



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di materiali e tecnologie per la  
riduzione degli effetti della radiazione solare.  
B. Invecchiamento e sporcamento  
accelerato di cool materials.

*R. Paolini, T. Poli, M. Zinzi, A. G. Mainini,  
M.P. Fiori, A. Speroni, L. Vercesi*

## INVECCHIAMENTO E SPORCAMENTO ACCELERATO DI COOL MATERIALS

Riccardo Paolini, Tiziana Poli, Andrea Giovanni Mainini, Matteo Paolo Fiori, Alberto Speroni, Lorenzo Vercesi, Politecnico di Milano – Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente costruito – *Architecture, Built environment and Construction engineering Dept.* – ABC

Michele Zinzi - ENEA

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

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: C2

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo di materiali e tecnologie per la riduzione degli effetti della radiazione solare. Invecchiamento e sporcamiento accelerato di cool materials"

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico Politecnico di Milano, Dipartimento ABC: Tiziana Poli

Si ringrazia l'ing. Emiliano Carnielo - UniRomaTre per il supporto nell'attività di misura dei campioni esposti naturalmente. 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. Il setup sperimentale per lo sporcamiento accelerato è stato realizzato grazie al finanziamento da Politecnico di Milano - Agenzia delle Entrate in supporto al progetto "Cinque per mille junior - Rivestimenti fluorurati avanzati per superfici edilizie ad alte prestazioni". Si ringraziano sentitamente Hugo Destailats, Mohamad Sleiman e Ronnen Levinson - Heat Island Group, Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, CA, USA) per il supporto per la procedura di sporcamiento accelerato. Le prove di sporcamiento accelerato della prima serie presentata sono state eseguite da R. Paolini al Lawrence Berkeley National Laboratory nell'ambito della collaborazione fra i due gruppi di ricerca.

## Indice

SOMMARIO.....	4
INTRODUZIONE.....	6
1.1 OGGETTO DELLA RICERCA .....	6
1.2 MOTIVAZIONE DELLA RICERCA .....	6
1.3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ .....	7
1.4 GLI OBIETTIVI DELLA RICERCA .....	7
2 MATERIALI SELEZIONATI E TESTATI .....	7
3 ESPOSIZIONE NATURALE IN AMBIENTE URBANO .....	9
4 MISURA DELLA RIFLETTANZA UV-VIS-NIR.....	11
5 RISULTATI DELL'ESPOSIZIONE NATURALE.....	13
6 PROCEDURA DI INVECCHIAMENTO E SPORCAMENTO ACCELERATO .....	23
6.1 STRUMENTAZIONE NECESSARIA .....	23
6.2 DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA.....	24
6.2.1 Fase A: condizionamento .....	24
6.2.2 Fase B: sporcamento .....	24
6.2.2.1 Preparare soluzioni acquose di agenti sporcanti individuali.....	24
6.2.2.2 Preparare miscele di agenti sporcanti .....	24
6.2.2.3 Nebulizzazione della miscela di sporco sui campioni.....	25
6.2.3 Fase C: invecchiamento .....	25
6.2.4 Fase D: Misura riflettanza solare .....	25
7 PROVE DI INVECCHIAMENTO E SPORCAMENTO ACCELERATO ESEGUITE .....	26
8 RISULTATI DELLE PROVE DI INVECCHIAMENTO E SPORCAMENTO ACCELERATO .....	28
9 CONCLUSIONI.....	38
10 RIFERIMENTI .....	39
11 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	41
12 ALLEGATO A - DETTAGLI PER LA PROCEDURA DI SPORCAMENTO ACCELERATO.....	42
12.1 AGENTI SPORCANTI .....	42
12.1.1 Particolato fuliginoso .....	42
12.1.2 Pulviscolo.....	42
12.1.3 Sali.....	42
12.1.4 Particolato di materie organiche (POM) .....	43
12.1.5 Composizione della miscela sporcante.....	43
12.1.5.1 Composizione del miscuglio sporcante per condizioni medie in U.S.A. ....	43
12.1.5.2 Composizione del miscuglio sporcante per climi caldi e secchi (Arizona CRRC) .....	43
12.1.5.3 Composizione della miscela sporcante per climi caldi e umidi (Florida CRRC) .....	43
12.1.5.4 Composizione della miscela sporcante per climi con estati moderate e inverni rigidi (Ohio CRRC).....	43
12.2 APPLICAZIONE DEGLI AGENTI SPORCANTI .....	43
12.3 CELLE PER INVECCHIAMENTO ACCELERATO .....	43
12.4 NEBULIZZAZIONE .....	43
12.5 CONCENTRAZIONE DI SPORCO SUPERFICIALE.....	44
12.6 VALIDAZIONE, PRECISIONE ED ERRORI .....	44
13 ALLEGATO B – DETTAGLI PROVE DI SPORCAMENTO ACCELERATO CONFRONTATE CON L'ESPOSIZIONE NATURALE NELLE TRE CONDIZIONI.....	45
14 ALLEGATO C – CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO .....	50

## Sommario

I materiali ad alta riflettanza solare sono diffusamente riconosciuti come un'opzione per limitare i picchi della temperatura superficiale esterna dell'involucro degli edifici nella stagione estiva, per cercare di mitigare il microclima urbano al fine di diminuire il fabbisogno energetico per il raffrescamento. Tuttavia, le superfici esterne degli edifici sono soggette a sporcamento a causa del deposito di polveri sottili e altri tipi di particolato presenti nell'aria, di composti organici volatili (e di altri elementi), in aggiunta ai naturali processi di invecchiamento. Tutti questi agenti riducono la riflettanza delle superfici, specie di quelle aventi riflettanza solare iniziale maggiore di 0.40, mentre incrementano lievemente la riflettanza di superfici aventi una riflettanza solare iniziale inferiore a 0.20. Per i *cool roofs*, la riduzione della riflettanza solare in ragione di sporcamento e invecchiamento comporta un incremento della temperatura superficiale e una conseguente riduzione dell'energia risparmiata per il raffrescamento. L'incremento dell'assorbanza solare comporta inoltre cicli di dilatazione e contrazione dovuti alle variazioni di temperature, oltre che il raggiungimento di valori di picco molto maggiori che per il materiale appena posato. Tutto ciò incide quindi sulla vita utile del materiale e del componente edilizio (in questo caso la copertura), e quindi sull'intero ciclo di vita.

Per quantificare questi effetti, sono stati esposti in ambiente urbano (a Milano e a Roma) campioni di quattordici membrane impermeabilizzanti per copertura, sia sintetiche sia bituminose, e di due tegole di tipo olandese. Sono stati selezionati prodotti avente proprietà "standard" (cioè rappresentativi delle proprietà dei prodotti già presenti in commercio) e una o più alternative aventi prestazioni ottimizzate, cioè ad alta riflettanza nel vicino infrarosso, o fotocatalitici. Per ogni prodotto, sito e condizione di esposizione, sono stati esposti tre campioni, dei quali, al tempo zero e dopo tre, sei, e dodici mesi di esposizione naturale, è stata misurata la riflettanza spettrale con uno spettrometro UV-Vis-NIR e ne sono stati calcolati i valori di riflettanza solare, nel campo UV, visibile e del vicino infrarosso secondo la norma ISO 9050 [5] (le misure al tempo zero e dopo tre mesi sono state effettuate nell'anno di attività 2011/2012). Per i prodotti con riflettanza solare iniziale maggiore di 0.70 è stato osservato un decremento anche del 15% dopo soli tre mesi di esposizione, mentre per prodotti con riflettanza solare iniziale minore di 0.40 sono state osservate variazioni modeste. Dopo un anno di esposizione naturale a Milano sono stati osservati deprezzamenti dell'ordine del 30% della riflettanza solare iniziale per membrane con riflettanza iniziale maggiore di 0.80, mentre a Roma, per le stesse membrane, è stata osservata una riduzione del 20%. Questi risultati saranno presentati e pubblicati in settembre al convegno internazionale "*Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials*" (Atene, Grecia).

E' stata condotta anche una campagna di invecchiamento e sporcamento accelerato in laboratorio con la procedura sviluppata dal Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) e descritta da Sleiman et al. [13]. Questa prima campagna di prove è stata condotta sulle stesse membrane esposte in ambiente urbano, trovando una buona correlazione sia in termini di distribuzione spettrale che di valori integrati. Tuttavia, la procedura sviluppata dal LBNL è stata progettata per riprodurre lo sporcamento dopo tre anni di esposizione presso tre siti non urbani negli USA (in Arizona, Florida, e Ohio). Si può comunque osservare un buon raccordo con i dati relativi ai sei mesi di esposizione a Roma e Milano. La procedura accelerata è stata quindi affinata aumentando l'intensità dello sporcamento per meglio simulare la deposizione e l'adesione dello sporco alla superficie esterna dell'involucro degli edifici in aree metropolitane come quelle italiane. Sono state inoltre testate diverse miscele per lo sporcamento e diversi apparati di prova. In particolare, si nota come i decrementi di riflettanza misurati per i prodotti esposti presso i siti del Cool Roofing Rating Council negli USA dopo tre anni di invecchiamento, presso Roma e Milano, si misurano dopo soli 6-12 mesi.

Il report riporta l'evoluzione del decadimento prestazionale dei campioni e la variante della procedura di sporcamento e invecchiamento accelerato di materiali a partire dal protocollo di sporcamento sviluppato dall'Heat Island Group del Lawrence Berkeley National Laboratory. La conoscenza dell'incidenza dello

sporramento per i differenti materiali dell'involucro edilizio consente di meglio stimare il risparmio energetico per il raffrescamento, programmando pulizia e manutenzione degli elementi costruttivi e di definire il ciclo di vita utile dell'elemento tecnico al variare delle sollecitazioni (eventualmente studiando i benefici di possibili trattamenti anti-sporcamento).

## Introduzione

In Letteratura ci sono molti studi riguardo la valutazione dell'evoluzione nel tempo della riflettanza spettrale di materiali per l'involucro degli edifici (es.: [7]; [9]). Inoltre 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 riflettanza solare ( $\rho_{SOL}$ ) ed emissività termica ( $\varepsilon$ ) al tempo zero e dopo tre anni di esposizione naturale di 2469 prodotti (dati relativi ad Agosto 2013). Più in dettaglio, il CRRC gestisce l'esposizione di prodotti per coperture in 3 siti negli Stati Uniti (i valori di  $\rho_{SOL}$  e  $\varepsilon$  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). È interessante notare come nessuno dei siti sia in ambiente urbano (evidentemente per motivi di spazio necessario all'esposizione naturale e costo dell'uso del suolo). Presso i siti del CRRC, come analizzato da Sleiman et al., [12], escludendo i materiali con riflettanza solare iniziale ( $\rho_{SOL,T0}$ ) inferiore a 0.20, tutti i prodotti presentano un decremento di  $\rho_{SOL}$ . Per esempio, i prodotti caratterizzati da  $\rho_{SOL,T0}$  maggiore di 0.80 presentano, dopo tre anni, un decremento pari a 0.20 con una variazione del 15% in relazione al contesto di esposizione. Inoltre, come notato da Sleiman et al. [12] questi database non includono dati spettrali utili al fine di comprendere gli agenti che producono la variazione di riflettanza e al fine di studiare possibili contromisure allo sporcamento (cioè azioni di pulizia o trattamenti anti-sporcamento). Questo aspetto è stato investigato da Berdahl et al., [7] che hanno studiato un set di membrane per coperture e hanno identificato i depositi di particelle disperse nell'atmosfera, e individuato nel particolato fine il principale agente che causa della variazione della riflettanza. Berdahl et al. osservano, inoltre, che il particolato fine assorbe maggiormente alle basse lunghezze d'onda (cioè nel visibile) che nel NIR, portando a un ingiallimento della superficie. Tuttavia, anche se vi sono dati disponibili, anche se raramente spettrali, circa l'intensità della variazione delle proprietà ottico-radiative nel tempo di materiali per coperture e anche riguardo diverse procedure alternative per la pulizia [11], questi riguardano quasi solo il contesto del Nord America.

In questo lavoro si presentano quindi i risultati del primo anno di esposizione naturale in ambiente urbano a Milano e Roma di sedici materiali per coperture, fra cui membrane impermeabilizzanti per coperture (sintetiche monostrato, sintetiche con rivestimento elastomerico realizzato in stabilimento, con rivestimento elastomerico applicato in opera su bitume-polimero, e bitume-polimero granigliate) e tegole in laterizio (testa di moro e con rivestimento bianco). Per ogni classe di prodotto (per esempio membrane sintetiche) è stato selezionato un prodotto con alta e uno con medio-bassa riflettanza. È stata misurata la riflettanza spettrale nel campo UV-Vis-NIR di tre campioni per ogni prodotto (per ciascun tipo) dopo tre, sei, e dodici mesi di esposizione naturale.

### 1.1 Oggetto della ricerca

La ricerca prevede lo studio dell'andamento nel tempo della riflettanza solare di prodotti per coperture di edifici sottoposti a invecchiamento naturale e la determinazione di una procedura di sporcamento accelerato replicabile. Viene effettuata una prima validazione della procedura grazie al confronto fra i dati ottenuti con lo sporcamento accelerato e con il primo anno di esposizione naturale.

### 1.2 Motivazione della ricerca

La motivazione della ricerca ha origine nei risultati dell'anno di attività 2011/2012, durante il quale è stata misurata la riflettanza UV-Vis-NIR di 16 prodotti per coperture (14 membrane impermeabilizzanti e 2 tegole per copertura), e per cui è stato osservato che per i prodotti avente maggiore riflettanza iniziale ( $\rho_{SOL,T0} > 0.80$ ), si ha un decremento anche superiore al 15% del valore iniziale nei soli primi tre mesi di esposizione, a Roma e in maniera più marcata a Milano. Questi valori sono nettamente superiori a quelli

riportati in letteratura per i siti di esposizione del Cool Roofing Rating Council (Ohio, Arizona e Florida), che sono però siti extra-urbani in zone non inquinate, dove decrementi percentuali del valore iniziale di quest'ordine di grandezza vengono raggiunti dopo 1.5-3 anni di esposizione. Per valutare quindi le prestazioni attese di edifici sui quali siano applicati cool materials, e in generale per valutare il fabbisogno energetico degli edifici, occorre quindi conoscere l'effettivo andamento nel tempo (o con un'approssimazione accettabile) della riflettanza solare dei materiali per l'involucro edilizio.

### 1.3 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:

- Prosecuzione dell'esposizione in esterno di materiali da costruzione a Roma e Milano. A seguito di un'analisi preliminare, sono state individuate 14 membrane impermeabilizzanti e 2 tegole in laterizio per coperture discontinue;
- Misura della riflettanza UV-Vis-NIR dopo 6 e 12 mesi (le misure al tempo zero e dopo 3 mesi di esposizione sono state effettuate nel precedente anno di attività);
- Invecchiamento e sporcamento accelerato secondo la procedura generale sviluppata dal Lawrence Berkeley National Laboratory;
- Invecchiamento e sporcamento accelerato utilizzando una diversa miscela per lo sporcamento, al fine di meglio rappresentare le deposizioni sulle superfici edilizie nelle aree metropolitane italiane;
- Valutazione di diversi tempi di deposizione (nella procedura accelerata), per riprodurre lo sporcamento dopo un anno di esposizione naturale in ambiente urbano (di cui si dispongono i dati da esposizione naturale);
- Confronto dei risultati e prima validazione del metodo.

### 1.4 Gli obiettivi della ricerca
















Gli obiettivi di questo studio includono:

- La messa a punto di una procedura per l'esposizione in esterno e la caratterizzazione del comportamento ottico-radiativo nel tempo di materiali per l'involucro edilizio;
- La valutazione della variazione nel tempo della riflettanza solare di materiali per l'involucro edilizio;
- Prove di invecchiamento e sporcamento accelerato sugli stessi materiali esposti in ambiente esterno;
- Una prima validazione (sulla base di un anno di dati di invecchiamento naturale) della procedura di invecchiamento e sporcamento accelerato;

## 2 Materiali selezionati e testati

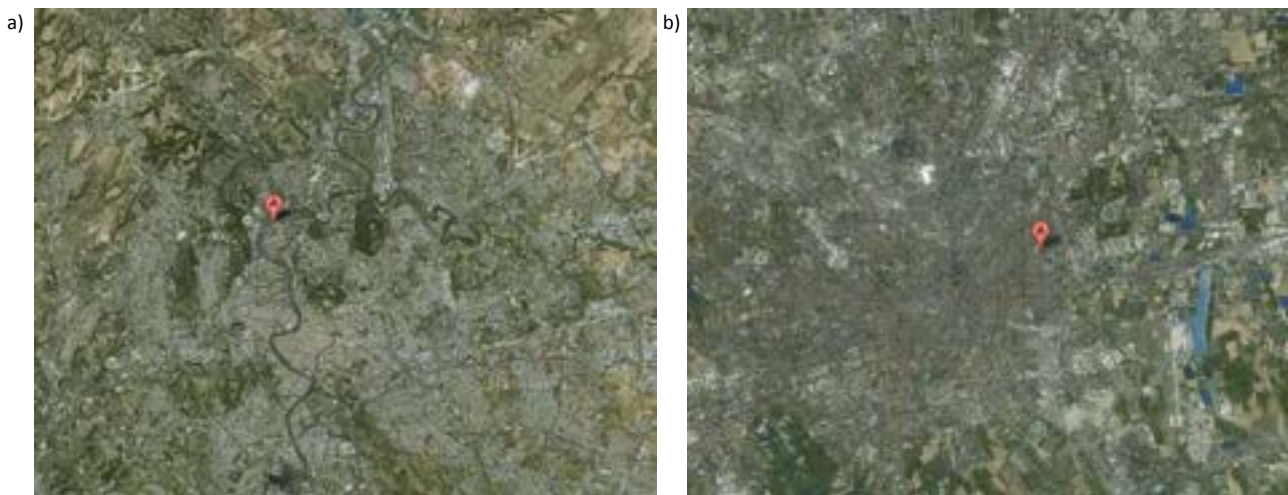
Per valutare l'effetto dello sporcamento sui materiali per l'involucro degli edifici, con particolare riferimento ai prodotti per coperture, sono state selezionate sul mercato quattordici membrane impermeabilizzanti e due tegole in laterizio. Per ogni classe di prodotto è stata selezionata un'opzione "standard", un'alternativa "cool" (cioè con riflettanza maggiore nel vicino infrarosso che nella porzione visibile dello spettro), e, se disponibile, un prodotto alternativo con proprietà fotocatalitiche. Sono stati inclusi nella selezione prodotti aventi riflettanza solare iniziale compresa fra 0.237 e 0.868, 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 (Tabella 1).

**Tabella 1. Descrizione e riflettanza solare iniziale dei materiali selezionati**

Campioni selezionati			
<p>m01 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.256</math></p>  <p>Membrana grigia in poliolefine flessibili (opaca con superficie antiscivolo).</p>	<p>m02 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.852</math></p>  <p>Membrana in poliolefine flessibili con rivestimento elastomerico bianco (in stabilimento).</p>	<p>m03 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.762</math></p>  <p>Membrana bianca in poliolefine flessibili (opaca con superficie antiscivolo).</p>	<p>m04 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.824</math></p>  <p>Membrana in poliolefina termoplastica bianca (lucida)</p>
<p>m05 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.464</math></p>  <p>Membrana grigia in PVC (lucida)</p>	<p>m06 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.838</math></p>  <p>Membrana bianca in PVC (opaca)</p>	<p>m07 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.593</math></p>  <p>Membrana beige in poliolefina termoplastica (opaca)</p>	<p>m08 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.805</math></p>  <p>Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico (bianco+)</p>
<p>m09 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.731</math></p>  <p>Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico (Bianco standard)</p>	<p>m10 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.756</math></p>  <p>Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico fotocatalitico</p>	<p>m11 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.718</math></p>  <p>Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico (Bianco lucido, tipo B)</p>	<p>m12 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.386</math></p>  <p>Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico colorato.</p>
<p>m13 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.282</math></p>  <p>Membrana bitume-polimero granigliata fotocatalitica.</p>	<p>m14 - <math>\rho_{sol,T0} = 0.234</math></p>  <p>Membrana bitume-polimero granigliata (standard).</p>	<p>Tm - <math>\rho_{sol,T0} = 0.485</math></p>  <p>Tegola olandese in laterizio color testa di moro.</p>	<p>Tb - <math>\rho_{sol,T0} = 0.737</math></p>  <p>Tegola olandese in laterizio color testa di moro rivestita di bianco.</p>

### 3 Esposizione naturale in ambiente urbano

Poiché l'impiego di cool materials per coperture è ampiamente identificato come un'opzione per mitigare le isole di calore urbane, si è deciso di valutare lo sporcamento dei prodotti selezionati proprio in contesti urbani. Sono stati selezionati due campi di esposizione in due aree urbane caratterizzate da climi differenti: Roma e Milano (Figura 1). In entrambi i casi i campi di esposizione sono realizzati su coperture piane di edifici senza ombre portate, e sono localizzati a una distanza circa intermedia fra il centro e la periferia, e sono lontani da specifiche sorgenti di inquinamento (ad esempio uno specifico impianto industriale); quindi i campioni sono soggetti all'inquinamento di fondo e alle condizioni medie di deposizione di particolato e altri composti che ne determinano lo sporcamento. Inoltre, a Milano (Figura 2) 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 1. Localizzazione del sito di esposizione naturale di Roma (sede centrale dell'ENEA) sul Lungo Tevere Thaon Di Revel (a). Localizzazione del sito di esposizione naturale presso il Politecnico di Milano (b)**



**Figura 2. Campo di esposizione presso il Politecnico di Milano**

Le membrane impermeabilizzanti sono state esposte debolmente inclinate (1.5% come raccomandato dalla normativa tecnica svizzera e dai codici di pratica italiani) e solo a Milano le membrane sono state esposte anche inclinate di 45 gradi e rivolte a Sud. Le tegole sono state invece esposte, sia a Milano che a Roma, con una pendenza del 30% e rivolte sia a Nord che a Sud (per le sole tegole sono stati esposti piccoli campioni e campioni completi di tegole, i quali verranno però misurati solo alla fine del programma di esposizione, dovendo essere distrutte per consentire la misura con lo spettrometro). Per ogni prodotto e condizione di esposizione (cioè città e pendenza) sono stati esposti tre campioni di 10 cm x 10 cm e vincolati a telai metallici per l'esposizione, a circa 80 cm dal piano della copertura (Figura 3 e Figura 4).



