronimi

### *Simboli*

$R_{SOL}$	Riflettanza solare (media pesata rispetto alla distribuzione spettrale di irradianza solare fra 300 e 2500 nm, secondo ISO 9050)
$R_{UV}$	Riflettanza nel campo della radiazione UV (media pesata rispetto alla distribuzione spettrale di irradianza solare fra 300 e 380 nm, secondo ISO 9050)
$R_{VIS}$	Riflettanza nel campo della radiazione visibile (media pesata rispetto alla distribuzione spettrale di irradianza solare fra 380 e 780 nm, secondo ISO 9050)
$R_{NIR}$	Riflettanza nel campo del vicino infrarosso (media pesata rispetto alla distribuzione spettrale di irradianza solare fra 780 e 2500 nm, secondo ISO 9050)
$R_{SOL,i}$	Riflettanza solare iniziale (riflettanza solare di un prodotto non esposto)

### *Acronimi*

ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
EU-CRC	European Cool Roofing Council
CRRC	US Cool Roofing Rating Council
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
NIR	Campo della radiazione del vicino infrarosso (Near Infra-Red) compreso fra 780 e 2500 nm
PVC	Polivinilcloruro (membrane termoplastiche)
TPO	Membrane termoplastiche poliolefiniche
US EPA	Environmental Protection Agency of the United States of America

## Allegato A - 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 presso il Politecnico di Milano, con una tesi (sviluppata a Milano, al Lawrence Berkeley National Lab e al King's College London) sulla mutua influenza fra superfici urbane e microclima. E' assegnista di ricerca e parte del TiSco Group al dipartimento di Scienza e Tecnologia dell'Ambiente Costruito, Politecnico di Milano. Dal 2009 è affiliato all'Heat Island Group, Lawrence Berkeley National Laboratory. 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 e di durabilità di materiali e componenti edilizi (membro della commissione CIB W080 e supporto all'attività pre-normativa per la commissione ISO TC59 SC14);
- La modellazione 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 dei Sistemi Edilizi è professore associato di Architettura Tecnica presso il Politecnico di Milano. Dal 2003 è membro del comitato scientifico del Building Environment Science and Technology Laboratory (BEST Lab) presso il Politecnico di Milano.

Principali attività didattiche e di ricerca:

La tecnologie e le prestazioni dell' involucro edilizio per edifici a basso fabbisogno energetico (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 per l'edilizia;

Mitigazione dell'effetto isola di calore e ricadute delle prestazioni dell'involucro edilizio sul microclima urbano (membro di CIB W108 climate change and built environment);

Consulente per industrie del settore edile.

**Matteo Fiori**, nato a Milano il 4 Giugno del 1968, laureato in Ingegneria Edile nel 1994, ha conseguito il dottorato in Ingegneria Edile nel 1997, è ricercatore (ICAR/10) presso il Dipartimento B.E.S.T del Politecnico di Milano.

Dal 1997 al 2003 ha conseguito un assegno di ricerca Post Doc nel gruppo di ricerca guidato dal Prof. Sergio Croce e denominato "Strategie e strumenti per il recupero e il miglioramento degli edifici residenziali"

Dal settembre 2005 è ricercatore in Architettura Tecnica (ssd ICAR 10) presso il Dipartimento B.E.S.T. del Politecnico di Milano

**Andrea Giovanni Mainini**, nato a Gallarate (Va) il 17 Giugno 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. Membro del Tisco Group presso il Dipartimento B.E.S.T. del Politecnico di Milano.

Principali attività didattiche e di ricerca:

- Efficienza energetica degli edifici, near zero energy buildings e integrazione nell'edificio di impianti che sfruttano risorse rinnovabili.
- Innovazione di prodotti, sistemi e componenti per l'edilizia;
- Caratterizzazione ottico-energetica delle superfici per l'involucro edilizio;
- Tecnologia dell' involucro edilizio e controllo, ottimizzazione ed eliminazione dei Ponti Termici in Edilizia;
- Consulente energetico per differenti aziende del settore delle costruzioni;
- Docente di numerosi corsi di aggiornamento per professionisti e per certificatori energetici.