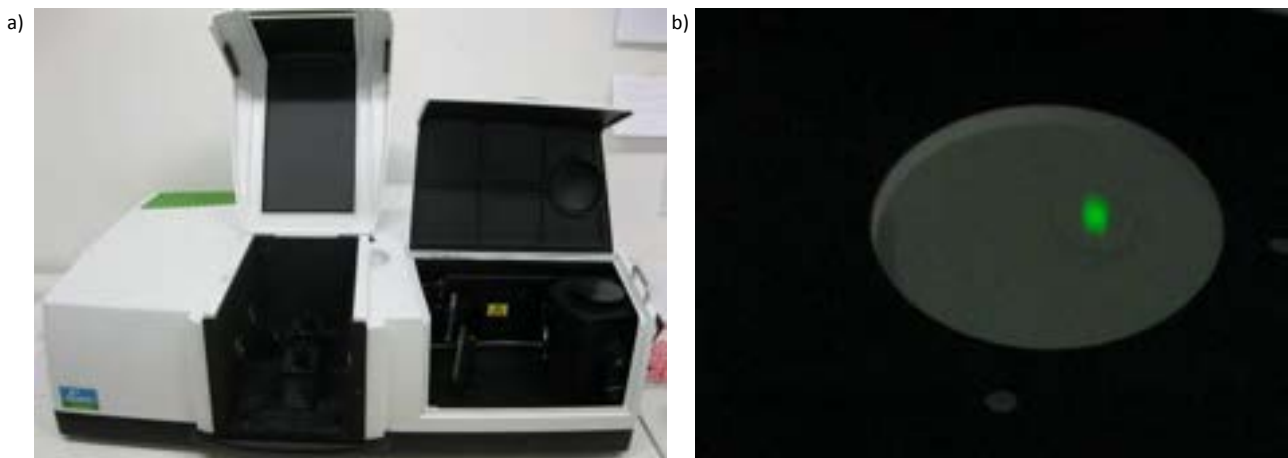
Figura 3. Telaio per l'esposizione naturale e visione d'insieme dei provini esposti



Figura 4. Dettaglio del fissaggio al supporto d'esposizione.

## 4 Misura della riflettanza UV-Vis-NIR

I campioni sono stati caratterizzati al tempo zero e dopo tre, sei e dodici mesi di esposizione naturale, a partire dal 18 Aprile 2012. Per ogni caratterizzazione sono stati tolti dal sito, misurati in laboratorio e riposati sino alla misurazione successiva. Tutte le misure della riflettanza spettrale ( $\rho_\lambda$ ) sono state effettuate nel campo UV-Vis-NR con uno spettrometro (Perkin Elmer Lambda 950 con sfera integratrice Labsphere di 150 mm di diametro rivestita internamente in Spectralon) 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). Con uno spettrometro UV-Vis-NIR (Figura 5) è possibile caratterizzare campioni piani di dimensioni normalmente non superiori a 10 cm x 10 cm, ma l'area caratterizzata è di pochi millimetri. Infatti, ogni campione è stato misurato nel punto centrale, considerato rappresentativo della porzione di campione illuminata dal raggio di misura, un rettangolo di circa 3 mm x 20 mm, sfruttando il resto dei 100 mm x 100 mm per escludere gli effetti di bordo. Per mediare le procedure (per computare i valori solari UV, Visibile e NIR) abbiamo seguito lo standard ISO 9050 [5], che utilizza la distribuzione spettrale d'irradianza della radiazione solare globale sul piano orizzontale con massa d'aria pari a 1.5. Per ogni prodotto e condizioni di esposizione (come sito, orientamento e inclinazione) per i tre campione di ciascun prodotto abbiamo computato medie delle curve spettrali e quindi integrato i valori.



**Figura 5. Spettrometro UV-Vis-NIR (a) e un campione, inquadrato dall'apertura d'ispezione superiore della sfera, alla porta di riflettanza su cui incide un fascio di luce monocromatica a 555 nanometri (b).**

I valori di riflettanza solare, UV, visibile, e NIR sono stati calcolati (per ciascuno dei tre campioni e per la curva media) considerando il metodo di integrazione indicato dalla norma ISO 9050 [5] (metodo analogo alla ASTM E 903 [15]), quindi con distribuzione spettrale di irradianza solare globale sul piano orizzontale per massa d'aria pari a 1.5 (condizione che si riscontra con un angolo zenitale solare pari a circa 48°). Per ogni materiale sono anche indicati i valori di riflettanza rispetto alla componente UV (fra 300 e 380 nm), visibile (fra 380 e 780 nm, indicata come "vis" nei grafici), e rispetto alla porzione di radiazione solare nel vicino infrarosso (fra 780 e 2500 nm, indicata come "nir" nei grafici). Nel dettaglio la riflettanza solare ( $\rho_{SOL}$ ) è calcolata come:

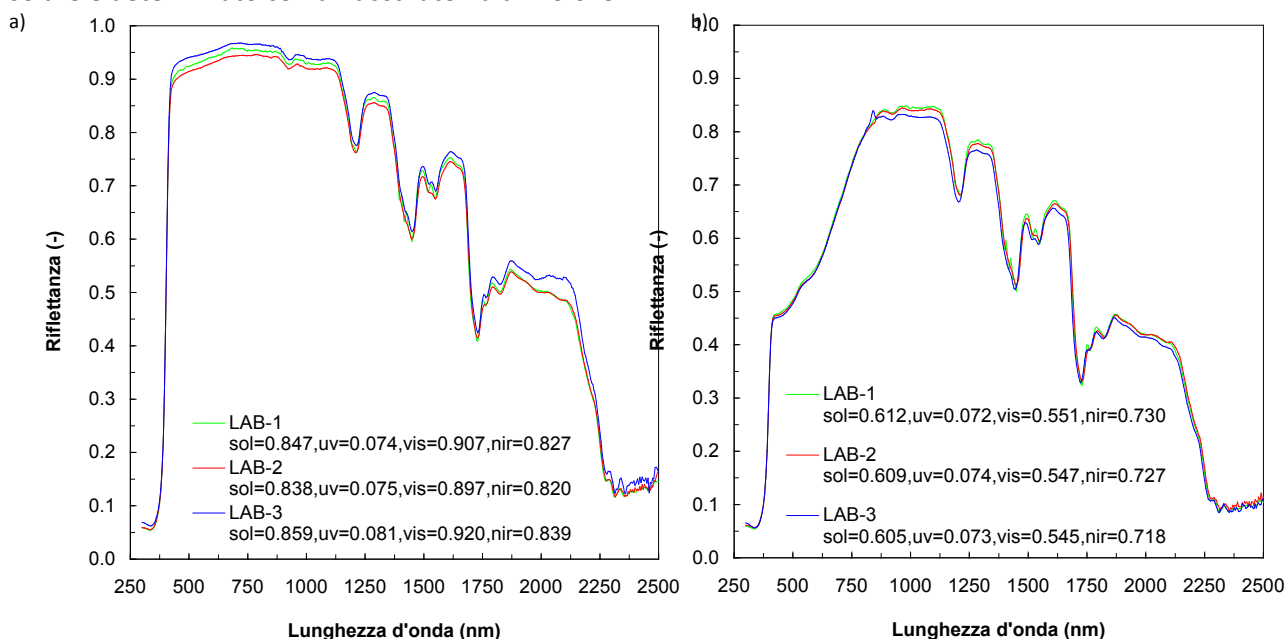
$$\rho_{SOL} = \frac{\int_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} \rho_\lambda G_\lambda d\lambda}{\int_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} G_\lambda d\lambda} \approx \frac{\sum_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} \rho_\lambda S_\lambda \Delta\lambda}{\sum_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_\lambda \Delta\lambda}$$

Dove:

- $G_{\lambda}$  è la radiazione solare monocromatica
- $S_{\lambda}$  è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare monocromatica, normalizzata all'irradianza solare di  $1000 \text{ W m}^{-2}$
- $\rho_{\lambda}$  è la riflettanza monocromatica misurata

Si possono poi calcolare anche i valori di riflettanza rispetto alla componente UV (fra 300 e 380 nm), visibile (fra 380 e 780 nm), e rispetto alla porzione di radiazione solare nel vicino infrarosso (fra 780 e 2500 nm, indicata come NIR).

Nella norma ASTM E 903 [15] 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 Figura 6 vi è un esempio di misure di routine eseguite presso tre laboratori di livello internazionale con strumenti analoghi, tutti di alta precisione, di una membrana impermeabilizzante bianca (m04 della selezione del presente studio) e una membrana beige selettiva (m07 della selezione del presente studio). Si vede in questo caso che il valore della riflettanza solare è determinato con un'accuratezza di  $\pm 0.015$ .



**Figura 6. Riflettanza spettrale di una membrana impermeabilizzante bianca (a) e di una beige (b), rispettivamente m04 e m07 della selezione dei prodotti del presente studio, effettuate presso tre laboratori dotati dello stesso modello di spettrometro UV-Vis-NIR. I valori di riflettanza solare, UV, Vis e NIR sono calcolati secondo ISO 9050.**

Si discutono in questa sede gli errori di misura e la ripetibilità di misura di campioni puliti, perché questi si aggiungono alle variabilità delle proprietà spettrali dei campioni sporcati, naturalmente o con una procedura accelerata, per i quali la riflettanza spettrale non è omogenea in quanto i depositi non sono omogenei sulla superficie del campione. Quindi, se la variabilità della riflettanza solare di campioni puliti è dell'ordine di  $\pm 0.015$  (effettuando misure con diversi strumenti, ossia essenzialmente con diversi campioni di calibrazione), ci si attende per campioni sporcati una variabilità non inferiore nelle misure effettuate con diversi strumenti (in funzione ovviamente del tipo e del livello di sporcamento), e verosimilmente di non meno di  $\pm 0.03$ . Di questo è opportuno tenere conto ai fini della validazione di un metodo di invecchiamento e sporcamento accelerato.

## 5 Risultati dell'esposizione naturale

In questo studio si presentano i risultati del primo anno di esposizione naturale presso i siti urbani di Roma e Milano. I dati analizzati includono le misure:

- al tempo zero (T0) e dopo tre mesi di esposizione (T3) presso entrambi i siti, eseguite nel precedente anno di attività;
- dopo sei mesi (T6) e dopo un anno (T12) di esposizione naturale per entrambi i siti di esposizione;
- dopo quindici mesi di esposizione naturale a Milano (T15) per le sole membrane m08, m09, m10 (sono state aggiunte queste misure per valutare l'efficacia del trattamento fotocatalitico della membrana m10); e
- dopo tre mesi di esposizione di una seconda serie di membrane impermeabilizzanti esposte debolmente inclinate a Milano a fine aprile 2013 (indicata nei grafici come T3b). Queste misure sono relative alle sole membrane m02, m03, m04, m05, m06, m07, m08, m09, m10, e m11.

Rispetto al precedente anno di attività si è deciso di calcolare la riflettanza spettrale media delle misure per i tre campioni (nel report precedente si era selezionata la curva più prossima alla media). Per le misure al tempo zero, e dopo tre mesi di esposizione (già presentati nel report precedente) sono state quindi ricalcolate le curve medie e i relativi valori di riflettanza solare, UV, visibile, e NIR.

Innanzitutto, si presentano gli andamenti della riflettanza solare (assoluti e in differenza percentuale rispetto al valore iniziale) calcolati come media dei valori per tre campioni, per le tre condizioni di esposizione (Roma e Milano sul piano orizzontale e Milano con orientamento verso Sud con inclinazione di 45 gradi) per le sole membrane impermeabilizzanti al tempo zero, dopo tre, sei e dodici mesi.

In entrambi i siti di esposizione osserviamo notevoli variazioni di riflettanza solare dopo un anno di esposizione naturale, e in molti casi i cambiamenti registrati nei siti della CRRC dopo tre anni di esposizioni sono registrati dopo sei mesi di esposizioni a Milano e Roma. Per esempio, per membrane con riflettanza solare superiore a 0.80 [13] [12], per il sito in Florida la media assoluta dei decrementi di riflettanza solare per i prodotti testati è di  $0.238 \pm 0.146$ , mentre è di  $0.077 \pm 0.060$  e  $0.173 \pm 0.092$  rispettivamente per l'Arizona e l'Ohio, ossia in media circa 0.162, o 18% del valore iniziale di tre anni prima. Per i prodotti con il medesimo range (0.8-1.0) di  $\rho_{SOL,T0}$  (m2, m4, m6 e m8 della nostra collezione, cfr. Tabella 1) abbiamo rilevato decrementi assoluti di 0.171 (Figura 7a) a Milano (di 0.158 per inclinazione di 45 gradi, Figura 7c), come in Ohio (il più vicino alla categoria urbana rispetto a quelli gestiti dalla CRRC), e di 0.116 a Roma (Figura 7e, mentre dopo un anno abbiamo misurato diminuzione a Milano pari a 0.223 (0.217 per inclinazione a 45°) e di 0.154 a Roma. Considerando i possibili termini di comparazione, abbiamo notato che dopo un anno di esposizione naturale nei due siti urbani di Roma e Milano si registrano perdite uguali o maggiori di riflettanza solare rispetto i siti CRRC. In generale, le membrane con  $\rho_{SOL,T0}$  tra 0.2 e 0.3 (m1, m13 e m14) non mostrano rilevanti variazioni nel tempo (circa 0.02-0.05). E' oltretutto interessante notare che l'SR della membrana monostrato (m1) mostra un decremento monotono, mentre le scandole di asfalto (m13 e m14) hanno una riflettanza solare fluttuante nel tempo, con alcuni periodi con valore superiore rispetto il valore iniziale quando tra i granuli si insedia fuliggine (e altri tipi di particelle) che hanno riflettanza superiore al substrato in bitume (come descritto in dettaglio in [8]).

Considerando la tendenza generale dei decrementi della riflettanza solare per tutte le membrane con  $\rho_{SOL,T0}$  maggiore di 0.40 (m1, m13, m14), abbiamo notato che, dopo un anno la perdita media assoluta a Milano è da 0.15 a 0.25 per membrane posate con bassa pendenza (da 0.10 a 0.25 per inclinazione di 45°) e a Roma è da 0.08 a 0.16. L'abbassamento della riflettanza solare dei campioni con bassa pendenza e inclinazione di 45° (orientata a Sud) a Milano non si registrano notevoli differenze.

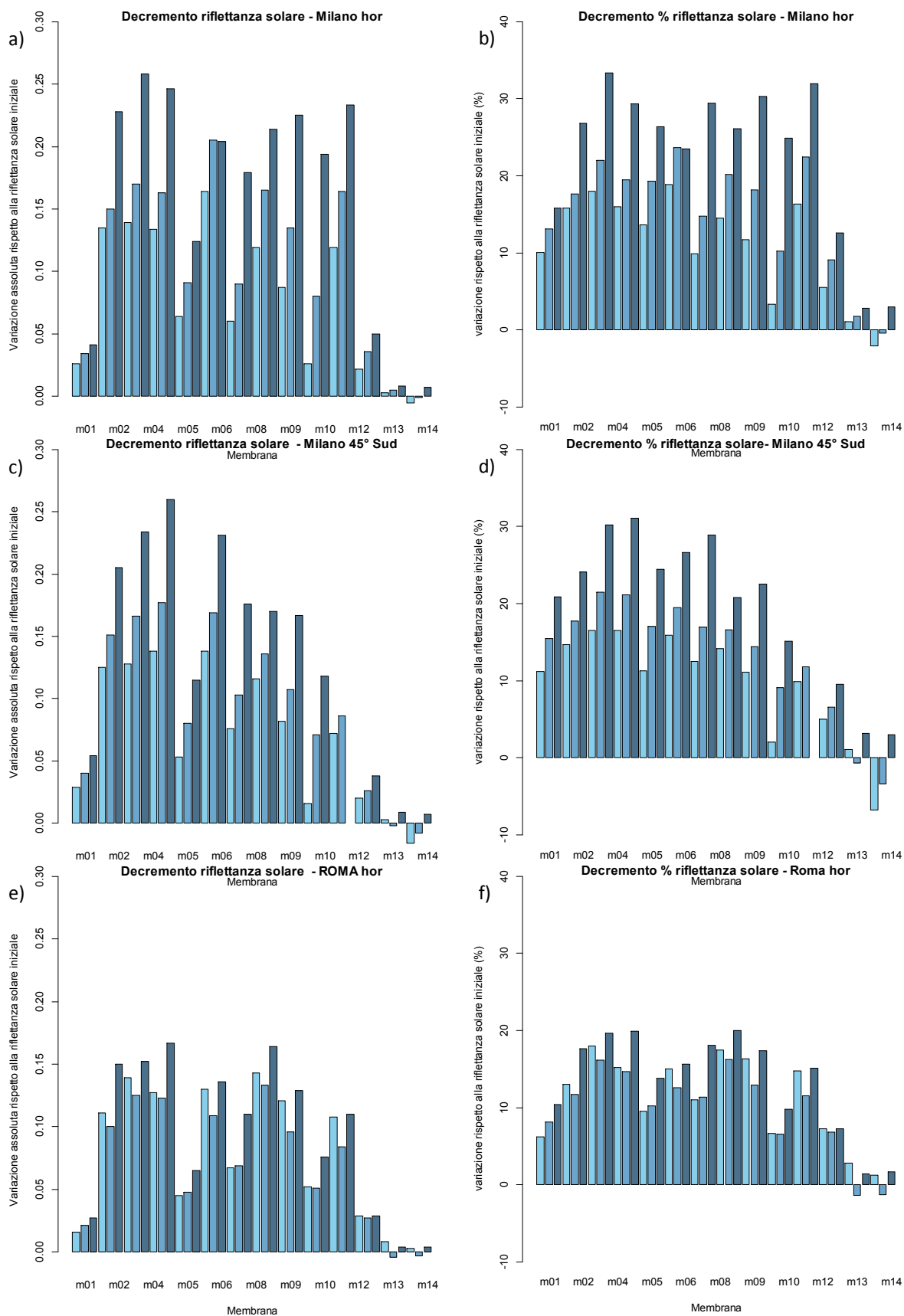


Figura 7. Variazione assoluta di riflettanza solare dopo 3 (azzurro chiaro), 6 (blu intermedio) e 12 mesi (blu scuro) di esposizione naturale a Milano per campioni debolmente inclinati (a) e inclinati di 45° e rivolti a Sud (c) e debolmente inclinati esposti a Roma (e). Decremento relativo (percentuale del valore iniziale) di riflettanza iniziale a Milano per campioni debolmente inclinati (b) e inclinati di 45° (d), e a Roma (f).

Concentrando l'attenzione sulle membrane più riflettenti della collezione (con  $\rho_{SOL,T0}$  maggiore di 0.8) si possono osservare decrementi del valore iniziale sino a circa il 26.7 % per campioni poco inclinati e di circa 26.1 % per campioni orientati a 45°. Differenze maggiori fra la riflettanza solare dei campioni inclinati di 45° e di quelli debolmente inclinati si riscontrano a 3 e 6 mesi, quando il livello dei depositi è minore, e questi sono, per così dire, meno incrostati e aderenti alla superficie dei campioni e vengono maggiormente dilavati.

L'analisi delle curve spettrali (da Figura 8 a Figura 13) consente una comprensione più approfondita dell'azione del deposito di particelle sulla riflettanza delle membrane delle coperture. L'abbattimento della riflettanza è evidente maggiormente nel campo del visibile e nella prima parte del vicino infrarosso, ed è interessante notare che per tutte le membrane chiare, la forma dello spettro è alterata specialmente nella prima parte della porzione del visibile (più precisamente fra 420 e 600 nm), mentre tra 600 e 800 nm lo spettro è traslato in basso, conservando l'andamento iniziale. Sebbene i valori assoluti delle riflettanze dei campioni esposti nei due siti sono differenti, si nota che la forma dello spettro delle membrane invecchiate è la stessa a Roma e Milano: ciò suggerisce che nelle due aree metropolitane l'intensità delle deposizioni è differente, ma la composizione delle particelle dello sporco è la stessa, poiché i prodotti della combustione dei veicoli e degli impianti di riscaldamento sono i medesimi ovunque (eccettuata la diversa incidenza dello smog fotochimico).

C'è effettivamente una differenza di termini del modelli dello spettro tra l'esposizione orizzontale dei campioni e quelli inclinato a 45°. Per questi ultimi l'effetto del deposito tra 420 e 600 nm è leggermente meno pronunciato rispetto ai campioni con bassa inclinazione. Ulteriormente, comparando i risultati tra membrane pulite e sporche con differenti riflettanze spettrali, abbiamo notato che quando la riflettanza è inferiore a 0.40 dopo 1500 nm l'impatto dello sporco è, nell'ultima porzione dello spettro vicino al NIR, trascurabile (Figura 8d, e, f). Similarmente, il caso della membrana m12, con un cool coating applicato su membrana bitume modificata, mostra che il comportamento ottico dello sporco nel visibile non altera il modello iniziale nel campo del visibile.

Le tegole in laterizio (Figura 13) mostrano un decremento di riflettanza spettrale durante il primo anno molto più contenuto, specialmente nel visibile, delle membrane e si spiega questo risultato considerando che si tratta di materiali porosi, e che quindi prima di avere un decremento sensibile della riflettanza i pori superficiali vengono occlusi dallo sporco, e solo in seguito si forma una patina di sporco sui campioni. Nel dettaglio, per i campioni considerati, si è osservato un decremento della riflettanza solare sempre inferiore all'8% del valore iniziale, anche per tegole rivestite di bianco. Per le tegole in laterizio è quindi necessario un periodo di osservazione maggiore, considerando che per questo tipo di materiale il meccanismo di sporco è differente, e può includere in maniera più rilevante che per le membrane, la proliferazione di specie biologiche in superficie e lo sviluppo di croste nere.

Per quanto concerne le membrane impermeabilizzanti, sono state inoltre calcolate le regressioni lineari (Figura 14) della riflettanza solare dopo un anno di esposizione rispetto alla riflettanza solare iniziale per le tre condizioni di esposizione, ottenendo un buon raccordo (coefficiente di correlazione  $r^2$  sempre maggiore di 0.90 e maggiore di 0.95 per le membrane debolmente inclinate).

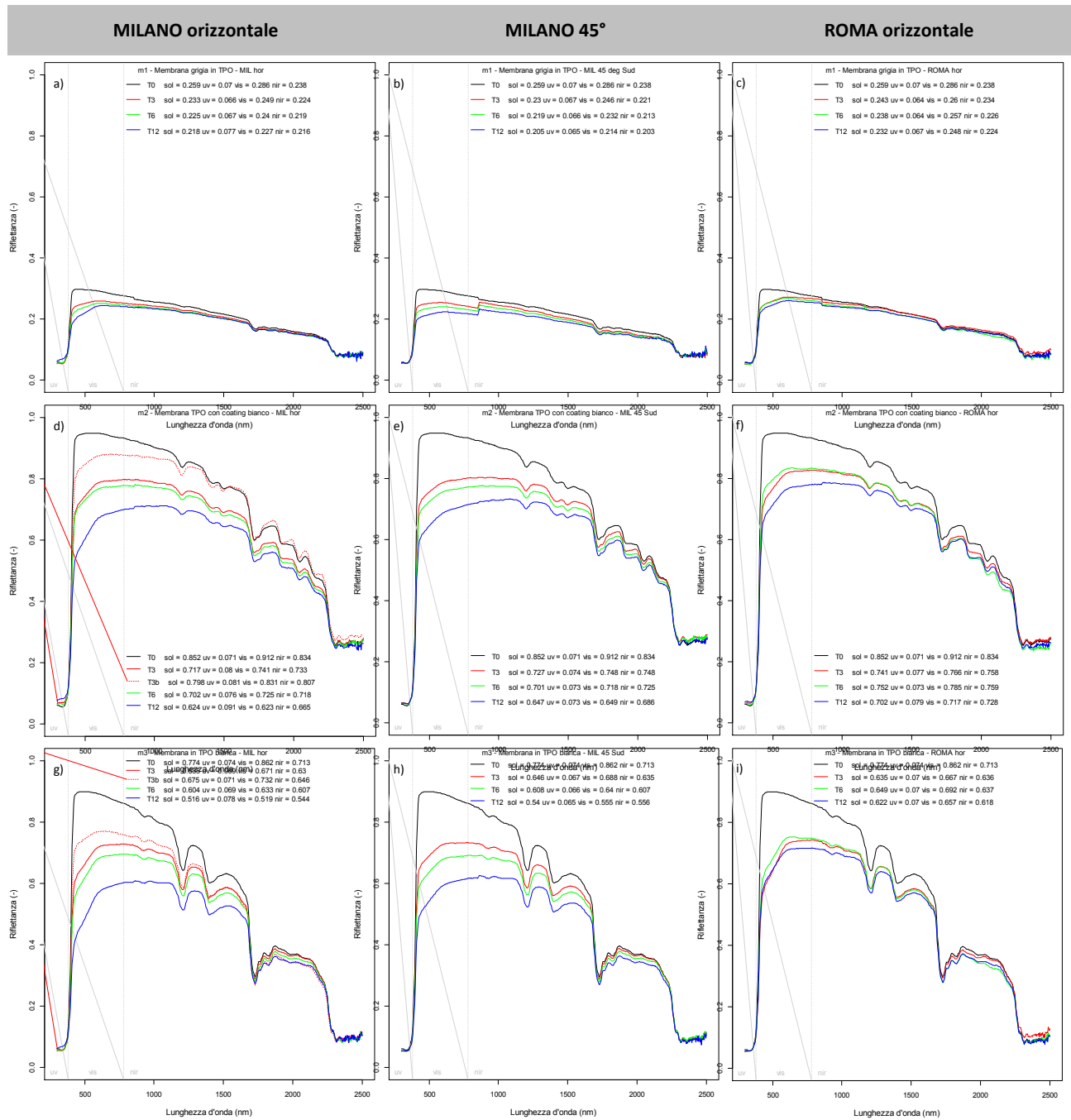
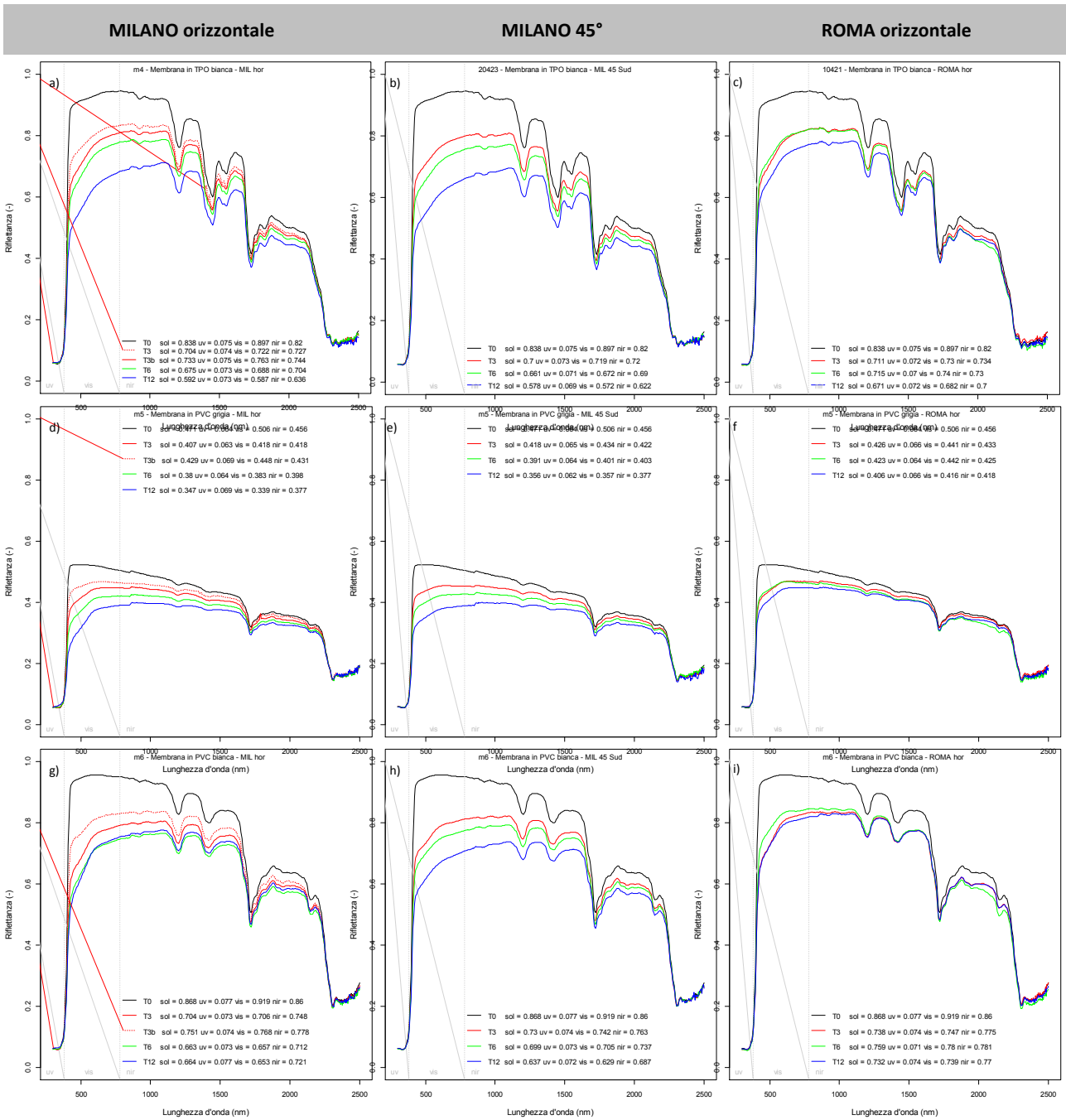


Figura 8. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m1, m2, m3 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45 ° inclinato orientato a sud) e a Roma.



**Figura 9. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m4, m5, m6 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45 ° inclinato orientato a sud) e a Roma.**

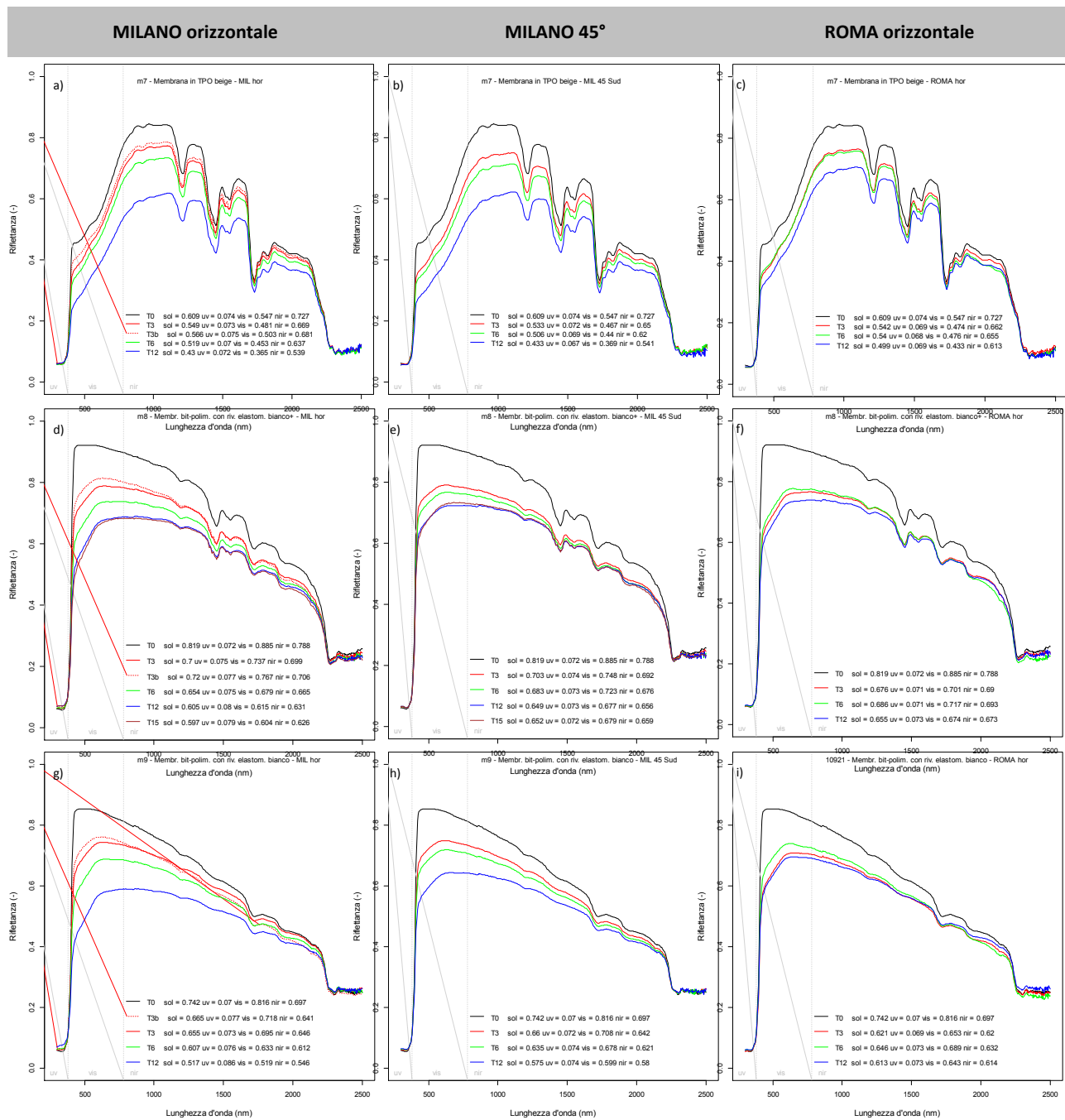
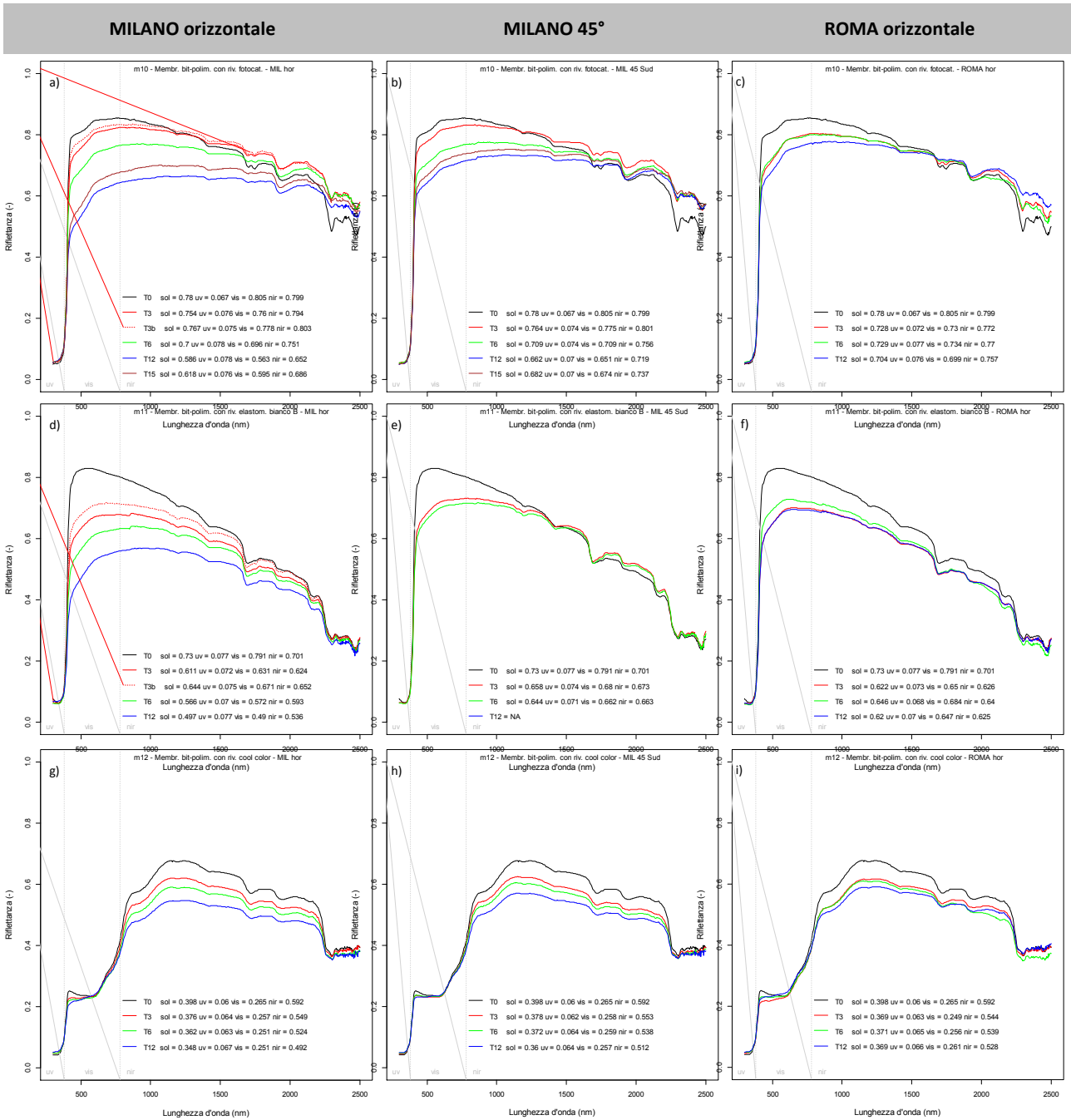


Figura 10. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m7, m8, m9 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45 ° inclinato orientato a sud) e a Roma.



**Figura 11. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m10, m11, m12 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45 ° inclinato orientato a sud) e a Roma.**

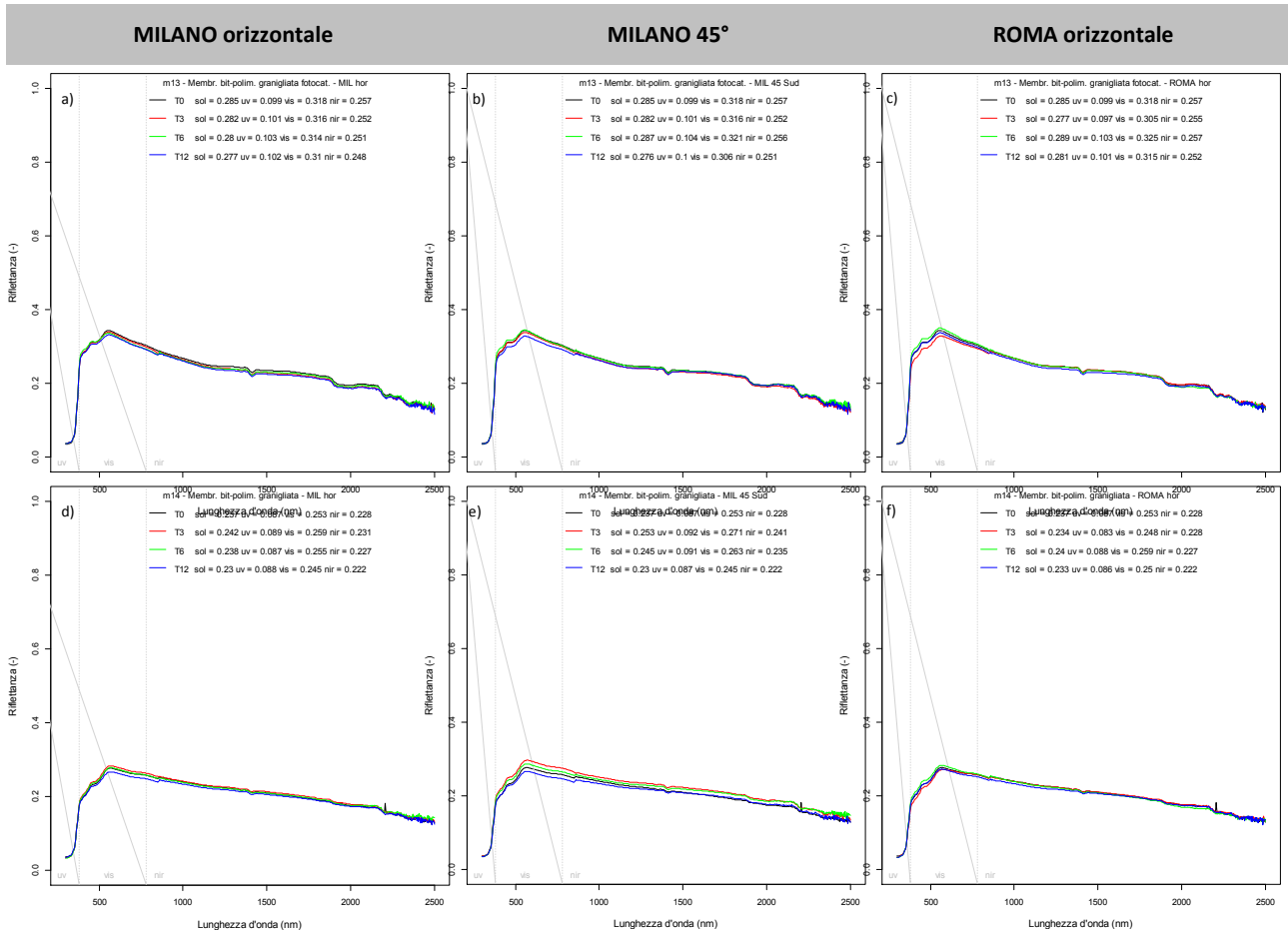
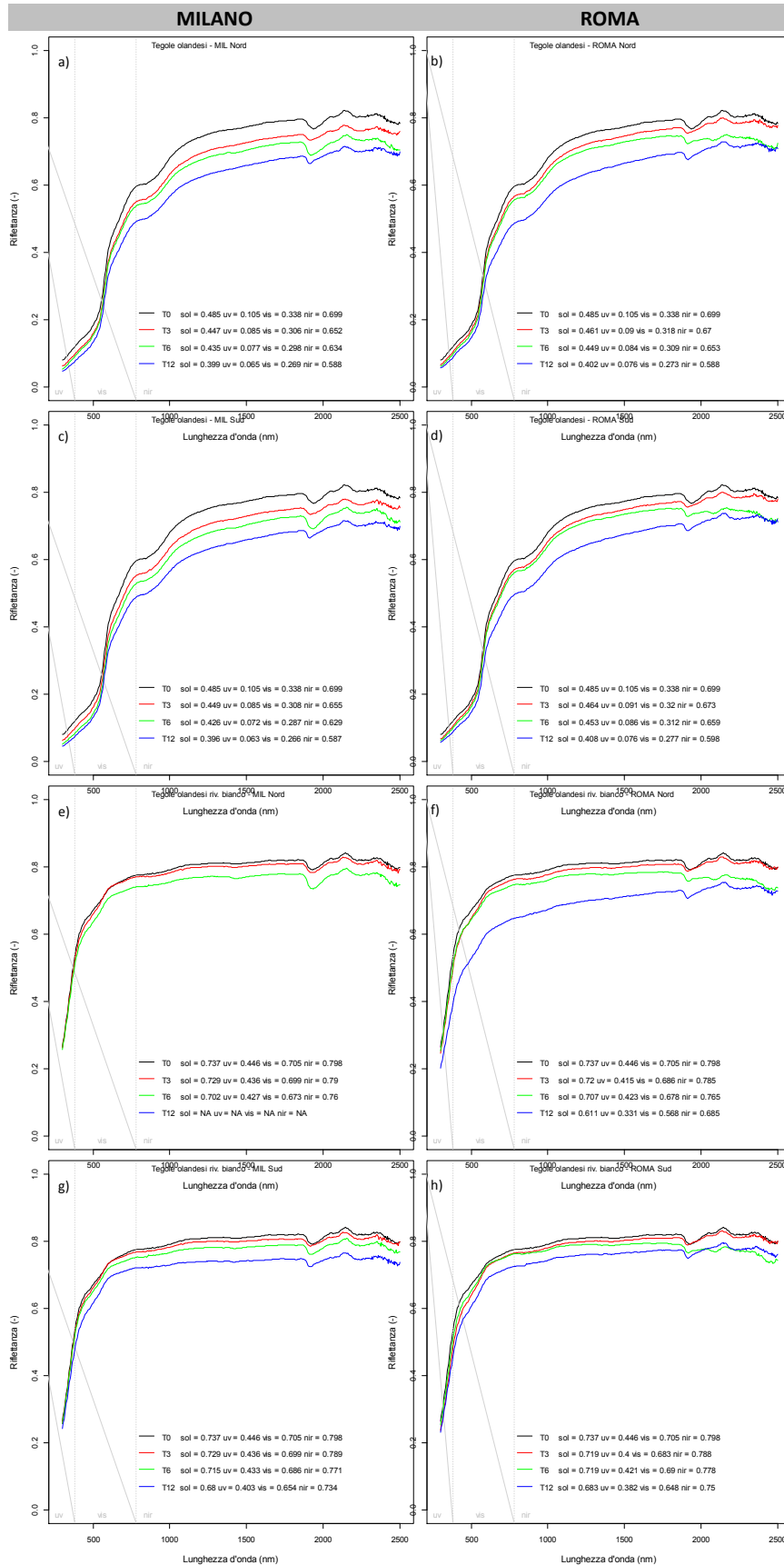


Figura 12. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m13, m14 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45 ° inclinato orientato a sud) e a Roma.



**Figura 13. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le tegole testa di moro (a, b, c, d) e rivestite di bianco (e, f, g, h) dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano e a Roma.**

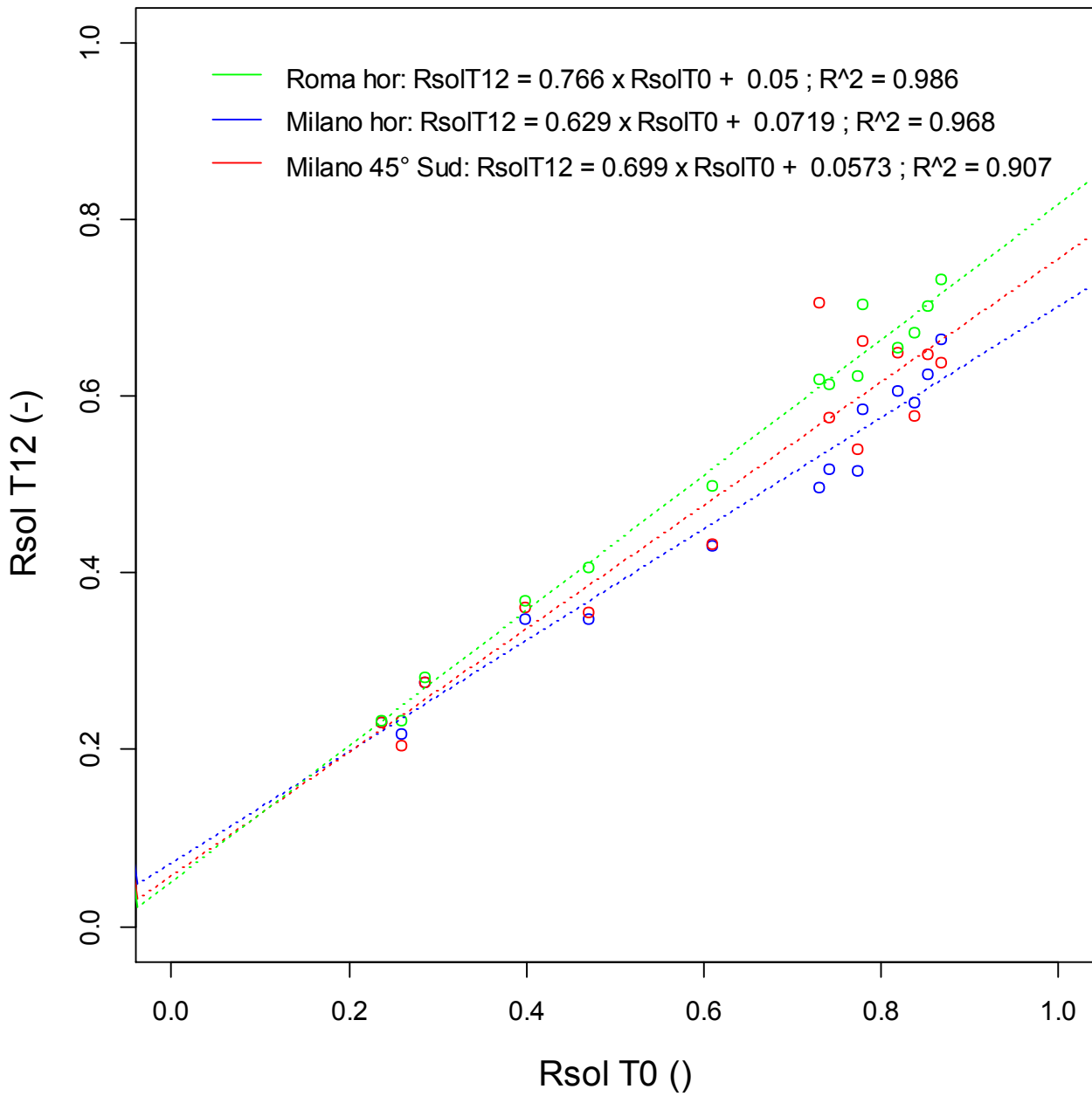


Figura 14. Riflettanza solare dopo un anno di esposizione (Rsol T12) rispetto alla riflettanza solare iniziale (Rsol T0) per le membrane impermeabilizzanti esposte a Roma e Milano, e relative regressioni lineari.

## 6 Procedura di invecchiamento e sporcamento accelerato

Sulla base dell'esposizione naturale presso i siti del CRRC, l'Heat Island Group del Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) ha elaborato un protocollo di invecchiamento e sporcamento accelerato, simulando la riflettanza spettrale dopo tre anni di esposizione naturale.

In questo report si presentano:

- il metodo di prova originale sia per l'invecchiamento che per lo sporcamento, con la descrizione della strumentazione e delle specie chimiche necessarie alla sua applicazione;
- i risultati dell'applicazione del metodo originale ai medesimi prodotti esposti a Roma e Milano dopo dieci secondi di nebulizzazione dello sporco;
- i risultati con una differente miscela di sporcamento (valutata come opzione migliore per simulare lo sporcamento a Roma e Milano) dopo dieci, trenta e sessanta secondi di nebulizzazione dello sporco, per valutare e con diversi tempi di deposizione. I risultati sono poi confrontati con quelli dell'esposizione naturale.

Il metodo di prova in fase sperimentale (e presentato come draft all'ASTM), sviluppato al LBNL da Sleiman et al. [12] [13] combina il ciclo di invecchiamento della ASTM G 154 [14] 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 [14]: 8 h di irraggiamento UVA ( $0.89 \text{ mW cm}^{-2}$ ) a  $60 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura di un campione nero di riferimento posto nella cella climatica) e 8 h di condensazione dell'acqua, con temperatura pari a  $50 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  (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 [14]: 8 h di irraggiamento UVA ( $0.89 \text{ mW cm}^{-2}$ ) a  $60 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura di un campione nero di riferimento posto nella cella climatica) e 8 h di condensazione dell'acqua, con temperatura pari a  $50 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura del campione nero).

È stata condotta una prima campagna esplorativa di prove di invecchiamento e sporcamento accelerato presso il Lawrence Berkeley National Laboratory nel dicembre 2012, adoperando la miscela di sporcamento generale. 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 spettrometro UV-Vis-NIR con sfera integratrice da 150 mm.

A seguire si riporta un estratto della bozza di norma ASTM per lo sporcamento accelerato, proposta dall'LBNL, e generalizzata per l'utilizzo con qualunque cella climatica. Per l'esecuzione della prova, oltre alla strumentazione, è raccomandato l'utilizzo di occhiali anti UV, guanti in nitrile e camice da laboratorio.

### 6.1 Strumentazione necessaria

Per l'applicazione della procedura occorrono:

- aria compressa;
- acqua deionizzata;
- un serbatoio a pressione dotato di manometro (Figura 15);
- tubi di raccordo;
- un ugello per la nebulizzazione;
- una vasca di raccolta;

- un supporto per posizionare l'ugello verticalmente sopra i campioni;
- un vassoio per posizionare i campioni sotto il cono di nebulizzazione;
- un cronometro;
- una bilancia di precisione con divisione di lettura di almeno 0.01 g;
- i composti chimici dettagliati a seguire;
- uno strumento di misura della riflettanza solare (preferibilmente uno spettrometro UV-Vis-NIR).

## 6.2 Descrizione della procedura

### 6.2.1 Fase A: condizionamento

I campioni devono essere posizionati all'interno della cella climatica per la quale siano state impostate le condizioni relative al primo ciclo in appendice alla norma ASTM G 154 [14]. Si eseguono quindi due cicli consecutivi di 12 ore, composti ciascuno da una fase di irraggiamento UVA per 8 ore (intensità  $0.89 \text{ W/m}^2$  e black panel temperature pari a  $60 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ), seguite da 4 ore di condensazione a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Deve essere utilizzata solo acqua a bassa conducibilità o deionizzata (DI). Dopo il condizionamento, i campioni devono essere rimossi dalla cella climatica e lasciati asciugare a temperatura ambiente per circa 2 ore prima di procedere con le fasi successive.

### 6.2.2 Fase B: sporcamento

#### 6.2.2.1 Preparare soluzioni acquose di agenti sporcanti individuali

Fuliggine: per il particolato fine (fuliggine) si utilizza una soluzione di Acquablack 001 (TOKAI Carbon, Inc.) diluita in acqua deionizzata (2% m/m). Per preparare 1 litro di fuliggine, diluire 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 fuliggine di 1.25 g/l.

Composto organico: dissolvere  $1.4 \pm 0.05$  grammi di commerciabile acido umico (CAS: 1415-93-6) in 1 litro di acqua DI per produrre una soluzione di 1.4 g/l.

Polvere minerale: mescolare  $0.3 \pm 0.02$  g di ossido di ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (CAS: 1309-37-1) con  $1 \pm 0.05$  g di Montmorillonite (CAS: 1318-93-0) e  $1 \pm 0.05$  g di bentonite (CAS: 1302-78-9). Aggiungere lentamente il preparato asciutto di polvere a 1 litro di acqua deionizzata e scuotere la miscela per circa 1-2 minuti. La concentrazione di polvere totale è 2.3 g/l. È importante scuotere la sospensione immediatamente prima di usare per minimizzare la sedimentazione.

Sali: dissolvere  $0.30 \pm 0.02$  g di cloruro di sodio (NaCl, CAS: 7647-14-5),  $0.30 \pm 0.02$  g di nitrato di sodio ( $\text{NaNO}_3$ , CAS: 7632-18-9) e  $0.40 \pm 0.02$  g di solfato calcico diidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , CAS: 7778-18-9) in 1 litro di acqua DI. La concentrazione totale di Sali è di 1 g/l.

#### 6.2.2.2 Preparare miscele di agenti sporcanti

In un contenitore di vetro, miscelare 4 agenti, miscelare i 4 agenti sporcanti come descritto di seguito: 250 ml di polvere + 250 ml di sale + 250 ml di acido umico + 250 ml di fuliggine. Scuotere la miscela per 2-5 minuti immediatamente prima di applicarla sui campioni.

NOTA Grazie al presente studio si è osservato che la miscelazione è ottimale se effettuata con un miscelatore a ultrasuoni (sonicatore) rispetto all'agitazione magnetica o alla miscelazione manuale proposte nella procedura originale.

### 6.2.2.3 Nebulizzazione della miscela di sporco sui campioni

- 1) Riempire il serbatoio con 1 litro di miscela sporcante e chiudere il coperchio con attenzione. Verificare che la valvola di rilascio pressione e la valvola di irrorazione siano chiuse.
- 2) Collegare un impianto di aria pressurizzata (cilindro di aria compressa) ad una pressione di 1 bar e aprire la valvola all'ingresso del recipiente.
- 3) Aspettare fino a quando la pressione non si è stabilizzata intorno a 1 bar.
- 4) Aprire la valvola di irrorazione, controllare l'ugello sia posizionato come da schema e verificare che lo schema dell'irroratore sia stabile e uniforme. Chiudere la valvola dello spray.
- 5) Pesare un campione asciutto e pulito di riferimento, quindi mettere il campione sul vassoio.
- 6) Aprire la valvola di irrorazione e nebulizzare per pochi secondi la miscela sporcante, quindi mettere il campione selezionato nella camera di sporcamento (mettere dentro il vassoio di plastica), e individuare la posizione che fornisce la distribuzione più uniforme di goccioline sulla superficie del campione. Un esempio dell'uniformità dello sporco è mostrata in figura 2.
- 7) Una volta determinata la posizione, irrorare il campione di riferimento per qualche secondo e quindi immediatamente ripesa (bagnato).
- 8) Determinare la durata dell'irrorazione necessaria ad aggiungere 0.8 – 0.9 g di miscela umida di sporco sul campione. Il tempo di spraiare potrebbe variare da 5 a 20 secondi; ciò dipende dal grandezza delle gocce.
- 9) Pulire il campione di riferimento con un asciugamano e ripetere l'irrorazione e volte per verificare che la massa mantenuta sia 0.8 – 0.9 g.
- 10) Attivare il procedimento di sporcamento sui campione delle coperture e usare le medesime condizioni (per posizione e durata) come da passaggio 9.4
- 11) Asciugare con una lampada ad infrarosso per 3-10 minuti, collocando il campione a circa 50 cm dalla lampada per evitare surriscaldamento. Verificare che la superficie non superi gli 80 °C.
- 12) Risciacquare con acqua DI, quindi riempire con 1 litro di acqua ed eseguire lo spruzzo per pulire il tubo e l'ugello dello spray.
- 13) Una volta che tutti gli sporchi campioni sono asciutti, procedere con la fase c (Agenti atmosferici).

NOTA Grazie al presente studio si è osservato che la miscelazione è ottimale se effettuata con un miscelatore a ultrasuoni (sonicatore) rispetto all'agitazione magnetica o alla miscelazione manuale proposte nella procedura originale.

### 6.2.3 Fase C: invecchiamento

Si ripete il ciclo eseguito per il condizionamento.

### 6.2.4 Fase D: Misura riflettanza solare

Si effettuano le misure di riflettanza solare (preferibilmente UV-Vis-NIR) come descritto per l'esposizione naturale.



Figura 15. Serbatoio utilizzato al Politecnico di Milano per la nebulizzazione.

## 7 Prove di invecchiamento e sporcamento accelerato eseguite

Per la prima serie di prove accelerate (eseguite presso LBNL) è stata utilizzata una cella climatica QUV-spray (Figura 16), mentre per la seconda, terza, e quarta serie di prove accelerate eseguite presso il Politecnico di Milano è stata utilizzata una camera climatic a Angelantoni CH 1200 SP (Figura 17 e Figura 18).

Durante la prima campagna di prove (condotta presso LBNL) è stato utilizzato il ciclo di invecchiamento accelerato come descritto al punto precedente (ossia il primo ciclo dettagliato in appendice a ASTM G 154) e il mix di sporcamento generale (rappresentativo delle condizioni medie presso i tre siti del CRRC) nebulizzato sui campioni per 10 secondi.

Per la seconda campagna di prove, condotta presso il Politecnico di Milano, è stato utilizzato un ciclo di invecchiamento di identica durata, ma con condizioni di cella differenti, e un mix di sporcamento calibrato sull'esposizione in Florida (la distribuzione di massa secca è: 16% di polvere, 7% di sali, 69% POM, e 8% fuliggine) nebulizzata per 10, 30 oppure 60 secondi (ottenuti con due cicli da 30 secondi). Invece che con una lampada a IR, i campioni sono stati asciugati in stufa a 40°C (avendo notato un rammollimento non riscontrato con l'esposizione naturale delle membrane in bitume-polimero durante le prove precedenti al LBNL usando la lampada IR). Il ciclo di invecchiamento implementato è composto, come in ASTM G 154, da due fasi (2 x 12 ore prima dello sporcamento e 2 x 12 ore dopo lo sporcamento):

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

Le differenze sono dovute ai diversi metodi di controllo delle condizioni di cella impiegate dalle diverse camere climatiche.

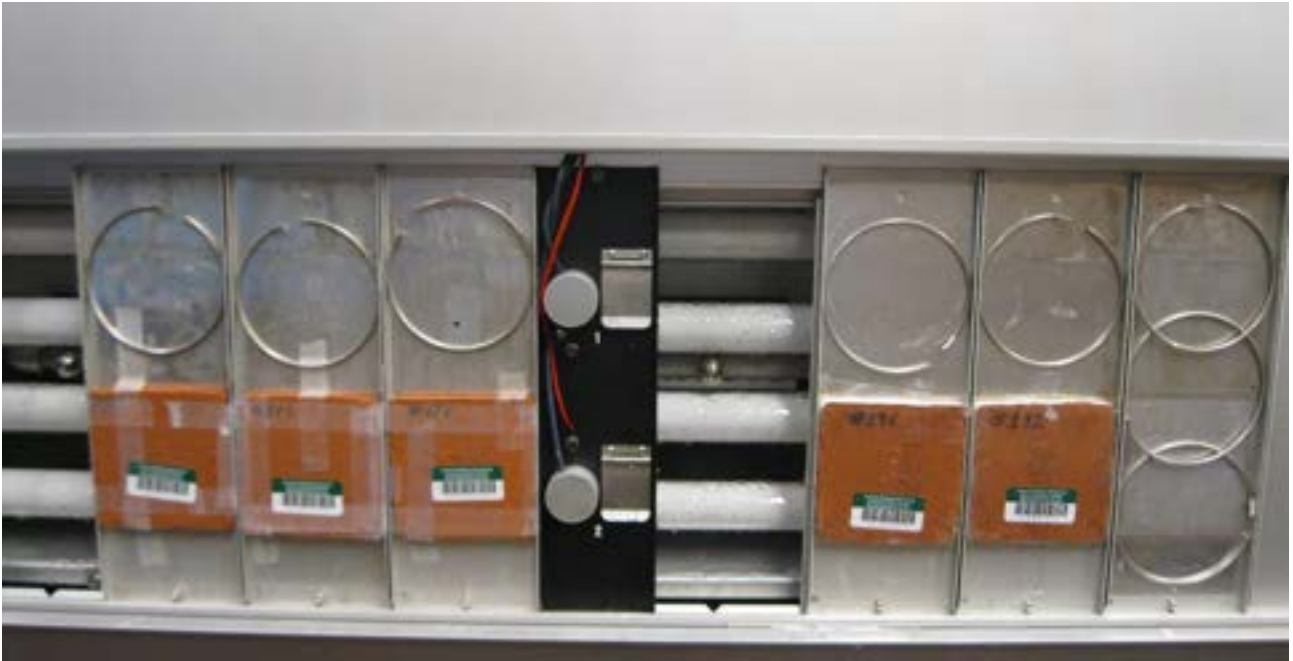


Figura 16. Campioni posizionati all'interno di una cella climatica per irraggiamento UVA, utilizzata presso LBNL per il primo set di prove di sporco e invecchiamento.



Figura 17. Cella climatica utilizzata al Politecnico di Milano e campioni posizionati all'interno (si tratta degli stessi prodotti esposti naturalmente).



Figura 18. Dettaglio dei campioni posizionati all'interno della camera climatica.

## 8 Risultati delle prove di invecchiamento e sporcamento accelerato

A seguire si presentano i risultati più significativi delle prove di invecchiamento e sporcamento accelerato, eseguiti sulle membrane m02, m04, m05, m06, m07, m09 e m12, con i confronti fra la riflettanza spettrale a seguito di invecchiamento e sporcamento accelerato e la riflettanza spettrale media fra quella dei campioni esposti debolmente inclinati a Roma e a Milano. In allegato sono riportati i confronti fra le curve misurate per i campioni sottoposti alle diverse varianti di procedura accelerata e le diverse condizioni di esposizione in ambiente urbano per le sole membrane impermeabilizzanti.

Dato che i dati relativi all'esposizione naturale delle tegole in laterizio hanno dimostrato che un anno non è sufficiente a operare una valutazione dell'andamento della riflettanza nel tempo, i risultati delle prove di invecchiamento accelerato per le tegole non vengono incluse nel presente lavoro, in assenza quindi di un termine di confronto. Inoltre, la procedura considerata non include cicli di gelo e disgelo, essenziali per valutare il comportamento nel tempo di materiali porosi come le tegole in laterizio (o materiali a base cementizia). Si presentano (da Figura 19 a Figura 26) quindi i risultati per le membrane impermeabilizzanti a seguito di:

- 10 secondi di nebulizzazione con il mix di sporcamento generale (identificato nei grafici come Ag 10s) condotte su due campioni per prodotto misurati in tre punti (centrale, sinistro, e destro) ciascuno e ciclo di invecchiamento sporcamento ASTM G 154 2x(2x(8h UV + 4 h condensazione));
- 10 secondi di nebulizzazione con il mix di sporcamento calibrato sull'esposizione in Florida (identificato nei grafici come Af 10s) condotte su cinque campioni per prodotto e con ciclo di invecchiamento dato da 2x(2x(8h UV @ 40°C e RH 15% + 4 h @ 40°C e RH 90%));

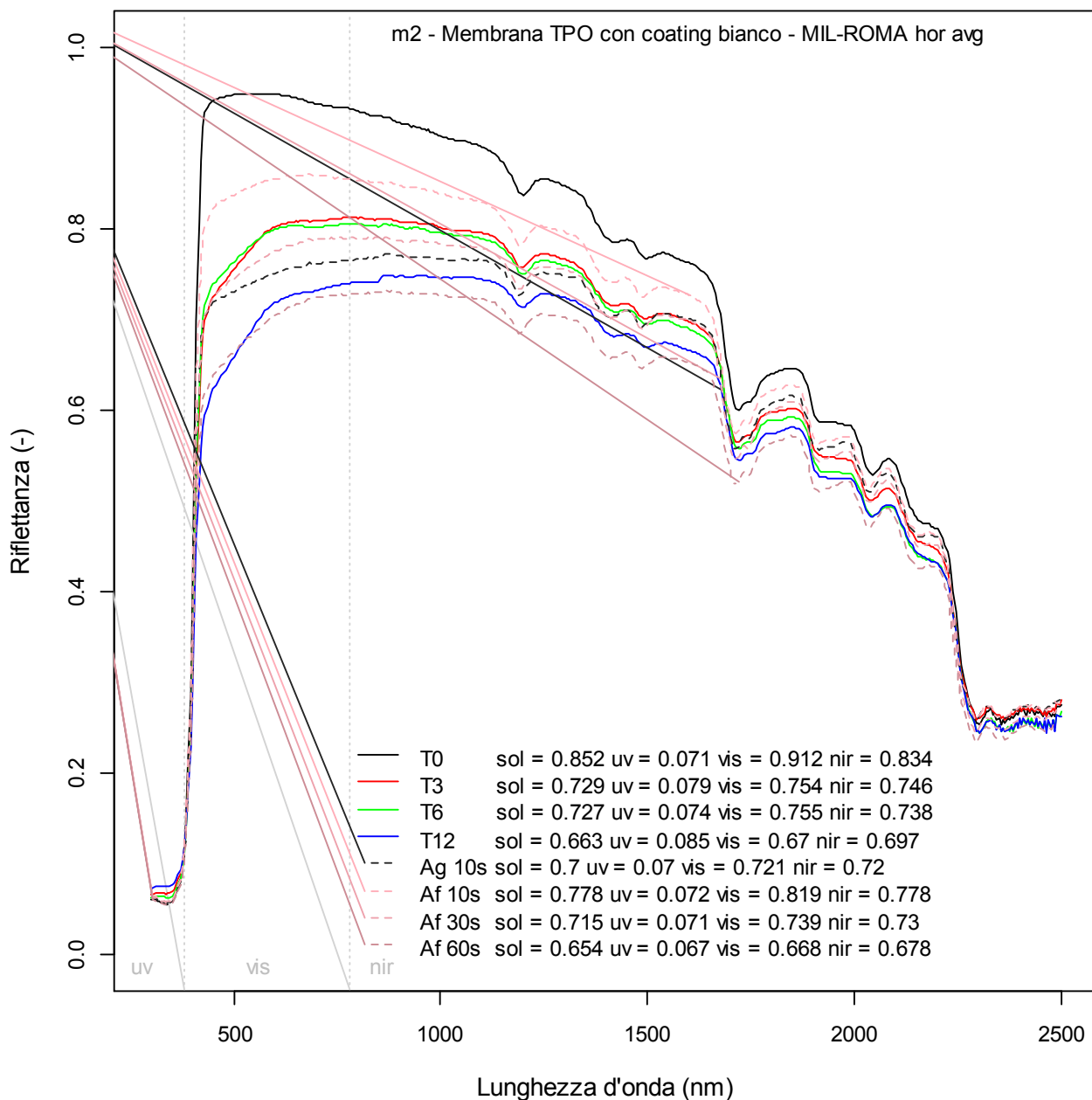
- 30 secondi di nebulizzazione con il mix di sporramento calibrato sull'esposizione in Florida (identificato nei grafici come Af 30s) condotte su cinque campioni per prodotto e con ciclo di invecchiamento dato da 2x(2x(8h UV @ 40°C e RH 15% + 4 h @ 40°C e RH 90%)); e
- 30 secondi di nebulizzazione, asciugatura in stufa a 40°C e altri 30 secondi di nebulizzazione con il mix di sporramento calibrato sull'esposizione in Florida (identificato nei grafici come Af 60s) condotte su cinque campioni per prodotto e con ciclo di invecchiamento dato da 2x(2x(8h UV @ 40°C e RH 15% + 4 h @ 40°C e RH 90%)).

Si è scelto di utilizzare il mix di sporramento calibrato sull'esposizione in Florida a seguito della prima campagna di sporramento e invecchiamento accelerato (identificata come Ag 10s) condotta su tutti i campioni già esposti naturalmente. Questa scelta è stata operata osservando che con il mix generale non si ha un decremento nella prima porzione del visibile (fra 420 e 600 nm), riscontrato invece con l'esposizione naturale. Infatti, nella miscela calibrata per la Florida è presente una maggiore concentrazione (69%) maggiore che nel mix generale (28%) di acido umico (cioè di una miscela di composti organici dati dalla decomposizione di specie vegetali, proliferazioni biologiche, e VOC di origine vegetale), che causa un decremento marcato nella prima porzione dello spettro. Questo composto è assente presso gli altri siti di esposizione del CRRC, Arizona e Ohio, in quanto il primo è nel deserto e il secondo a Cleveland, in riva al lago Erie (uno dei grandi laghi del Nord America), quindi con una bassa presenza di vegetazione.

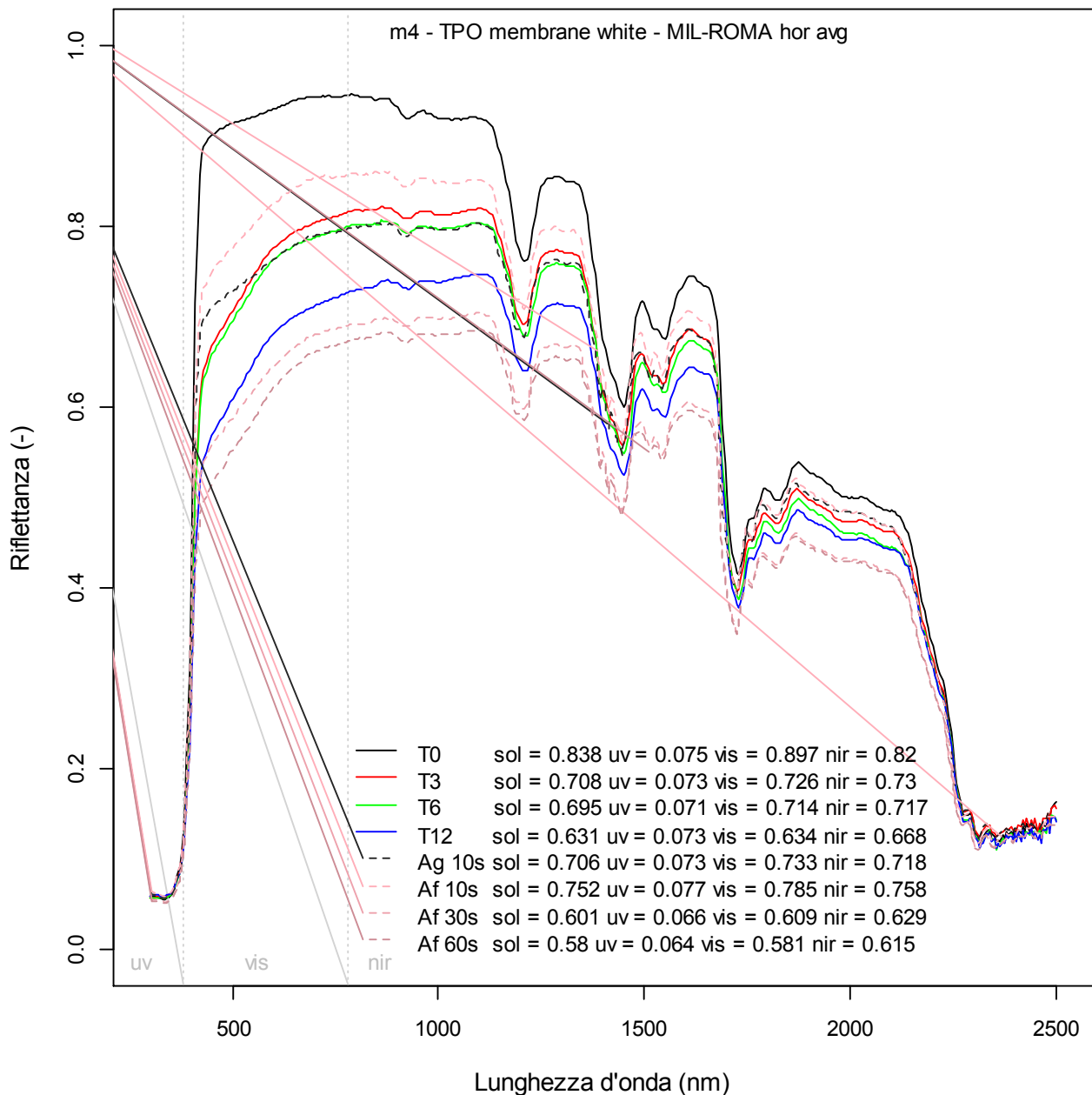
Nelle aree urbane italiane sono invece presenti diversi ed estesi parchi urbani. Inoltre, in Europa viene utilizzato anche combustibile per motori diesel, invece assenti negli Stati Uniti, che producono SOx, i quali a loro volta danno luogo a depositi tendenti al giallo. Si riscontra che in alcuni casi si riesce a ottenere un raccordo molto buono con la curva media a dodici mesi di esposizione naturale (es.: m02, m05, m07, m12) sia in termini di valore assoluto che per quanto concerne la forma dello spettro dopo 30 + 30 secondi di nebulizzazione del mix denominato della Florida (Af 60s), mentre in altri casi (m04, e m09) non si ottiene un risultato altrettanto buono. Si fa notare che per i casi in cui la correlazione è meno buona si ha una buona correlazione con i dati dell'esposizione di Milano (vedi allegato) e che in questi casi si osservano forti differenze fra l'esposizione a Roma e a Milano.

Allo stato attuale si conclude che per simulare l'esposizione a Roma è consigliabile utilizzare il mix per la Florida nebulizzato per 30 secondi, mentre a Milano occorre ripetere la deposizione per ulteriori 30 secondi (quindi 30 secondi, asciugatura in stufa e altri 30 secondi di nebulizzazione).

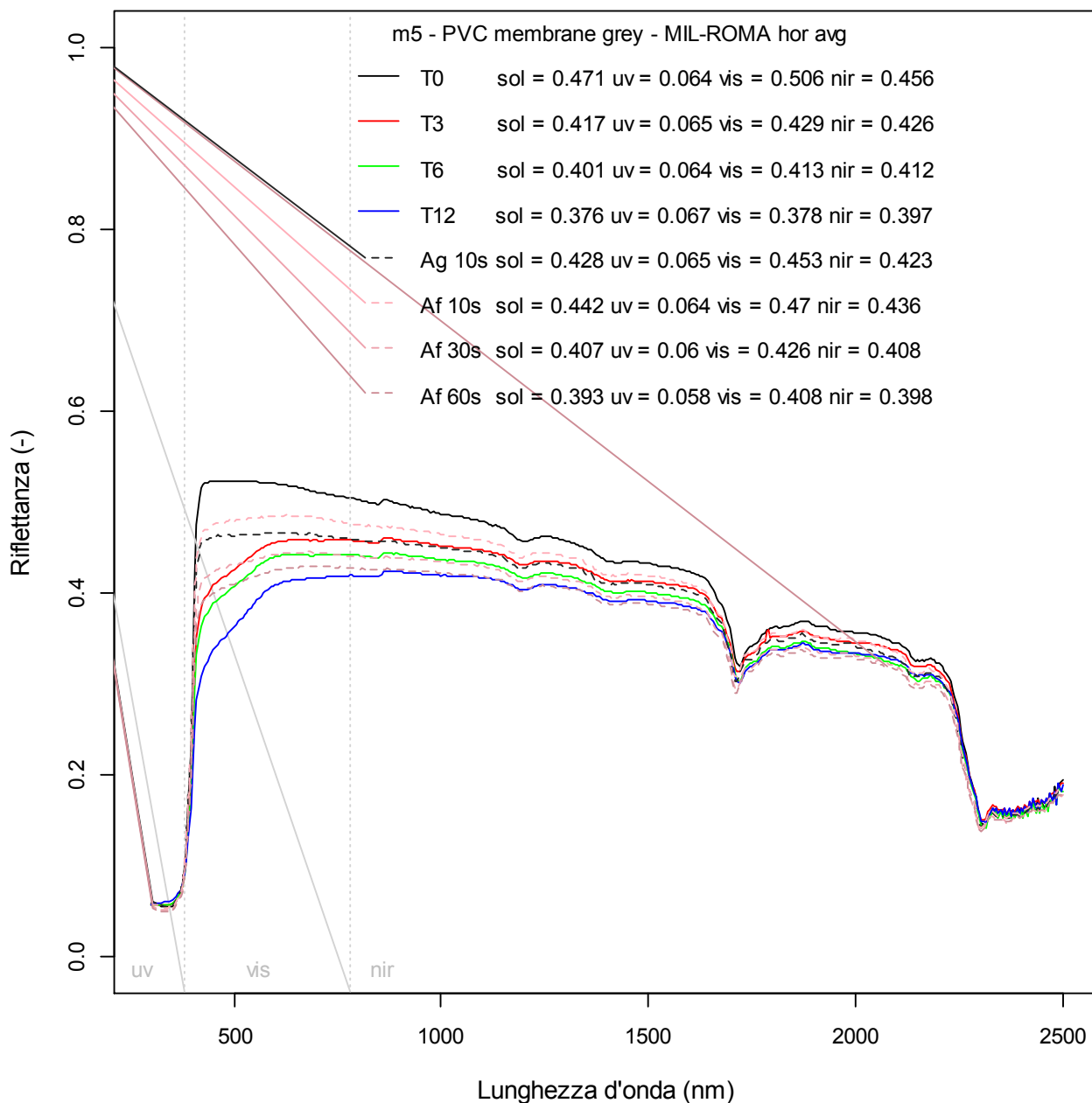
Il metodo impiegato è adatto a valutare la propensione allo sporramento di membrane impermeabilizzanti aventi riflettanza iniziale maggiore di 0.30. Infatti per prodotti con riflettanza iniziale inferiore si sovrastima lo sporramento (Figura 26), e non è per altro utile, dato che l'esposizione naturale ha dimostrato che per bassi valori di riflettanza solare iniziale (cioè minore di 0.3) si ha o un lieve incremento o oscillazioni trascurabili rispetto al valore iniziale. Il metodo inoltre non appare attualmente calibrato per la valutazione di prodotti con proprietà fotocatalitiche.



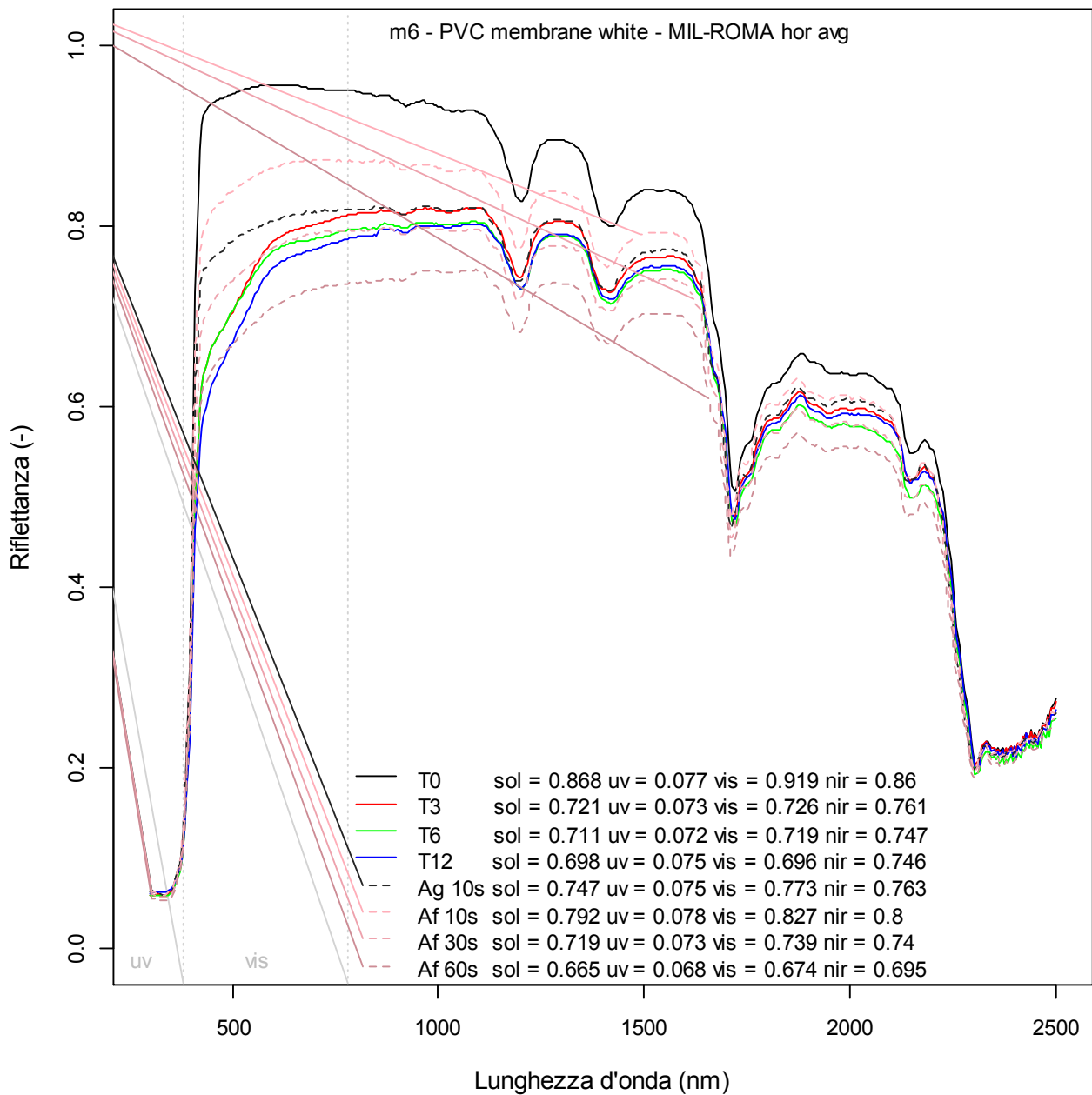
**Figura 19. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare, UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per una membrana in TPO rivestita in stabilimento con un coating elastomerico bianco lucido. Le curve relative all'esposizione naturale (T3, T6, e T12), e i relativi valori di riflettanza solare, UV, Vis, e NIR, sono le curve medie calcolate per l'esposizione in orizzontale a Roma e a Milano. Le curve relative ai campioni sottoposti a invecchiamento e sporcamento accelerato sono Ag 10 s, Af 10 s, Af 30 s, e Af 60s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporcamento di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), 30 secondi (Af 30 s) e 60 secondi (Af 60 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.**



**Figura 20. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare, UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per una membrana in TPO bianca. Le curve relative all'esposizione naturale (T3, T6, e T12), e i relativi valori di riflettanza solare, UV, Vis, e NIR, sono le curve medie calcolate per l'esposizione in orizzontale a Roma e a Milano. Le curve relative ai campioni sottoposti a invecchiamento e sporcamento accelerato sono Ag 10 s, Af 10 s, Af 30 s, e Af 60s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporcamento di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), 30 secondi (Af 30 s) e 60 secondi (Af 60 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.**



**Figura 21. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare, UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per una membrana in PVC grigia. Le curve relative all'esposizione naturale (T3, T6, e T12), e i relativi valori di riflettanza solare, UV, Vis, e NIR, sono le curve medie calcolate per l'esposizione in orizzontale a Roma e a Milano. Le curve relative ai campioni sottoposti a invecchiamento e sporciamento accelerato sono Ag 10 s, Af 10 s, Af 30 s, e Af 60s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporciamento di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), 30 secondi (Af 30 s) e 60 secondi (Af 60 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.**



**Figura 22. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare, UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per una membrana in PVC bianca. Le curve relative all'esposizione naturale (T3, T6, e T12), e i relativi valori di riflettanza solare, UV, Vis, e NIR, sono le curve medie calcolate per l'esposizione in orizzontale a Roma e a Milano. Le curve relative ai campioni sottoposti a invecchiamento e sporcamento accelerato sono Ag 10 s, Af 10 s, Af 30 s, e Af 60s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporcamento di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), 30 secondi (Af 30 s) e 60 secondi (Af 60 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.**

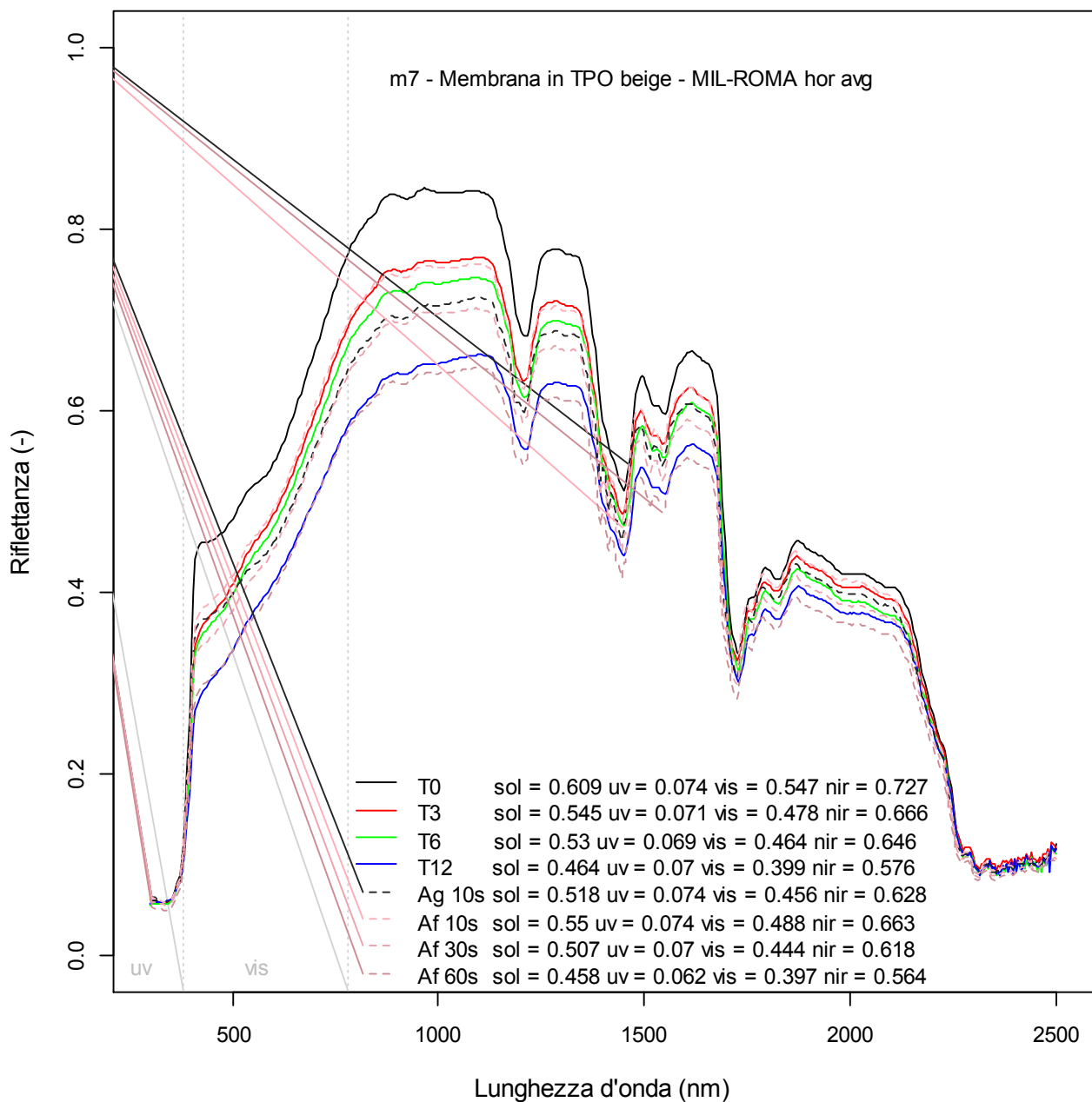
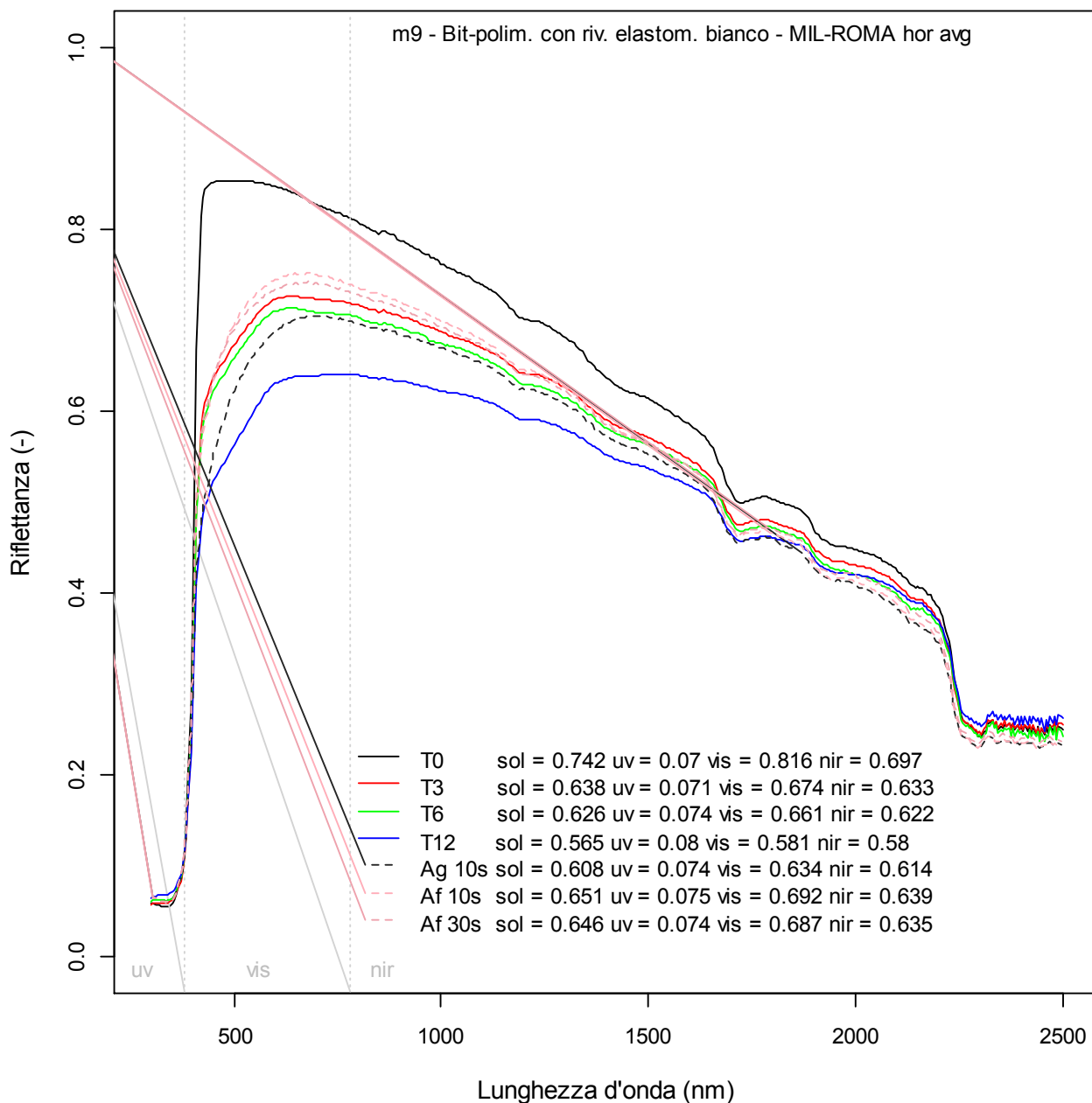
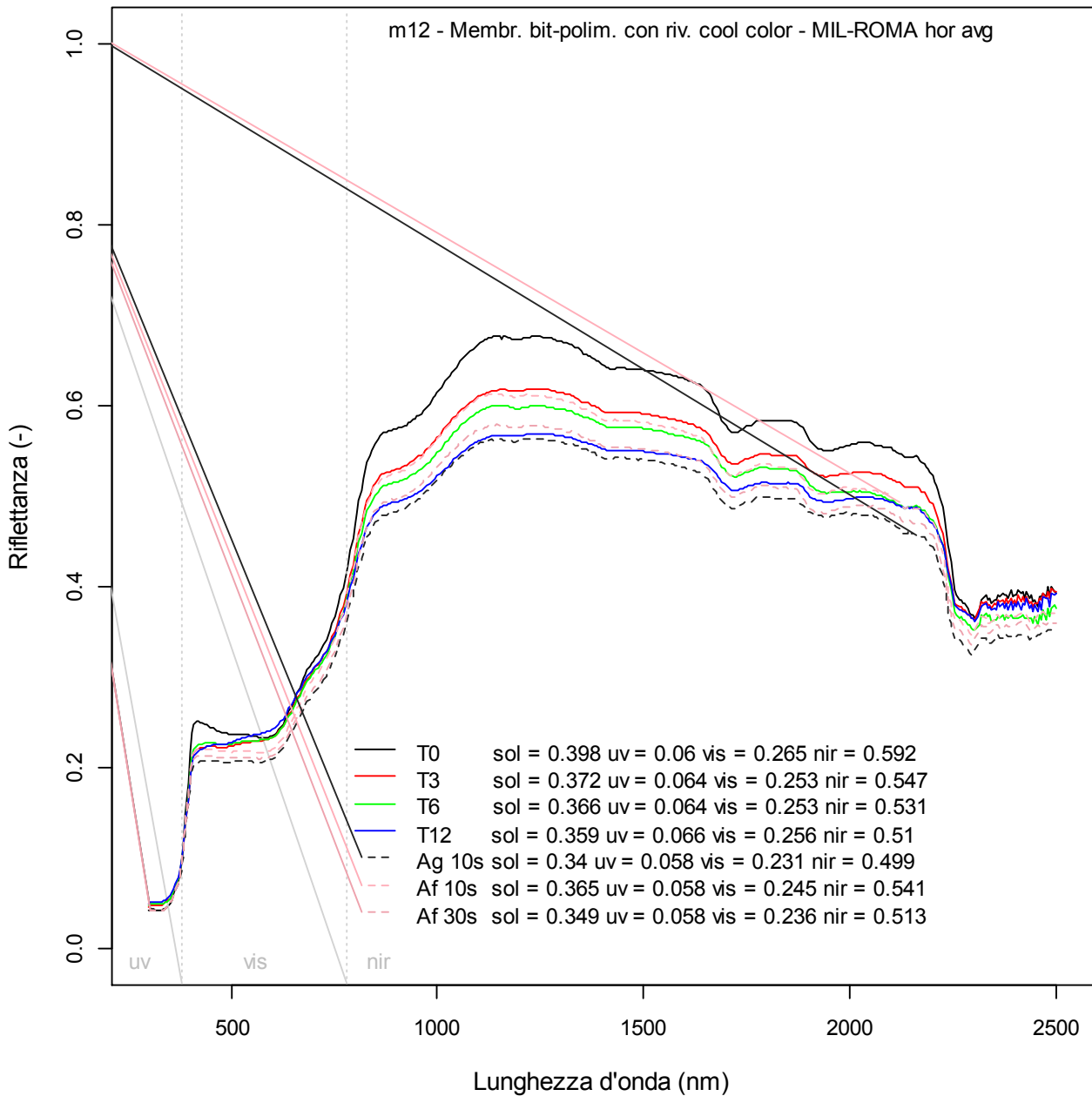


Figura 23. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare, UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per una membrana in TPO beige. Le curve relative all'esposizione naturale (T3, T6, e T12), e i relativi valori di riflettanza solare, UV, Vis, e NIR, sono le curve medie calcolate per l'esposizione in orizzontale a Roma e a Milano. Le curve relative ai campioni sottoposti a invecchiamento e sporciamento accelerato sono Ag 10 s, Af 10 s, Af 30 s, e Af 60s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporciamento di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), 30 secondi (Af 30 s) e 60 secondi (Af 60 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.



**Figura 24. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare, UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per una membrana in bitume polimero rivestita in opera con un coating elastomerico bianco. Le curve relative all'esposizione naturale (T3, T6, e T12), e i relativi valori di riflettanza solare, UV, Vis, e NIR, sono le curve medie calcolate per l'esposizione in orizzontale a Roma e a Milano. Le curve relative ai campioni sottoposti a invecchiamento e sporcamento accelerato sono Ag 10 s, Af 10 s, Af 30 s, e Af 60s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporcamento di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), e 30 secondi (Af 30 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.**



**Figura 25. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare, UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per una membrana in bitume polimero rivestita in opera con un coating elastomerico colorato cool (NIR riflettente). Le curve relative all'esposizione naturale (T3, T6, e T12), e i relativi valori di riflettanza solare, UV, Vis, e NIR, sono le curve medie calcolate per l'esposizione in orizzontale a Roma e a Milano. Le curve relative ai campioni sottoposti a invecchiamento e sporcamento accelerato sono Ag 10 s, Af 10 s, e Af 30 s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporcamento di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), e 30 secondi (Af 30 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.**

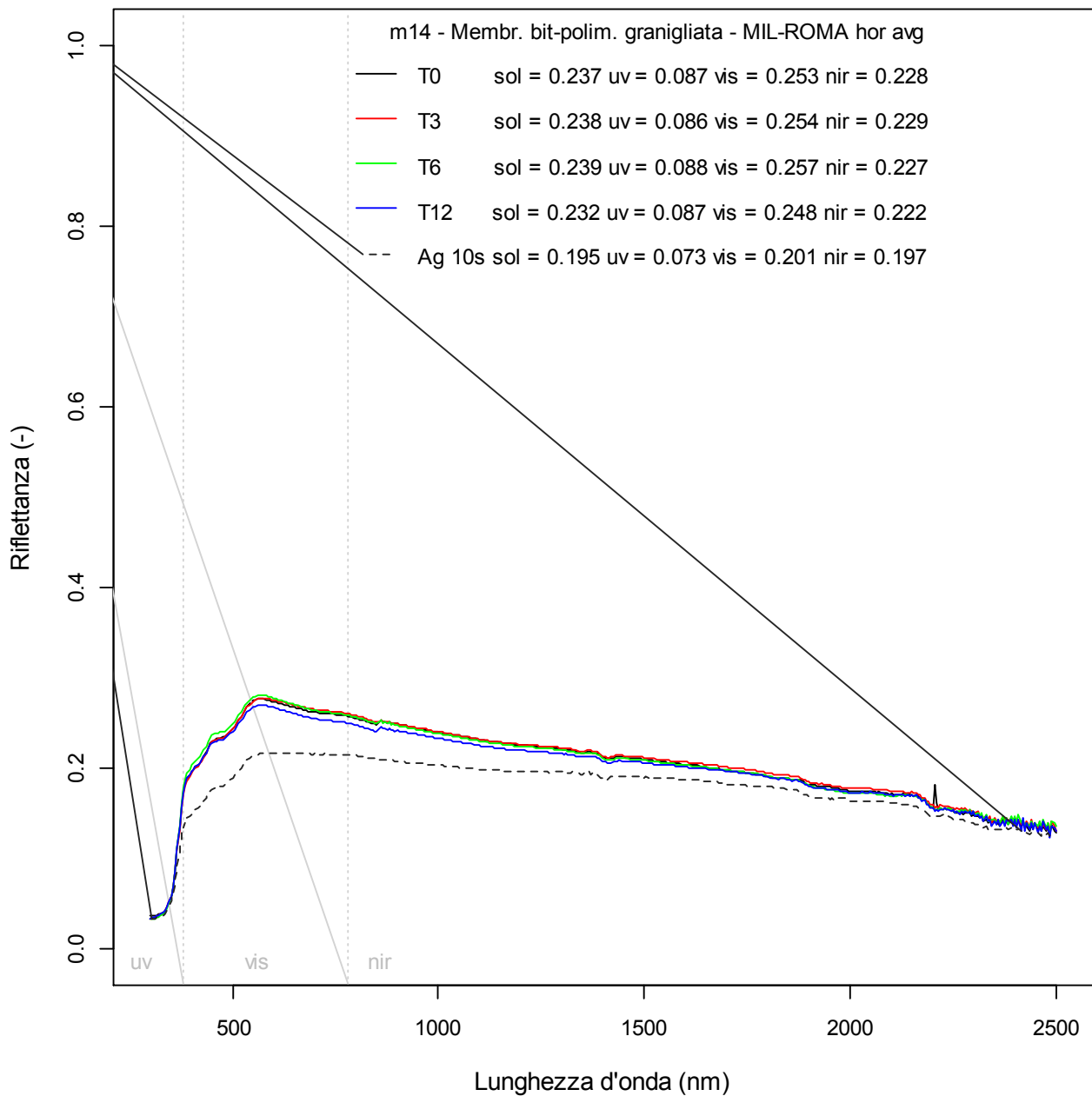


Figura 26. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare, UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per una membrana in bitume polimero granigliata (asphalt shingle). Le curve relative all'esposizione naturale (T3, T6, e T12), e i relativi valori di riflettanza solare, UV, Vis, e NIR, sono le curve medie calcolate per l'esposizione in orizzontale a Roma e a Milano. La curva relativa ai campioni sottoposti a invecchiamento e sporco accelerato è Ag 10 s, media delle curve misurate per campioni sottoposti a un ciclo di sporco di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s).

## 9 Conclusioni

Dato che i cool roofs sono identificati come una soluzione al fine di mitigare l'isola di calore e ridurre l'energia richiesta per il raffrescamento molti studi sono stati effettuati dagli U.S.A. per determinare quanto a lungo un tetto potesse mantenere un alto albedo, ma in Europa ci sono solo poche esperienze. Per questo, al fine di comprendere le variazioni di albedo a causa dei depositi superficiali anche nelle città Italiane, nell'Aprile 2012 abbiamo esposto in Milano e Roma 14 membrane da copertura recuperate dal mercato, misurando la loro riflettanza quando pulite e dopo 3, 6 e 12 mesi. Dopo un anno di esposizione naturale a Milano abbiamo computato una riduzione di SR qualche volta maggiore al 30% del valore iniziale, per esempio per membrane che all'inizio possedevano un valore di riflettanza maggiore di 0.8, mentre per campioni esposti a Roma con medesime proprietà si riscontra un calo del 20%.

Abbiamo notato in particolare che le perdite osservate dopo 3 anni di esposizione nei siti della CRRC sono state registrate a Milano e a Roma dopo soli 6 mesi. Dai dati misurati dopo 15 mesi di esposizione per alcune delle membrane (a Milano) sembra che la deposizione e quindi lo sporco abbia raggiunto una condizione di stabilità, ma ovviamente occorre proseguire l'esposizione naturale e misurare tutti i campioni in tutte le condizioni di esposizione.

Ai fini della simulazione energetica o di una valutazione preliminare (ad esempio per i protocolli di certificazione ambientale), anche l'utilizzo della regressione lineare per calcolare la riflettanza solare dopo un anno di esposizione noto il valore iniziale appare come sufficientemente adeguato allo scopo (in assenza di dati più approfonditi).

E' stata condotta anche una campagna di invecchiamento e sporco accelerato in laboratorio con la procedura sviluppata al Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) e descritta da Sleiman et al. (2011).

Questa prima campagna di prove è stata condotta sulle stesse membrane esposte in ambiente urbano, trovando una buona correlazione sia in termini di distribuzione spettrale che di valori integrati. Tuttavia, la procedura sviluppata dal LBNL è stata progettata per riprodurre lo sporco dopo tre anni di esposizione presso tre siti non urbani negli USA (in Arizona, Florida, e Ohio) e si ha un buon raccordo con i dati di sei mesi di esposizione a Roma e Milano. La procedura accelerata è stata quindi affinata aumentando l'intensità dello sporco per meglio simulare la deposizione e l'adesione dello sporco alla superficie esterna dell'involucro degli edifici in aree metropolitane come quelle italiane, ottenendo un buon raccordo con i dati relativi a un anno di esposizione.

Allo stato attuale si conclude che per simulare l'esposizione a Roma è consigliabile utilizzare il mix per la Florida nebulizzato per 30 secondi, mentre a Milano occorre ripetere la deposizione per ulteriori 30 secondi (quindi 30 secondi, asciugatura in stufa e altri 30 secondi di nebulizzazione).

Il metodo impiegato è adatto a valutare la propensione allo sporco di membrane impermeabilizzanti aventi riflettanza iniziale maggiore di 0.30 e non appare attualmente calibrato per la valutazione di prodotti con proprietà fotocatalitiche.

Ulteriori affinamenti e implementazioni della procedura di invecchiamento e sporco sono comunque necessari; specialmente occorre validare il metodo con i dati di più anni di esposizione. Si considera pertanto questo lavoro come preliminare. Ulteriori affinamenti si attendono inoltre dall'attività di confronto inter-laboratorio attualmente in corso.

## 10 Riferimenti

- [1] ASTM, 2011. ASTM E 1980. Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.
- [2] ASTM, 1997. ASTM E 1918: Standard test method for measuring solar reflectance of horizontal and low-sloped surfaces in the field. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.
- [3] Levinson, R., H. Akbari, P. Berdahl. 2010. Measuring solar reflectance - Part II: Review of practical methods. *Solar Energy* 84: 1745-1759.
- [4] Akbari, H., R. Levinson, S. Stern. 2008. Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy* 82: 648–655.
- [5] ISO, 2003. ISO 9050 - Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors. International Organization for Standardization, Geneva (CH).
- [6] ASTM, 2012. ASTM E 903: Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.
- [7] Berdahl, P., H. Akbari, L.S. Rose. 2002. Aging of reflective roofs: soot deposition. *Applied Optics*, 41(12), 2355-2360.
- [8] Berdahl, P., H. Akbari, R. Levinson, J. Jacobs, F. Klink, R. Everman. 2012. Three-year weathering tests on asphalt shingles: Solar reflectance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99(special issue), 277–281.
- [9] Bretz, S.E., H. Akbari. 1997. Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy and Buildings*, 25(2), 159-167.
- [10] ISO, ISO 9050. 2003. Glass in building — Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors. Geneva (CH).
- [11] Levinson, R., 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(40), 7807–7824.
- [12] Sleiman, M., G. Ban-Weiss, H.E. Gilbert, D. Francois, P. Berdahl, T.W. Kirchstetter, H. Destailats, R. Levinson. 2011a. Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance - Part I: Analysis of roofing product databases. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(12), 3385–3399.
- [13] Sleiman M., H. Destailats, T. Kirchstetter, H. Gilbert, P. Berdahl, H. Akbari, L. Marlot, S. Quelen, C. Preble, M. Spears, G. Ban-Weiss, R. Levinson. 2011b. 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.
- [14] ASTM G 154: Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials.

- [15] ASTM E 903: 1996. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres.
- [16] 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.
- [17] ISO 9050: 2003. Glass in building — Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
- [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] Kirchstetter, T. W.; Novakov, T., Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in evaluating black carbon measurement methods. *Atmospheric Environment* 2007, 41 (9), 1874-1888.
- [21] Sleiman M., K. T. W., Berdahl R., Levinson R., Akbari H., and Destailats H., Development of an accelerated aging method that mimics natural exposure of roofing materials. *Energy and Buildings Submitted*.
- [22] Heat Island Group (LBNL), <http://heatisland.lbl.gov/projects/projects-advanced-surfaces>. 2012.
- [23] Paolini, R., T. Poli, M. Fiori, A.G. Mainini. 2012. Valutazione delle prestazioni di cool materials esposti all'ambiente urbano: variazione della riflettanza a seguito di invecchiamento naturale. [http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/2011/113-rds-pdf](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/2011/113-rds-pdf).
- [24] Paolini, R., T. Poli, M. Fiori, A.G. Mainini. 2012. Valutazione delle prestazioni di cool materials esposti all'ambiente urbano: sporramento e invecchiamento accelerato. [http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/2011/114-rds-pdf](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/2011/114-rds-pdf).

## 11 Abbreviazioni ed acronimi

### *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

## 12 Allegato A - Dettagli per la procedura di sporcamento accelerato

### 12.1 Agenti sporcanti

il particolato atmosferico ha origine dalla polvere trasportata dal vento, dagli incendi di foreste e praterie, piante e spruzzi del mare, così come dalle attività umane come ad esempio la combustione di carburanti fossili e biomasse. La maggior parte del particolato disperde o assorbe debolmente la luce solare. Una notevole eccezione è rappresentata dalla fuliggine carboniosa nera emessa dalla combustione di combustibili fossili e biomasse e da incendi. Per via della loro elevata efficienza nell'assorbimento di massa, una piccola parte di fuliggine nera potrebbe contribuire in modo apprezzabile allo sporcamento delle superfici degli edifici. Una sospensione acquosa di quattro agenti sporcanti (come descritti in seguito) è stata utilizzata per le prove accelerate. La scelta degli agenti sporcanti e della loro composizione è stata fatta sulla base dei rispettivi contributi alle variazioni della riflettanza solare delle superfici sporche, determinate in laboratorio. Questi agenti sporcanti hanno dimostrato di accumularsi sulle superfici esposte in ambienti esterni naturali (Favez et al. 2006).

#### 12.1.1 Particolato fuliginoso

Sono stati identificati due tipi di fuliggine nera di carbone idrofila che danno lo stesso effetto di sporcamento: la fuliggine di carbone nera generata dall'utilizzo di fiamma a diffusione di metano (Kirchstetter e Novakov 2007) che viene trasformata da idrofobica ad idrofila tramite esposizione all'ozono, e un carbone nero auto disperdente disponibile sul mercato. In entrambi i casi il particolato nero è elettrostaticamente stabile come una sospensione acquosa senza l'impiego di additivi disperdenti. La fuliggine nera di carbone proveniente da incendi è inizialmente raccolta in filtri realizzati con membrane allungate di Teflon per facilitare l'esposizione all'ozono. L'ozono ad una sovra concentrazione di 100 ppm viene fatto passare attraverso un filtro a carboni attivi per 15 minuti ad una velocità di 0.3 cm/s. Dopo l'esposizione all'ozono, la fuliggine idrofila viene risciacquata dal filtro con un delicato flusso d'acqua. La massa di fuliggine aggiunta al serbatoio d'acqua è la differenza tra la massa secca della membrana in Teflon prima e dopo il risciacquo della fuliggine nera di carbone. Tipicamente 0.25 g di fuliggine viene raccolta in 1 L di acqua distillata e agitata per alcuni minuti producendo una sospensione stabile di 0.25 g/L. per prevenire la sedimentazione la sospensione viene mescolata prima dell'uso se trascorsa più di un ora dal momento dell'agitamento.

#### 12.1.2 Pulviscolo

Una miscela di ossido di ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in polvere (CAS: 1309-37-1,  $< 5 \mu\text{m}$ ) e due rocce naturali (Montmorillonite K10 (CAS: 1318-93-0) e bentonite idrofila (CAS: 1302-78-9)) viene utilizzata come agente per spolveratura. Tipicamente, 0.3 g di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in polvere vengono miscelati con 1 g di montmorillonite e 1 g di bentonite. Il miscuglio viene trasferito in 1 L di acqua distillata e mescolato per circa 1 h per preparare 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.

#### 12.1.3 Sali

1L di soluzione contenente un miscuglio di Sali inorganici viene preparato dissolvendo 0.3 g di cloruro di sodio (NaCl, CAS: 7647-14-5), 0.3 g di nitrato di sodio ( $\text{NaNO}_3$ , CAS: 7632-00-0) e 0.4 g di solfato di calcio diidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , CAS: 7778-18-9). La concentrazione totale della soluzione è 1 g/L.

#### 12.1.4 Particolato di materie organiche (POM)

1.4 g di acido umico commerciabile (CAS: 1415-93-6) viene dissolto in 1 L di acqua distillata per produrre una soluzione di 1.4 g/L. Il particolato atmosferico aerosol contiene tipicamente tra il 5 e il 40% (in peso) di miscela di un composto organico polimerico ossidato che assorbe la radiazione solare. L'acido umico è un buon surrogato di tale composto. In più la struttura chimica di tali acidi è comparabile ai prodotti e residui della decomposizione di agenti microbiologici quali alghe, batteri e funghi.

#### 12.1.5 Composizione della miscela sporcante

Differenti soluzioni/sospensioni vengono preparate per ogni agente sporcante. Una volta preparate i quattro ingredienti sporcanti (prima descritti) possono essere combinati in vari rapporti dipendenti dal clima da simulare.

##### 12.1.5.1 Composizione del miscuglio sporcante per condizioni medie in U.S.A.

(A parità di volume per ogni ingrediente) La distribuzione di massa secca è polvere (47%), sali (20%), POM (28%) e fuliggine (5%). Concentrazioni: polvere (2.3 g/L), Sali (1 g/L), POM (1.4 g/L) e fuliggine (0.25 g/L).

##### 12.1.5.2 Composizione del miscuglio sporcante per climi caldi e secchi (Arizona CRRC)

La distribuzione di massa secca è polvere (79%), Sali (20%), POM (0%) e fuliggine (1%).

##### 12.1.5.3 Composizione della miscela sporcante per climi caldi e umidi (Florida CRRC)

La distribuzione di massa secca è polvere (16%), Sali (7%), POM (69%) e fuliggine (8%).

##### 12.1.5.4 Composizione della miscela sporcante per climi con estati moderate e inverni rigidi (Ohio CRRC)

La distribuzione di massa secca è polvere (61%), Sali (31%), POM (0%) e fuliggine (8%).

### 12.2 Applicazione degli agenti sporcanti

Il miscuglio sporcante acquoso viene spruzzato su un campione di un materiale per coperture. Il miscuglio viene posizionato in un recipiente pressurizzato con aria e connesso con tubazioni ad un ugello che spruzza sottili gocce (diametro 100-200  $\mu\text{m}$ ) sul campione (come illustrato in Figura 1). Dopo lo spruzzamento e la pesatura, ogni campione viene riscaldato con una lampada ad infrarossi per permettere all'acqua di evaporare. Dopo l'asciugatura il 40-60% della superficie del campione dovrebbe essere ricoperta con deposizione di sporco uniformemente e casualmente separata, di diametro pari a 1.5-3.0 mm.

### 12.3 Celle per invecchiamento accelerato

Un dispositivo per l'invecchiamento accelerato commerciabile viene impiegato per simulare l'invecchiamento naturale in ambiente esterno. Il dispositivo espone i materiali a cicli alternati di raggi ultravioletti (UV) e umidità a temperature elevate e controllate. Simula i fotoni ad elevata energia emessi dalla luce solare utilizzando lampade fluorescenti UV. Simula inoltre rugiada e pioggia con umidità condensata e/o acqua nebulizzata. Il campione di materiale per copertura viene trattato per 24 h esponendolo a due consecutivi cicli di invecchiamento secondo il metodo ASTM G 154, condizione 1. Questo ciclo prevede l'irradiazione con raggi UV per 8 h a 60°C seguito da 4 h di condensazione a 50°C.

### 12.4 Nebulizzazione

Ne l'esatta dimensione delle gocce nebulizzate, ne la pressione alla quale sono applicate sono critiche per il metodo. Tuttavia, è importante che le gocce non si uniscano e scorrano sulla superficie irrorata, e che il 40-60% della superficie del campione sia uniformemente ricoperta con punti di sporco con diametro compreso tra 1.5-3.0 mm. Prove con diversi diametri degli ugelli e pressioni del serbatoio indicano che ciò può essere ottenuto utilizzando un ugello nebulizzante di tipo cavo-conico SF-2 (Spraying Systems Co.) in grado di produrre gocce di dimensioni pari a 100-200  $\mu\text{m}$  con pressioni pari a  $1\text{E}10^5$ - $1.2\text{E}^5$  Pa (14-18 psi).

### 12.5 Concentrazione di sporco superficiale

Il campione è pesato immediatamente prima dello sporco (massa  $m_0$ ). L'impianto nebulizzante viene azionato per circa 10-15 secondi per raggiungere un modello di irrorazione uniforme e stabile. Successivamente, il campione pesato viene introdotto nella camera di sporco e posizionato in una predeterminata posizione ottimizzata per una irrorazione superficiale uniforme. Una tipica distanza tra l'ugello e il campione è compresa tra 40 e 60 cm. Dopo 10 secondi di irrorazione il campione viene rimosso dalla camera e nuovamente pesato (massa  $m_1$ ). La massa sporca e bagnata trattenuta dal campione ( $m_1 - m_0$ ) è solitamente il 10 - 20% dei 4 - 5 g di soluzione tipicamente emessa dall'ugello. La massa trattenuta sul campione di 10 cm x 10 cm dovrebbe essere pari a 0.5 - 1.0 g, avendo a disposizione una densità umida specifica (alla superficie) di 5 - 11 mg/cm<sup>2</sup>. La densità areica sarà variabile con la composizione della miscela.

### 12.6 Validazione, precisione ed errori

Ulteriori dati sulla precisione e gli errori della procedura applicata in studi con confronto tra diversi laboratori (inter-laboratory) a cui Politecnico di Milano e ENEA partecipano e saranno forniti in futuro. Si presentano i valori ottenuti dal LBNL.

Per una membrana monostrato, la massa trattenuta dal campione dopo l'irroramento con miscuglio sporcante per 20 volte, mostra una ripetibilità di  $\pm 0.1$  g e una deviazione standard relativa pari al 9%. La ripetizione per dieci volte della procedura descritta utilizzando membrane monostrato come campione, porta ad una precisione della riflettanza solare di  $\pm 0.02\%$  dopo l'esposizione in laboratorio. Il protocollo per l'invecchiamento accelerato descritto è stato applicato due volte a 19 prodotti per coperture (membrane monostrato, rivestimenti applicati sul campo (coating), metallo, piastrella, ciottoli, bitumi modificati) utilizzando due differenti operatori del LBNL. I risultati mostrano una ottima riproducibilità con una precisione media del  $\pm 0.02$  (range: 0.001 - 0.03) della riflettanza solare e una deviazione media standard del 2% (range: 0.2 - 6%).

## 13 Allegato B – Dettagli prove di sporcamento accelerato confrontate con l'esposizione naturale nelle tre condizioni

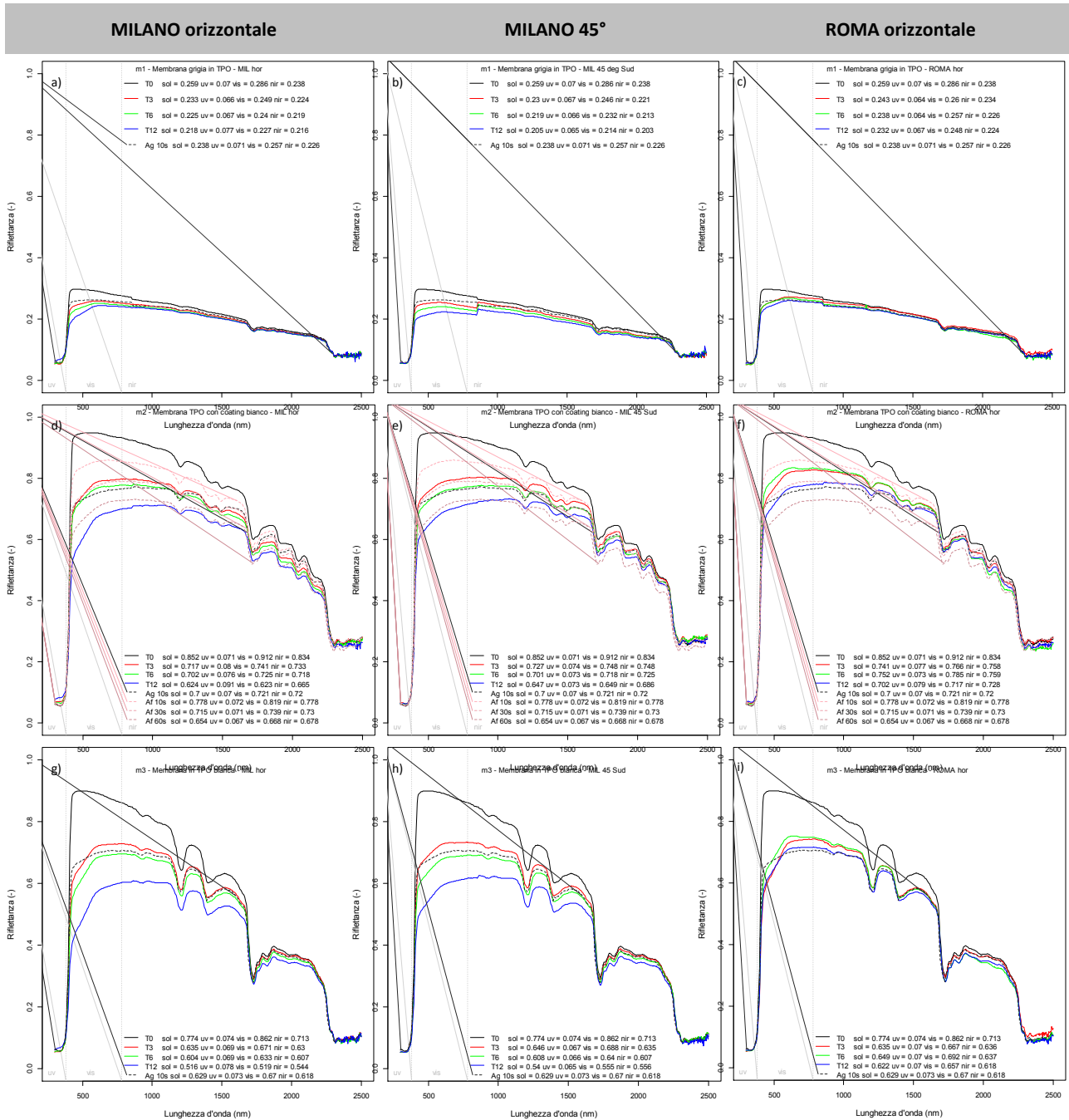


Figura 27. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m1, m2, m3 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45 ° inclinato orientato a sud) e a Roma, e a seguito di sporcamento accelerato. Ag 10 s, Af 10 s, e Af 30 s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporcamento di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), e 30 secondi (Af 30 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.

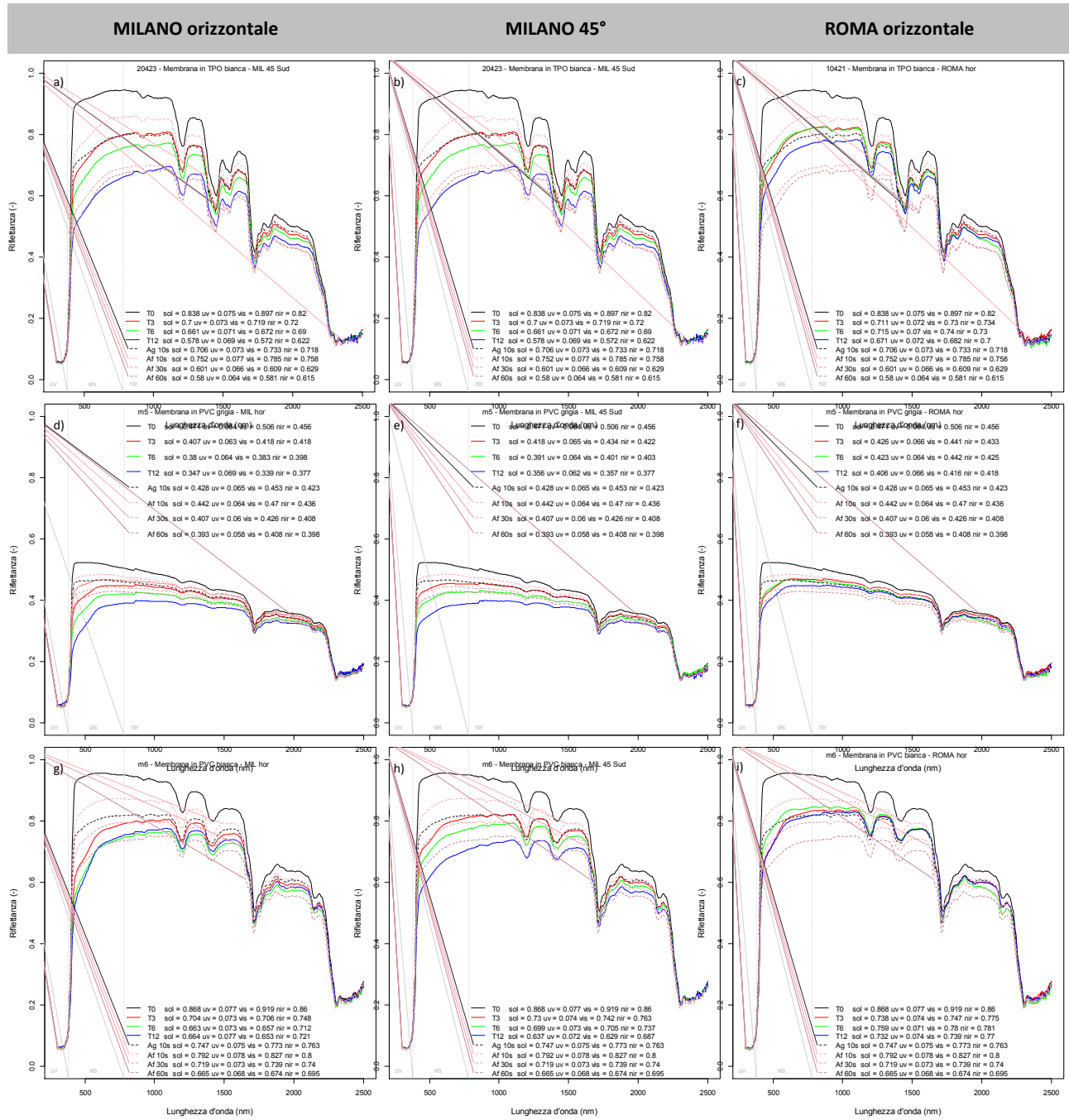
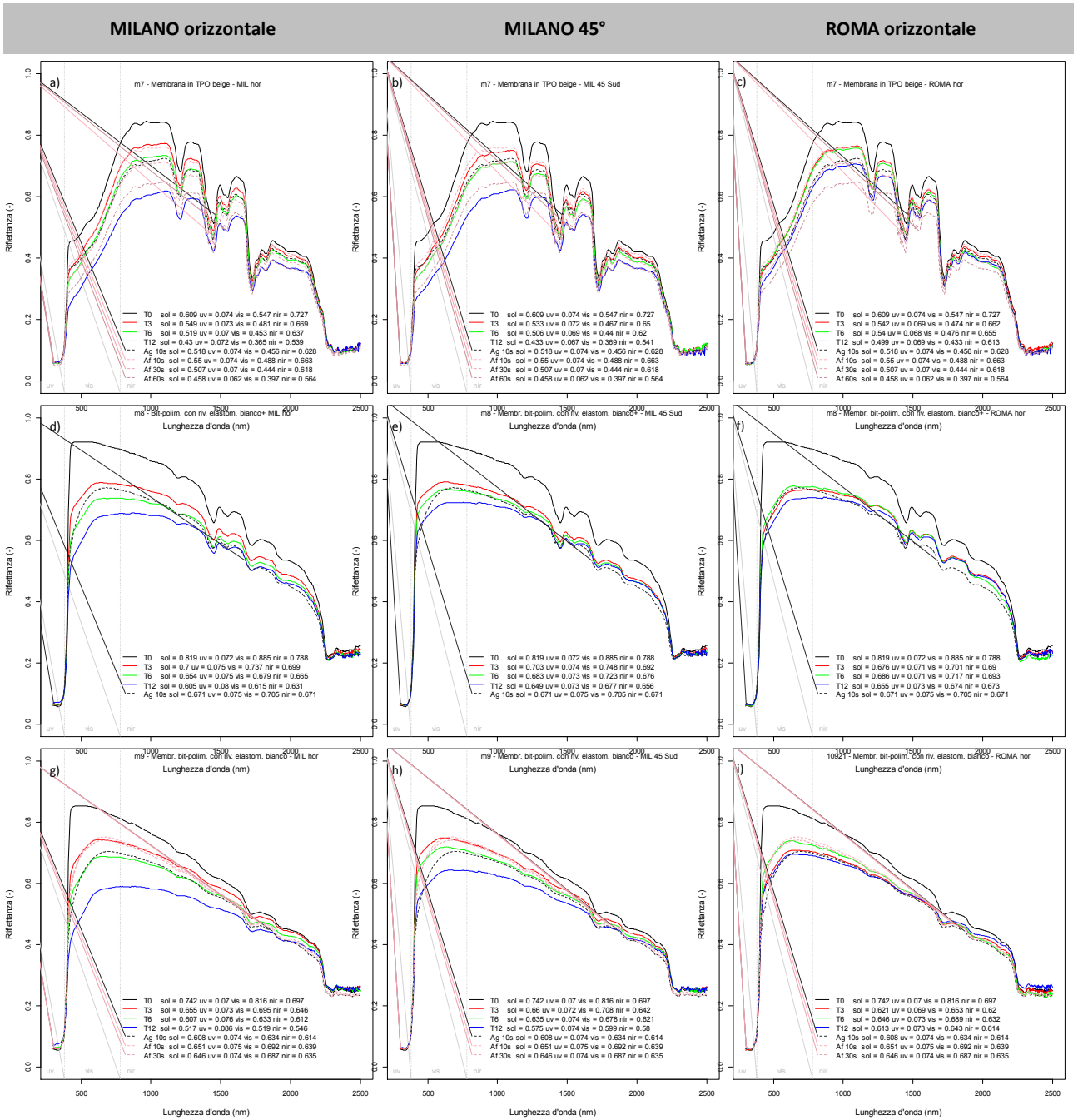


Figura 28. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m4, m5, m6 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45 ° inclinato orientato a sud) e a Roma, e a seguito di sporco accelerato. Ag 10 s, Af 10 s, e Af 30 s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporco di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), e 30 secondi (Af 30 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.



**Figura 29. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m7, m8, m9 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45° inclinato orientato a sud) e a Roma, e a seguito di sporcamento accelerato. Ag 10 s, Af 10 s, e Af 30 s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporcamento di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), e 30 secondi (Af 30 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.**

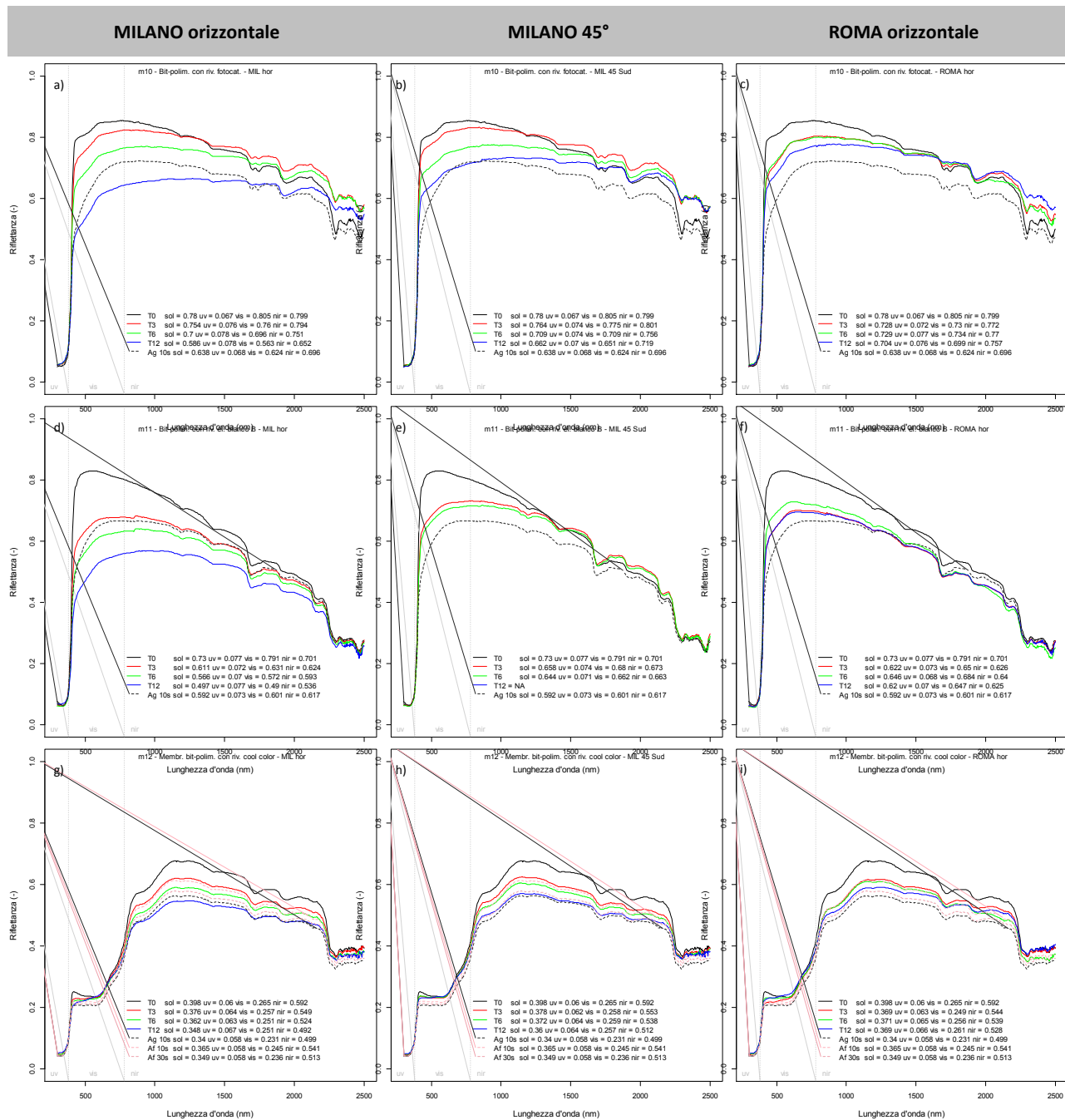
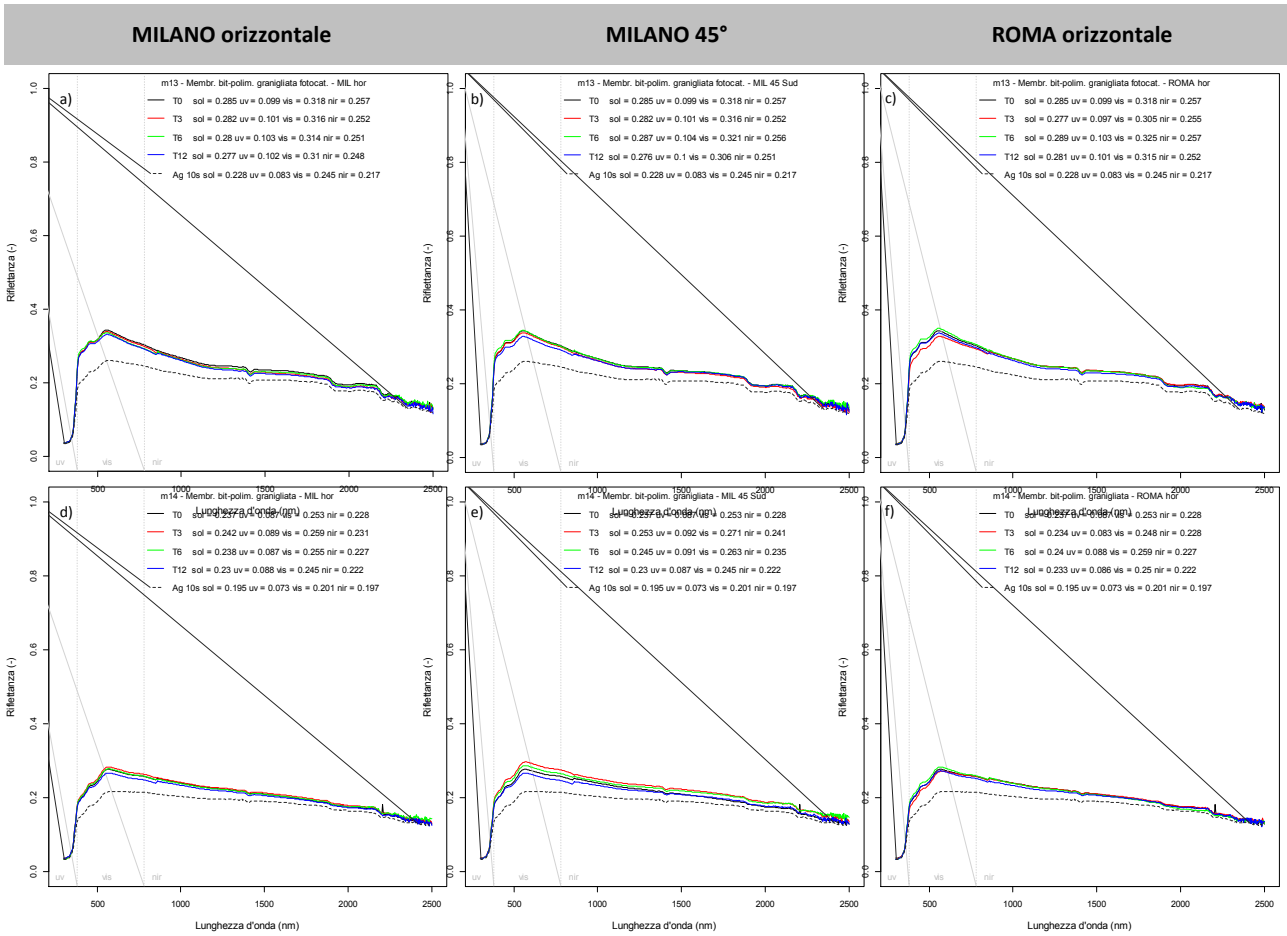


Figura 30. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m10, m11, m12 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45 ° inclinato orientato a sud) e a Roma, e a seguito di sporco accelerato. Ag 10 s, Af 10 s, e Af 30 s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporco di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), e 30 secondi (Af 30 s) con la miscela rappresentativa per la Florida.



**Figura 31. Riflettanza spettrale da 300-2500 nm e valori di riflettanza solare , UV, visibile e NIR calcolati secondo ISO 9050 per le membrane m10, m11, m12 dopo 3, 6 e 12 mesi a Milano (a bassa pendenza e 45 ° inclinato orientato a sud) e a Roma, e a seguito di sporco accelerato. Ag 10 s, Af 10 s, e Af 30 s, e riguardano, rispettivamente, campioni sottoposti a un ciclo di sporco di 10 secondi con la miscela generale (Ag 10 s), di 10 secondi (Af 10 s), e 30 secondi (Af 30 s) con la miscela rappresentativa per la Florida**

## 14 Allegato C – 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 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 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 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.

**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. 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: 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.

**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 ABC del Politecnico di Milano.

Dal 1997 al 2003 ha conseguito 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

**Alberto Speroni**, nato a Milano (Mi) il 18 Luglio 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. I principali ambiti di studio e ricerca sono:

- Ottimizzazione e sviluppo di tecnologie e componenti per l'involucro edilizio;

- Analisi energetiche con particolare attenzione per l'involucro edilizio;
- Analisi e ricerca di materiali innovativi per il controllo solare.

**Lorenzo Vercesi**, nato a Milano nel 1988. Laureato in Ingegneria dei Sistemi Edilizi nel 2013 presso il Politecnico di Milano, ha lavorato come stagista per un anno presso Arup nel team di Ingegneria delle Facciate a Milano. Dal 2013 svolge il ruolo di collaboratore di ricerca presso il dipartimento ABC del Politecnico di Milano. Le tematiche di studio e ricerca si concentrano prevalentemente sugli aspetti tecnologici ed energetici dell'involucro edilizio, in particolare:

- Integrazione di materiali avanzati nei dispositivi adattivi di controllo solare;
- Modellazione parametrica per l'ottimizzazione dei componenti di facciata;
- Analisi delle geometrie complesse e discretizzazione razionale delle superfici di facciata.